

Vinicius Souza Moraes

***Projeto E Construção De Charpy Utilizando A Modelagem Numérica Da
Plataforma Ansys® No Estudo Comparativo Entre Ensaio Numéricos E Práticos
A Partir De Diferentes Propriedades Mecânicas De Materiais Compósitos***

Ilha Solteira – SP
Junho de 2016



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DOS MATERIAIS

***Projeto E Construção De Charpy Utilizando A Modelagem Numérica Da
Plataforma Ansys® No Estudo Comparativo Entre Ensaio Numéricos E Práticos A
Partir De Diferentes Propriedades Mecânicas De Materiais Compósitos***

Vinicius Souza Moraes

Orientador: Prof. Dr. Newton Luiz Dias Filho

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia –
UNESP - Campus de Ilha Solteira, como parte
dos requisitos para obtenção do título de Doutor
em Ciência dos Materiais. Área de conhecimento:
Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Ilha Solteira – SP
Junho de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

M827p **Morais, Vinicius Souza.**
Projeto e construção de charpy utilizando a modelagem numérica da plataforma ansys® no estudo comparativo entre ensaios numéricos e práticos a partir de diferentes propriedades mecânicas de materiais compósitos / Vinicius Souza Moraes . -- Ilha Solteira: [s.n.], 2016
177 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciência e Engenharia dos Materiais, 2016

Orientador: Newton Luis Dias Filho
Inclui bibliografia

1. Charpy. 2. Compósitos. 3. Fibras naturais. 4. Ansys. 5. Propriedades mecânicas.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Projeto e construção de Charpy utilizando a modelagem numérica da plataforma Ansys® no estudo comparativo entre ensaios numéricos e práticos a partir de diferentes propriedades mecânicas de materiais compósitos

AUTOR: VINICIUS SOUZA MORAIS

ORIENTADOR: NEWTON LUIZ DIAS FILHO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em CIÊNCIA DOS MATERIAIS, área: ENGENHARIA DE MATERIAIS E METALURGICA pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. NEWTON LUIZ DIAS FILHO
Departamento de Física e Química / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. HIDEKASU MATSUMOTO
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. VICENTE AFONSO VENTRELLA
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. MARCUS VINICIUS MONTEIRO VARANIS
Faculdade de Engenharia / Universidade Federal da Grande Dourados



Prof. Dr. AMÂNCIO RODRIGUES DA SILVA JUNIOR
Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Ilha Solteira, 24 de junho de 2016

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos verdadeiros amigos e familiares aliados com Deus, pelo apoio, incentivo e dedicação, que nunca me deixaram;

Ao Prof. Dr. Newton Luiz Dias Filho, pelo companheirismo, incentivo, amizade e orientação desta tese (UNESP, Ilha Solteira – SP);

Aos meus ex-professores de graduação que compõe a banca examinadora deste doutoramento, pelo aceite de contribuição deste trabalho: Prof. Dr. Hidekasu Matsumoto e Prof. Dr. Vicente Afonso Ventrella (UNESP, Ilha Solteira – SP);

À banca externa de titulares composta por: Prof. Dr. Amâncio Rodrigues da Silva Júnior (CPO-UFMS, Campo Grande – MS) e Prof. Dr. Marcus V. M. Varanis (FAEN-UFGD, Dourados – MS) pelo aceite e contribuição nesse trabalho;

Aos funcionários do Departamento de Física e Química, biblioteca e secretaria de pós-graduação que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho (UNESP, Ilha Solteira – SP);

Ao Departamento de Engenharias: Mecânica, Mecatrônica e Computação da Universidade Católica Dom Bosco pela disponibilidade de pronta utilização da máquina universal de ensaios Tração e Charpy (UCDB, Campo Grande – MS);

Ao Departamento de Engenharias do Centro Universitário Anhanguera de Campo Grande pela disponibilização da máquina universal de ensaios Tração (UNIDERP, Campo Grande – MS);

Ao departamento da Faculdade de Odontologia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul por permitir que eu me afastasse, quando necessário, por várias vezes no intuito da realização de ensaios e/ou testes desta tese (UFMS, Campo Grande – MS).

RESUMO

Desde a antiguidade os seres humanos vêm buscando aprimorar o uso de materiais em seu favor, buscando conferir vantagens de aspectos diversos. Aliado à necessidade de experimentação de novos materiais os softwares simuladores foram impulsionados e conferiram uma poderosa ferramenta da atualidade. A partir desta premissa, a inserção de conhecimento, princípios de estudo e aprendizado, principalmente no que tange a modelagem de ensaios mecânicos como o de tração e de impacto destrutivo Charpy foram realizados. Posteriormente uma máquina de ensaio destrutivo do tipo Charpy foi confeccionada e instrumentada analógico-digitalmente. De posse de bons resultados da máquina, a mesma foi utilizada no comparativo entre teoria e prática a partir de diferentes materiais, possibilitando que tais dados em forma de tabelas e gráficos serem confrontados com resultados obtidos através de simulações com o software comercial. Ensaios de Tração foram realizados em máquinas universais em diferentes materiais metálicos e compósitos (fibras naturais e sintéticas), coletados seus devidos dados e posteriormente confrontados com a literatura e software comercial. Os resultados oriundos das fibras naturais, principalmente do bambu, surtiram efeitos interessantes proporcionando uma maior resistência, leveza e redução no custo para sua produção.

Palavras chave: Charpy, Ansys®, Fibras Naturais, Compósitos, Propriedades Mecânicas.

ABSTRACT

Since ancient times humans have sought to improve the use of materials in their favor, seeking to confer advantages in many aspects. Together with the need to experiment with new materials simulators were driven software and gave a powerful tool today. From this premise, the inclusion of knowledge, study and learning principles, especially regarding the modeling of mechanical tests such as tensile and Charpy destructive impact were performed. Later, a destructive test machine Charpy type was made and analog-digitally instrumented. Possession of good results of the machine, it was used in the comparison between theory and practice from different materials, enabling such data in tables and graphs are faced with results obtained through simulations with commercial software. Tensile tests were performed on machines in different metal materials and composites (natural and synthetic fibers) collected their proper data and subsequently confronted with the literature and commercial software. The results derived from natural fibers, mainly bamboo, have heightened interesting effects providing greater strength, light weight and reduced cost for production.

Keywords: *Charpy, Ansys[®], Natural Fibres, Composites, Mechanical Properties.*

OBJETIVOS

A proposta deste Doutorado objetivou três frentes principais que foram utilizadas no decorrer do desenvolvimento da tese, a saber:

➤ *Com relação aos ensaios de impacto Charpy:*

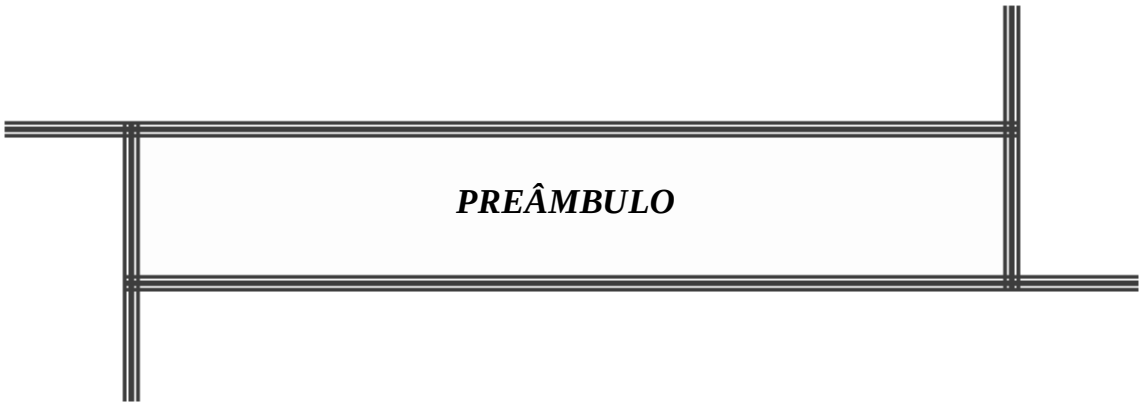
- Confecção do equipamento e instrumentação analógica e digital;
- Confecção de corpos de provas metálicos e compósitos (fibras naturais e sintéticas);
- Estudo de resultados de impacto e coleta de dados.

➤ *Com relação aos ensaios de Tração:*

- Confecção de corpos de provas metálicos e compósitos (fibras naturais e sintéticas);
- Estudo de resultados de tração e coleta de dados.

➤ *Com relação ao software Ansys®:*

- Princípios de funcionamento;
- Estudo das potencialidades do software;
- Testes de modelagem e simulação de propriedades mecânicas;
- Estudo dos resultados das simulações oriundas do software e posterior confronto com resultados de testes e literatura pertinente.



PREÂMBULO

Este Doutorado foi percorrido em: Resumo, Objetivos, este Preâmbulo, Lista de Figuras, Lista de Tabelas, Sumário, além de 05 capítulos seguido das Referências Bibliográficas e Anexos.

Os Capítulos contemplam em um primeiro foco: assuntos relacionados às propriedades mecânicas de materiais, bem como ensaios mecânicos, construção de equipamentos e confecção de corpos de prova. Em um segundo foco: esse trabalho trata de uma abordagem geral sobre o tratamento numérico dado ao assunto, suas vantagens e desvantagens, assim como uma simulação de alguns aspectos mecânicos. De forma resumida, os Capítulos discorrem sobre:

✓ **1º Capítulo** – Está relacionado à fundamentação teórica sobre propriedades e ensaios mecânicos, uma breve descrição de alguns ensaios mecânicos dando prioridade ao ensaio Charpy, onde o mesmo será confeccionado e ensaiado. Também é abordada nesse capítulo a teoria que envolve os principais processos mecânicos de fabricação utilizados. Por fim, este capítulo contempla também uma abordagem numérica teórica sobre elementos finitos, utilizado como ferramenta nas soluções de equações no programa comercial Ansys®.

✓ **2º Capítulo** – Como a análise computacional dada envolverá ensaios mecânicos, no intuito de comparar uma simulação teórica com análise de ensaios destrutivos, uma máquina de ensaios Charpy foi construída, foco principal deste capítulo que prevê: montagem, ajuste, instrumentação analógica e digital.

✓ **3º Capítulo** – Contempla o confeccionamento dos corpos de provas para os ensaios de tração e Charpy de forma prática em laboratórios. Além de uma breve teoria sobre materiais utilizados na composição dos compósitos e suas proporções. Corpos de provas metálicos e compósitos normalizados foram criados neste capítulo, realizando assim, ainda nesse capítulo, determinados ensaios de tração e impacto Charpy.

✓ **4º Capítulo** – Trata-se dos resultados e discussões das situações abordadas no corpo da tese como: resultados simulação-experimental de tração para materiais metálicos e compósitos, resultados simulação-experimental do ensaio de rompimento Charpy para o Aço 1045, além de resultados de ensaios de tração e Charpy para os compósitos seguidos de resultados de propriedades como: Tensão de Escoamento, Módulo de Elasticidade e Energia Absorvida por Temperatura, respectivamente.

✓ **5º Capítulo** – Resume as principais conclusões do trabalho e suas perspectivas futuras.

Em seguida contempla-se a Bibliografia referenciada e/ou consultada seguido de: ANEXO A - Projeto e Sincronismo de dados Charpy; que trata dos desenhos do projeto da máquina Charpy em CAD seguido de teste de sincronismo entre resultados analógicos e digitais da referida máquina; e ANEXO B - Gráficos, ensaios e resultados; que aborda dados captados da máquina universal de ensaios através de “Relatório de Ensaio” de tração realizados para os conjuntos de corpos de prova feitos a partir de compósitos dispostos em ordem crescente de Tensão de Escoamento, além de relatórios extras dos ensaios;

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1 – Dispositivo usado para conduzir ensaios tensão-deformação por tração	22
Figura 1.2 – Diagrama tensão-deformação obtido por meio de um ensaio de tração	23
Figura 1.3 – Diagrama tensão-deformação para um material frágil	24
Figura 1.4 – Diagrama tensão-deformação para uma liga típica de alumínio	25
Figura 1.5 – Curva tensão-deformação no regime elástico linear	25
Figura 1.6 – Curva tensão-deformação não-linear	26
Figura 1.7 – Ensaio Brinell	29
Figura 1.8 – Penetrador Vickers	31
Figura 1.9 – Pequenas trincas em barra submetida a esforço de flexão alternado	32
Figura 1.10 – Arranjo para ensaio de fadiga por flexão	32
Figura 1.11 – Ruptura por número de ciclos e tensões	33
Figura 1.12 – Representação de um ensaio de impacto	34
Figura 1.13 – Apoios dos corpos de prova no ensaio Charpy	35
Figura 1.14 – Variações de energia de impacto com temperatura	36
Figura 1.15 – Exemplo de homopolímero e copolímero	37
Figura 1.16 – Polímeros lineares	37
Figura 1.17 – Cadeia ramificada	38
Figura 1.18 – Ligação cruzada	39
Figura 1.19 – Ligação em rede	39
Figura 1.20 – Diferentes tipos de compósitos	42
Figura 1.21 – O aumento do uso de compósitos no período de 1990 a 2000	43
Figura 1.22 – Processos de fabricação	45
Figura 1.23 – Máquina de serra fita. Vertical à direita e horizontal à esquerda	46
Figura 1.24 – Tipos de soldagem	47
Figura 1.25 – Torno convencional	48
Figura 1.26 – Tipos de torneamento e suas partes	48
Figura 1.27 – Ferramentas aplicadas no torno convencional	49
Figura 1.28 – Ferramentas de roscar	50
Figura 1.29 – Tipos de fresamento	51
Figura 1.30 – Tipos de fresadoras	51
Figura 1.31 – Máquina de ensaio de tração universal	52
Figura 1.32 – Região de comportamento elástico	54

Figura 1.33 – Limite de elasticidade	55
Figura 1.34 – Determinação de E para materiais com zona elástica não linear	57
Figura 1.35 – Limite de escoamento	58
Figura 1.36 – Corpo de prova característico de um ensaio de tração	60
Figura 1.37 – Máquina utilizada para o ensaio de tração	61
Figura 1.38 – Formato dos corpos de prova utilizados para o ensaio de tração	61
Figura 1.39 – Formato dos corpos de prova para o ensaio de tração com entalhe	61
Figura 1.40 – Molde para a preparação dos corpos de prova, ensaio de tração	62
Figura 1.41 – Corpo de prova característico de um ensaio de tração	62
Figura 1.42 – Tipos de corpos de provas Charpy	63
Figura 1.43 – Estados das tensões nos corpos de provas com e sem entalhe	63
Figura 1.44 – Analogia MEF	65
Figura 1.45 – Modo de utilização do MEF em carrocerias	66
Figura 1.46 – Ilustração da utilização da ferramenta MEF em <i>Crashtest</i>	66
Figura 1.47 – Ilustração da utilização da ferramenta MEF em sistemas de proteção	68
Figura 1.48 – Estrutura não simétrica: malha de elementos finitos e ação exterior	72
Figura 1.49 – Estrutura não simétrica: malha deformada	73
Figura 1.50 – Principais tensões e respectivas direções	73
Figura 1.51 – Campo de deslocamentos verticais	74

Capítulo 2

Figura 2.1 – Influência do raio da ponta do entalhe na resistência ao impacto	78
Figura 2.2 – Variáveis de Projeto	79
Figura 2.3 – Cutelo	80
Figura 2.4 – Fresando a Porca de sustentação	80
Figura 2.5 – Base de Apoio do Corpo de Prova	80
Figura 2.6 – Eixo de Giração	81
Figura 2.7 – Eixo de Giração e Mancais	81
Figura 2.8 – Base de Apoio	81
Figura 2.9 – Chapas laterais	82
Figura 2.10 – Mancais	82
Figura 2.11 – Martelo	82
Figura 2.12 – Dimensões de acordo com a norma do Cutelo	83
Figura 2.13 – Mancais montados	83
Figura 2.14 – Rolamentos nos mancais	83
Figura 2.15 – Eixo de Giro sendo Montado	84
Figura 2.16 – Guias das Bases Laterais	84
Figura 2.17 – Base da Estrutura da Máquina	84
Figura 2.18 – Base de Apoio do Corpo de Prova	85
Figura 2.19 – Conjunto Parcialmente Montado	85
Figura 2.20 – Eixo do Pêndulo	86
Figura 2.21 – Cutelo Montado	86
Figura 2.22 – Folga no eixo	86
Figura 2.23 – Vista explodida	87
Figura 2.24 – Vista montada	87
Figura 2.25 - Peças perfil L cortadas pelo processo de corte por serra fita	88
Figura 2.26 - Apoio do Charpy soldado	89
Figura 2.27 – Pintura anti-ferrugem (esquerda) e Definitiva (direita)	89

Figura 2.28 - Objetivo final da instrumentação analógica	91
Figura 2.29 – Dispositivo de instrumentação analógica finalizado	92
Figura 2.30 – Charpy finalizado confeccionado durante esse doutoramento	92
Figura 2.31 – Encoder incremental ótico angular (BERTIN e LOPES, 2012)	94
Figura 2.32 – Encoder incremental (DECOM, 2012 apud OLIVEIRA, 2007)	95
Figura 2.33 – Estrutura de um encoder de contato (BERTIN e LOPES, 2012)	95
Figura 2.34 – Discos codificados de encoders óticos angulares absolutos tipos (a) Binário (b) Gray (c) código Gray gerado (BERTIN e LOPES)	96
Figura 2.35 – Arduíno (RENNA et al 2013)	97
Figura 2.36 – Kit com encoder e o disco (imagem do próprio autor)	98
Figura 2.37 – Kit arduíno montado e programado (imagem do próprio autor)	99
Figura 2.38 – Teste feito no arduíno e encoder (imagem do próprio autor)	99
Figura 2.39 – Montagem do encoder e disco no eixo da máquina pendular (imagem do próprio autor)	100
Figura 2.40 – Kit arduino e kit do encoder fixados na máquina (imagem do próprio autor)	100

Capítulo 3

Figura 3.1 – Corpo de prova Tipo I (em milímetros), padronizado segundo a norma ASTM D638	102
Figura 3.2 – Moldes para confeccionamento dos CP's (imagem do próprio autor)	109
Figura 3.3 – Fibras naturais e pesagem (imagem do próprio autor)	109
Figura 3.4 – Fibras de bambu ainda “in natura” (imagem do próprio autor)	110
Figura 3.5 – Fibras de kevlar, resina e preparação (imagem do próprio autor)	110
Figura 3.6 – Corpo de prova sendo ensaiado na EMIC e respectivo resultado (imagem do próprio autor)	110
Figura 3.7 – Corpos de prova diversos (Sem Fibra, Fibra de Bambu, Nylon, Coco, Cana e outros) (imagem do próprio autor)	111
Figura 3.8 – Dimensões dos corpos de prova, norma ASTM E-23	112
Figura 3.9 – Dimensões dos corpos de prova, norma ASTM E-23 para Charpy do tipo A	112
Figura 3.10 – Energia de Impacto x Temperatura. Onde NDT é Temperatura de ductilidade nula e FTP é Temperatura 100% fibrosa (dúctil)	113
Figura 3.11 – Corpos de prova tipo Charpy A – Esquerda com utilização de programa computacional; Direita criado a partir de usinagem mecânica	114
Figura 3.12 – Máquina de ensaios mecânicos WDW100EB 100KN (imagem do próprio autor)	115
Figura 3.13 – Corpos de prova diversos materiais no ensaio de tração (imagem do próprio autor)	116
Figura 3.14 – Corpos de prova nos ensaios – Resina pura (imagem do próprio autor)	117
Figura 3.15 – Corpos de prova depois dos ensaios – Fibra de Kevlar (imagem do próprio autor)	117
Figura 3.16 – Corpos de prova depois dos ensaios – Fibra de coco (imagem do próprio autor)	118
Figura 3.17 – Corpo de prova metálico rompido por Ensaio Charpy, mostrando regiões de fratura dúctil (cinza escuro) e de fratura frágil (aspecto rugoso)	119

Capítulo 4

Figura 4.1 – Gráfico de energia de absorção de impacto para o Aço, Alumínio e Cobre através de dados oriundos de literatura, análise Ansys e ensaios Charpy	121
Figura 4.2 – Materiais “in natura” adquiridos para ensaio rompimento Charpy	122
Figura 4.3 – Gráfico de limites de escoamento para o Aço, Alumínio e Cobre através de dados oriundos de literatura, análise Ansys e ensaios M.U.E.	123
Figura 4.4 – Gráfico de limites de resistências à tração para o Aço, Alumínio e Cobre através de dados oriundos de literatura, análise Ansys e ensaios M.U.E.	124
Figura 4.5 – Gráfico da energia absorvida x temperatura de ensaio, UNESP Guaratinguetá	131
Figura 4.6 – Gráfico Comparativo: Energia absorvida (J) x Temperatura (°C) para o aço 1045	133
Figura 4.7 – Engastes em forma de cubo e cutelo com dimensões reais	134
Figura 4.8 – Engastes e cutelo em forma circular	134
Figura 4.9 – Engastes em forma de chapa dobrada e cutelo com dimensões reais	134
Figura 4.10 – Engastes em forma de cubo arredondado nas extremidades e cutelo com dimensões reais	134
Figura 4.11 – Sequência retirada da filmagem virtual de um rompimento característico charpy	135
Figura 4.12 – Gráfico Comparativo das três curvas: Energia absorvida (J) x Temperatura (°C) para o aço 1045	136
Figura 4.13 – Gráfico Comparativo: Energia absorvida (J) x Temperatura (°C) para Fibra de coco	138
Figura 4.14 – Gráfico Comparativo: Energia absorvida (J) x Temperatura (°C) para demais compósitos	138

Anexo A

Figura A.1 – Vistas esquerda, frontal e direita respectivamente	155
Figura A.2 – Vista explodida e respectiva lista de descrição das peças da Máquina	156
Figura A.3 – Martelo	156
Figura A.4 – Alavanca de Acionamento	157
Figura A.5 – Mancal	157
Figura A.6 – Cutelo (Vista Lateral e Frontal)	157
Figura A.7 – Eixo de Giro	158
Figura A.8 – Bigorna	158
Figura A.9 – Suporte da Mola, Mola e Pino do Dispositivo de Trava	159
Figura A.10 – Chapa Lateral	159
Figura A.11 – Tubo da trava e Eixo do Martelo	160
Figura A.12 – Exemplo de corpo de prova de alumínio rompido pelo ensaio Charpy	161
Figura A.13 – Gráfico de Energia de absorção de impacto para instrumentação analógica e digital	162

Anexo B

Figura B.1 – Exemplo de relatório de ensaio para 4 corpos de prova no ensaio de tração	163
Figura B.2 – Exemplo de método de obtenção de dados e propriedades após ensaio de tração	164
Figura B.3 – Relatório de ensaio de tração para Fibra1 de cavaco de nylon	165
Figura B.4 – Relatório de ensaio de tração para Fibra2 de cavaco de nylon	165
Figura B.5 – Relatório de ensaio de tração para Fibras juta (<i>Corchorus capsularis</i>)	166
Figura B.6 – Relatório de ensaio de tração para Resina + cola 3M	166
Figura B.7 – Relatório de ensaio de tração para Resina + cola 3M em excesso	167
Figura B.8 – Relatório de ensaio de tração para Fibra1 de cavaco de PVC	167
Figura B.9 – Relatório de ensaio de tração para Fibra2 de cavaco de PVC	168
Figura B.10 – Relatório de ensaio de tração para Resina + catalisador em excesso	168
Figura B.11 – Relatório de ensaio de tração para Fibra1 de borracha	169
Figura B.12 – Relatório de ensaio de tração para Fibra2 de borracha	169
Figura B.13 – Relatório de ensaio de tração para Fibra1 de cana	170
Figura B.14 – Relatório de ensaio de tração para Fibra2 de cana	170
Figura B.15 – Relatório de ensaio de tração para Fibra1 de coco	171
Figura B.16 – Relatório de ensaio de tração para Fibra2 de coco	171
Figura B.17 – Relatório de ensaio de tração para Fibra3 de coco	172
Figura B.18 – Relatório de ensaio de tração para Resina pura	172
Figura B.19 – Relatório de ensaio de tração para Fibra1 de fio de Nylon	173
Figura B.20 – Relatório de ensaio de tração para Fibra2 de fio de Nylon	173
Figura B.21 – Relatório de ensaio de tração para Fibra de technyl	174
Figura B.22 – Relatório de ensaio de tração para Fibra de bambu	174
Figura B.23 – Relatório de ensaio de tração para Fibra1 de vidro	175
Figura B.24 – Relatório de ensaio de tração para Fibra2 de vidro	175
Figura B.25 – Relatório de ensaio de tração para Fibra3 de vidro	176
Figura B.26 – Relatório de ensaio de tração para Fibra1 de kevlar	176
Figura B.27 – Relatório de ensaio de tração para Fibra2 de kevlar	177

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1

Tabela 1.1 – Coeficiente de Poisson de alguns polímeros	56
---	----

Capítulo 2

Tabela 2.1 – Variáveis do projeto	78
Tabela 2.2 – Lista de materiais e custos	90

Capítulo 3

Tabela 3.1 – Características físicas e mecânicas das fibras de Bambu, Coco e Sisal	104
Tabela 3.2 – Proporção de materiais utilizados nos Corpos de Prova(CP)	111

Capítulo 4

Tabela 4.1 – Comparativo entre energia absorvida para o Aço, Alumínio e Cobre através de dados oriundos de literatura, análise Ansys e ensaio Charpy	121
Tabela 4.2 – Comparativo entre limites de escoamento para o Aço, Alumínio e Cobre através de dados oriundos de literatura, análise Ansys e ensaios M.U.E.	123
Tabela 4.3 – Comparativo entre limites de resistências a tração para o Aço, Alumínio e Cobre através de dados oriundos literatura, análise Ansys e ensaios M.U.E.	124
Tabela 4.4 - Valores obtidos com corpos de prova sem tratamento	125
Tabela 4.5 - Valores colhidos com corpos de prova com tratamento	126
Tabela 4.6 - Comparativo entre os corpos de prova CTSF e STSF, média e desvio padrão	126
Tabela 4.7 - Comparativo entre os corpos de prova STCF e CTCF, média e desvio padrão	127
Tabela 4.8 - Comparativo entre os corpos de prova STSF e STCF, média e desvio padrão	128

Tabela 4.9 - Comparativo entre os corpos de prova CTCF e STSF, média e desvio padrão	128
Tabela 4.10 - Comparativo entre os corpos de prova STCF e CTSF, média e desvio padrão	129
Tabela 4.11 - Comparativo entre os corpos de prova CTSF e CTCF, média e desvio padrão	130
Tabela 4.12 – Valores da temperatura e da energia absorvida para o aço 1045, UNESP	131
Tabela 4.13 – Valores da temperatura e energia absorvida para o aço 1045, presente trabalho	132
Tabela 4.14 – Valores comparativos da temperatura e energia absorvida para o aço 1045 para mesmas temperaturas entre UNESP e Presente trabalho	132
Tabela 4.15 – Valores da temperatura e energia absorvida para o aço 1045, ANSYS	136
Tabela 4.16 – Energia absorvida (charpy) para materiais comp. pelos grupos de CP's	137
Tabela 4.17 – Propriedades mecânicas: Tensão de Escoamento e Módulo de Elasticidade para CP's	139

Anexo A

Tabela A.1 – Comparativo entre dados captados, analógico e digital para o Charpy criado no presente trabalho	161
--	-----

Anexo B

Tabela B.1 – Propriedades mecânicas obtidas pelo CP 2 após resultados de ensaio de tração	164
---	-----

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
1.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS		19
1.1.1	Ensaio de Tração	21
1.1.2	Ensaio de Compressão	26
1.1.3	Ensaio de Dureza	27
1.1.3.1	DUREZA ROCKWELL	27
1.1.3.2	DUREZA BRINELL	28
1.1.3.3	DUREZA VICKERS	30
1.1.4	Ensaio de Fadiga	31
1.1.5	Ensaio de Impacto	33
1.2. POLÍMEROS		36
1.2.1. Estruturas Moleculares		37
1.2.1.1	POLÍMEROS LINEARES	37
1.2.1.2	POLÍMEROS RAMIFICADOS	38
1.2.1.3	POLÍMEROS COM LIGAÇÕES CRUZADAS	38
1.2.1.4	POLÍMEROS EM REDE	39
1.2.1.5	POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS	40
1.2.1.6	POLÍMEROS TERMORRÍGIDOS	40
1.2.1.7	ELASTÔMETOS	41
1.2.2.	Características do polipropileno	41
1.3. MATERIAIS COMPÓSITOS		41
1.4. PROCESSOS MECÂNICOS DE FABRICAÇÃO		44
1.4.1.	Usinagem	45
1.4.2.	Operação de corte por serra fita	46
1.4.3.	Soldagem	46
1.4.4.	Torneamento	47
1.4.5.	Roscamento	49
1.4.6.	Fresamento	50

1.5. ENSAIO DE TRAÇÃO	51
1.5.1. Máquina de Ensaio de Tração	51
1.5.2. Propriedades Obtidas no Ensaio de Tração	53
1.5.2.1 TENSÃO NORMAL	53
1.5.2.2 DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA	53
1.5.2.3 ÁREA DE COMPORTAMENTO ELÁSTICO	54
1.5.2.4 REGIÃO DE COMPORTAMENTO PLÁSTICO	57
1.6. CORPOS DE PROVA	59
1.6.1. Tração	59
1.6.2. Charpy	62
1.7. ABORDAGEM NUMÉRICA	64
1.7.1 Elementos Finitos	64
1.7.2 Tipo de análise em Elementos Finitos	68
1.7.2.1 ANÁLISE DINÂMICA OU ESTÁTICA	69
1.7.2.2 ANÁLISE NÃO LINEAR OU LINEAR	69
1.7.2.3 TIPO DE ESTRUTURA	69
1.7.3 Fundamentos do MEF	70
1.7.4 Etapas na Utilização do MEF	71
1.7.5 Exemplo de aplicação do MEF	72

CAPÍTULO 2 CONSTRUÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO CHARPY 75

2.1. ABSORÇÃO DE ENERGIA	76
2.1.1. Polímeros	76
2.1.2. Ensaio de Impacto para Polímeros	77
2.1.3. Variáveis do Projeto	78
2.2. DESCRIÇÃO DA FABRICAÇÃO	79
2.3. MONTAGEM	83
2.4. AJUSTE	86
2.5. BASE-SUPORTE CHARPY	87
2.6. LISTA DE MATERIAIS E CUSTOS	90
2.7. INSTRUMENTAÇÃO ANALÓGICA	91
2.8 INSTRUMENTAÇÃO DIGITAL	93
2.8.1. Encoders	93
2.8.1.1. ENCODER INCREMENTAL	94
2.8.1.2. ENCODER ABSOLUTO	96
2.8.2. Arduíno	97
2.8.3. Montagem	98

CAPÍTULO 3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	102
3.1. CONFECCIONAMENTO DOS CORPOS DE PROVAS		102
3.1.1. Ensaio de tração		102
3.1.1.1 <i>CORPOS DE PROVA DE COMPÓSITOS</i>		103
3.1.1.1.1 <i>A resina (Matriz)</i>		103
3.1.1.1.2 <i>As fibras vegetais</i>		103
3.1.1.1.3 <i>A fibra de coco</i>		104
3.1.1.1.4 <i>A fibra da cana de açúcar</i>		105
3.1.1.1.5 <i>A fibra de Technyl e Nylon</i>		106
3.1.1.1.6 <i>A fibra de vidro</i>		107
3.1.1.1.7 <i>A fibra de Borracha</i>		108
3.1.1.1.8 <i>A fibra de PVC</i>		108
3.1.1.1.9 <i>A composição dos corpos de provas</i>		109
3.1.2 Ensaio Charpy		111
3.1.2.1 <i>CORPOS DE PROVA METÁLICO</i>		113
3.1.2.1 <i>CORPOS DE PROVA DE COMPÓSITOS</i>		114
3.2. ENSAIOS PRÁTICOS REALIZADOS		115
3.2.1. Ensaio de tração		115
3.2.2. Ensaio charpy		118
CAPÍTULO 4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	120
4.1 ENSAIOS DE VALIDAÇÃO NUMÉRICO-EXPERIMENTAIS		120
4.1.1 Resultados Charpy		121
4.1.2 Resultados Tração		122
4.2 RESULTADOS CHARPY SIMULAÇÃO-EXPERIMENTAL		125
4.2.1 Ensaio de Charpy na máquina universal		130
4.2.2 Ensaio Charpy através da análise de elementos finitos		133
4.2.3 Comparação Charpy dos ensaios experimental e computacional		135
4.2.4 Ensaio charpy nos compósitos		137
4.3 RESULTADOS TRAÇÃO SIMULAÇÃO-EXPERIMENTAL		139
4.3.1 Ensaio de tração nos compósitos		139
CAPÍTULO 5	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	141
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		144
ANEXO A – Projeto e Sincronismo de dados Charpy		155
A.1 O PROJETO MÁQUINA CHARPY		155
A.2 O SINCRONISMO DE DADOS CHARPY		160
ANEXO B – Resultados Ensaio Tração de compósitos		163

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS

Na engenharia, seja para o projeto e manufatura de pequenos ou grandes componentes, é fundamental o conhecimento do comportamento do material com que se trabalha, isto é, suas propriedades mecânicas em várias condições de uso. As condições de uso envolvem: temperaturas, tipo de cargas, desgaste, deformabilidade, etc...

A resistência de um material depende de sua capacidade de suportar a carga sem deformação excessiva ou ruptura. Essa propriedade é inerente ao próprio material que deve ser determinada por experimentos. Um dos testes mais importantes a realizar nesse sentido é o ensaio de tração. (HIBBELER, 2010).

A aplicação de uma força num corpo sólido promove uma deformação do material na direção do esforço e o ensaio de tração consiste em submeter um material a um esforço que tende a esticá-lo ou alongá-lo. O ensaio é realizado num corpo de prova de formas e dimensões padronizadas, para que o resultado obtido possa ser comparado. Este corpo de prova é fixado numa máquina de ensaio que aplica esforços crescentes na sua direção axial, sendo medidas as deformações correspondentes através de um extensômetro acoplado a máquina. Os esforços e cargas são medidos na mesma e o corpo de prova é levado até sua ruptura. (SOUZA, 1982).

Para que o projetista possa prever o comportamento do material em condições de trabalho é imprescindível que tenha em mãos os parâmetros de comportamento, determinados através de ensaios mecânicos.

Embora os valores de propriedades de muitos materiais comumente usados na engenharia possam ser obtidos de tabelas, é importante se ter o conhecimento da metodologia da execução dos ensaios e do significado de cada parâmetro. Portanto é importante conhecer os fundamentos básicos relativos a cada ensaio.

Basicamente existem dois tipos de ensaios que são comumente utilizados por especialistas, a saber:

ENSAIO NÃO DESTRUTIVO

Denomina-se ensaio não destrutivo (END ou NDT em inglês nondestructive testing) a qualquer tipo de ensaio praticado a um material que não altere de forma permanente suas propriedades físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais. Os ensaios não destrutivos implicam um dano imperceptível ou nulo.

Para Callister (2002), ensaios não destrutivos representam um conjunto amplo de técnicas de análise utilizadas na ciência e na indústria para avaliar as propriedades de um material, componente ou sistema, sem causar danos, baseando-se na aplicação de fenômenos físicos tais como ondas eletromagnéticas, acústicas, elasticidade, emissão de partículas subatômicas, capilaridade, absorção e qualquer tipo de teste que não implique um dano considerável à amostra examinada.

Os ensaios não destrutivos são técnicas altamente valiosas, uma vez que permitem o controle das propriedades dos materiais, com economia de tempo e dinheiro, e permitem que o material testado volte intacto para o local de trabalho após a inspeção. Métodos comuns de END incluem ultra-som, partículas magnéticas, líquido penetrante. END são uma ferramenta comumente usada em engenharia forense, engenharia mecânica, engenharia elétrica, engenharia civil, sistemas de engenharia, engenharia aeronáutica, medicina e arte.

ENSAIO DESTRUTIVO

Denomina-se ensaio destrutivo qualquer tipo de ensaio no qual o corpo de prova fique inutilizado após a realização do mesmo, ou seja, ocorram alterações permanentes nas propriedades físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais.

Segundo Callister (2007), no ensaio de tração por exemplo, que é um dos métodos mais comuns de ensaios mecânicos destrutivos, utilizado para determinar o módulo de Young de um material, o corpo de prova sofre uma tensão que tende a alongá-lo ou esticá-lo até que ocorra a fratura. Neste ensaio pode-se utilizar o extensômetro na captura de dados.

Muitos outros tipos de ensaios destrutivos ainda são comumente utilizados, porém a possibilidade de realização mediante um ensaio não destrutivo onde o material em questão não sofra nenhum tipo de dano e, portanto, possa ser reutilizado normalmente desperta grande interesse, levando-se em consideração vantagens como economia de tempo e dinheiro, facilidade de execução, precisão nas medidas, dentre outras.

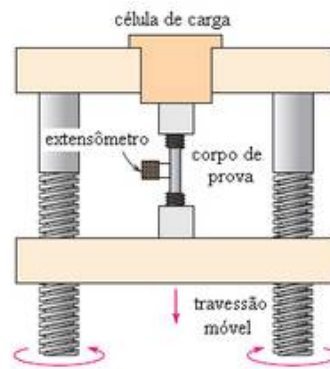
Com o objetivo de estruturar uma base de conhecimento no que diz respeito aos ensaios mecânicos mais importantes existentes, serão descritos a seguir alguns dos ensaios mecânicos relevantes para o assunto deste proponente, que são:

- Tração;
- Compressão;
- Dureza; e
- Impacto.

1.1.1 Ensaio de Tração

Segundo Callister (2002), Um dos mais importantes ensaios existente. Em um ensaio de tração, um corpo de prova é submetido a um esforço que tende a alongá-lo ou esticá-lo até à ruptura. Geralmente, o ensaio é realizado num corpo de prova de formas e dimensões padronizadas, para que os resultados obtidos possam ser comparados ou, se necessário, reproduzidos. Este é fixado numa máquina de ensaios que aplica esforços crescentes na sua direção axial, sendo medidas as deformações correspondentes. Os esforços ou cargas são mensurados na própria máquina, e, normalmente, o ensaio ocorre até a ruptura do material (ensaio destrutivo).

Na Figura 1.1 O corpo de prova é alongado pelo travessão móvel; uma célula de carga e um extensômetro medem, respectivamente, a magnitude da carga aplicada e o alongamento.

Figura1.1 – Dispositivo usado para conduzir ensaios tensão-deformação por tração

Com esse tipo de ensaio, pode-se afirmar que praticamente as deformações promovidas no material são uniformemente distribuídas em todo o seu corpo, pelo menos até ser atingida uma carga máxima próxima do final do ensaio e, como é possível fazer com que a carga cresça numa velocidade razoavelmente lenta durante todo o teste, o ensaio de tração permite medir satisfatoriamente a resistência do material.

Segundo Callister (2002), a uniformidade da deformação permite ainda obter medições para a variação dessa deformação em função da tensão aplicada. Essa variação, extremamente útil para o engenheiro, é determinada pelo traçado da curva tensão-deformação a qual pode ser obtida diretamente pela máquina ou por pontos. A uniformidade termina no momento em que é atingida a carga máxima suportada pelo material, quando começa a aparecer o fenômeno da estricção ou da diminuição da seção do corpo de prova, no caso de materiais com certa ductilidade.

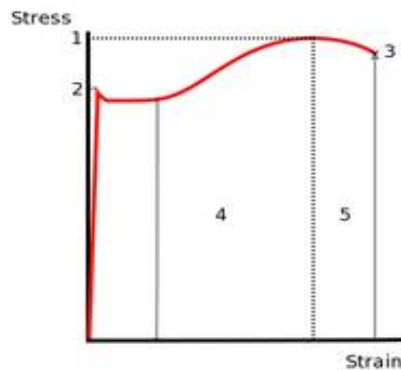
A ruptura sempre se dá na região mais estreita do material, a menos que um defeito interno no material, fora dessa região, promova a ruptura do mesmo, o que raramente acontece.

A precisão de um ensaio de tração depende, evidentemente, da precisão dos aparelhos de medida que se dispõe. Com pequenas deformações, pode-se conseguir uma precisão maior na avaliação da tensão ao invés de detectar grandes variações de deformação, causando maior imprecisão da avaliação da tensão.

Mesmo no início do ensaio, se esse não for bem conduzido, grandes erros podem ser cometidos, como por exemplo, se o corpo de prova não estiver bem alinhado, os esforços assimétricos que aparecerão levarão a falsas leituras das deformações para uma mesma carga aplicada. Deve-se, portanto, centrar bem o corpo-de-prova na máquina para que a carga seja efetivamente aplicada na direção do seu eixo longitudinal.

Em um ensaio de tração obtém-se o gráfico tensão-deformação, na qual é possível analisar o comportamento do material ao longo do ensaio. Do início do ensaio, até a ruptura, os materiais geralmente passam pelas etapas da Figura 1.2

Figura 1.2 – Diagrama tensão-deformação obtido por meio de um ensaio de tração



Onde:

1. Tensão Máxima de Tração
2. Tensão de Escoamento
3. Tensão de Ruptura
4. Região de Encruamento
5. Região de "Estricção".

DEFORMAÇÃO ELÁSTICA

Segundo Callister (2007), para a maioria dos metais que são solicitados em tração e com níveis de tensão relativamente baixos, a tensão e a deformação são proporcionais.

As deformações elásticas não são permanentes, ou seja, quando a carga é removida, o corpo retorna ao seu formato original. No entanto, a curva tensão-deformação não é sempre linear, como por exemplo, no ferro fundido cinzento, concreto e polímeros.

Até este ponto, assume-se que a deformação elástica é independente do tempo, ou seja, quando uma carga é aplicada, a deformação elástica permanece constante durante o período em que a carga é mantida constante. Também é assumido que após a remoção da carga, a deformação é totalmente recuperada, ou seja, a deformação imediatamente retorna para o valor zero.

DEFORMAÇÃO PLÁSTICA

Acima de certa tensão, os materiais começam a se deformar plasticamente, ou seja, ocorrem deformações permanentes. O ponto na qual estas deformações permanentes começam a se tornar significativas é chamado de limite de escoamento.

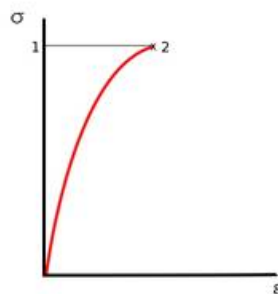
Segundo Callister (2007), para metais que possuem transição gradual do regime elástico para o plástico, as deformações plásticas se iniciam no ponto na qual a curva tensão-deformação deixa de ser linear, sendo este ponto chamado de limite de proporcionalidade (ou tensão limite-elasticidade). No entanto, é difícil determinar este ponto precisamente. Como consequência, criou-se uma convenção na qual é construída uma linha reta paralela à porção elástica, passando pela deformação de 0,2% da deformação. A tensão correspondente à intersecção desta linha com a curva tensão-deformação é o limite de escoamento.

A magnitude do limite de escoamento é a medida da resistência de um material à deformação plástica e pode variar muito, como por exemplo, entre 35 MPa para uma liga de alumínio de baixa resistência até 1400 MPa para um aço de alta resistência.

Callister (2007) descreve que durante a deformação plástica, a tensão necessária para continuar a deformar um metal aumenta até um ponto máximo, chamado de limite de resistência à tração, na qual a tensão é a máxima na curva tensão-deformação de engenharia. Isto corresponde a maior tensão que o material pode resistir; se esta tensão for aplicada e mantida, o resultado será a fratura. Toda a deformação até este ponto é uniforme na seção. No entanto, após este ponto, começa a se formar uma estricção, na qual toda a deformação subsequente está confinada e, é nesta região que ocorrerá ruptura. A tensão que corresponde a fratura é chamada de limite de ruptura.

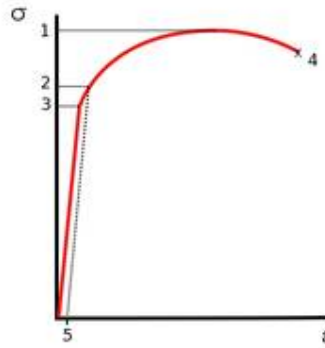
Assim, é possível obter o gráfico tensão-deformação, que varia conforme o material analisado. Por exemplo, os materiais frágeis (Figura 1.3), como cerâmicas e concreto, não apresentam um limite de escoamento. Já os materiais dúcteis (Figura 1.4), como o alumínio, apresentam o limite de escoamento bem definido.

Figura 1.3 – Diagrama tensão-deformação para um material frágil



Onde:

1. Tensão máxima de tração
2. Ruptura.

Figura 1.4 – Diagrama tensão-deformação para uma liga típica de alumínio

Onde:

1. Tensão máxima de tração
2. Limite de escoamento
3. Tensão limite de proporcionalidade
4. Ruptura
5. Deformação "offset" (tipicamente 0,002).

MÓDULO DE YOUNG

Segundo Paiva (2002), na região onde a Lei de Hooke é válida (regime elástico linear) o módulo de Young pode ser obtido pelo coeficiente angular do gráfico tensão-deformação. Para materiais cuja porção inicial elástica da curva tensão-deformação não é linear (por exemplo, ferro fundido cinzento e concreto), não é possível determinar o módulo de Young pelo coeficiente angular.

Ainda Paiva (2002) diz que nestes casos, tanto o módulo tangente quanto o módulo secante são normalmente usados. Módulo tangente é tomado como sendo a inclinação da curva tensão-deformação em um nível de tensão específico, enquanto que o módulo secante representa a inclinação de uma secante traçada a partir da origem até um dado ponto da curva. Os gráficos das Figuras 1.5 e 1.6 representam respectivamente as curvas de tensão em regime linear e não-linear.

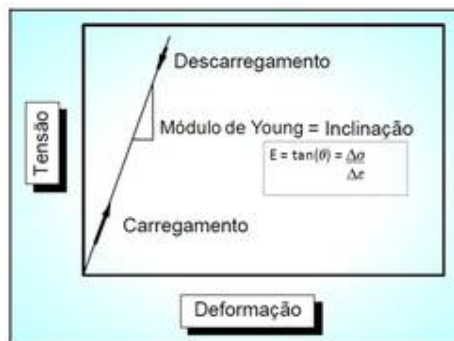
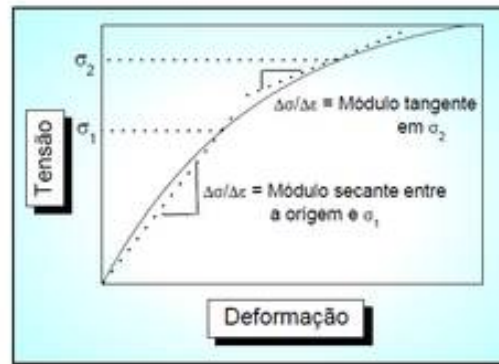
Figura 1.5 – Curva tensão-deformação no regime elástico linear (PAIVA, 2002)

Figura 1.6 – Curva tensão-deformação não-linear (PAIVA, 2002)

1.1.2 Ensaio de Compressão

A compressão física é um resultado da aplicação de uma força de compressão a um material, resultando em uma redução em seu volume, ou, como tratado em resistência dos materiais e engenharia, uma redução de uma de suas dimensões, axial com a atuação da força, e um aumento da seção transversal a este mesmo eixo, quando a deformação da peça nesta direção é permitida, pois deve-se considerar que teoricamente, neste caso, seu volume mantenha-se constante. Um exemplo característico de objeto submetido a esforços de compressão são as colunas dos prédios, que recebem, com a mesma direção de seu eixo, as cargas acima delas.

A compressão ocorre quando a força axial aplicada estiver atuando com o sentido dirigido para o interior da peça. Por exemplo, uma pequena chapa de aço engastada em uma morsa, sendo gradativamente comprimida pelos dois engastes, estará recebendo forças com direções opostas, porém, apontando para seu interior. Com isso, a peça sofre deformações. Em um primeiro momento, sofre uma deformação elástica, porém, quando atinge sua tensão de escoamento, a peça passará a entrar em sua deformação plástica, ou seja: o material estará sendo deformado permanentemente, ao contrário do regime elástico, onde a organização molecular volta ao estado onde se encontrava no início. A compressão pode ser denominada quando a peça estiver sendo "empurrada", ao contrário da tração, onde está sendo "puxada".

A compressão tem muitas implicações na resistência dos materiais, na física e na engenharia estrutural, pelo fato da compressão produzir quantidades consideráveis de stress e tensão. Relacionado à compressão, propriedades mecânicas, tais como a força de compressão ou o módulo de elasticidade, podem ser medidos.

Os cientistas podem utilizar máquinas para induzir a compressão. Este tipo de experimento é chamado de ensaio de compressão, que é utilizado para comprovar as características mecânicas de uma peça, descobrindo assim a que tensão ela sofrerá ruptura. Caracterizam-se como ensaios destrutivos, uma vez que a peça fica normalmente inutilizada após o ensaio.

1.1.3 Ensaio de Dureza

Na ciência dos materiais, dureza é a propriedade característica de um material sólido, que expressa sua resistência a deformações permanentes e está diretamente relacionada com a força de ligação dos átomos.

Basicamente, a dureza pode ser avaliada a partir da capacidade de um material "riscar" ou penetrar o outro. Na engenharia e na metalurgia, utiliza-se o chamado ensaio de penetração para a medição da dureza. A partir de um referencial intermediário, a dureza pode ser expressa em diversas unidades.

Existem diferentes tipos de ensaios de dureza, a saber: Rockwell, Brinell, Vickers, Meyer, Knoop, Shore, Barcol e IRHD. Serão abordados apenas os mais importantes e difundidos, neste caso, os 3 primeiros:

1.1.3.1 DUREZA ROCKWELL

O método Rockwell é um método de medição direta da dureza, sendo um dos mais utilizados em indústrias. Este é um dos métodos mais simples e que não requer habilidades especiais do operador. Além disso, várias escalas diferentes podem ser utilizadas através de possíveis combinações de diferentes penetradores e cargas, o que permite o uso deste ensaio em praticamente todas as ligas metálicas, assim como em muitos polímeros.

Os penetradores incluem esferas fabricadas em aço de elevada dureza, com diâmetros de 1/16, 1/8, 1/4 e 1/2 polegada, assim como cones de diamante, utilizados nos materiais de elevada dureza.

Neste sistema, a dureza é obtida através da diferença entre a profundidade de penetração resultante da aplicação de uma pequena carga, seguida por outra de maior intensidade.

Imprecisões podem ocorrer caso a amostra possua pequena espessura, se a impressão ocorrer próxima de um canto da amostra ou próxima de outra impressão. Assim, a espessura do corpo ensaiado deve ser pelo menos dez vezes superior a profundidade da impressão. Além disso, a impressão deve ser feita a uma distância equivalente a três diâmetros do penetrador de outras impressões e cantos da amostra e, a superfície em questão deve possuir uma boa planicidade.

Os equipamentos modernos para obtenção da dureza Rockwell são automatizados e muito simples de usar. A dureza é fornecida diretamente pelo equipamento e cada medição requer apenas alguns segundos.

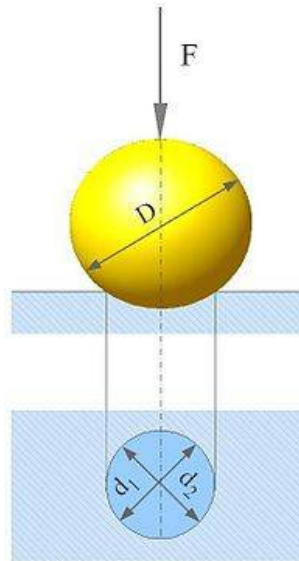
Procedimento do Ensaio:

- Na superfície limpa, aplica-se uma pré-carga de 10 kgf,
- Aplica-se uma carga nominal que pode variar entre 60, 100 ou 150 kgf,
- Depois de aproximadamente 10 segundos é retirada a carga,
- E é realizada a leitura da dureza do material diretamente na máquina, por isso, é um método direto de medição de dureza e um dos mais utilizados nas indústrias.

1.1.3.2 DUREZA BRINELL

O método Brinell é um método de medição da dureza, utilizado principalmente nos materiais metálicos. Este método foi proposto em 1900, pelo engenheiro sueco Johan August Brinell. É o primeiro ensaio de dureza normatizado e amplamente utilizado na engenharia e metalurgia.

O teste típico consiste em um penetrador de formato esférico com 10 mm de diâmetro, feito de aço de elevada dureza ou de carbeto de tungstênio (Figura 1.7).

Figura 1.7 – Ensaio Brinell

A carga aplicada varia entre 500 e 3000 kgf e, durante o teste, a carga é mantida constante por um período entre 10 e 30 segundos.

O número Brinell de dureza (HB) é função da carga aplicada e do diâmetro da impressão resultante e pode ser obtido através da Equação 1.1:

$$HB = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1.1)$$

Onde: “P” é o valor da carga aplicada (em kgf);

“D” é o diâmetro do penetrador; e

“d” é o diâmetro da impressão resultante, ambos em milímetros.

Uma das grandes desvantagens do ensaio Brinell é o tamanho do penetrador, que muitas vezes causa danos consideráveis à peça analisada.

Para garantir um bom resultado, a medição do diâmetro da impressão deve ser feita em pelo menos duas direções.

A dimensão da dureza Brinell é MPa e uma das normas que a rege é a ASTM E10 (Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials).

1.1.3.3 DUREZA VICKERS

Dureza Vickers é um método de classificação da dureza dos materiais baseada num ensaio laboratorial. Neste método, é usada uma pirâmide de diamante com ângulo de diedro de 136° que é comprimida, com uma força arbitrária "F", contra a superfície do material. Calcula-se a área "A" da superfície impressa pela medição das suas diagonais.

A dureza Vickers HV é dada pela Equação 1.2:

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \approx 1,854 \frac{F}{d^2} \quad (1.2)$$

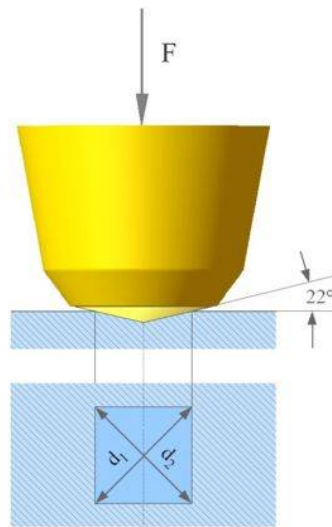
Onde:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

O método é baseado no princípio de que as impressões provocadas pelo penetrador possuem similaridade geométrica, independentemente da carga aplicada. Assim, cargas de diversas magnitudes são aplicadas na superfície plana da amostra, dependendo da dureza a ser medida. O Número Vickers (HV) é então determinado pela razão entre a carga (kgf) e a área superficial da impressão (mm²). Por ser dependente da área a escala Vickers varia rapidamente quando comparada a Rockwell.

Este método foi desenvolvido no início da década de 1920 como uma alternativa ao Brinell. Uma das grandes vantagens é que os cálculos da dureza não dependem das dimensões do penetrador.

O mesmo penetrador pode ser usado nos ensaios de diversos materiais, independentemente da dureza (Figura 1.8). Além disso, esta é uma das escalas mais amplas entre as usadas para medição de dureza e pode ser utilizada para todos os metais, com uma grande precisão de medida.

Figura 1.8 – Penetrador Vickers

A grande vantagem deste método é a pequena impressão deixada, sendo que este procedimento é utilizado em ensaios de micro e nano-dureza, na qual é possível analisar cerâmicas e finíssimas camadas de revestimento. As desvantagens são a necessidade de preparar a amostra previamente e o uso de um microscópio adequado.

Este ensaio é normatizado pela ASTM E-92 (Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials). A conversão das escalas de dureza nem sempre é precisa e recomendada, tendo em vista a sua não linearidade:

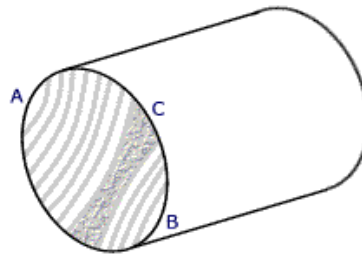
1.1.4 Ensaio de Fadiga

Segundo Colim (2006), fadiga é uma falha que pode ocorrer sob solicitações bastante inferiores ao limite de resistência do metal, isto é, na região elástica. É consequência de esforços alternados, que produzem trincas, em geral na superfície, devido à concentração de tensões.

No exemplo da Figura 1.9, uma barra submetida a um esforço de flexão alternado pode apresentar pequenas trincas em lados opostos A e B. Com a continuidade do esforço alternado, as trincas aumentam, reduzindo a área resistente da seção.

A ruptura ocorre quando essa área se torna suficientemente pequena para não mais resistir à solicitação aplicada (C).

Figura 1.9 – Pequenas trincas em barra submetida a esforço de flexão alternado (COLIM, 2006)

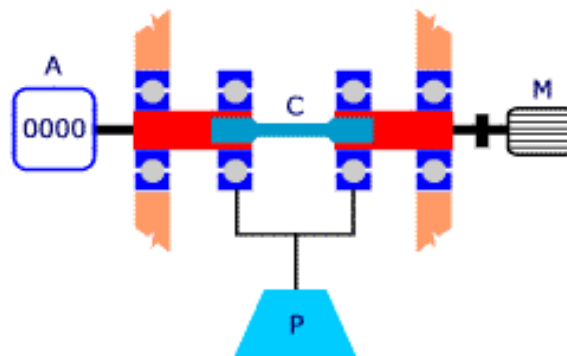


A fratura por fadiga é facilmente identificável. A área de ruptura C tem um aspecto distinto da restante, que se forma gradualmente.

A fadiga é um processo progressivo, mas a ruptura é brusca e, portanto, não é difícil imaginar o perigo que pode representar, uma vez que cargas variáveis ocorrem em inúmeros casos.

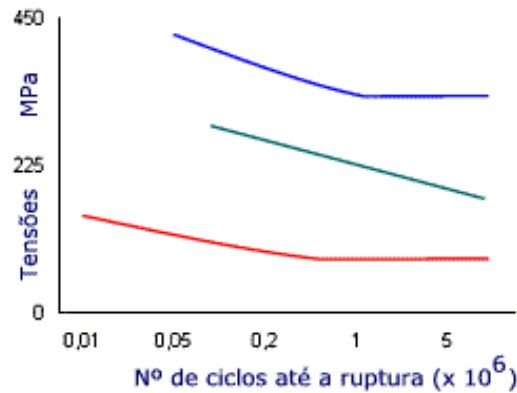
Segundo MSPC – Inf. Tec., um ensaio de fadiga por flexão pode ser feito com um arranjo conforme Figura 1.10. Um motor gira um corpo de prova C. Os rolamentos externos são fixos em apoios e os internos recebem uma carga P, produzindo um esforço de flexão alternado devido à rotação do corpo de prova.

Figura 1.10 – Arranjo para ensaio de fadiga por flexão rotativa (MSPC – Inf. Tec.)



Assim, como mostrado por MSPC – Inf. Tec., um ciclo completo de flexão alternada é aplicado a cada volta do eixo e o número de voltas é registrado pelo contador A. Quando o corpo se parte por fadiga, o contador deixa de ser acionado e sua indicação é o número de ciclos que o corpo suportou com a carga P.

Dadas as dimensões do corpo de prova, é possível calcular a tensão de flexão em função de P. Assim, repetindo o ensaio para diversos valores de P, é possível elaborar um gráfico relacionando o número de ciclos até a ruptura com a tensão de flexão mostrado na Figura 1.11 de MSPC – Inf. Tec.

Figura 1.11 – Ruptura por número de ciclos e tensões (MSPC – Inf. Tec.)

A curva superior é típica de um aço-carbono 0,5% C endurecido; a curva intermediária, de uma liga de alumínio e a inferior, de um ferro fundido.

Pode-se notar que o aço tem um limite de resistência à fadiga, isto é, uma tensão abaixo da qual a vida da peça sob flexão alternada é teoricamente infinita.

1.1.5 Ensaio de Impacto

As estruturas concebidas pelo homem são encontradas em toda parte, mas é importante prever o comportamento estrutural destas quando submetidas a diversos tipos de carregamento, e é por isto que engenheiros e especialistas, desenvolvem várias técnicas de análise elástica e plástica, incluindo o comportamento dinâmico das estruturas quando sujeitas a impacto visando projeto de equipamentos e componentes mais leves e seguros (ALVES, 2009).

Os ensaios de tração e flexão não nos permite prever como um material se comporta quando é submetido a uma carga dinâmica, porque esses ensaios avaliam a resposta do material diante a um carregamento estático (MARTINS e LUCENA, 2007).

Por outro lado, objetos do nosso cotidiano como automóveis, bicicleta, aviões, entre outros, utilizam materiais que são submetidos a esforços de características dinâmicas, como aqueles provocados por impactos e explosões, ou esforços repetitivos, ocasiões em que o material absorve grande quantidade de energia em um tempo muito curto (MARTINS e LUCENA, 2007).

Segundo Shigley et.al. (2005), uma força externa aplicada a uma estrutura ou peça é denominada “carga de impacto”.

O impacto representa um esforço de natureza dinâmica, a carga é aplicada repentina e bruscamente, neste caso não é só a força aplicada que conta, outro fator é a velocidade de aplicação da mesma, força associada com velocidade traduz-se em energia (MCMICHAEL e FISCHER, 1989).

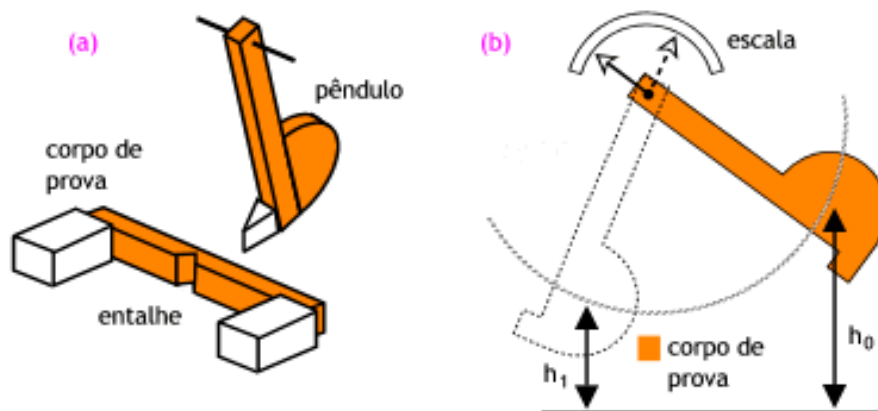
A tenacidade de um material, avaliada a partir do ensaio de tração, pode dar uma idéia da sua resistência ao impacto, mas a relação não é necessariamente conclusiva. Esse fato tornou-se relevante durante a segunda guerra mundial, quando navios passaram a usar chapas soldadas no lugar da tradicional construção rebitada.

Sob impacto, trincas iniciadas em regiões de solda podiam propagar-se pelas chapas, que não apresentavam perda de tenacidade ou ductilidade em ensaios de tração.

Foram desenvolvidos então ensaios específicos para impactos, considerando que a resistência a eles é grandemente afetada pela existência de trincas ou entalhes e pela velocidade de aplicação da carga, condições que não podem ser facilmente implementadas em um ensaio comum de tração. A temperatura também exerce significativa influência.

O ensaio de impacto é simples (como diz MSPC – Inf. Tec.) conforme pode ser visto pelo esquema da Figura 1.12 (a): um corpo de prova padronizado com um entalhe é rompido pela ação de um martelo em forma de pêndulo. O princípio de operação pode ser analisado pela vista lateral (b) da mesma Figura.

Figura 1.12 – Representação de um ensaio de impacto (MSPC – Inf. Tec.)



Supõe-se que o pêndulo seja levado até uma posição tal que o seu centro de gravidade fique a uma altura h_0 em relação a uma referência qualquer. Desprezando a resistência do ar e o atrito no pivô, uma vez liberado e na ausência do corpo de prova, o pêndulo deverá atingir mesma altura do outro lado, como dito por MSPC – Inf. Tec.

Ainda MSPC – Inf. Tec. esclarece que: Se o corpo de prova é inserido e rompido pelo impacto do pêndulo, a energia absorvida nessa operação faz o pêndulo atingir, no outro lado, uma altura máxima h_1 menor que h_0 . Ou seja, a resistência ao impacto do material é dada pela diferenças entre as energias potenciais em h_0 e em h_1 .

Na prática, o instrumento tem uma escala graduada, com indicador de valor máximo, para leitura direta da diferença de energias. Por ser energia, a resistência ao impacto deve ser dada em Joules (J), de acordo com o Sistema Internacional.

Em equipamentos mais antigos, podem ser consideradas unidades como quilograma-força metro (kgf m) ou libra-força pé (lbf ft). Há dois padrões comuns para o ensaio: Charpy e Izod. O primeiro é usual nos Estados Unidos e o segundo, na Europa.

Pelas descrições de MSPC – Inf. Tec., no ensaio Charpy, o corpo de prova tem um entalhe central e é apoiado em ambas as extremidades. O impacto se dá no centro conforme Figura 1.13 (a).

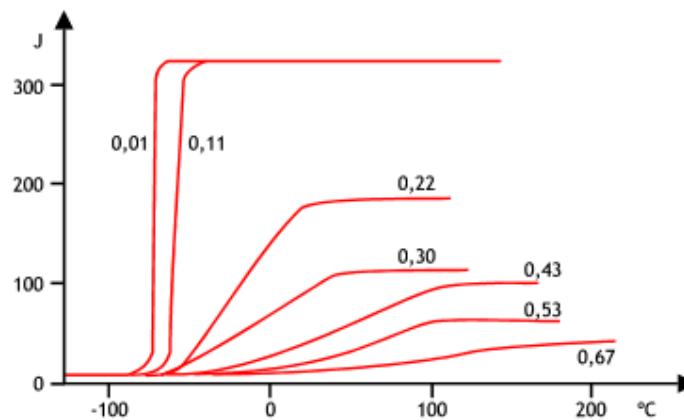
O entalhe comum é tipo "V", mas há também padrão em forma de "U" ou fenda terminada em furo (dimensões para V: comprimento 55 mm, seção 10 x 10 mm, entalhe a 45° profundidade 2 mm). Há padrões especiais (sem entalhe) para materiais como ferro fundido.

No padrão Izod, o corpo é engastado em um lado e recebe o impacto na outra extremidade conforme Figura 1.13 (b).

Figura 1.13 – Apoios dos corpos de prova no ensaio Charpy (MSPC – Inf. Tec.)



Conforme mencionado por MSPC – Inf. Tec., a resistência ao impacto dos materiais varia com a temperatura. As curvas do gráfico da Figura 1.14 indicam, de forma aproximada, variações da energia de impacto Charpy para aços-carbono de diferentes teores de C, todos eles aquecidos (para formação da austenita) a 870°C por 4 horas e resfriados lentamente, de forma que a estrutura é basicamente ferrita e perlita.

Figura 1.14 – Variações de energia de impacto com temperatura (MSPC – Inf. Tec.)

Nota-se que há uma temperatura ou faixa de temperaturas para a qual a energia de impacto muda de patamar, ou seja, de um valor mais baixo ("impacto frágil") para outro mais alto ("impacto dúctil") como dito por MSPC – Inf. Tec. Mas isso, naturalmente, é válido apenas para o corpo de prova. Não significa que, por exemplo, uma peça prática de aço com 0,6% C sofrerá sempre fratura frágil em temperatura ambiente.

1.2. POLÍMEROS

Segundo Canevarolo (2006), polímeros são macromoléculas que se caracterizam pelo tamanho, interações intra e intermolecular e estrutura química. São ligados quimicamente por ligações covalentes que se repetem ao longo da cadeia, denominadas meros. A quantidade de meros da cadeia polimérica é denominada grau de polimerização.

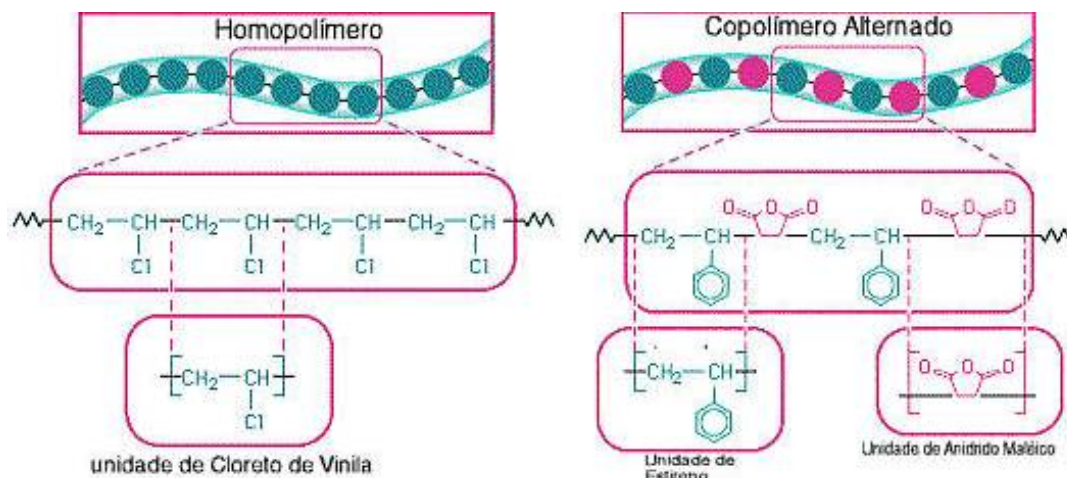
Todos os polímeros são macromoléculas, mas nem todas as macromoléculas são polímeros. Monômeros são compostos químicos suscetíveis de reagir para formar polímeros (CANEVAROLO, 2006).

Quando o polímero possui apenas um tipo de mero é classificado como homopolímero, quando possui mais que um tipo é denominado copolímero (CANEVAROLO, 2006).

Na Figura 1.15 é possível observar um exemplo de homopolímero (cloreto de vinila) em que unidade se repete enquanto no copolímero (anidrido maléico) não se repete.

Figura 1.15 – Exemplo de homopolímero e copolímero

Fonte: (<http://www.escolainterativa.com.br>).



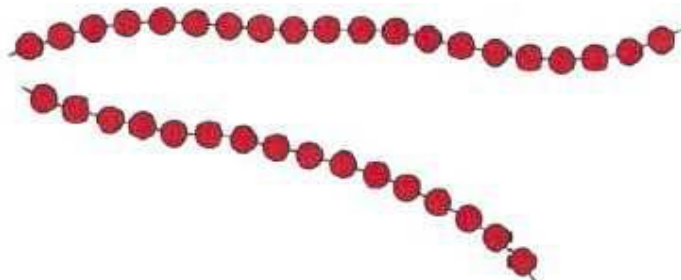
1.2.1. Estruturas Moleculares

1.2.1.1 POLÍMEROS LINEARES

Segundo Callister (2002), os polímeros lineares são estruturas onde os meros estão unidos em cadeias únicas ponta a ponta. São longas cadeias flexíveis, como se fosse uma corda. Os polímeros que se formam com estruturas lineares são vários como; o polietileno, o poliestireno, o cloreto de polivinila e outros. A Figura 1.16 mostra a estrutura de um polímero linear.

Figura 1.16 – Polímeros lineares

Fonte: (CALLISTER, 2002, p)

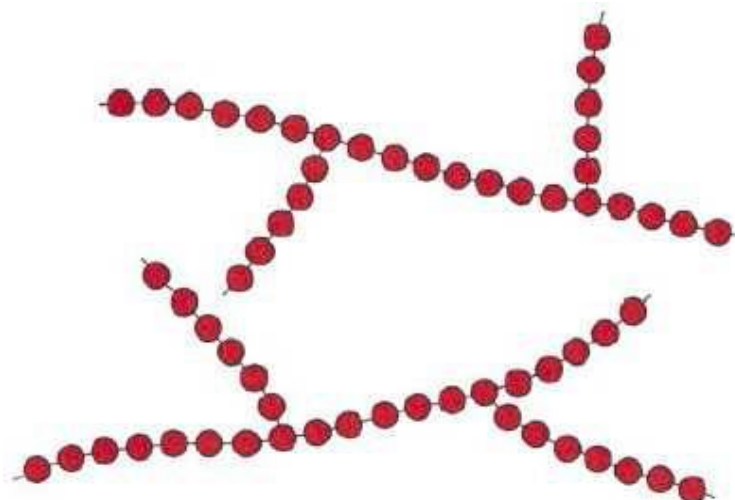


1.2.1.2 POLÍMEROS RAMIFICADOS

Para Callister (2002), os polímeros ramificados são cadeias principais que se cruzam com cadeias de ramificações laterais, isso pode ser visto na Figura 1.17. Essas ramificações são resultados das reações paralelas que ocorrem na síntese do polímero. Polímero com ramificações tem densidades menores, pois a sua eficiência na compactação reduz com as ramificações laterais.

Figura 1.17 – Cadeia ramificada

Fonte: (CALLISTER, 2002, p.)

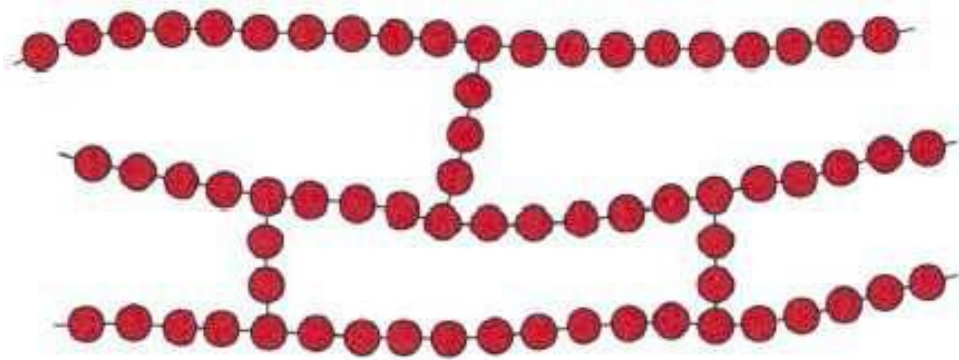


1.2.1.3 POLÍMEROS COM LIGAÇÕES CRUZADAS

Ainda para Callister (2002), polímeros com ligações cruzadas são cadeias lineares unidas umas as outras em diversas posições pelas ligações covalentes. São realizadas durante a síntese do polímero ou por reações químicas não reversíveis durante uma temperatura elevada. Materiais elásticos com característica de borracha apresentam essas ligações. A estrutura é mostrada na Figura 1.18.

Figura 1.18 – Ligação cruzada

Fonte: (CALLISTER, 2002, p.)

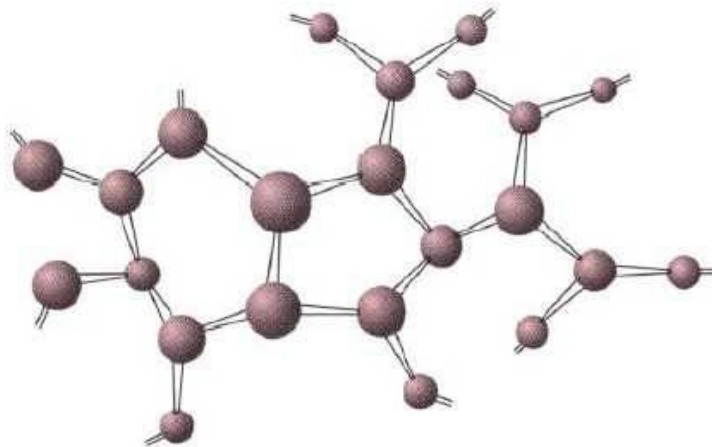


1.2.1.4 POLÍMEROS EM REDE

Segundo Canevarolo (2006), polímeros em rede são meros com três ligações covalentes ativas, formando redes tridimensionais, como ilustrado na Figura 1.19. Polímeros que tenham muitas ligações cruzadas também podem ser classificados de polímeros em rede. Materiais com essa estrutura têm propriedades mecânicas e térmicas distintas.

Figura 1.19 – Ligação em rede

Fonte: (CALLISTER, 2002, p.)



1.2.1.5 *POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS*

Segundo Shackelford (2008), os polímeros termoplásticos quando aquecidos se tornam moles e deformáveis, são características das moléculas poliméricas lineares. Essa plasticidade em temperaturas elevadas se deve à capacidade das moléculas deslizarem umas sobre as outras. Materiais termoplásticos têm uma semelhança com metais, pois ganham ductilidade quando submetidos a altas temperaturas.

Alguns exemplos de polímeros termoplásticos.

- Polietileno (PE);
- Poliestireno (PS);
- Poliamida (Náilon);
- Polipropileno (PP);
- Policloreto de vinila (PVC);
- Polietileno tereftalato (PET).

A forma como os polímeros respondem às solicitações mostra suas propriedades mecânicas. Esta resposta depende de alguns fatores como estrutura química, temperatura, tempo e condições de processamento do polímero (CANEVAROLO, 2006).

1.2.1.6 *POLÍMEROS TERMORRÍGIDOS*

Segundo Shackelford (2008), elastômeros são polímeros termorrígidos que são materiais duros e rígidos e também podem obter essas características sob o aquecimento. Diferentes dos termoplásticos, esse fenômeno não se perde com o resfriamento, que é característico das estruturas moleculares em rede formadas pelo mecanismo de crescimento em estágios. Esses estágios da reação química são acentuados pelas temperaturas altas e irreversíveis, ou seja, a polimerização permanece sob o resfriamento.

Exemplos de polímeros termorrígidos:

- Baquelite;
- Resina epóxi;
- Resinas fenólicas.

1.2.1.7 ELASTÔMETOS

Para Canevarolo (2006), polímeros que podem ser deformados a temperatura ambiente, ao menos duas vezes o seu comprimento original. Depois da retirada de carga ele volta a sua forma original. Os elastômeros são compostos por cadeias moleculares torcidas e dobradas, são materiais amorfos (sem estrutura atômica definida). Exemplo: Borracha.

1.2.2. Características do polipropileno

Desde a sua introdução em 1954, o polipropileno se tornou uma das mais importantes resinas termoplásticas da atualidade, continuando ainda como a resina de maior crescimento (BNDES, 2006).

O polipropileno é um termoplástico produzido através da formação de cadeias longas de monômero de propeno. O propeno na temperatura ambiente é um gás, mas depois de unido forma longas cadeias de moléculas denominadas polímeros, este é o polipropileno (PARMENTIER, 2007).

Algumas características do polipropileno:

- Sua densidade é uma das mais baixas entre todos os materiais poliméricos disponíveis, na faixa de $0,905 \text{ g/cm}^3$. Permitindo obter peças com baixo peso;
- Sua rigidez é elevada;
- Apresenta boa resistência ao impacto à temperatura ambiente;
- Dureza superficial alta;
- Condutividade elétrica baixa;
- Resistência química elevada, não sendo atacados pela maioria dos produtos químicos.

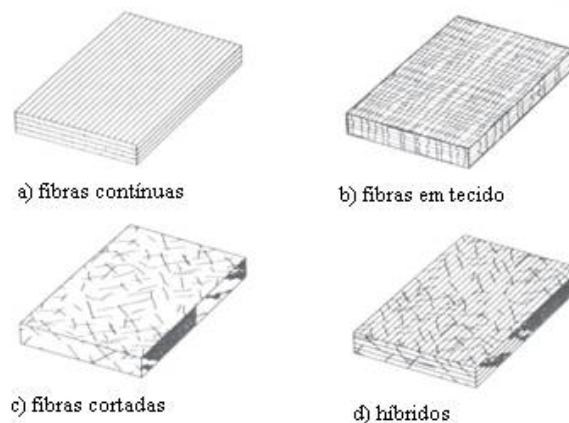
1.3. MATERIAIS COMPÓSITOS

Materiais compósitos são dois ou mais materiais combinados fisicamente (sem que haja reação química) em escala macroscópica para formar um novo material. Os materiais

compósitos se dividem em compósitos laminados, particulados e fibrosos. Os laminados constitui-se de camadas com pelo menos 2 materiais diferentes, ligadas por intermédio de uma matriz. Já os particulados compõem-se de partículas de um ou mais materiais suspensos na matriz de outro material e, por fim, os fibrosos, que são caracterizados por fibras em uma matriz.

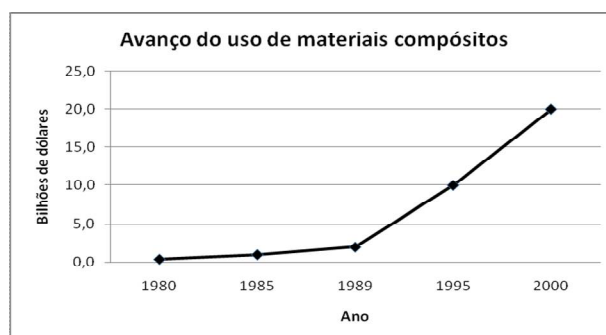
Os materiais compósitos fibrosos podem ser divididos em vários tipos conforme sua aplicação. Têm-se os compósitos de fibras contínuas, os de tecido, os de fibras cortadas e os híbridos. Esses diferentes tipos de compósitos fibrosos são ilustrados na Figura 1.20

Figura 1.20 – Diferentes tipos de compósitos



O uso desses materiais não é recente, pois as primeiras aeronaves tinham em sua estrutura partes de madeira, que é um compósito natural. Porém a produção de materiais compósitos foi iniciada na segunda guerra mundial, com a fabricação de estruturas secundárias, tais como portas e carenagens em aviões de guerra. Tais compósitos eram feitos de resina poliéster e fibra de vidro.

As fibras nos materiais compósitos são de pouca utilidade, a menos que unidas por um material ligante, denominado matriz, para formar um elemento estrutural. Esse material tem igual ou superior resistência mecânica a um similar, com a grande vantagem de ter uma baixa densidade, o que o torna de grande uso em estruturas que necessitam de baixa densidade, como é o caso de aviões, embarcações, veículos em geral. Ultimamente tem-se aumentado consideravelmente o uso desses materiais. A Figura 1.21 ilustra o avanço na aplicação de materiais compósitos nos Estados Unidos no período de 1990 a 2000.

Figura 1.21 – O aumento do uso de compósitos no período de 1990 a 2000

O desenvolvimento de fibras de vidro pela Força Aérea Americana nos Estados Unidos, fez com que esse material se tornasse altamente competitivo com outros materiais metálicos usados na indústria aeroespacial. Dessa forma o alumínio, que era um dos principais materiais utilizados nessas estruturas foi gradualmente sendo substituído pelos compósitos feitos com fibras de vidro e Kevlar. Com o crescente avanço tecnológico, processos para a produção desses compósitos ficaram cada vez mais viáveis quando comparados com outros materiais.

A partir da década de 60, os materiais compósitos de alto desempenho foram introduzidos de maneira definitiva na indústria aeroespacial. Os avanços nos compósitos criaram novas oportunidades para estruturas de alto desempenho e com baixo peso, favorecendo o desenvolvimento de sistemas estratégicos, como a área de mísseis, foguetes e aeronaves de geometrias complexas. O crescimento do uso desses compósitos é em torno de 5% ao ano. O seu uso está distribuído em 60% para o setor aeronáutico comercial, 20% para o de defesa e espaço, 10% para o recreativo, e 10% para a indústria em geral.

Neste contexto, o Brasil tem ampliado a sua aplicação em compósitos estruturais, utilizando-os em componentes externos e internos de aviões, automóveis e helicópteros e, em menor escala, em foguetes.

Para o setor de transportes, a tendência mundial mostra que a indústria automotiva será a maior usuária de compósitos poliméricos.

Em construções civis, já estão sendo muito utilizados em edificações em áreas sujeitas a abalos sísmicos. E devido a sua excelente resistência à corrosão, tem também sido muito utilizado em eletrodos de células de combustíveis. Além dessas aplicações, os materiais

compósitos também são utilizados na área médica, na confecção de próteses ortopédicas, na área esportiva, como por exemplo, em tacos de baseball, varas de pescar, estruturas de bicicletas. Uma outra área que está se beneficiando das propriedades de resistência mecânica e menor peso dos compósitos estruturais é a de construção de plataformas de petróleo e de equipamentos para extração de petróleo em alto mar.

Os desenvolvimentos em pesquisa nesta área são cada vez mais importantes, pois necessita-se de alta tecnologia para a combinação de materiais com diferentes características físico-químicas e mecânicas e pela utilização de diferentes processos de manufatura, fazendo com que haja a formação de recursos humanos cada vez mais capacitados.

1.4. PROCESSOS MECÂNICOS DE FABRICAÇÃO

Fabricar é transformar matérias-primas em produtos acabados, por uma variedade de processos (SOUZA, 2011). E também pode ser definida como a arte e a ciência de transformar os materiais em produtos finais utilizáveis (LOSEKANN, 2011).

O homem pré-histórico teve a necessidade de desenvolver operações para fabricar ferramentas, pois perceberam que suas pernas e braços não eram suficientes para se desenvolver e caçar, com o passar dos tempos desenvolveram operações para facilitar o abate, o corte e a retirada das peles de suas caças, utilizando machados e lanças (PEREIRA e RODRIGUES, 2011 apud COSTA e SANTOS, 2006).

Durante centenas de anos a pedra foi à matéria-prima, mas por volta de 4000 a.C. ele começou a trabalhar com metais, começando com o cobre, depois com o bronze e finalmente com o ferro para a fabricação de armas e ferramentas (SOUZA, 2011).

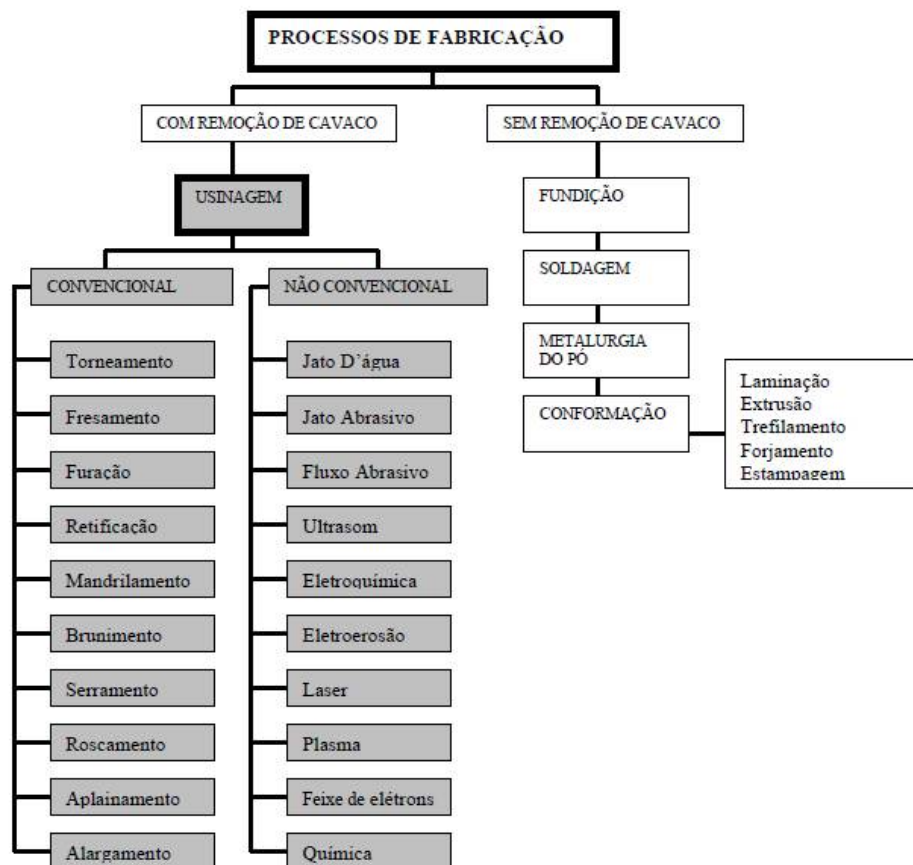
Para a seleção dos materiais, tem – se em vista as características exigidas das peças e o seu comportamento nos sistemas que farão partes (LOSEKANN, 2011). Como por exemplo, quando se deseja um simples clipe de papel por mais simples que seja sua função, é necessário desenvolver um projeto, seleção de um material adequado e de um método de fabricação para atender os requisitos de serviço do produto (PEREIRA e RODRIGUES, 2011 apud COSTA e SANTOS, 2006). Dentre uma infinidade de processos de fabricação existente, o mais utilizado é o processo de usinagem.

1.4.1. Usinagem

Consiste na remoção de partículas de material de um bloco ou forma bruta, até atingir a forma desejada. É efetuada com o auxílio de ferramentas adequadas de material duro em máquinas especiais como: tornos, plainas, fresadoras, retificadoras, etc. (LOSEKANN, 2001).

O termo usinagem também pode ser definido como sendo um processo de fabricação com remoção de cavaco. Como mostrado na Figura 1.22.

Figura 1.22 – Processos de fabricação (COSTA e SANTOS, 2006)



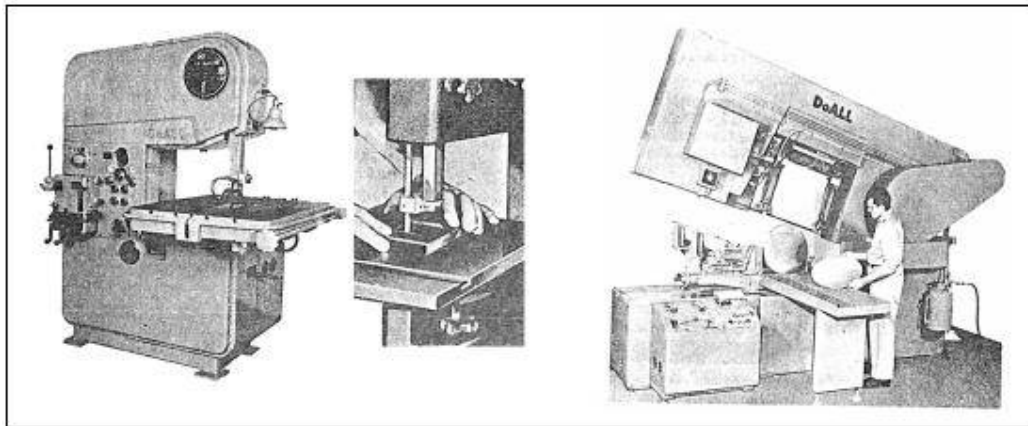
A usinagem é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos algo em torno de 10% de toda a produção de metais, e empregando dezenas de milhões de pessoas em todo o mundo (COSTA e SANTOS, 2006).

1.4.2. Operação de corte por serra fita

O corte de metais e outros materiais é uma das operações mais largamente aplicadas, sendo na maioria das vezes a primeira operação do processo de fabricação, responsável por dividir a matéria prima, que é adquirida em chapas, barras ou tarugos (JÚNIOR e SOUZA, 2013).

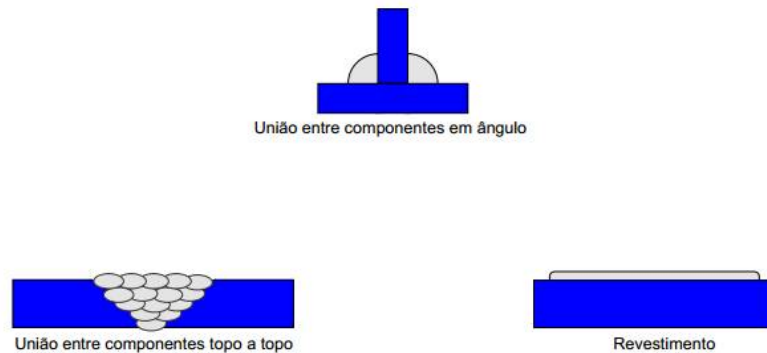
A serra de fita, também chamada de fita dentada, normalmente é adquirida em rolos e cortada no tamanho desejado. São muito utilizadas, pois além de cortar em linha reta, como nos outros tipos de serra, podem serrar contornos. Possui dispositivo para cortar, soldar, revenir e retificar a fita que pode se romper com relativa facilidade (JÚNIOR e SOUZA, 2013). A Figura 1.23 exibe uma máquina vertical à esquerda e uma horizontal à direita.

Figura 1.23 – Máquina de serra fita. Vertical à esquerda e horizontal à direita (JÚNIOR e SOUZA)



1.4.3. Soldagem

É o processo pelo qual se faz a união localizada de metais ou não-metais, produzida pelo aquecimento dos materiais a temperatura adequada, com ou sem aplicação de pressão, e com ou sem a utilização de metal de adição (COPELTEC). Existem três tipos básicos de soldagem superficial como mostra a Figura 1.24:

Figura 1.24 – Tipos de soldagem (COPECTEC)

Em uma breve explicação sobre estes três tipos de soldagem pode se dizer que:

- *União entre componentes de ângulo (solda de ângulo)* – Soldagem executada com duas ou mais chapas colocadas perpendicularmente entre si formando um ângulo.
- *Solda topo a topo* – Soldagem executada com duas ou mais chapas colocadas sobre o mesmo plano.
- *Revestimento* – Soldagem executada no metal de base com a finalidade de deixar o material resistente ao desgaste e a corrosão.

1.4.4. Torneamento

O processo que se baseia no movimento da peça em torno de seu próprio eixo e a ferramenta de corte executa o movimento de avanço chama-se torneamento. O torneamento é uma operação de usinagem que permite trabalhar peças cilíndricas movidas por um movimento uniforme de rotação em torno de um eixo fixo. Quanto à forma da trajetória, o torneamento pode ser retilíneo ou curvilíneo (SOUZA, 2011):

- *Torneamento retilíneo* – Processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea. O torneamento retilíneo pode ser: cilíndrico, cônico, radial ou de perfil.
- *Torneamento curvilíneo* – Processo de torneamento, no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória curvilínea.

E por ser uma operação muito utilizada pela indústria mecânica por efetuar várias formas geométricas, além de sua alta remoção de cavaco, o torneamento pode ser classificado

em torneamento de desbaste e acabamento (PEREIRA e RODRIGUES, 2011 apud AGOSTINHO e BUTTON, 2004):

- *Desbaste* – Retirar grandes quantidades de material da peça com valores altos de avanço e profundidade de corte.
- *Acabamento* – Confeccionar peças com precisão mais elevada e melhor acabamento superficial, realizados com baixos valores de avanço e profundidade de corte.

A sequencia de Figuras de 1.25 à 1.27 mostram um torno convencional, os vários tipos de torneamento e suas partes e as ferramentas aplicadas no torno respectivamente.

Figura 1.25 – Torno convencional (PEREIRA e RODRIGUES, 2011)

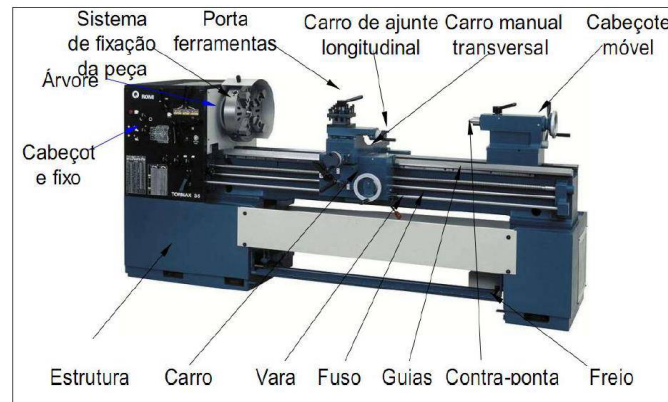


Figura 1.26 – Tipos de torneamento e suas partes (PEREIRA e RODRIGUES, 2011)

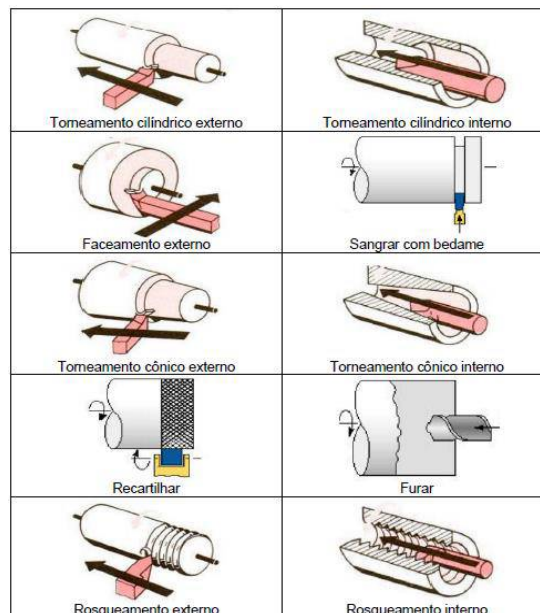


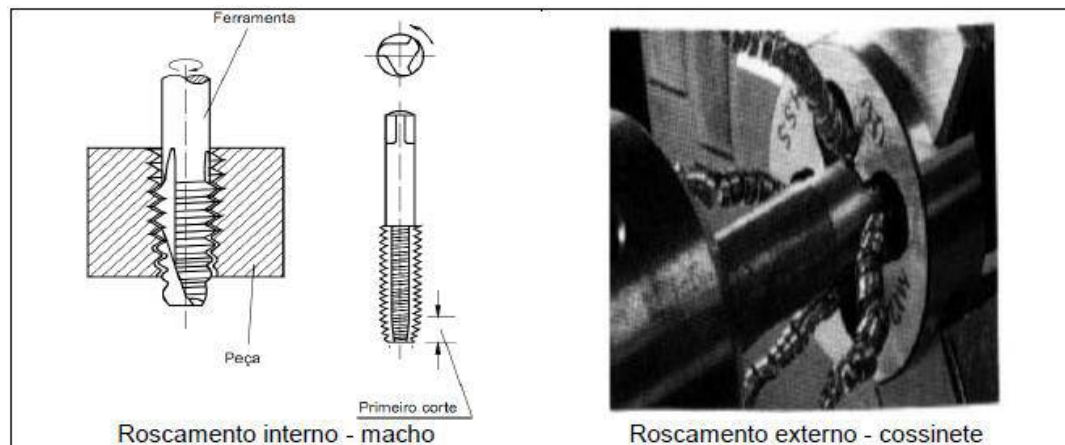
Figura 1.27 – Ferramentas aplicadas no torno convencional (PEREIRA e RODRIGUES, 2011)

1.4.5. Roscamento

O roscamento é um processo mecânico, de usinagem ou conformação, que se destina à obtenção de filetes com perfis roscados, por meio da abertura de um ou mais sulcos helicoidais de passo uniforme, em superfícies cilíndricas ou cônicas de revolução (CARVALHO, 2011). Sua usinagem pode ser interna ou externa (PEREIRA e RODRIGUES, 2011 apud LOSEKANN, 2001):

- *Roscamento interno utilizam-se machos* – ferramentas de corte, com rosca similar a um parafuso com três ou quatro ranhuras longitudinais retas ou helicoidais.
- *Roscamento externos utilizam-se cossinetes* – ferramentas de corte, com rosca similar a uma porca, com cortes paralelos dispostos em torno de um furo central.

Essas ferramentas possuem padrões determinados por normas, para determinar diâmetros e passos-de-roscas a serem utilizadas nas usinagens e nos reparos. As comumente usadas são a DIN e a SI (PEREIRA e RODRIGUES, 2011). A Figura 1.28 mostra essas ferramentas e suas funções.

Figura 1.28 – Ferramentas de roscar (PEREIRA e RODRIGUES, 2011)

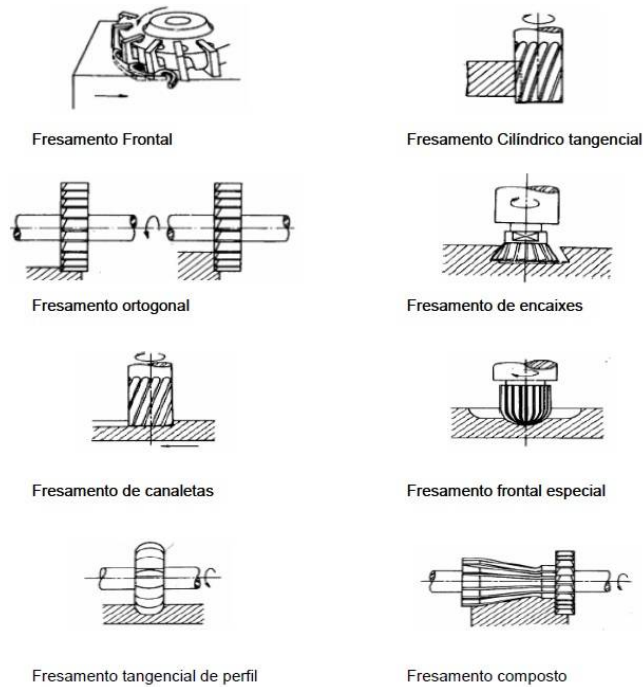
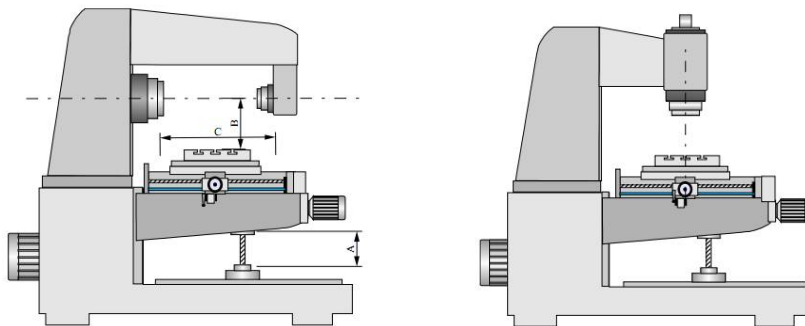
1.4.6. Fresamento

Fresadoras são máquinas de movimentos contínuos destinados à usinagem de materiais, onde se removem os cavacos por meio de uma ferramenta de corte chamada fresa, a operação de retirada de cavacos é chamada de fresamento, tanto a ferramenta quanto a peça se desloca em mais de uma direção, ao mesmo tempo. (CHIAVERINI, 1986).

A Figura 1.29 mostra os tipos de fresamento que são classificados em vários formatos de geometrias e superfícies obtidas pelo processo e também há várias formas construtivas de fresadoras convencionais, sendo duas de uso comum (BORGES, 2009): a fresadora vertical (ferramenteira) e a fresadora horizontal (universal). Tais fresadoras estão ilustradas na Figura 1.30.

Figura 1.29 – Tipos de fresamento

Fonte: (MARIO E. S. M, 2001)

**Figura 1.30** – Tipos de fresadoras

1.5. ENSAIO DE TRAÇÃO

1.5.1. Máquina de Ensaio de Tração

A função básica de uma máquina universal (realiza ensaio de tração, compressão, flexão) é criar um diagrama baseado em informações como tensão versus deformação. Uma

vez absorvido estes dados pode-se calcular a tensão de escoamento via um algoritmo computacional acoplado. Neste caso, são também calculados o módulo de elasticidade, a tensão limite de ruptura e o alongamento total. Podem ser encontrados dois modelos desta máquina universal a de funcionamento eletromecânica ou de funcionamento hidráulico (SENGEMEC, 2012). Na Figura 1.31 é ilustrado um modelo eletromecânico da máquina de ensaios.

Figura 1.31 – Máquina de ensaio de tração universal
Fonte: Autoria própria



No ensaio de tração aplica-se uma carga crescente em um corpo de prova devidamente até ocorrer à ruptura. A carga é aplicada uniaxialmente e é realizada a observação e o registro simultâneo do alongamento sofrido pelo corpo de prova. Esses corpos de prova são geralmente de seção retangular ou circular e seus ensaios são feitos em máquinas que dispõem de dispositivos de fixação apropriados que auxiliam na aplicação da carga, de forma a não permitir qualquer tipo de escorregamento durante o ensaio (PARMENTIER, 2007).

Nas máquinas de ensaio de tração, a carga é aplicada mediante o deslocamento de uma das garras onde o corpo de prova se encontra fixado. Mede-se a carga durante o ensaio utilizando células de carga que podem conter extensômetros elétricos devidamente calibrados (PARMENTIER, 2007).

A tensão aplicada versus o deslocamento sofrido pelo corpo de prova é registrada em um computador através de um programa, onde se obtêm a curva do ensaio (PARMENTIER, 2007).

1.5.2. Propriedades Obtidas no Ensaio de Tração

1.5.2.1 TENSÃO NORMAL

A força pela unidade de área ou a intensidade das forças distribuídas numa certa seção transversal é chamada de tensão (BEER, 1995).

A tensão é indicada pela letra grega σ (sigma), sua unidade no Sistema Internacional é expressa em Pascal (N/m²) (BEER, 1995). A Equação 1.3 é dada logo a seguir.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1.3)$$

Onde:

σ = Tensão Normal.

F = Força Normal.

A = área da seção transversal.

1.5.2.2 DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA

Ainda Segundo Beer e Russel (1995), depois que aplicada uma força ao material ele muda sua forma e seu tamanho, isso é chamado de deformação.

Deformação específica é dada pela variação de comprimento da barra pelo comprimento inicial, como mostrado na Equação 1.4.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1.4)$$

Onde:

ϵ = deformação específica;

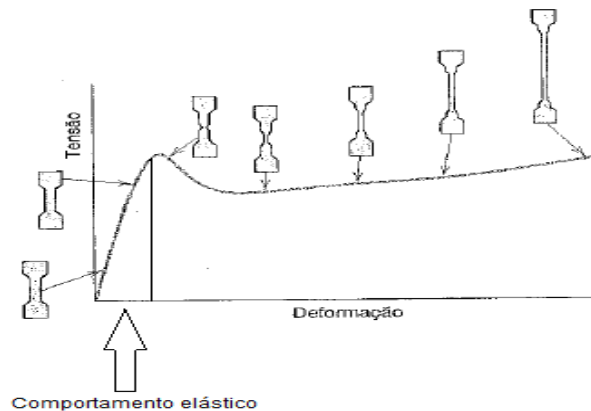
ΔL = variação de comprimento;

L_0 = comprimento inicial.

1.5.2.3 ÁREA DE COMPORTAMENTO ELÁSTICO

Segundo Hibbeler (2004), a região de comportamento elástico se refere a uma parte da curva tensão versus deformação, que se aplicado uma carga no material e depois retirá-la o mesmo voltará ao seu formato original, ou seja, sem mudar suas dimensões nem suas propriedades. Nessa região é válida a Lei de Hooke. Na Figura 1.32 é mostrada uma ilustração da região elástica do material.

Figura 1.32 – Região de comportamento elástico
Fonte: (CALLISTER, 2002)



LEI DE HOOKE

Para Beer e Russel (1995), a maioria dos materiais ensaiados em níveis de tensões relativamente baixas que não ultrapassem a região de comportamento elástico, a tensão e a deformação específica dos mesmos são diretamente proporcionais. Essa relação é conhecida como a Lei de Hooke, e deve-se ao matemático Robert Hooke. O coeficiente E é conhecido

como módulo de elasticidade do material, ou módulo de Young. Já que a deformação específica ε é adimensional, o módulo de elasticidade tem a mesma unidade da tensão σ , dada por Pascal (N/m²) no Sistema Internacional. Segue a Equação 1.5 da Lei de Hooke.

$$\sigma = E.\varepsilon \quad (1.5)$$

Onde:

σ = Tensão;

E = Módulo de elasticidade;

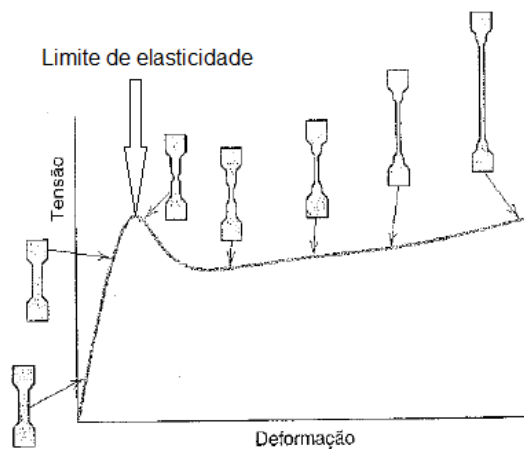
ε = Deformação específica.

LIMITE DE ELASTICIDADE

Para Nash (1982), limite de elasticidade representa tensão máxima que pode se aplicar no material sem que apareçam deformações residuais, ou permanentes, depois que se retira a carga externa. Para muitos materiais com o início do escoamento bem definido no gráfico de tensão versus deformação específica, os limites de elasticidade e de proporcionalidade coincidem com a tensão de escoamento, conforme na Figura 1.33, em termos são empregados como sinônimos. Nesta fase os materiais obedecem a Lei de Hooke.

No caso dos polímeros termoplásticos a tensão de escoamento é tomada como sendo um valor máximo na curva, o que ocorre imediatamente após o término da região elástica (CALLISTER, 2002).

Figura 1.33 – Limite de elasticidade
Fonte: (CALLISTER, 2002, p.)



COEFICIENTE DE POISSON

Segundo Hibbeler (2004), o cientista francês S. D. Poisson no século XIX notou que na região de elasticidade a divisão entre as deformações (lateral e longitudinal) é uma constante, onde as deformações no comprimento da barra e a deformação no raio são diretamente proporcionais. A constante em específico é denominada de coeficiente de Poisson. Sua formula é expressa pela Equação 1.6:

$$\nu = - \frac{\epsilon_{lat}}{\epsilon_{long}} \quad (1.6)$$

Onde:

ν = coeficiente de Poisson;

ϵ_{lat} = deformação específica lateral;

ϵ_{long} = deformação específica longitudinal.

Usa-se o sinal negativo, pois o alongamento longitudinal (deformação positiva) provoca contração lateral (deformação negativa) (HIBBELER, 2004).

A deformação lateral é igual em todas as direções laterais, e também ela é provocada somente pela força longitudinal ou a força axial, ou seja, não tem forças atuando na direção lateral para deformar nessa direção o material (CALLISTER, 2002). Segue abaixo a Tabela 1.1, com o coeficiente de Poisson de alguns polímeros.

Tabela 1.1 – Coeficiente de Poisson de alguns polímeros
Fonte: (CALLISTER, 2002, p.)

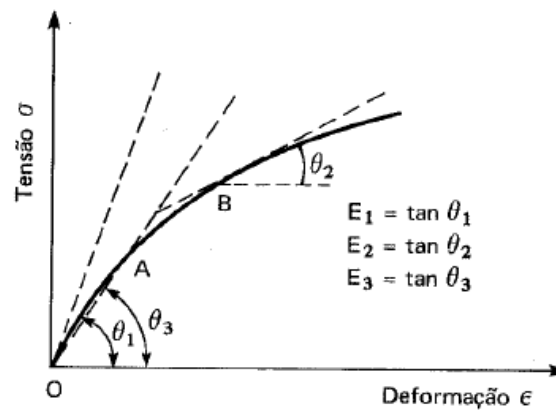
Material	Coeficiente de Poisson
Cloreto de polivinila (PVC)	0,38
Náilon	0,39
Polipropileno	0,41
Poliestireno	0,33

MÓDULO DE ELASTICIDADE

Segundo Souza (1982), cada material tem um módulo de elasticidade constante. A medida da rigidez de um material é denominado módulo de elasticidade. Quanto maior seu módulo, menor será sua deformação elástica, e por sua vez mais rígido será o material.

A medição do módulo de elasticidade E é realizada pela tangente da reta característica da região elástica, traçando-se a curva tensão por deformação específica na região elástica com a precisão maior possível em corpos de prova criados conforme normas. Caso essa reta seja muito pequena, ou mesmo inexistente na prática, pode-se medir o módulo de elasticidade pela tangente da reta que é tangente à curva no ponto O da origem ou num ponto B especificado da curva ou ainda pela tangente da reta que é secante à curva, que vai do ponto O ao ponto A especificado da curva, (SOUZA, 1982). A Figura 1.34 ilustra o conceito.

Figura 1.34 – Determinação de E para materiais com zona elástica não linear
Fonte: (SOUZA, 1982, p.)



1.5.2.4 REGIÃO DE COMPORTAMENTO PLÁSTICO

Segundo Callister (2002), até uma determinada tensão o material tem um comportamento elástico, depois dessa região ele já começa a sofrer uma deformação plástica, ou seja, se for retirada a tensão no material, ele sofrerá uma deformação permanente não voltará à sua forma original.

Analisando a microestrutura atômica, na deformação plástica acontece uma quebra de ligações com átomos vizinhos logo em seguida ocorre uma formação de novas ligações com novos átomos, certo que um grande número de átomos se move uns em relação aos outros, retirando a tensão, não conseguem retornar as suas posições (CALLISTER, 2002).

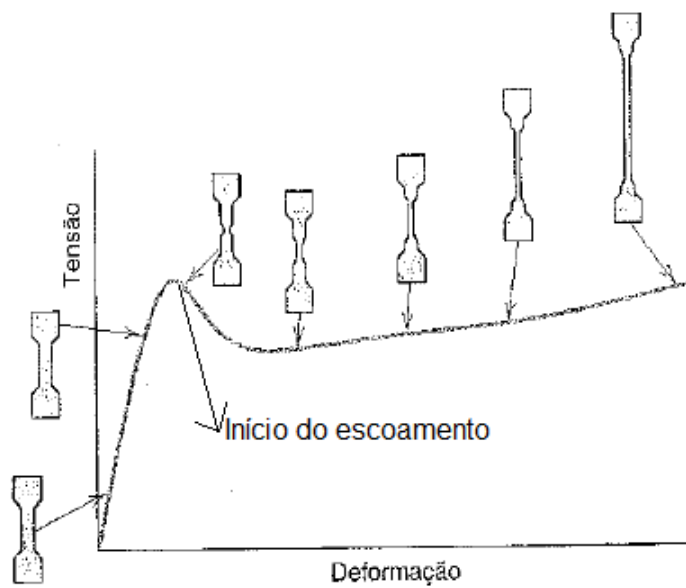
ESCOAMENTO

Segundo Hibbeler (2004), o escoamento é uma região onde uma pequena tensão causa um deslocamento elevado, e essa região tem uma deformação permanente. Essa região localiza-se logo no início da deformação plástica. O limite de escoamento nada mais é que a tensão que provoca o escoamento do material.

Na Figura 1.35 estão incluídas as representações esquemáticas do perfil do corpo de prova durante vários estágios da deformação. Ficam evidentes a partir dessa curva os limites de escoamento superior e inferior, os quais são seguidos por uma região praticamente horizontal.

No limite de escoamento superior, forma-se um pequeno pescoço na seção útil do corpo de prova. Dentro do pescoço, as cadeias vão se tornando orientadas (eixos da cadeia ficam alinhados paralelamente à direção do alongamento), levando ao aumento de resistência localizado. Conseqüentemente, neste ponto existe uma resistência à continuidade da deformação, e o alongamento do corpo de prova segue pela propagação desse pescoço ao longo da seção útil. Uma vez que um pescoço é formado, toda deformação subsequente fica confinada no interior dessa região empescoçada (CALLISTER, 2002).

Figura 1.35 – Limite de escoamento
Fonte: (CALLISTER, 2002, p.)



Segundo Souza (2004), quando se vai realizar algum tipo de ensaio em um material o importante é focar o teste nas especificações do material, e principalmente o método do ensaio que será proporcionado ao corpo de prova a ser analisado. Tendo em vista que o mesmo ensaio possa ser realizado em qualquer lugar e que seus resultados cheguem o mais perto possível do real. Segue agora algumas instituições que fornecem as normas utilizadas em vários laboratórios de análises:

- *ABNT* - Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- *ASTM* - American Society for Testing and Materials;
- *DIN* - Deutsches Institut für Normung;
- *AFNOR* - Association Française de Normalisation;
- *BSI* - British Standards Institution;
- *ASME* - American Society of Mechanical Engineer;
- *ISO* - International Organization for Standardization;
- *JIS* - Japanese Industrial Standards;
- *SAE* - Society of Automotive Engineers;
- *COPANT* - Comissão Panamericana de Normas Técnicas.

1.6. CORPOS DE PROVA

A confecção dos corpos de prova para os ensaios, bem como uma correta e minuciosa atenção às dimensões e acabamento dado são fundamentais no processo de retirada de dados, principalmente em ensaios destrutivos.

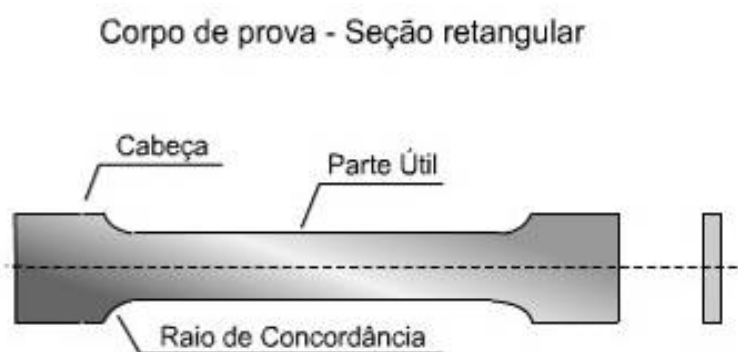
Para cada tipo de ensaio, os corpos de provas deverão ser preparados seguindo modelos rígidos de confecção. A seguir, uma análise nas dimensões de corpos de provas para o ensaio de tração e ensaio Charpy foram realizados.

1.6.1. Tração

Segundo Souza (2004), no ensaio de tração o corpo de prova tem que estar em perfeito acabamento em todas as partes, pois qualquer alteração pode levar a resultados

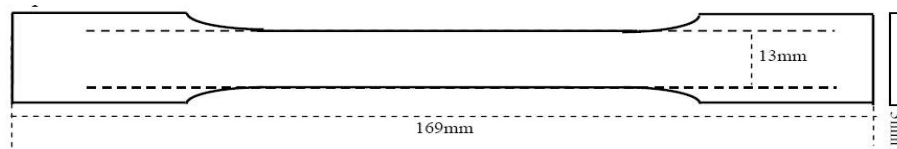
muitos diferentes como, por exemplo, se a cabeça do corpo de prova for mal fixada ou fixada de maneira errada, poderá mudar o ponto que o material irá distribuir a força. Na parte útil o mau acabamento pode deixar trincas facilitando a ruptura antecipada do material. Na Figura 1.36 são mostradas as partes do corpo de prova retangular, onde a parte útil é a porção efetivamente utilizada para medição do alongamento e a cabeça são as extremidades, cuja função é permitir a fixação do corpo de prova na máquina de ensaio (SOUZA, 2004).

Figura 1.36 – Corpo de prova característico de um ensaio de tração
Fonte: (SENGEMEC, 2012)

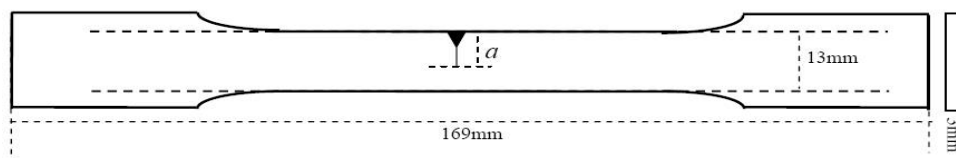


Ainda segundo Souza (2004), utilizando as normas da ABNT, se possível o comprimento do corpo de prova deve medir cinco vezes o valor do seu diâmetro. Respeitando um acordo internacional sempre que possível, a parte útil de um corpo de prova deve medir dez milímetros de diâmetro e cinquenta milímetros de comprimento. Caso não haja forma de extrair um corpo de prova nestas medidas, utilizar medidas mais próximas e proporcionais às citadas anteriormente.

O ensaio de tração realizado segundo a norma internacional ASTM E399 (1990) é realizado em uma máquina de ensaio universal Emic DL 200 (Figura 1.37) com célula de carga de 50 Kgf com uma velocidade de 1 mm/min, utilizando corpo de prova como ilustrado na Figura 1.38.

Figura 1.37 – Máquina utilizada para o ensaio de tração**Figura 1.38** – Formato dos corpos de prova utilizados para o ensaio de tração

Pode-se introduzir uma trinca no corpo de prova utilizando-se serras e lâminas para a determinação do K1C, utilizando-se a norma ASTM E399 (1990) por tração, como ilustrado na Figura 1.39.

Figura 1.39 – Formato dos corpos de prova para o ensaio de tração com entalhe

A confecção dos corpos é realizada através de moldes, como mostra a Figura 1.40, deve-se tomar cuidado com confeccionamento de corpos de provas, principalmente em amostras não metálicas pois podem ocorrer defeitos estruturais, como é o caso de micro bolhas ou aparecimento de trincas quando se lida com variação de temperatura. Um tipo de amostra de polímeros pode ser visto na Figura 1.41.

Figura 1.40 – Molde para a preparação dos corpos de prova, ensaio de tração



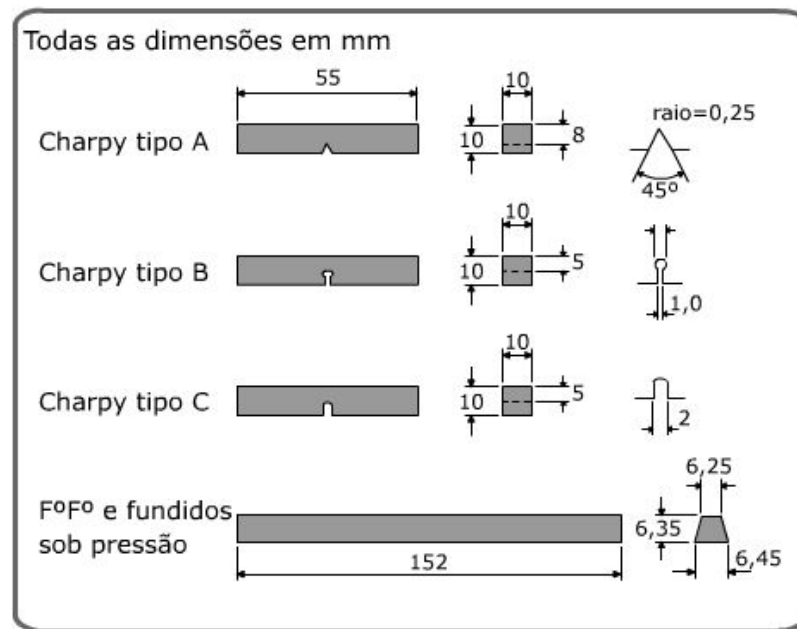
Figura 1.41 – Corpo de prova característico de um ensaio de tração



1.6.2. Charpy

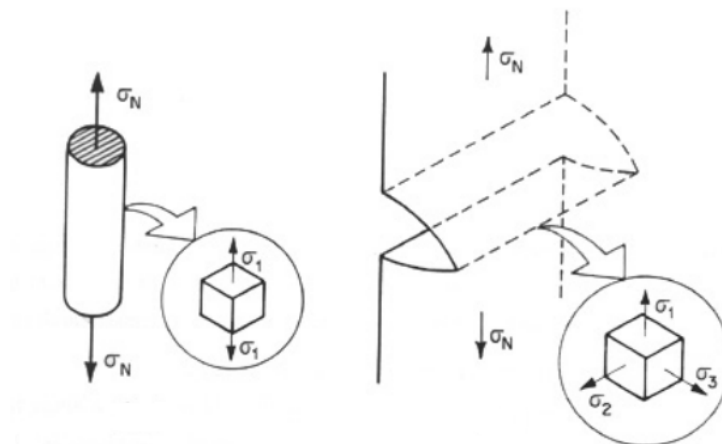
Nos ensaios de impacto, os corpos de prova são entalhados com amostras dos materiais a serem submetidos ao impacto, sobre temperaturas conhecidas em uma posição horizontal numa máquina pendular, os resultados apresentados são obtidos na forma de energia absorvida pelo corpo de prova durante o impacto (NOGUEIRA, 2006).

A Figura 1.42 mostra que os corpos de prova para os ensaios de impacto Charpy possuem uma variedade na geometria, porém são normalizados pela ASTM E 23 (*American Society for Testing and Materials*).

Figura 1.42 – Tipos de corpos de provas Charpy

Na execução do ensaio Charpy, o corpo de prova é apoiado nas suas extremidades como uma viga simples bi-apoiada que é golpeada no lado oposto do entalhe, o efeito desse tipo de tensionamento é triaxial (Delforge, 1994).

Segundo Nogueira (2006), estado de tensão triaxial de um entalhe resulta numa espécie de endurecimento por entalhe, por que introduz uma forte restrição ao escoamento plástico. Na figura 1.43, um corpo de prova com entalhe e o outro sem, para ilustrar o entendimento do assunto.

Figura 1.43 – Estados das tensões nos corpos de provas com e sem entalhe

1.7. ABORDAGEM NUMÉRICA

Os métodos computacionais foram inicialmente desenvolvidos na década de 1960 para resolver equações lineares e com interface bidimensional. No decorrer dos anos, os computadores possibilitaram o desenvolvimento de métodos tridimensionais e posteriormente, na década de 1970, resolução de equações de comportamento não-linear. Simulações eram restritas. Apenas supercomputadores tinham capacidade de resolver métodos e equações. Graças à evolução da informática e desenvolvimento de *software* com interfaces mais amigáveis, hoje, a simulação computacional é difundida em diversas áreas.

Dentre as vantagens da utilização de ferramentas computacionais de simulação numérica, estão:

- Baixo custo de aquisição e operação, já que as tecnologias computacionais vêm se tornando cada vez mais acessíveis ao longo dos anos.
- Oferecem informações detalhadas sobre o estudo, com relativa facilidade de acesso aos dados de saída;
- Permitem a rápida mudança de parâmetros, otimizando a análise e interpretação;
- Podem simular detalhamento realístico da geometria em estudo; e
- Permitem o estudo de fenômenos de risco, sem oferecer risco ao usuário.

A abordagem numérica que será utilizada na Tese será através do software comercial **ANSYS**, que é um software que tem liderado a evolução das ferramentas de simulação virtual baseadas na tecnologia de Elementos Finitos. Dentre os cuidados que devem ser adotados na simulação numérica pelo método dos elementos finitos, corresponde quanto à escolha da densidade da malha utilizada no modelo em estudo (BILESKEY, 2010). Assim, discorre-se a seguir o que é e como funciona a ferramenta matemática chamada Elementos Finitos.

1.7.1 Elementos Finitos

O método dos elementos finitos é uma importante ferramenta computacional para executar cálculos que na prática seriam muitos difíceis ou mesmo impossíveis. As suas primeiras aplicações tiveram início na década de 1950.

O método dos elementos finitos (MEF ou FEM em inglês (Finite Element Methode)) é uma forma de resolução numérica de um sistema de equações diferenciais parciais.

O método encontra aplicações em diversos campos: Mecânica estrutural, Mecânica dos fluidos, Eletromagnetismo, Etc.

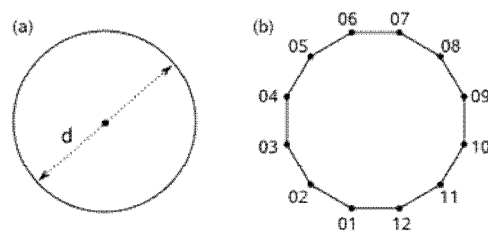
Até certa época, o processamento só podia ser feito nos caros *mainframes* e, por isso, o uso era restrito a grandes empresas, centros de pesquisa, instalações militares. Com a evolução da capacidade e a redução de custos dos computadores, as aplicações do método se expandiram e se tornaram cada vez mais precisas e sofisticadas.

De início era usado quase sempre no cálculo de estruturas de engenharia e atualmente é aplicado em áreas diversas como transferência de calor, escoamento de fluidos, eletromagnetismo e muitas outras.

Uma breve analogia para o método pode ser vista na Figura 1.44: supõe-se que se deseja determinar a relação entre o perímetro e o diâmetro de uma circunferência, isto é, o número π . No desenvolvimento matemático tradicional, chega-se a uma série de infinitos termos e o número π pode ser calculado com a quantidade de casas decimais que for necessária.

Um meio mais compatível com processos computacionais pode ser visto em (b) da Figura 1.44: a circunferência é considerada uma sucessão de elementos, isto é, de segmentos de reta de mesmo comprimento formando um polígono regular. O comprimento total desses elementos é uma aproximação para o perímetro, aproximação esta tanto melhor quanto maior o número de elementos.

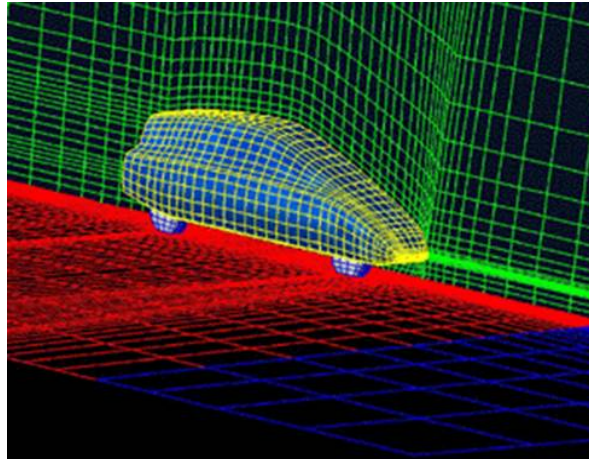
Figura 1.44 – Analogia MEF



Há de se notar que esse método pode ser aplicado ao cálculo do comprimento de uma curva genérica dada por uma sucessão de pontos, ao passo que o processo contínuo tradicional exige o conhecimento da sua função matemática, o que nem sempre é possível ou fácil em muitos casos práticos.

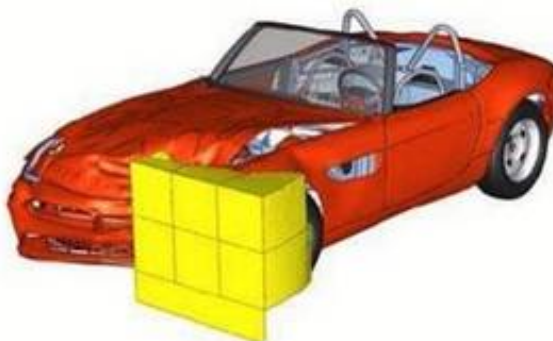
Geralmente no início do projeto, são definidos pela Engenharia Automotiva alguns valores que servirão como base para o desenvolvimento do mesmo como: Torção e Flexão de Carroceria, Frequência Natural, Níveis de ruídos (Acústica) bem como níveis de segurança a serem atingidos. A Figura 1.45 mostra o modo de utilização do MEF em simulações.

Figura 1.45 – Modo de utilização do MEF em carrocerias



O método de elementos finitos (FEM) é uma das ferramentas mais usadas na análise de estruturas complexas na engenharia mecânica, na engenharia veicular, aeroespacial e na engenharia civil. É usado tanto para tarefas rotineiras como cálculos de análise de forças, de estabilidade e de vibração estrutural, como também para a análise de problemas mais complexos como, por exemplo, problemas de deformação que incluem o comportamento do material plástico, como é necessário na simulação de uma colisão de veículos (*Crashtest* Figura 1.46).

Figura 1.46 – Ilustração da utilização da ferramenta MEF em *Crashtest*



O método de elemento finito (muitas vezes referido como a análise de elemento finito) é uma técnica numérica para encontrar soluções aproximadas das equações diferenciais parciais assim como de equações integrais. A aproximação da solução é baseada em eliminar a equação diferencial completamente, ou em aproximar as equações diferenciais parciais em um sistema de aproximação de equações diferenciais ordinárias, que são resolvidas então usando técnicas padrão tais como o método de Euler, o Runge-Kutta, etc.

Antes mesmo do Advento do CAD (Computer-Aided Design) a Mercedes-Benz utilizou um programa próprio chamado ESEM.

Hoje no mercado há inúmeros sistemas disponíveis que executam o cálculo do FEM, os mais conhecidos são: PERMAS, NASTRAN, ABAQUS, DYNA3D e é claro, o maior e mais famoso deles, o ANSYS.

A vantagem de se utilizar o FEM está no fato de se permitir o cálculo de estruturas de qualquer nível de complexidade; na facilidade de analisar várias variantes, no fato de que são consideradas as propriedades anisotrópicas e não lineares dos materiais e na facilidade que os programas tem de conversarem com outros programas CAD/CAM. Hoje por exemplo, o CATIA V5 já dispõem de um módulo que executa o FEM para pequenas peças.

O FEM também tem algumas limitações; a precisão dos resultados depende do tipo de elemento e do nível de decomposição da estrutura, juntas soldadas não são reproduzidas com exatidão e alterações de espessura de chapa e as características de materiais para peças com repuxo profundo não são consideradas.

Na construção de carrocerias automotivas, o FEM é utilizado na análise de resistência de peças individuais e de seções de carroceria sujeitas á sobrecargas especiais, como por exemplo, o sistema de fixação do eixo traseiro nas longarinas.

Estes ensaios têm como objetivo verificar se a secção analisada dispõe de resistência suficiente para atender as exigências de campo ou se há necessidade de se alterar o projeto para a redução de tensões.

Pode ainda ser utilizado na análise do comportamento dinâmico da carroceria ou ainda no caso de uma colisão. Normalmente todos os fabricantes de veículos realizam ensaios de acidentes (impacto frontal, lateral, traseiro e capotagem) para verificar se os veículos atendem as normas para os quais estes se destinam.

Primeiro executa-se a análise em computador e depois verifica-se in loco se o comportamento é condizente com os ensaios realizados virtualmente.

O FEM também é utilizado na análise dos sistemas de proteção dos ocupantes (Figura 1.47), neste caso em conjunto com outro Software ele pode ser utilizado tanto no projeto como na otimização dos sistemas de retenção e acolchoamento.

Figura 1.47 – Ilustração da utilização da ferramenta MEF em sistemas de proteção



Diferente do que se pode pensar o Método de Elementos Finitos é utilizado em vários níveis no projeto. Pode-se fazer uma pré-avaliação da estampagem de uma peça, verificando-se quantos estágios seriam necessários para obtê-la sem comprometer a sua estrutura individual. Pode-se ainda simular a injeção de peças plásticas.

E antes mesmo do primeiro protótipo ser construído pode-se realizar a simulação Acústica, simular oscilações de Temperatura no veículo bem como testes de durabilidade, túnel de vento e etc.

1.7.2 Tipo de análise em Elementos Finitos

Quando surge a necessidade de resolver um problema de análise de uma estrutura, a primeira questão que se coloca é a sua classificação quanto à geometria, modelo do material constituinte e ações aplicadas. O modo como o MEF é formulado e aplicado depende, em parte, das simplificações inerentes a cada tipo de problema. Referem-se em seguida alguns aspectos que deve levar em consideração na fase que antecede a análise de uma estrutura.

1.7.2.1 ANÁLISE DINÂMICA OU ESTÁTICA

As ações sobre as estruturas são em geral dinâmicas, devendo ser consideradas as forças de inércia associadas às acelerações a que cada um dos seus componentes fica sujeito. Por este motivo, seria de esperar que a análise de uma estrutura teria obrigatoriamente de ter em consideração os efeitos dinâmicos. Contudo, em muitas situações é razoável considerar que as ações são aplicadas de um modo suficientemente lento, tornando desprezáveis as forças de inércia. Nestes casos a análise designa-se estática. Nesta tese apenas são considerados problemas em que se supõem válidas as simplificações inerentes às análises realizadas.

1.7.2.2 ANÁLISE NÃO LINEAR OU LINEAR

Na análise de uma estrutura sólida, é habitual considerar que os deslocamentos provocados pelas ações exteriores são muito pequenos quando comparados com as dimensões dos componentes da estrutura. Nestas circunstâncias, admite-se que não existe influência da modificação da geometria da estrutura na distribuição dos esforços e das tensões, todo o estudo é feito com base na geometria inicial indeformada. Se esta hipótese não for considerada, a análise é designada não linear geométrica.

É também freqüente considerar que, ao nível do material que constitui a estrutura, a relação entre tensões e deformações é linear. Nos casos em que esta simplificação não é considerada, é necessário recorrer a algoritmos específicos de análise não linear material dentro do próprio programa computacional utilizado.

1.7.2.3 TIPO DE ESTRUTURA

As estruturas podem ser classificadas quanto à sua geometria como reticuladas, laminares ou sólidas. Estas últimas são as mais genéricas, sendo classificadas como sólidas as que não apresentarem características que as permitam enquadrar no grupo das laminares ou das reticuladas.

As estruturas laminares são as que se desenvolvem para ambos os lados de uma superfície média, mantendo-se na sua vizinhança. É o caso de uma lâmina cuja espessura é muito inferior às restantes dimensões. Quando a superfície média é plana, a estrutura laminar pode ser classificada como parede, laje ou casca plana. Uma parede apenas se encontra sujeita a ações paralelas ao seu plano médio. Uma laje pode ter aplicadas forças perpendiculares ao plano médio e momentos cujo vetor está contido no plano médio. Uma estrutura laminar plana sujeita a outros tipos de ações é designada casca plana. Quando a superfície média não é plana, tem-se uma casca tridimensional.

As estruturas reticuladas são as constituídas por barras prismáticas, cujas dimensões transversais são muito menores do que o comprimento do respectivo eixo. Neste tipo de estruturas é habitual distinguir os pórticos das treliças, conforme é ou não considerada a compatibilidade de rotações nas extremidades de barras adjacentes.

É possível tratar com grande eficiência uma classe de problemas de análise de estruturas designados assimétricos. Estes ocorrem quando a estrutura é um sólido de revolução e as ações são todas assimétricas em relação ao mesmo eixo. Neste tipo de problemas é ainda possível distinguir o caso do sólido de revolução do caso da lâmina de revolução.

1.7.3 Fundamentos do MEF

A formulação do MEF requer a existência de uma equação integral, de modo que seja possível substituir a integral sobre um domínio complexo (de volume V) por um somatório de integrais estendidos a subdomínios de geometria simples (de volume V_i).

Esta técnica é ilustrada (Equação 1.7) com o seguinte exemplo, que corresponde a integral de volume de uma função f .

$$\int_V f \, dV = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} f \, dV \quad (1.7)$$

Pressupondo que seja verdade a Equação 1.8:

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (1.8)$$

Se for possível calcular todas as integrais estendidas aos subdomínios V_i , basta efetuar a somatória correspondente ao segundo membro da primeira equação para se obter a integral estendida a todo domínio. Cada subdomínio V_i corresponde a um elemento finito de geometria simples (segmento de reta, triângulo, quadrilátero, tetraedro, paralelepípedo).

1.7.4 Etapas na Utilização do MEF

Segundo Parmentier (2007), a primeira etapa a se realizar na análise por elementos finitos é a construção da geometria com as dimensões do corpo de prova que será analisado. Isso requer certo entendimento técnico do usuário para essa construção.

Ainda segundo Parmentier (2007), o próximo passo para a análise é a adição dos carregamentos, as restrições e o material do corpo de prova.

No programa pode se escolher diversos tipos de carregamento, como cargas concentradas, ou cargas distribuídas sobre certa área. Nas restrições também existem diversas opções. Elas podem ser fixas, com movimento em alguma direção e restrição nas outras, imóveis, rolantes ou deslizantes entre outras opções (PARMENTIER, 2007).

Parmentier (2007), ainda completa que é necessária também a escolha do material através de suas características como, densidade, coeficiente de Poisson, módulo de elasticidade e outras.

O passo mais importante é a criação da malha computacional. A malha é a divisão do modelo em um número de elementos finitos, que podem ser de vários tipos e dimensões. As malhas são formadas por vários nós, podendo ser internas ou externas, ou seja, no interior do elemento ou na aresta (Parmentier, 2007).

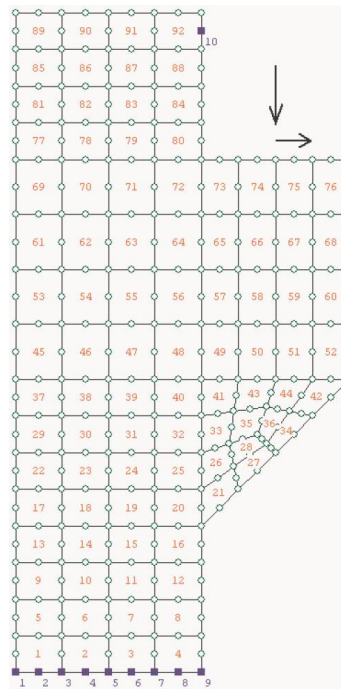
O último passo é a execução da análise dentro do programa. As equações de deformações, tensões e deslocamento são desenvolvidas nesta etapa, para depois serem mostrados os resultados das saídas gráficas de tensão e deformação (PARMENTIER, 2007).

1.7.5 Exemplo de aplicação do MEF

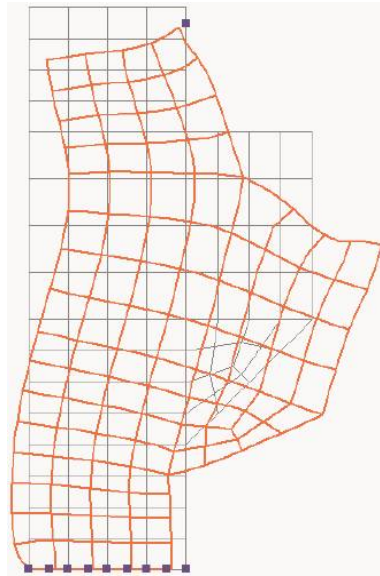
Apresenta-se em seguida um exemplo de aplicação do MEF, que consiste na análise de uma estrutura não simétrica de pequena espessura, sujeita às ações indicadas na Figura 1.48. Nestas condições pode-se admitir que se trata de um meio contínuo, sujeito a um estado plano de tensão.

Na Figura 1.48 está representada também a malha utilizada, que é constituída por 92 elementos finitos quadriláteros, sendo cada um destes elementos definido por 8 nós. Encontram-se também mostrados os 10 nós que estão ligados ao meio exterior.

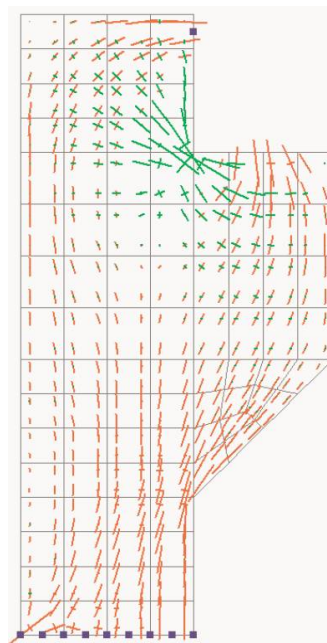
Figura 1.48 – Estrutura não simétrica: malha de elementos finitos e ação exterior



Depois de findada a análise da estrutura pelo MEF, ficam os dados dos valores aproximados dos deslocamentos e das tensões presentes. Na Figura 1.49 está representada a malha deformada pela ação das forças aplicadas à estrutura. Para permitir uma melhor visualização dos deslocamentos, estes são multiplicados por um fator de ampliação. Como referência, é também representada a malha original indeformada.

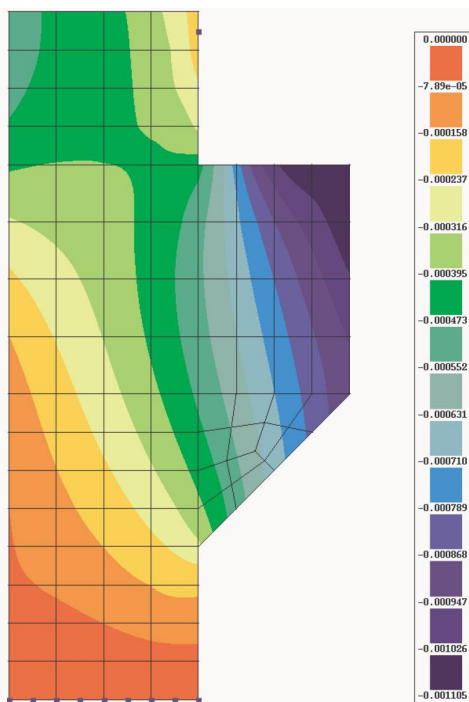
Figura 1.49 – Estrutura não simétrica: malha deformada

Com o tipo de visualização utilizado na Figura 1.50 é possível ter uma percepção imediata dos locais de tensões principais, bem como da trajetória das tensões dentro da estrutura. Cada segmento de reta está orientado segundo uma direção principal de tensão. A cor verde indica que se trata de uma tração e à cor vermelha está associada uma compressão.

Figura 1.50 – Principais tensões e respectivas direções

Na Figura 1.51, o valor da componente vertical do vetor deslocamento é representado, em cada ponto, por intermédio de uma codificação por cores. A tabela de cores lateral mostra o valor do deslocamento vertical em qualquer ponto da estrutura.

Figura 1.51 – Campo de deslocamentos verticais



CAPÍTULO 2

CONSTRUÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO CHARPY

De acordo com a segunda frente deste doutoramento, discorre-se a seguir o assunto relacionado à confecção e o processo de fabricação da máquina de ensaio pendular Charpy.

Durante a primeira metade do século XX, um metalúrgico chamado Izod inventou um tipo de ensaio de impacto para se determinar a capacidade de usar alguns metais como ferramentas de corte. O teste envolvia um pêndulo com massa conhecida o qual impactava o corpo-de-prova que estava engastado em posição vertical (SILVA, 2004).

Alguns anos mais tarde outro metalurgista chamado Augustin Charpy em Budapest na França, efetuou modificações no ensaio de Izod, orientando o corpo-de-prova em uma posição horizontal, mas mantendo o mesmo princípio do método de impacto (DUARTE, 2006).

Esses tipos de ensaios pendulares mostraram ser úteis, produzindo dados confiáveis durante a II Guerra Mundial. A partir dos anos 70 começaram a ser utilizados testes com velocidades e energias de impacto mais elevadas através de ensaios de queda de peso. Esses ensaios perduram nos dias atuais, o que demonstra sua importância (SILVA, 2004).

O mesmo autor também afirma que, máquinas de impacto e queda de peso passaram a ser populares, porém, aplicações de impacto com velocidades mais altas se tornaram cada vez mais necessárias com o avanço da tecnologia, principalmente da aeronáutica, então foram desenvolvidos ensaios de impacto balístico no qual pode se atingir altas velocidades e simular, por exemplo, o impacto de aves em aviões.

Neste capítulo será abordado como projetar e construir uma máquina de ensaio destrutivo pendular para ensaios de impacto do método Charpy. dimensionamento de eixos,

mancais, rolamentos, análise e escolha de materiais, fator de segurança apropriado, entre outros, são partes que integrará o projeto proposto em sua forma final.

Esta máquina pendular realizará o ensaio destrutivo de materiais que necessitam de baixo valor de energia de impacto para romper-se, dando assim, ênfase especial para os materiais poliméricos, apenas limitando para materiais que absorvam até 50J de energia, parâmetro usado no projeto.

Usar materiais adequados para a fabricação de componentes garante, não apenas que o mesmo estará bem dimensionado e não falhará, mas também que o projeto poderá ser executado a contento, proporcionando a utilização de materiais que ocasionará redução de custos na sua fabricação.

2.1 ABSORÇÃO DE ENERGIA

Neste ensaio, uma massa é liberada de uma altura conhecida, h_1 e em movimento pendular, atingindo o corpo de prova na condição de flexão, com geometria e entalhe determinados por norma sobre dois apoios para receber o golpe do martelo. Parte da energia do martelo é absorvida pelo corpo-de-prova que se rompe com a força de impacto, continuando sua trajetória o mesmo eleva-se a uma altura máxima h_2 , energia potencial final (MARTINS e LUCENA, 2007).

A diferença das energias potenciais pelas alturas h_1 e h_2 do martelo, resultará na energia absorvida pelo rompimento do corpo de prova, que é dada pela equação 2.1:

$$E_p = m \times g (h_1 - h_2) \quad (2.1)$$

onde, E_p é a energia total, m a massa do martelo, g a aceleração da gravidade, h_1 altura inicial e h_2 altura final (MARTINS e LUCENA, 2006).

2.1.1. Polímeros

Polímeros naturalmente ocorrentes - aqueles derivados de plantas e animais - têm sido usados durante muitos séculos. Estes materiais incluem madeira, borracha, algodão, lã, couro e seda. Outros polímeros naturais tais como proteínas, enzimas, amidos e celulose são

importantes em processos biológicos e fisiológicos em plantas e animais (JUNIOR, 2011).

Muitos dos nossos utensílios plásticos, borrachas e materiais de fibras são polímeros sintéticos. Em algumas aplicações partes de metal e de madeira foram substituídas por plásticos, que têm propriedades satisfatórias e podem ser produzidos a um custo mais baixo. Tal como com metais e cerâmicas, as propriedades dos polímeros estão intrinsecamente relacionadas aos elementos estruturais do material. (d'ALMEIDA e MONTEIRO, 1996).

2.1.2. Ensaio de Impacto para Polímeros

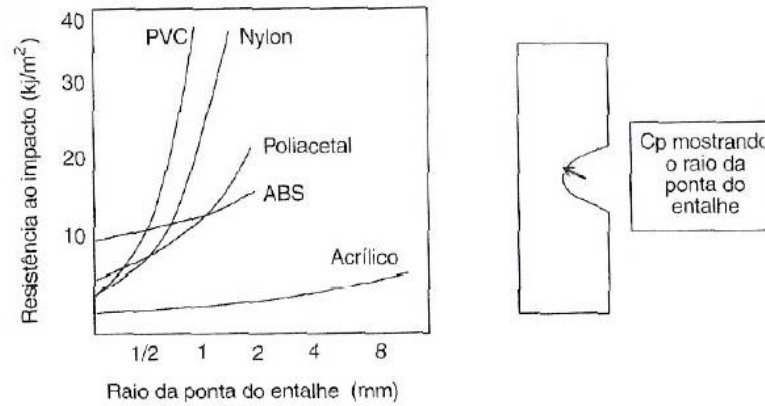
Uma de suas propriedades mecânicas é a resistência ao impacto o que considera o estudo do comportamento sob impacto de materiais poliméricos é de enorme importância, haja vista o grande número de aplicações práticas sujeitas a solicitações dessa ordem, tais como: choques mecânicos em quedas, batidas, etc. Dessa forma, a resistência ao impacto é frequentemente utilizada como um fator de decisão na seleção de materiais (JUNIOR, 2011).

Muitos plásticos considerados satisfatórios em algumas situações são rejeitados para outras por apresentarem tendência à fratura frágil sob impacto. Esses materiais, que normalmente podem ser considerados dúcteis em testes onde a taxa de deformação é baixa ou moderada, quando em um agente concentrador de tensão, devido a defeitos ou ao próprio design da peça, apresentam fratura frágil. (JUNIOR, 2011).

A energia necessária para romper o corpo de prova é a soma das energias para iniciar e propagar trinca. Em alguns casos, a resistência ao impacto depende mais da energia para a criação da trinca do que da energia para propagá-la.

Variações no ângulo da ponta do entalhe permitem caracterizar quanto o polímero é sensível ao entalhe (trinca). A Figura 2.1 ilustra como varia a resistência ao impacto com o raio da ponta do entalhe para vários termoplásticos. Observa-se que o PVC e o Nylon são muito mais sensíveis ao entalhe que o acrílico e o copolímero de ABS.

Figura 2.1 – Influência do raio da ponta do entalhe na resistência ao impacto
 Fonte - (d'Almeida e Monteiro, 1996)



2.1.3. Variáveis do Projeto

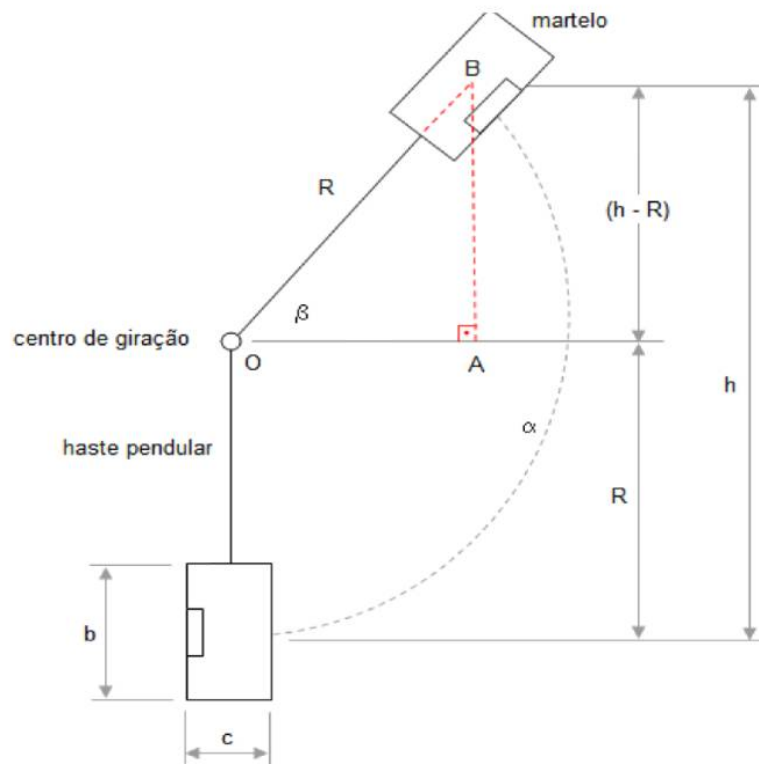
Para o início da confecção da máquina foi estabelecido alguns parâmetros e variáveis, que venham a fundamentar o trabalho com o objetivo proposto, segue na Tabela 2.1 algumas dessas variáveis.

Tabela 2.1 – Variáveis do projeto

Fundo de escala	90J
Ângulo de impacto	150°
Aceleração da gravidade (g):	9,81 m/s ²
Densidade do material do martelo (ρ):	7850 kg/m ³
Altura inicial do martelo (b):	230 mm
Espessura inicial do martelo (a):	50 mm
Largura inicial do martelo (c)	180 mm
Altura (h)	749 mm
Altura (R)	394 mm

A Figura 2.2 ilustra as variáveis de projeto envolvidas na fabricação de uma máquina pendular de ensaio destrutivo Charpy.

Figura 2.2 – Variáveis de Projeto



2.2. DESCRIÇÃO DA FABRICAÇÃO

Neste momento todos os objetivos que foram definidos no início do projeto e no planejamento dos processos têm que estar respectivamente detalhados. O ideal é verificar que se para cada componente ou para cada objetivo tenha um planejamento do processo de fabricação (RESENDE, 2005).

A descrição do processo de fabricação pode ser dividida nas seguintes fases:

- Seleção das peças em bruto;
- Seleção dos processos, ferramentas e dispositivos;
- Seleção das máquinas-ferramentas;
- Seleção das condições de processo;
- Sequenciamento das operações;
- Seleção dos instrumentos de inspeção;
- Determinação das dimensões intermediárias e das tolerâncias de produção.

As seguintes peças foram fresadas: base da máquina, cutelo Figura 2.3, porca Figura 2.4 e base de apoio dos corpos de prova Figura 2.5.

Figura 2.3 – Cutelo



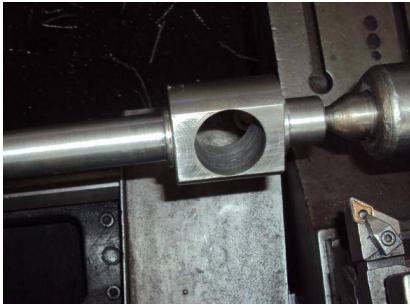
Figura 2.4 – Fresando a Porca de sustentação



Figura 2.5 – Base de Apoio do Corpo de Prova



Todas as peças de revolução da máquina foram executadas por torneamento, dentre elas destacam-se os mancais, a haste pendular, o eixo de giração e as porcas, segue nas Figuras 2.6 e 2.7 alguns exemplos.

Figura 2.6 – Eixo de Giração**Figura 2.7 – Eixo de Giração e Mancais**

Em diversas situações houve a necessidade de furação das peças da máquina pendular como ilustrado na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Base de Apoio

O processo de corte oxi-acetilênico consiste na queima de uma mistura entre oxigênio e acetileno, visando obter uma chama de alta temperatura regulável por meio de um maçarico. As seguintes peças foram cortadas usando maçarico: Laterais e base da máquina (Figura 2.9), mancais de rolamento (Figura 2.10) e martelo (Figura 2.11).

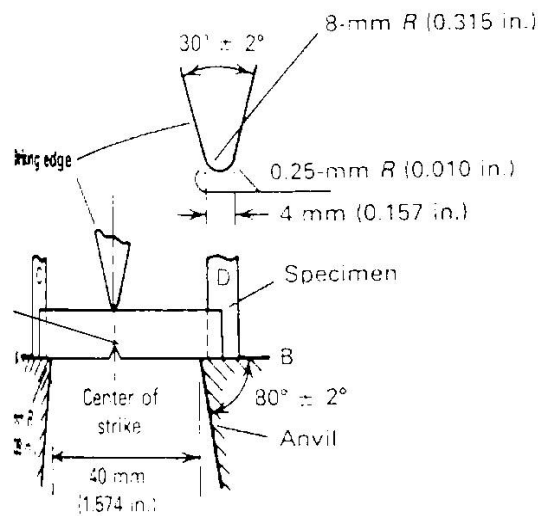
Figura 2.9 – Chapas laterais**Figura 2.10** – Mancais**Figura 2.11** – Martelo

O cutelo foi à peça fabricada com mais atenção devido sua importância na máquina pendular, pois é ele que irá colidir com as amostras e transmitir a força de impacto, assim a escolha ideal do material e o processo de fabricação é importante nesta etapa do projeto.

A norma ASTM E399-90 que trata do método de teste padrão para determinar a resistência ao impacto Charpy para plásticos, foi utilizada para o dimensionamento do cutelo, segue abaixo a ilustração das dimensões segundo as normas, Figura 2.12.

Este foi fabricado com a fresa para facilitar a construção do ângulo e o raio da ponta da peça. O material empregado no cutelo foi o Aço 8620, que é um aço com boa temperabilidade e usinabilidade, utilizado geralmente em aplicações que solicitam endurecimento superficial por cementação ou carbonitretação.

Segundo a Arcelor Mittal, fabricante desse tipo de material o Aço 8620 após temperado e normalizado tem sua resistência ao impacto de 99,7J, o que está dentro dos parâmetros do projeto.

Figura 2.12 – Dimensões de acordo com a norma do Cutelo

2.3. MONTAGEM

Após todas as peças devidamente usinadas conforme projeto e desenhos em anexo iniciou-se a montagem da máquina pendular de acordo com os processos a seguir:

Primeiro foram montados os mancais de rolamentos nas bases laterais da máquina fixando-os com os parafusos Allen M10x1,25 mostrados na Figura 2.13.

Após os mancais os rolamentos auto-compensadores foram montados nos mancais, lembrando que as peças já estão em suas medidas e tolerâncias conforme o projeto e desenhos, Figura 2.14.

Figura 2.13 – Mancais montados**Figura 2.14** – Rolamentos nos mancais

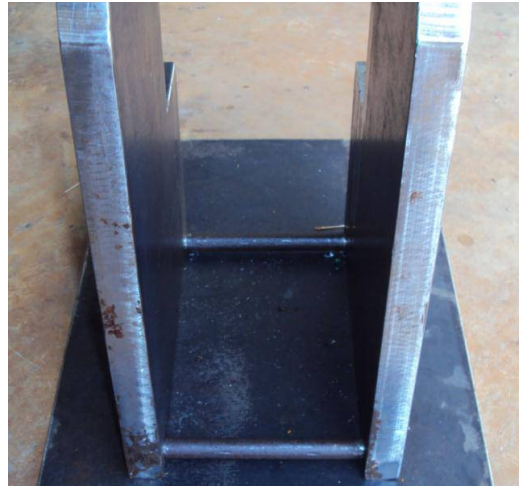
Com os rolamentos em seus devidos lugares foi montado o eixo de giro em uma das bases laterais, deixando-a apoiada sobre a mesa, podendo assim fixar a outra base lateral sobre o eixo, Figura 2.15.

Com as bases encaixadas montam-se na Figura 2.16, os guias das laterais que ficam dois na parte inferior e um na superior das bases laterais.

Figura 2.15 – Eixo de Giro sendo Montado



Figura 2.16 – Guias das Bases Laterais



Depois dos guias e eixo montados, monta-se (Figura 2.17) a base da estrutura da máquina, que são seis parafusos na parte inferior das laterais.

Figura 2.17 – Base da Estrutura da Máquina



Em seguida executa-se a montagem das bases do corpo de prova que foram fabricadas de acordo com a norma ASTM E23 como mostra nas Figuras 2.18 e 2.19.

Figura 2.18 – Base de Apoio do Corpo de Prova

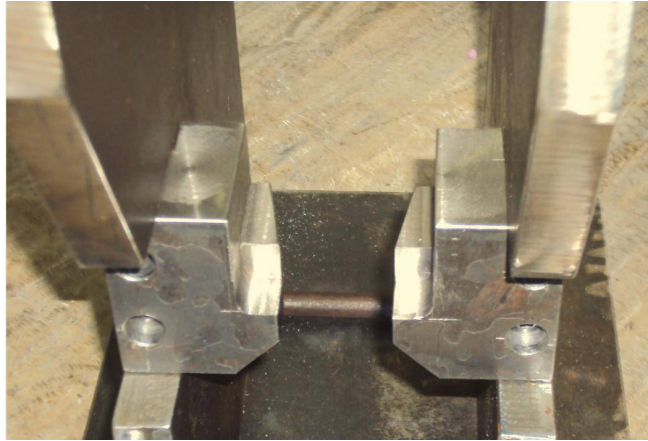


Figura 2.19 – Conjunto Parcialmente Montado



O eixo do pêndulo foi montado ao martelo e depois fixado ao eixo de giro por uma porca no topo do eixo do pêndulo como mostra na figura 2.20. O cutelo foi montado ao martelo e fixado por dois parafusos Allen como mostra a figura 2.21.

Figura 2.20 – Eixo do Pêndulo

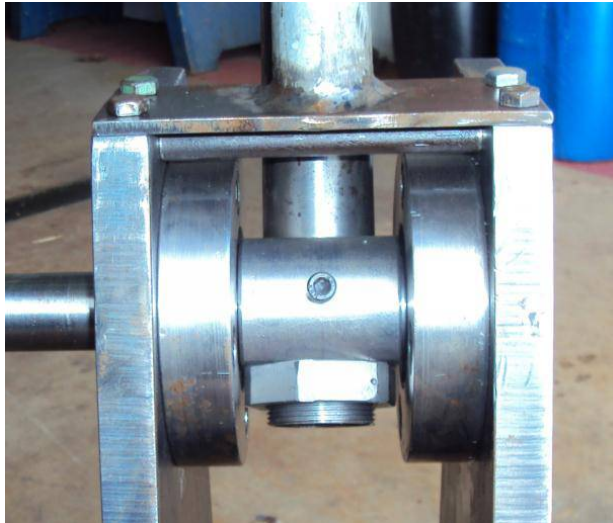


Figura 2.21 – Cutelo Montado



2.4. AJUSTE

Após todas as peças montadas verificou - se os ajustes da máquina que por sua vez estava com folgas na direção axial, e não possuía folga na direção radial devido aos ajustes dos rolamentos, folgas e tolerâncias. A Figura 2.22 mostra como as folgas foram medidas.

Figura 2.22 – Folga no eixo



As ilustrações a seguir mostram o projeto da estrutura da máquina Charpy feito através de programas gráficos. A Figura 2.23 mostra uma vista explodida e a Figura 2.24 ilustra o projeto já montado.

Figura 2.23 – Vista explodida

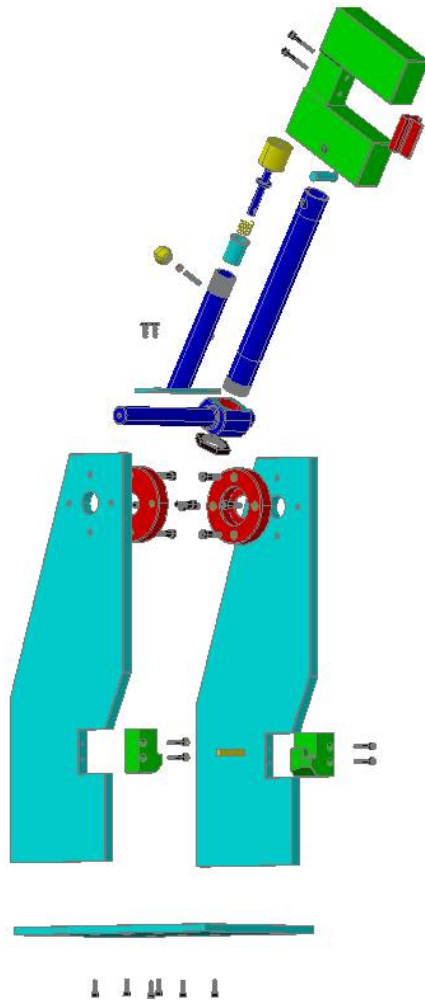
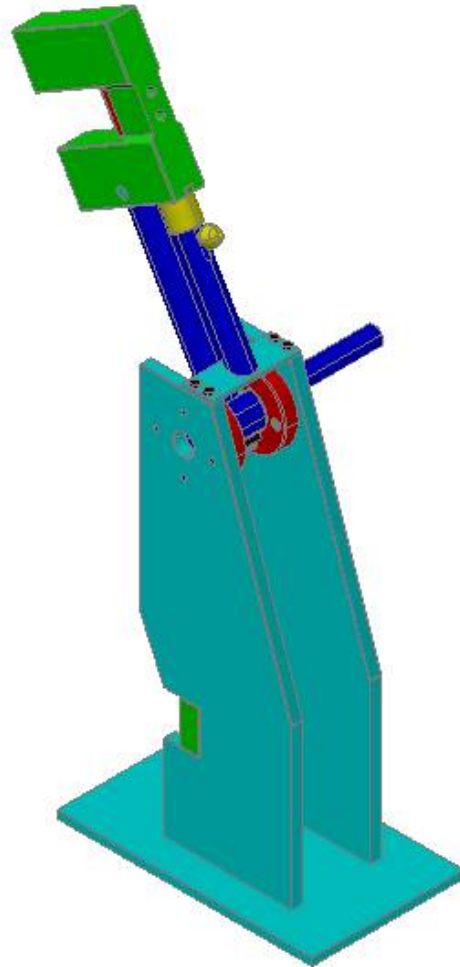


Figura 2.24 – Vista montada



2.5. BASE-SUPORTE CHARPY

Primeiramente foi feito a verificação do funcionamento do dispositivo de ensaio de impacto constatando que o mesmo possuía algum tipo de vibração. Com a averiguação da máquina, notou-se que após ser solto o martelo oscilações indesejadas eram produzidas em sua base interferindo em seu equilíbrio e, qualquer movimento brusco, havia riscos para quem fosse utilizá-la, além de influenciar no cálculo da energia de impacto absorvida pelo material.

Foi necessário então, construir um suporte para fixar o Charpy e este ser devidamente chumbado no chão. Para isso foi utilizado chapas de perfil L com as seguintes dimensões (em polegadas): 3/16"x1", 3/16"x2" e 1/4"x2".

Dando procedimento à construção do apoio, os cortes das chapas foram feitos por uma serra de fita, pois a mesma corta em linha reta. A Figura 2.25 mostras as chapas de perfil L cortadas.

Figura 2.25 - Peças perfil L cortadas pelo processo de corte por serra fita (imagem do próprio autor)



Para formar a base do apoio do Charpy utilizou-se o processo de soldagem de ângulo para unir as chapas de aço de perfil L, sendo esta solda executada com duas ou mais chapas colocadas perpendicularmente entre si formando um ângulo. A Figura 2.26 mostra o apoio após executado o processo de soldagem.

Figura 2.26 - Apoio do Charpy soldado (imagem do próprio autor)



Para uma melhor apresentação, acabamento e conservação a base-apoio foi devidamente pintada com fundo para metais e posteriormente tinta azul metálica. Tais procedimentos podem ser visto na Figura 2.27.

Figura 2.27 – Pintura anti-ferrugem (esquerda) e Definitiva (direita)



2.6. LISTA DE MATERIAIS E CUSTOS

Segue na Tabela 2.2 a lista dos materiais que foram utilizados no projeto e construção da máquina pendular, contendo quantidade, dimensões e custo dos mesmos.

Tabela 2.2 – Lista de materiais e custos

Quantidade e Nomenclatura	Material	Diâmetro	Comprimento	Custo/Kg R\$
Eixo rotativo	Aço 1020 trefilado	2 1/2 in	300 mm	6
Eixo do Martelo	Tubo de aço 1020 sem costura	42 mm	400 mm	6
Mancais	Aço 1020	120 mm	#3/4	6
Base de apoio	Aço 1020		# 1/2 in 250x420 mm	6
Cutelo	Aço 8620	2 in	70 mm	12
2 Rolamentos		30x62 mm		35 unidade
Bases Laterais	Aço 1020		#3/4 650x250 mm	6
Base Corpo de Prova	Aço 1045		#2 in 60x70 mm	6
Guias	Eixo Aço 1020	1/2 in	109 mm	6
Dispositivo de trava	Tubo Aço Galvanizado	1 1/8 in	220 mm	4.50
Base do dispositivo trava	Aço 1020		#1/4 in 150x50 mm	6
8 Parafusos Allen	Aço 8.8	M10x1.5	40 mm	0.60 unidade
6 Parafusos Allen	Aço 8.8	M8x1.25	25 mm	0.60 unidade
2 Parafusos Allen Rosca Parcial	Aço 8.8	M8x1.25	50 mm	0.60 unidade
6 Parafusos Allen	Aço 8.8	M6x1	25 mm	0.25 unidade
4 Parafusos Sextavado	Aço 8.8	M8x1.25	25 mm	0.20 unidade
4 Parafusos Allen	Aço 8.8	M8x1.25	38 mm	0.60 unidade

Com relação à confecção da máquina de ensaio destrutivo Charpy, foi apresentado nesse capítulo o projeto e fabricação de uma máquina de ensaio Charpy aplicada para baixos níveis de energia de impacto. Do ponto de vista de projeto, constatou-se que o modelo físico do equipamento é simples e se baseia no princípio da conservação da energia.

Através da igualdade entre energia potencial e cinética do pêndulo, puderam-se extrair as principais variáveis que permitiram estimar dimensões importantes, como altura de abandono do pêndulo e seu raio de giração. Com a prévia escolha da energia absorvida e da velocidade de impacto foi possível determinar a massa e as dimensões do martelo pendular.

Do ponto de vista da execução do projeto, verificou-se que a especificação correta dos materiais de cada peça do conjunto determinou o adequado desempenho da máquina, eliminando variáveis como vibrações e desalinhamentos pós-impactos no conjunto.

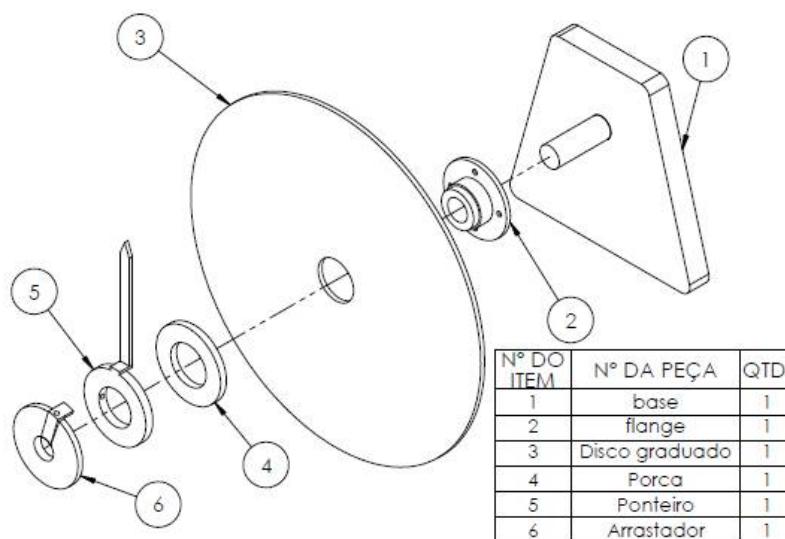
Noções de projeto, seleção de materiais, comportamento mecânico, dificuldades com máquinas ferramentas e fabricação foram os tópicos básicos abordados na construção da máquina charpy e são utilizadas por um profissional do setor.

2.7. INSTRUMENTAÇÃO ANALÓGICA

A instrumentação analógica tem como objetivo mostrar de forma mais didática como é obtida a posição final do martelo após sua queda, e a partir daí o usuário fará todos os devidos cálculos para a obtenção da energia de impacto absorvida pelo material, tendo assim um melhor entendimento do processo e funcionamento da máquina pendular.

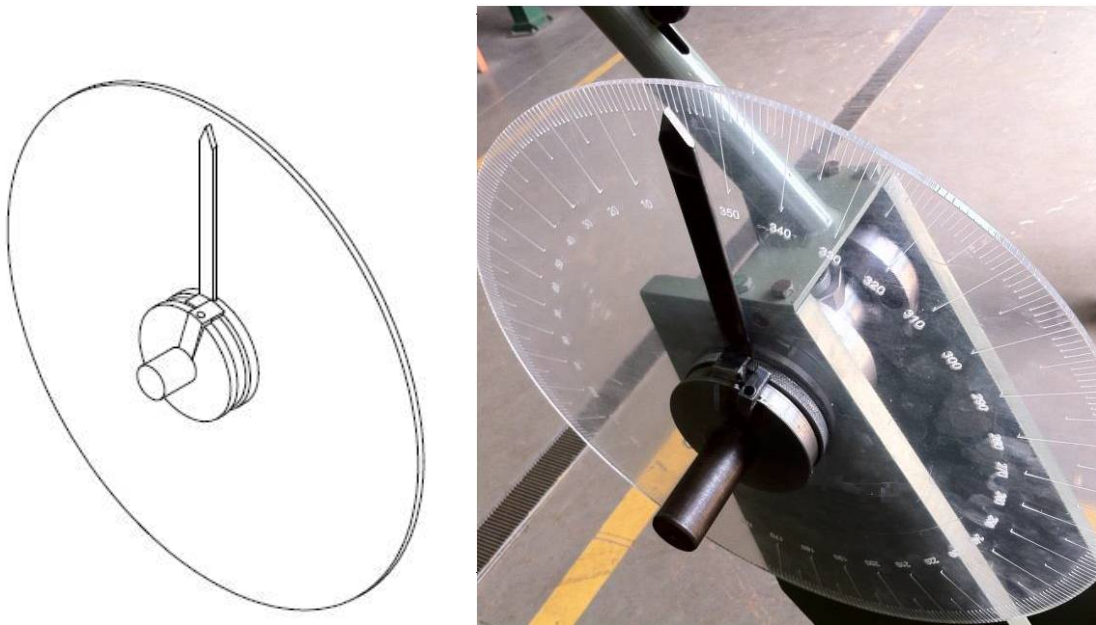
As principais peças que compõe a instrumentação analógica do projeto são: flange, porca, ponteiro e arrastador, que foram feitas pelo processo de torneamento. A Figura 2.28 mostra uma vista explodida da parte construtiva da instrumentação analógica.

Figura 2.28 - Objetivo final da instrumentação analógica (imagem do próprio autor).



Assim, depois de confeccionado os materiais base para instrumentação analógica, o dispositivo foi devidamente unido à máquina Charpy resultando na Figura 2.29 que mostra croqui à esquerda e o aparato montado já no dispositivo finalizado.

Figura 2.29 – Dispositivo de instrumentação analógica finalizado (imagem do próprio autor).



A Figura 2.30 mostra a máquina (finalizada) de ensaio Charpy confeccionada durante essa tese de doutoramento que será utilizada para comparar com a modelagem e simulação através de programas comerciais.

Figura 2.30 – Charpy finalizado confeccionado durante esse doutoramento



2.8. INSTRUMENTAÇÃO DIGITAL

A constante evolução tecnológica torna a necessidade de conhecimentos em diferentes áreas. Não basta ao profissional da área das ciências exatas dominarem um único campo de conhecimento. É preciso saber integrar todos os tipos de recursos de apoio, sejam eles de informática ou de outras áreas de engenharia.

A instrumentação é um exemplo de área do conhecimento que é formada por vários campos dentro da engenharia ou das ciências, e é associada ao estudo teórico e prático dos instrumentos e seus princípios científicos, utilizados para monitorar de forma contínua, ou discreta, o comportamento de variáveis de controle que de alguma forma venham interessar ao homem nas diversas áreas do conhecimento humano aplicado, ou seja, não apenas nos processos produtivos industriais (CASTELETTI).

Instrumentações analógicas utilizam variáveis contínuas que podem assumir um número infinito de valores possíveis, exemplo: números reais (GAMA, 2012).

Instrumentações digitais utilizam variáveis digitalizadas que só podem assumir um número finito de valores distintos, exemplo: números binários (GAMA, 2012).

2.8.1. Encoders

Os Encoders são transdutores de movimento capazes de converter movimentos lineares ou angulares em informações elétricas que podem ser transformadas em informações binárias e trabalhadas por um programa que converta as informações passadas em algo que possa ser entendido como distância, velocidade, etc. (OLIVEIRA, 2007).

Para medir velocidade, por exemplo, é necessário gerar um número conhecido de pulsos por revolução – volta completa do eixo. Isso pode ser feito sem precisar de um conversor analógico digital – A/D – pois o sinal transmitido pelo encoder é próximo de uma onda quadrada – sinal digital – tornando fácil o seu tratamento quando utilizado as transições de 0s e 1s (BERTIN e LOPES 2012 apud WERNECK, 1996).

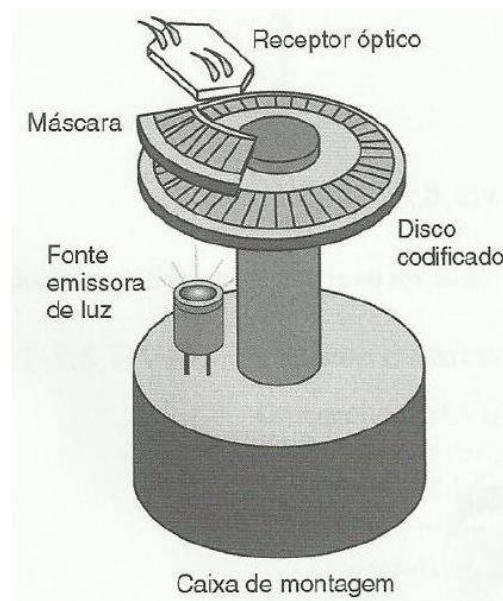
Os encoders são divididos em duas categorias a saber: os incrementais e os absolutos.

2.8.1.1. ENCODER INCREMENTAL

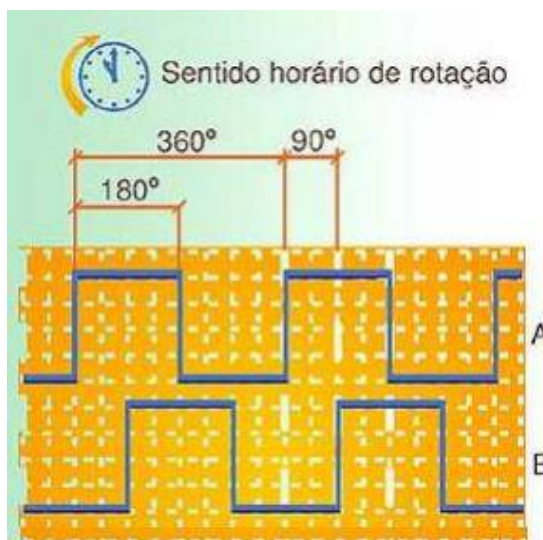
Os encoders incrementais podem ser lineares ou angulares e possuem três tipos: óticos, por contato e magnéticos (BERTIN e LOPES, 2012).

Os encoders óticos angulares são um disco dividido em setores que são alternadamente transparentes e opacos. Uma fonte luminosa é posicionada em um dos lados do disco e no outro lado há um sensor óptico. Com a rotação do disco, a saída do detector alterna entre dois estados: passando luz ou não, e assim, fornecem uma saída digital, conforme mostra a Figura 2.31 (FILHO, 2012).

Figura 2.31 – Encoder incremental ótico angular (BERTIN e LOPES, 2012)

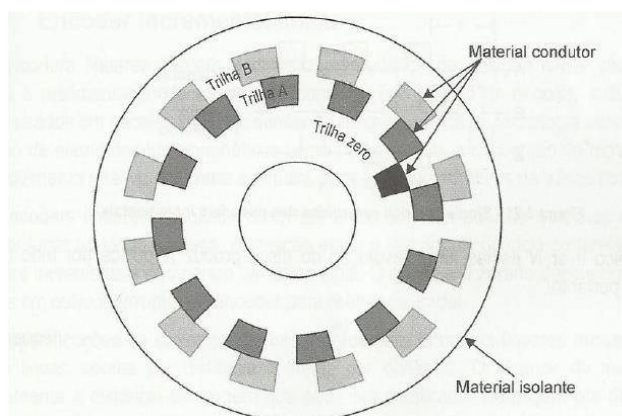


Para maximizar o uso do encoder incremental são utilizadas duas saídas A e B, onde são apresentados dois pulsos quadrados defasados em 90°. Ler apenas um canal fornece a velocidade, se ler os dois canais (A e B) também é possível determinar o sentido de giro. Alguns encoders incrementais ainda possuem mais um sinal que dá posição absoluta do encoder. Na Figura 2.32 tem-se a representação gráfica dos sinais obtidos através de um encoder incremental (DECOM, 2012).

Figura 2.32 – Encoder incremental (DECOM, 2012 apud OLIVEIRA, 2007)

Os encoders incrementais por condução elétrica apresentam o mesmo princípio dos óticos, porém, o disco é isolante e possuem estrias condutoras.

Os encoders baseados na condução elétrica apresentam estrias condutoras depositadas sobre a superfície de um disco isolante acoplado ao equipamento que está sendo monitorado (THOMAZINI e ALBUQUERQUE, 2009). Para identificar os dois possíveis níveis de saída do sinal, existe um pino aterrado que faz contato com as estrias, fechando o contato do circuito de leitura, criando os diferentes níveis de leitura (BERTIN e LOPES, 2012). A Figura 2.33 mostra a estrutura de um encoder de contato, que resulta em três ondas quadradas distintas entre si.

Figura 2.33 – Estrutura de um encoder de contato (BERTIN e LOPES, 2012)

O encoder magnético incremental é similar aos demais e possui em seu disco, segmentos de polos alternados, norte e sul, e um sensor de efeito Hall, o qual gera uma onda senoidal, conforme as alterações do campo magnético no giro do disco (BERTIN e LOPES, 2012).

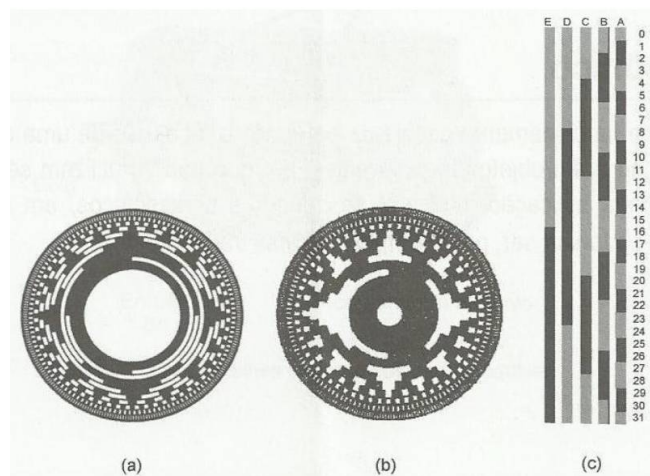
2.8.1.2. ENCODER ABSOLUTO

O princípio de funcionamento do encoder absoluto e de um encoder incremental são bastante semelhantes, pois, ambos utilizam o princípio das janelas transparentes e opacas, com estas interrompendo um feixe de luz, transformando pulsos luminosos em pulsos elétricos.

A principal diferença entre eles é que a posição inicial do encoder incremental começa a partir do pulso zero, enquanto que no absoluto é determinada pela leitura de trilhas codificadas e este é único para cada posição, ou seja, numa queda de tensão os encoders absolutos não perde sua real posição.

Esse tipo de encoder possui uma quantidade de furos (anéis) maior que o incremental, que possibilita um maior número de combinações de sinais, que geram um código binário para cada posição do disco, aumentando a resolução do dispositivo (ARAÚJO, 2011). A Figura 2.34 mostra discos codificados de encoders óticos angulares absolutos.

Figura 2.34 – Discos codificados de encoders óticos angulares absolutos tipos (a) Binário (b) Gray (c) código Gray gerado (BERTIN e LOPES)



Cada trilha tem seu próprio fotodetector, e é organizada de forma a ler todos os detectores, gerando um byte, normalmente no código Gray. A detecção de uma trilha é significativamente mais complexa e cara que um encoder incremental, e todos os canais da trilha devem funcionar em conjunto para evitar falsa informação da posição (THOMAZINI e ALBUQUERQUE, 2009). Eles são facilmente conectados aos controladores baseados em microprocessador e em displays.

2.8.2. Arduíno

O Arduíno é um pequeno computador que você pode programar para processar entradas e saídas entre o dispositivo e os componentes externos conectados a ele (BERTIN e LOPES 2012 apud MCROBERTS, 2011).

O Arduíno foi projetado com a finalidade de ser de fácil entendimento, de fácil programação e de fácil aplicação, além de ser multi-plataforma, podendo ser configurado em ambiente Linux, Mac OS e Windows (RENNA et al 2013). Para visualização, a Figura 2.35 mostra um arduíno genérico.

Figura 2.35 – Arduíno (RENNA et al 2013)



2.8.3. Montagem

Primeiramente, para confeccionamento da instrumentação digital da máquina pendular, foi utilizado um kit com um encoder absoluto e um disco que contém 1800 divisões em sua extremidade, como mostra a Figura 2.36.

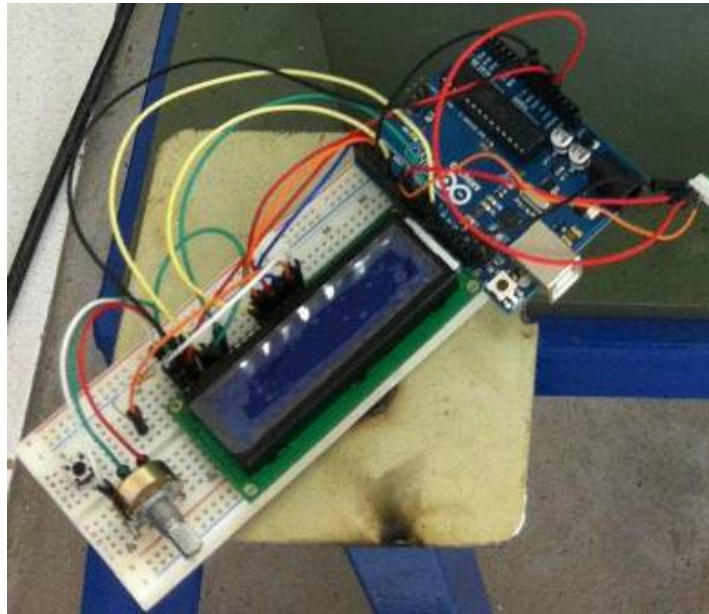
Figura 2.36 – Kit com encoder e o disco (imagem do próprio autor)



O encoder lerá a quantidade de “barrinhas” que o disco andou após a queda do martelo, esta informação precisará ser lida e interpretada para que o usuário possa saber os resultados finais de absorção de energia. Para fazer esta leitura do encoder, foi utilizado um kit arduino, já que o mesmo é um pequeno computador que pode ser programado para processar entradas e saídas entre o dispositivo e os componentes externos conectados a ele, além de ser de fácil entendimento e de fácil programação.

Este foi projetado e programado para ler e interpretar a informação passada pelo encoder, a informação será passada para o usuário na tela de LCD que contém no kit, a Figura 2.37 mostra o arduino já montado.

Figura 2.37 – Kit arduíno montado e programado (imagem do próprio autor)



Com o kit montado, foi feito o teste da leitura do encoder pelo arduíno antes dos mesmos serem fixados na máquina pendular. A Figura 2.38 mostra tal situação.

Figura 2.38 – Teste feito no arduíno e encoder (imagem do próprio autor)



Executados os testes a contento com o kit arduíno e o kit do encoder, os materiais e equipamentos foram montados na máquina charpy. Inicialmente foi inserido o encoder e o disco no eixo da máquina, como mostra a Figura 2.39. Posteriormente, foi feito um suporte para que o kit arduíno fosse instalado.

Figura 2.39 – Montagem do encoder e disco no eixo da máquina pendular (imagem do próprio autor)



Finalmente, após todos os encaixes, temos a máquina Charpy finalizada e pronta para entrar em operação, como mostra a Figura 2.40.

Figura 2.40 – Kit arduino e kit do encoder fixados na máquina (imagem do próprio autor)



Assim, a instrumentação digital aliado à instrumentação já feita de forma analógica da **“Máquina Analógico-Digital de Ensaio de Rompimento Destrutivo Charpy”** foi finalizada e testes de sincronismo de dados foram feitos com o intuito de verificar eventuais erros entre os resultados analógicos e digitais. Tais testes comparativos podem ser visualizados no ANEXO A da presente tese.

CAPÍTULO 3

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

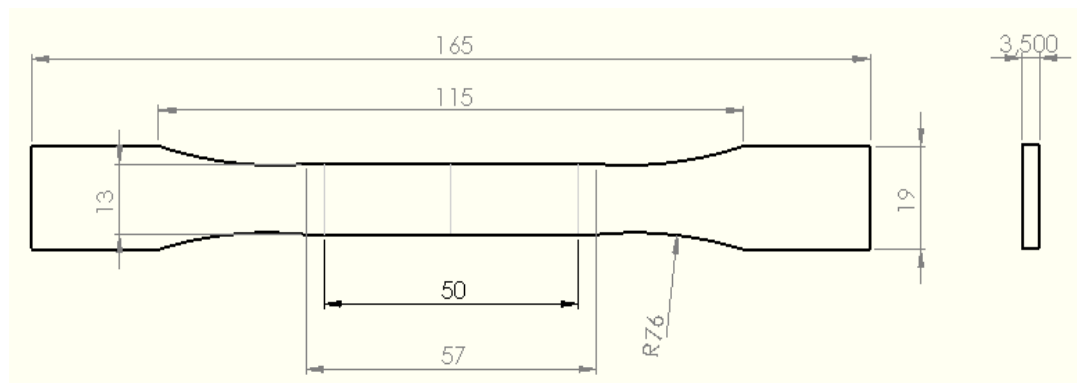
3.1. CONFECCIONAMENTO DOS CORPOS DE PROVAS

A seguir discorre-se como foi realizado o confeccionamento dos corpos de provas do referente trabalho, assim, em sua primeira parte será abordado o assunto relacionado aos corpos de provas para ensaio de tração e em seguida o texto será dedicado ao ensaio de rompimento charpy.

3.1.1. Ensaio de tração

Utilizando a norma ASTM D638, foi realizado o dimensionamento do corpo de prova como mostrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Corpo de prova Tipo I (em milímetros), padronizado segundo a norma ASTM D638



3.1.1.1 CORPOS DE PROVA DE COMPÓSITOS

3.1.1.1.1 A resina (Matriz)

Para Carvalho (2003), a resina é responsável pela aparência do produto e das suas características superficiais, a função fundamental da resina em composição reforçada por fibras é de transmitir as tensões aplicadas na composição para o reforço. O módulo elástico das fibras é muito maior que o da resina, que por outro lado a resina pura é bastante fraca e quebradiça. O processo consiste de um sistema de cura a base de peróxido orgânico como o catalizador, este é um ativador controlável quando se deseja o processo de cura em determinado tempo ou temperatura. As resinas depois da cura apresentam propriedades que favorecem sua resistência.

3.1.1.1.2 As fibras vegetais

Para Magalhães (2009), a utilização de materiais fibrosos em processos construtivos é muito antiga, mas em grande escala industrial se deu somente no início do século XX. Já Petrucci (1982) explica que os usos desses materiais fibrosos se dão pelo fato de terem uma baixa massa específica, alta resistência a tração sendo resistentes a agentes agressivos.

Com o avanço das tecnologias e a busca por fontes renováveis que não causam problemas à saúde e na natureza, os materiais fibrosos tem se tornado uma alternativa no ramo da construção e até artesanais pelo baixo custo e a facilidade de encontrar produtos.

De acordo com MARINHO (2012), o bambu por ser uma fonte renovável e sustentável devido ao seu rápido crescimento vem apresentando um grande potencial econômico, pois completa o seu ciclo de plantio em poucos meses e atinge o seu nível de resistência máxima em poucos anos. Devido à necessidade da busca de materiais sustentáveis, a indústria da construção civil vem buscando esses materiais onde lhes propiciam custo-benefício, leveza, força, dureza, flexibilidade e facilidade para o trabalho.

López (1974) diz que esse material possui um grande leque na construção como usos em estruturas, pisos, paredes e tetos. Já com relação a outros materiais mais utilizados atualmente (como a fibra de vidro entre outros), seus processos de industrialização não são totalmente renováveis e sustentáveis, pois geram grande volumes resíduos não reaproveitáveis.

De acordo com Burman e Filgueiras (1993), os bambus brasileiros são considerados um dos mais importantes das espécies pela sua utilidade prática e aplicação econômica. Marinho (2012) explica que as fibras são as principais responsáveis pela resistência mecânica, suas características individuais diferem em comprimento e espessura.

Para Magalhães (2009), a relação entre o comprimento e diâmetro das fibras influencia na transferência de esforços chamado de índice de enfiamento, ou seja, quanto maior o índice maior a aderência. Ainda Magalhães (2009), menciona que as fibras possuem baixo módulo de elasticidade, o que contribui para trabalharem no estágio de fissuramento com grande absorção de energia e resistência a esforços dinâmicos. A Tabela 3.1 mostra as características físicas e mecânicas das fibras de Bambu, Coco e Sisal.

Tabela 3.1 – Características físicas e mecânicas das fibras de Bambu, Coco e Sisal

Propriedades	Massa esp. (kg/m ³)	Absorção Max. (%)	Alongam. na ruptura (%)	Resistência a tração (Mpa)	Mod. elast. (GPa)	Índice Enfiamento
Coco	1.177	93,8	23,9 a 51,4	95 a 118	2,8	35,0
Bambu	1.158	145	3,2	73 a 505	51,1 a 24,4	170,5
Sisal	1,370	110,0	4,9 a 5,4	347 a 378	15,2	152,6

Fontes Agopyan e Savastano Junior , Toledo Filho (apud FREIRE E BERALDO, 2003) CEPED(1982).

3.1.1.1.3 A fibra de coco

O coco é formado a partir de uma semente chamada drupa, é constituída basicamente por um epicarpo, que consiste em uma camada externa fina e lisa que forma a sua casca; mesocarpo, camada intermediária fibrosa de onde se obtém a fibra; endocarpo, uma camada lenhosa e dura e a castanha chamada de albúmen sólido, que é a parte do fruto de maior valor comercial, além da água de coco.

Quanto à sua composição, as fibras são formadas basicamente de celulose, hemicelulose, lignina, pectina e minerais. A celulose é o principal constituinte estruturante, sendo um polissacarídeo linear de alto peso molecular formado principalmente de glicose, responsável pela estabilidade e resistência das fibras. A lignina é um polímero complexo que sua concentração nas fibras influencia na estrutura, na morfologia, na flexibilidade e taxa de hidrólise. Fibras com alto teor de lignina são de excelente qualidade e alta flexibilidade.

As fibras das cascas de coco possuem uma quantidade menor de celulose, contudo, o percentual de lignina é grande, cerca de duas a quatro vezes maiores que os valores existentes nas fibras de juta e sisal, tornando-a extremamente vantajosas frente às outras fibras. O teor de lignina nas fibras varia em função da idade do fruto, girando entre 20% nas fibras de coco jovem e de aproximadamente 35% no fruto maduro.

As características (EMBRAPA) básicas da fibra de coco são: Comprimento: 9 a 33 cm; Diâmetro da fibra: 0.5 a 0.6 mm; Densidade: 0,92g/cm³; Cor: Marrom a avermelhado.

No passado, a casca de coco (fonte da fibra) era tratada como lixo ou material residual, mas com a evolução dos conhecimentos técnico-científicos, esse material passou a ter várias utilidades. As características da fibra, como coloração uniforme, elasticidade, durabilidade e resistência à tração e à umidade, oferecem muitas possibilidades de utilização como matéria-prima natural para a indústria.

O Uso da Fibra de coco, segundo pesquisas na web, no comércio destaca-se em: Manufatura de colchões para salto, por possuir grande elasticidade; Tapetes, capachos, pois tem alta durabilidade, retenção da sujeira e fungicida natural; Cordame especial para navios, pois é resistente à água do mar; e Fabricação de mantas de fibra de coco para reflorestamento.

3.1.1.1.4 A fibra da cana de açúcar

O bagaço de cana-de-açúcar é um subproduto fibroso resultante da moagem da cana e que pode ter diversos usos, desde a produção de energia através da queima, até incorporação ao solo ou como parte integrante da dieta bovina. Mesmo após a extração da sacarose e outros nutrientes, o bagaço ainda contém muita matéria orgânica, sendo assim uma possível fonte de energia e de outros produtos da química fina.

O álcool obtido a partir do bagaço é conhecido como etanol de segunda geração (etanol lignocelulósico). Porém, devido à complexidade dos componentes, muitos estudos ainda são necessários para melhorar a eficiência da produção de etanol por esse caminho. O bagaço é matéria orgânica vegetal rica em polissacarídeos (açúcares complexos), como a celulose e a hemicelulose (compostos comumente encontrados nas paredes celulares das células vegetais). Também está contida nessa massa orgânica a lignina (biomassa lignocelulósica). Esses três materiais juntos compõem mais de 75% da biomassa vegetal e conferem resistência mecânica à planta.

Como dito, a lignina é formada por uma estrutura complexa que dá às plantas maior resistência mecânica, é um composto muito resistente à degradação química e enzimática.

A principal característica do bagaço da cana é o seu teor de fibra, uma vez que a quantidade de bagaço que se obtém por unidade de massa de cana, depende do teor de fibra. Segundo levantamento do IDEA (2002) o teor médio de fibra para as usinas paulistas gira em torno de 12,8 %, enquanto na região Nordeste esse valor é da ordem de 15,6 %, dependendo da variedade da cana e do número de cortes.

Composição geral da fibra do bagaço é: Celulose: 48%; Hemicelulose: 25%; e Lignina: 12%.

3.1.1.1.5 A fibra de Technyl e Nylon

O Technyl (marca registrada da Rhodia) é o nome comercial de uma outra família de polímeros, cuja estrutura química é também baseada na poliamida, porém reforçada com fibras minerais e/ou sintéticas (como a fibra de vidro, por exemplo) e aditivos químicos específicos, visando diminuir o peso específico e principalmente aumentar a resistência mecânica.

Dentre algumas das principais características do Technyl destaca-se: Baixo peso específico (1/8 em relação ao bronze por exemplo); Alta resistência ao desgaste e abrasão; Ponto de fusão elevado; Grande resistência a agentes químicos; Auto-extinguibilidade de chama; Auto lubrificante; Absorção de vibrações; Alta resistência ao choque; Baixo coeficiente de atrito; e Movimentos mecânicos silencioso.

Possui como aplicação amplamente utilizada em Buchas, Engrenagens, Cremalheira, Polias, Roletes, Parafusos, Arruelas, Guias, Cames, Rotores, Roldanas, Mancais, etc.

Já o Nylon é uma fibra feita/sintetizada em laboratório onde se faz parte de um grupo chamado Polímeros (são macromoléculas formadas a partir de unidades estruturais menores).

As características do Nylon são: Resistente a impactos; Alta temperatura de fusão; Baixo coeficiente de atrito; Impermeável a gases; Baixa resistência a ácidos inorgânicos (nitríco, clorídrico, sulfúrico, etc.); Baixa resistência a alcoóis aromáticos (álcool benzílico, fenóis cresóis, etc.); Alta fluidez.

3.1.1.1.6 A fibra de vidro

É um material composto da aglomeração de finíssimos filamentos de vidro que são altamente flexíveis. Quando adicionado à resina poliéster (ou outro tipo de resina), transforma-se em um composto popularmente conhecido como fibra de vidro, sendo o nome correto PRFV (Polímero Reforçado com Fibra de Vidro").

O PRFV tem alta resistência à tração, flexão e impacto, sendo muito empregado em aplicações estruturais. É leve e não conduz corrente elétrica, sendo utilizado também como isolante estrutural. Permite ampla flexibilidade de projeto, possibilitando a moldagem de peças complexas, grandes ou pequenas, sem emendas e com grande valor funcional e estético.

Segue as principais vantagens na utilização do PRFV segundo Modelglass:

Densidade: Ajuda a diminuir peso comparado às partes de aço (até 30% mais leves) com propriedades termo-mecânicas semelhantes.

Reciclagem: Devido a métodos técnicos diferentes, reciclagem de fibra de vidro é agora possível, como também a reciclagem de termoplásticos ou reforços de vidro de thermoset.

Apodrecimento: Filamento de vidro não deteriora, não apodrece e não é afetado por pragas.

Condutividade térmica: Esta característica é altamente estimada na indústria de construção civil, onde o uso de compostos de fibra de vidro torna possível eliminar passagens térmicas possibilitando economia de calor.

Estabilidade dimensional: Filamento de vidro é insensível a variações em temperatura e tem um baixo coeficiente de expansão linear.

Compatibilidade com matrizes orgânicas: A habilidade da fibra de vidro para aceitar tipos diferentes de tamanho cria uma liga entre o vidro e a matriz, possibilitando que seja combinada com muitas resinas sintéticas, como também, com certas matrizes minerais.

Resistência alta a agentes químicos: Quando combinada com resinas apropriadas, compostos com esta característica podem ser feitos de filamento de vidro.

Força mecânica: Filamento de vidro tem uma resistência específica mais alta (resistência à tensão/massa volumétrica) do que a do aço. Esta característica é o ponto de partida para o desenvolvimento de fibra de vidro para produzir compostos de alto desempenho.

Características elétricas: Suas propriedades como um isolador elétrico são excelentes, até mesmo a espessuras pequenas.

Incombustibilidade: Como um material mineral, fibra de vidro é naturalmente incombustível. Não propaga, não mantém chama e não emite fumaça quando exposta ao calor.

3.1.1.1.7 A fibra de Borracha

A borracha natural é um polímero obtido da seiva da seringueira, árvore de origem amazônica, mas que ganhou o mundo, principalmente pela rápida adaptação que sofreu quando, na virada do século, foi plantada com sucesso nas florestas tropicais asiáticas. Para sua extração são feitos pequenos cortes superficiais no caule da árvore, através, dos quais, o látex é captado. Depois de sua coagulação e secagem, este material é aquecido e posteriormente processado com outras substâncias químicas, transformando-se em borracha. Com o passar do tempo, criou-se na Alemanha a tecnologia para fabricá-la artificialmente a partir do petróleo.

Apesar de a borracha sintética ser muito parecido com a borracha natural, ela não é tão resistente ao calor e racha com a mudança de temperatura muito rápida. Por isso, os artefatos são sempre constituídos de uma parcela da borracha natural. No Brasil, a maior parte da borracha produzida industrialmente é usada na fabricação de pneus, correspondendo a 70% da produção.

Ao contrário do que muitos pensam, o pneu não é feito apenas de borracha, seu processo envolve também muita tecnologia. Além da borracha natural, que pode ser substituída pela borracha sintética, o pneu é composto também por negro de fumo (obtido da queima de derivados de petróleo), óxido de zinco e ácido esteárico, enxofre, resinas, agentes plastificadores e antioxidantes, além do poliéster ou nylon de aço.

3.1.1.1.8 A fibra de PVC

A principal matéria-prima do PVC é o sal marinho, recurso renovável na natureza. A partir dele se obtém o cloro, que representa 57% em peso do PVC. Os 43% restantes são obtidos a partir do petróleo utilizado na forma de eteno. Entretanto, deve-se destacar que o Brasil possui tecnologia para sua obtenção a partir do álcool da cana-de-açúcar, tornando-se também um recurso renovável e, por conseguinte, inesgotável.

O PVC consome apenas 0,3% do petróleo extraído no mundo, índice bem pequeno na medida em que é um dos 3 plásticos mais utilizados. Devido à baixa dependência do petróleo por si só, o PVC já se credencia como um plástico que atende a um dos requisitos básicos do desenvolvimento sustentável, sendo 100% reciclável.

3.1.1.1.9 A composição dos corpos de provas

Dessa forma, moldes foram criados com o mesmo formato do ensaio do polipropileno (norma ASTM D638) para que os corpos de provas de compósitos fossem confeccionados e posteriormente tratados para retirada de imperfeições (rebarbas) e eventual correção de dimensão. A sequência de imagens (Figuras 3.2 a 3.7) ilustram situações da criação dos CP's e moldes criados para a presente tese a serem ensaiados na Máquina EMIC (tração).

Figura 3.2 – Moldes para confeccionamento dos CP's (imagem do próprio autor)



Figura 3.3 – Fibras naturais e pesagem (imagem do próprio autor)



Figura 3.4 – Fibras de bambu ainda “in natura” (imagem do próprio autor)



Figura 3.5 – Fibras de kevlar, resina e preparação (imagem do próprio autor)



Figura 3.6 – Corpo de prova sendo ensaiado na EMIC e respectivo resultado (imagem do próprio autor)

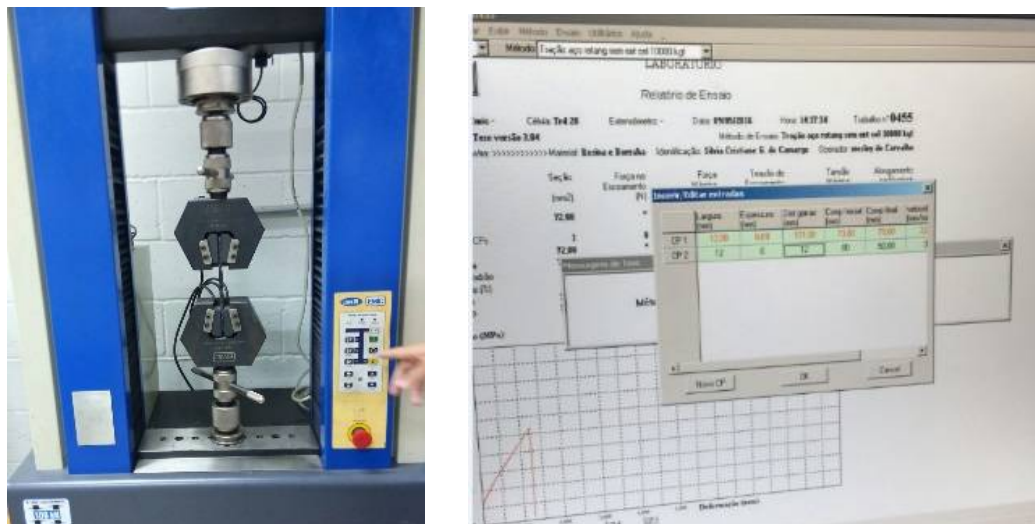


Figura 3.7 – Corpos de prova diversos (Sem Fibra, Fibra de Bambu, Nylon, Coco, Cana e outros)
(imagem do próprio autor)



Assim, foram confeccionados cinco corpos de provas para cada material a ser inserido no molde juntamente com a resina, cada qual com suas proporções de materiais, bem como a quantidade de resina e catalisador utilizado. Para efeito de organização, serão dispostos os materiais e a composição do corpo de prova, conforme Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Proporção de materiais utilizados nos Corpos de Prova(CP)

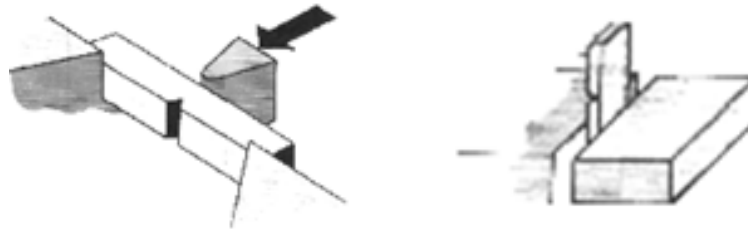
Grupo de CP	Resina (ml)	Catalisador (Gotas)	Sem Fibra	Fibra de Coco (%)	Fibra de Bambu (%)	Fibra de Cana (%)	Fibra de Technyl (%)	Fibra de Nylon (%)	Fibra de Vidro (%)	Fibra de Borracha (%)	Fibra de Kevlar (%)
1	30	15	0	-	-	-	-	-	-	-	-
2	30	15	-	3	-	-	-	-	-	-	-
3	28	14	-	5	-	-	-	-	-	-	-
4	25	13	-	10	-	-	-	-	-	-	-
5	23	12	-	20	-	-	-	-	-	-	-
6	30	15	-	-	15	-	-	-	-	-	-
7	20	12	-	-	-	35	-	-	-	-	-
8	20	12	-	-	-	-	15	-	-	-	-
9	20	12	-	-	-	-	-	15	-	-	-
10	20	12	-	-	-	-	-	-	30	-	-
11	20	12	-	-	-	-	-	-	-	25	-
12	20	12	-	-	-	-	-	-	-	-	50

3.1.2 Ensaio Charpy

Segundo Shigley (2005), um dos ensaios que permitem estudar os efeitos das cargas dinâmicas é o ensaio de impacto. Este ensaio é usado para medir a tendência de um metal de se comportar de maneira frágil. O choque ou impacto representa um esforço de natureza dinâmica, porque a carga é aplicada repentina e bruscamente.

Ainda Segundo Shigley (2005), nos ensaios de impacto, utilizam-se duas classes de corpos de prova com entalhe: o Charpy e o Izod. Esses corpos de prova seguem especificações de normas internacionais, baseadas na norma americana E-23 da ASTM. A Figura 3.8 mostra o detalhamento dos corpos de prova Charpy e Izod respectivamente.

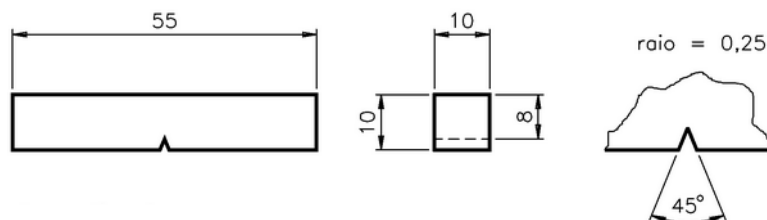
Figura 3.8 – Dimensões dos corpos de prova, norma ASTM E-23



Os entalhes são necessários para assegurar que haja ruptura do corpo de prova, mesmo nos materiais mais dúcteis. Quando a queda do martelo não provoca a ruptura do corpo de prova, o ensaio deve ser repetido com outro tipo de corpo de prova, que apresente entalhe mais severo, de modo a garantir a ruptura.

Os corpos de prova do tipo Charpy compreendem três subtipos (A, B e C), de acordo com a forma do entalhe. A Figura 3.9 mostra a forma e dimensão do corpo de prova selecionado na presente tese para testes de impacto Charpy (Norma ASTM E-23).

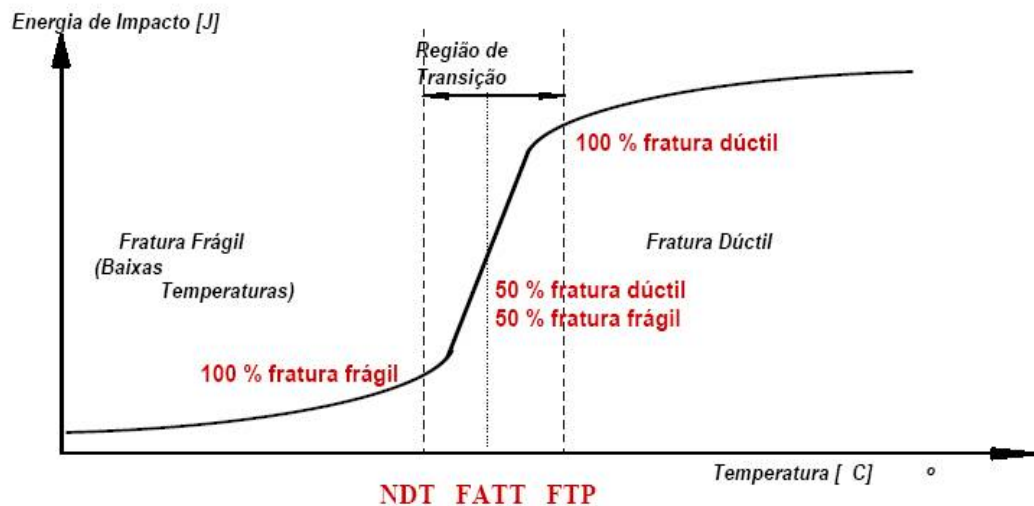
Figura 3.9 – Dimensões dos corpos de prova, norma ASTM E-23 para Charpy do tipo A



Em condições de temperatura diversas da temperatura ambiente, os resultados deste ensaio variam sensivelmente. A temperatura, especificamente a baixa temperatura, é um fator de extrema importância no comportamento frágil dos materiais.

As fraturas produzidas por impacto podem ser frágeis ou dúcteis. As fraturas frágeis caracterizam-se pelo aspecto cristalino e as fraturas dúcteis apresentam aparência fibrosa. A Figura 3.10 mostra um gráfico representativo dos dois tipos de fratura, relacionando Energia de Impacto [J] com Temperatura [°C].

Figura 3.10 – Energia de Impacto x Temperatura. Onde NDT é Temperatura de ductilidade nula e FTP é Temperatura 100% fibrosa (dúctil)



Shigley (2005) diz que os materiais frágeis rompem-se sem nenhuma deformação plástica, de forma brusca. Por isso, esses materiais não podem ser utilizados em aplicações nas quais sejam comuns esforços bruscos, como em eixos de máquinas, bielas etc. Para estas aplicações são desejáveis materiais que tenham capacidade de absorver energia e dissipá-la, para que a ruptura não aconteça, ou seja, materiais que apresentem tenacidade.

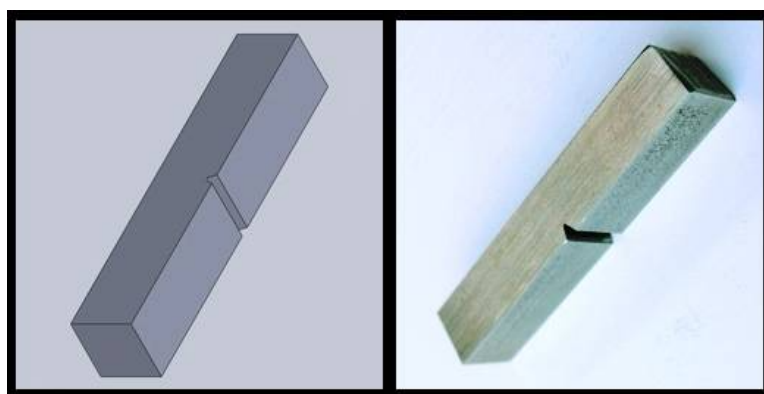
Ainda segundo Shigley (2005), esta propriedade está relacionada com a fase plástica dos materiais e por isso se utilizam as ligas metálicas dúcteis neste tipo de aplicação. Porém, mesmo utilizando ligas dúcteis, com resistência suficiente para suportar uma determinada aplicação, verificou-se na prática que um material dúctil pode romper-se de forma frágil.

3.1.2.1 CORPOS DE PROVA METÁLICO

Na literatura (Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Departamento de Materiais e Tecnologia da UNESP campus de Guaratinguetá) foi encontrada uma tabela de rompimento que relaciona a energia absorvida por temperatura utilizando o método de ensaio Charpy do tipo A para o aço 1045. Assim, para efeitos comparativos e validação da máquina de ensaio Charpy criada para a presente tese o mesmo experimento foi realizado, cujo resultado será mostrado juntamente com a modelagem numérica através do código computacional ANSYS.

Assim, 30 corpos de prova foram confeccionados com aço 1045 na fresadora seguindo rigorosamente as dimensões ASTM E-23 para o método Charpy com entalhe do tipo A. Foram realizados 3 rompimentos para cada temperatura do corpo de prova e feito uma média aritmética para um resultado mais confiante. A Figura 3.11 mostra o corpo de prova criado para ensaio na máquina pendular Charpy.

Figura 3.11 – Corpos de prova tipo Charpy A – Esquerda com utilização de programa computacional; Direita criado a partir de usinagem mecânica



3.1.2.1 CORPOS DE PROVA DE COMPÓSITOS

Para corpos de prova criados a partir de misturas líquidas para posteriores endurecimentos exigem que sejam feitos a partir de um molde de dimensões adequadas, assim, para que os corpos de prova atendessem a norma ASTM E 23 foi confeccionado ainda para essa tese de doutoramento moldes em aço 1045 por corte a laser.

Utilizando o mesmo roteiro para as fibras dos ensaios de Tração, diferentes corpos de prova de compósitos padronizados para o ensaio Charpy foram criados a partir de materiais como: Fibra de coco, Fibra de bambu, Fibra de cana de açúcar, Fibra de Technyl e Nylon, Fibra de vidro, Fibra de Borracha, Fibra de kevlar, entre outros, formando diferentes compósitos, além do corpo de prova de resina sem fibras.

Assim, supre-se nesse momento as imagens do confeccionamento dos CP's charpy, pois seguem o mesmo padrão, além dos mesmos materiais utilizados quando no ensaio de tração ainda deste capítulo.

3.2. ENSAIOS PRÁTICOS REALIZADOS

Foram realizados no decorrer deste doutoramento dois tipos de ensaios práticos em corpos de provas: o primeiro deles se trata do ensaio de tração feito a partir de maquinário comercial, já o segundo contempla um ensaio de rompimento de corpos de provas charpy, realizado com equipamento confeccionado durante esta tese.

3.2.1. Ensaio de tração

A máquina onde foram realizados os ensaios está mostrada na Figura 3.12, tal equipamento é utilizado para realizar ensaios de tração, flexão e compressão de diferentes materiais, sendo a mesma do Modelo WDW100EB com capacidade de 100 KN.

Figura 3.12 – Máquina de ensaios mecânicos WDW100EB 100KN (imagem do próprio autor)



Inicialmente os corpos de prova foram observados e seguindo o procedimento, os mesmos foram fixados na máquina através de duas garras e o ensaio pode ser iniciado a contento.

Assim, finalmente os ensaios de tração puderam ser realizados, Assim, dados do ensaio de tração dos corpos de prova foram colhidos e armazenados. Diga-se de passagem, no momento não serão apresentados tais dados já que seria redundante, pois aparecerá novamente na comparação com os resultados de simulação numérica feita a partir do ANSYS.

Ademais, diversos ensaios para os materiais compósitos foram realizados na máquina de tração, segue as imagens das Figuras 3.13 a 3.16 como ilustração de alguns materiais e testes realizados no decorrer desta tese. Como são materiais frágeis, os mesmos não possuem deslocamento plástico considerável que justificariam suas ilustrações completas. No entanto o ANEXO B mostra alguns dos principais resultados obtidos no ensaio de tração para compósitos.

Figura 3.13 – Corpos de prova diversos materiais no ensaio de tração (imagem do próprio autor)



Figura 3.14 – Corpos de prova nos ensaios – Resina pura (imagem do próprio autor)



Figura 3.15 – Corpos de prova depois dos ensaios – Fibra de Kevlar (imagem do próprio autor)



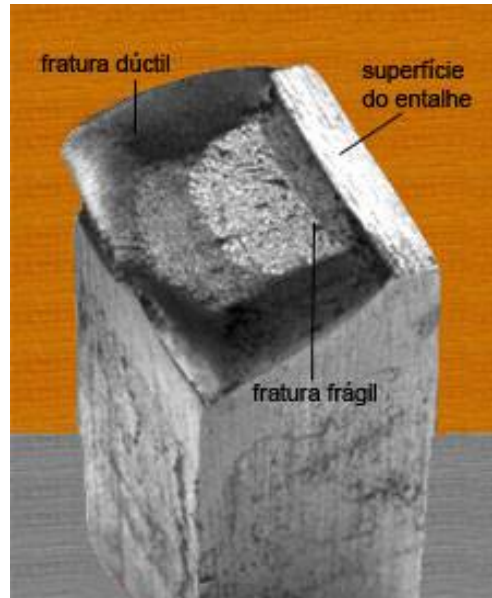
Figura 3.16 – Corpos de prova depois dos ensaios – Fibra de coco (imagem do próprio autor)



3.2.2. Ensaio charpy

Os testes de rompimento com Charpy no geral é uma situação muito rápida onde não se nota diferença entre corpos de prova e ensaios distintos, ou seja, todos os rompimentos, visualmente falando são idênticos, excetuando, o tipo de fratura e os resultados de absorção de energia, por esse fato não será mostrado imagens dos ensaios, mas segue mostrado na Figura 3.17 um exemplo em detalhe de uma fratura metálica onde se pode observar uma área dúctil e uma frágil.

Figura 3.17 – Corpo de prova metálico rompido por Ensaio Charpy, mostrando regiões de fratura dúctil (cinza escuro) e de fratura frágil (aspecto rugoso)



No entanto, como exemplo de rompimentos e análise de resultados, no capítulo resultados e discussões segue um experimento realizado a partir de compósitos com a máquina de ensaios destrutivo, criada a partir dessa tese.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo é dedicado às discussões e resultados oriundos das frentes de trabalho: Ensaio de Tração e Ensaio rompimento Charpy. Aborda-se também no conteúdo deste tópico a simulação realizada com o software Ansys em comparativo com as análises práticas das duas frentes em questão.

4.1 ENSAIOS DE VALIDAÇÃO NUMÉRICO-EXPERIMENTAIS

A título de comparação, ilustração e validação de resultados oriundos dos equipamentos utilizados no presente trabalho, bem como a maçante pesquisa em torno do já consagrado código computacional Ansys, dois comparativos foram feitos, a saber:

- *Ensaio Charpy* para os materiais: Aço, Alumínio e Cobre a partir de dados retirados de 3 fontes distintas: Literatura, Análise através do Ansys e Máquina Analógico-Digital de Ensaio de Rompimento Destrutivo Charpy criada no decorrer da presente tese;
- *Ensaio de Tração* para os mesmos materiais: Aço, Alumínio e Cobre a partir de dados retirados também de 3 fontes distintas: Literatura, Análise através do Ansys e Máquina Universal de Ensaio (M.U.E.) do laboratório de Engenharia da Anhanguera.

4.1.1 Resultados Charpy

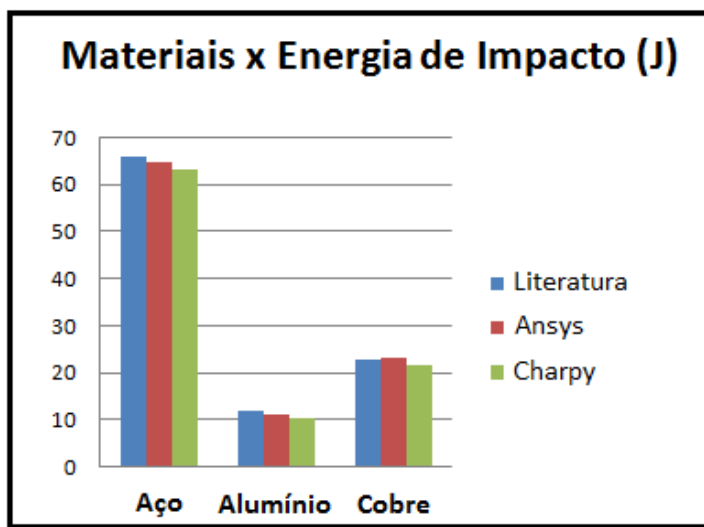
Os dados coletados na literatura (Callister) para a energia de absorção de impacto para o aço, alumínio e cobre, aliado aos resultados oriundos dos ensaios no equipamento confeccionado Charpy e posterior análise no programa comercial Ansys deram origem à Tabela 4.1 e sua respectiva Figura 4.1.

Lembrando que os dados de ensaio experimental charpy foram realizados por média entre 3 corpos de prova para o cobre e o aço, já o para o alumínio os resultados foram extraídos deste mesmo trabalho, quando houve o comparativo entre resultados analógicos e digitais da Máquina de ensaio destrutivo Charpy.

Tabela 4.1 – Comparativo entre energia absorvida para o Aço, Alumínio e Cobre através de dados oriundos de literatura, análise Ansys e ensaio Charpy

Unidades em (J)	Literatura (Callister)	Ansys (Presente Projeto)	Charpy (Presente Projeto)	Erro (%) Ansys/Charpy (Em relação à Literatura)	
Aço	65,80	64,74	62,95	1,61094	2,76491
Alumínio	12,00	11,38	10,31	5,16667	9,40246
Cobre	23,00	23,21	21,70	0,90478	6,50582

Figura 4.1 – Gráfico de energia de absorção de impacto para o Aço, Alumínio e Cobre através de dados oriundos de literatura, análise Ansys e ensaios Charpy



Nota-se em um comparativo da Tabela 4.1 e sua respectiva Figura 4.1 uma boa coerência na tendência dos valores entre dados da literatura, simulação virtual e ensaios laboratoriais. Os dados que mais se aproximam da literatura foram as simulações virtuais, pode-se explicar este fato devido às mesmas utilizarem em seu código fonte uma formulação matemática oriunda das próprias referências bibliográficas.

Já os ensaios laboratoriais estão propensos a uma enorme lista de erros como: má leitura e interpretação de dados, oscilações de temperaturas, material com impurezas ou até mesmo problemas quando do confeccionamento dos corpos de prova através de uma têmpera indesejada, etc, resultando em eventuais dados incoerentes.

Pode-se notar também que em todos os casos dos materiais ensaiados com o Charpy deram valores em média abaixo da literatura, fato esse que pode ser explicado pelas impurezas contidas em materiais comerciais não puros. A Figura 4.2 mostra um exemplar de cada material como foram adquiridos, ainda sem o entalhe para o rompimento.

Figura 4.2 – Materiais “*in natura*” adquiridos para ensaio rompimento Charpy



4.1.2 Resultados Tração

Assim como feito nos resultados Charpy, uma analogia é concedida para os comparativos dos ensaios de Tração, no entanto, para os ensaios de tração serão levados em consideração dois pontos importantes de um gráfico tensão-deformação, a saber: Limite de Escoamento (σ_e) e Limite de Resistência à Tração (σ_u ou LRT).

Os dados coletados na literatura (Callister, 2002) de σ_e e σ_u para o aço, alumínio e cobre, aliado aos resultados oriundos da Máquina Universal de Ensaio (M.U.E.) e posterior análise no programa comercial Ansys deram origem às Tabelas 4.2 e 4.3 e sua respectiva Figuras 4.3 e 4.4.

Tabela 4.2 – Comparativo entre limites de escoamento para o Aço, Alumínio e Cobre através de dados oriundos de literatura, análise Ansys e ensaios M.U.E.

Unidades em (MPa)	Literatura (Callister)	Ansys (Presente Projeto)	M.U.E. (Presente Projeto)	Erro (%) Ansys/M.U.E. (Em relação à Literatura)	
Aço (1020)	180,00	187,30	173,15	3,89749	7,55473
Alumínio	35,00	35,22	34,00	0,62465	3,46394
Cobre	69,00	72,19	66,78	4,41889	7,49411

Figura 4.3 – Gráfico de limites de escoamento para o Aço, Alumínio e Cobre através de dados oriundos de literatura, análise Ansys e ensaios M.U.E.

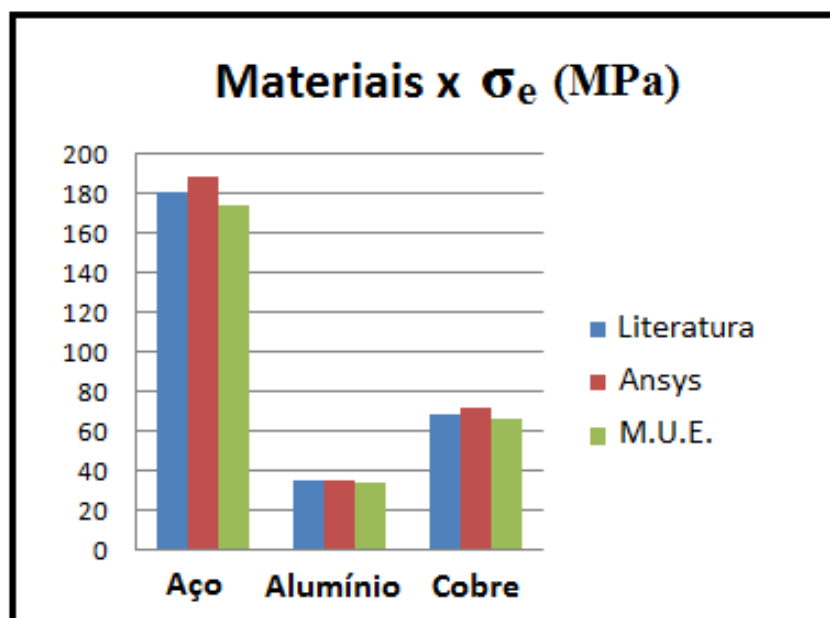
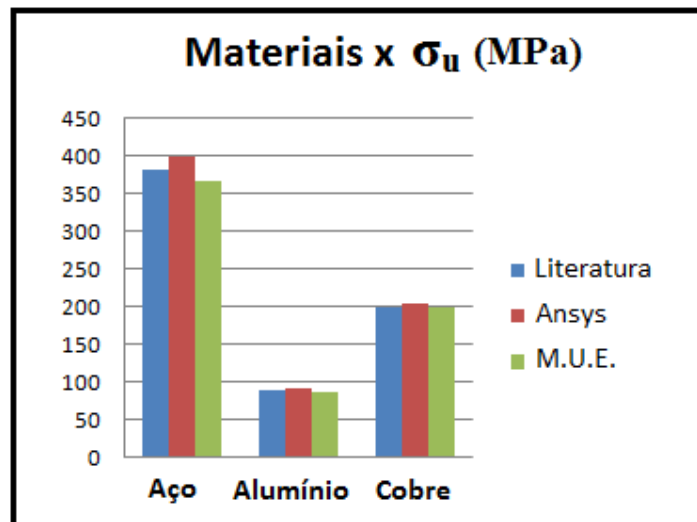


Tabela 4.3 – Comparativo entre limites de resistências a tração para o Aço, Alumínio e Cobre através de dados oriundos de literatura, análise Ansys e ensaios M.U.E.

Unidades em (MPa)	Literatura (Callister)	Ansys (Presente Projeto)	M.U.E. (Presente Projeto)	Erro (%) Ansys/M.U.E. (Em relação à Literatura)	
Aço (1020)	380,00	398,94	366,54	4,74758	8,12152
Alumínio	90,00	91,15	87,35	1,26166	4,16895
Cobre	200,00	203,44	199,02	1,69092	2,17263

Figura 4.4 – Gráfico de limites de resistências à tração para o Aço, Alumínio e Cobre através de dados oriundos de literatura, análise Ansys e ensaios M.U.E.



Em comentários aos resultados obtidos nos ensaios de tração no que remete ao comparativo entre Literatura, Ansys e M.U.E observa-se também uma analogia aos resultados Charpy da seção anterior no que se refere a:

- Coerência na tendência dos valores;
- As simulações virtuais tiveram resultados mais próximos da literatura;
- Os Ensaios laboratoriais proporcionaram sempre valores inferiores aos da literatura.

Nota-se que os limites de escoamento para o aço, alumínio e cobre analisados através da literatura, Ansys e ensaio M.U.E. surtiram valores inferiores quando comparado aos limites de resistências à tração para o mesmos materiais. Obviamente estas informações estão a contento, pois quando se analisa uma curva de engenharia estes limites são bem distintos para materiais elasto-plásticos e certamente o limite de escoamento é inferior ao limite resistência à tração.

4.2 RESULTADOS CHARPY SIMULAÇÃO-EXPERIMENTAL

Foi elaborado nessa fase da tese, corpos de prova de compósitos com duas variáveis: adição de fibras de cana de açúcar e tratamento térmico (aquecimento/resfriamento). Assim, a partir dos resultados dos ensaios e medidas de energia de impacto absorvida pelo material, pôde-se concluir se o tratamento térmico e a adição das fibras foram fatores que influenciaram a absorção de energia mecânica, como se pode observar a partir dos resultados a seguir. Assim, foram construídos 4 corpos de prova para 4 classes distintas, a saber:

- Sem fibra e sem tratamento térmico (SFST);
- Sem fibra e com tratamento térmico (SFCT);
- Com fibra e sem tratamento térmico (CFST);
- Com fibra e com tratamento térmico (CFCT).

Para cada um dos tipos de corpo de prova foram feitas as suas médias de energia de impacto absorvidas e seus respectivos desvios padrões. Para análise dos dados foi feito um cruzamento de dados no intuito de comparar resultados, As Tabelas 4.4 e 4.5 mostram os resultados gerais do experimento.

Tabela 4.4 - Valores obtidos com corpos de prova sem tratamento

Energia absorvia (J) – Sem Tratamento			
Nº	Sem Fibra	Com Fibra	Nº
1	0,69	1,83	1
2	2,12	0,80	2
3	1,12	0,91	3
4	1,12	0,93	4

Tabela 4.5 - Valores colhidos com corpos de prova com tratamento

Energia absorvia (J) – Com Tratamento			
Nº	Sem Fibra	Com Fibra	Nº
1	1,01	1,53	1
2	1,83	1,23	2
3	1,43	0,80	3
4	1,12	1,01	4

➤ *ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA (CTSF) E (STSF)*

Nota-se que para cada corpo de prova com seu tipo de classificação se obteve valores diferentes de energia de impacto absorvida (J), sendo que pela média os valores dos corpos de prova CTSF absorveram mais energia que os corpos de provas STSF, porém esta diferença de energia não chega a ser de importância significativa, aumentando pouco a resistência.

Tal fato pode ter ocorrido devido ao maior número de ligações cruzadas que se formaram durante o T.T. A Tabela 4.6 reúne um comparativo entre os corpos de prova CTSF e STSF.

Tabela 4.6 - Comparativo entre os corpos de prova CTSF e STSF, média e desvio padrão

CTSF		STSF	
Nº	Energia (J)	Energia (J)	Nº
1	1,01	0,69	1
2	1,83	2,12	2
3	1,43	1,12	3
4	1,12	1,12	4
Média/Desv.	1,35/0,37	1,26/0,61	Média/Desv.

➤ *ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA (STCF) E (CTCF)*

Para os corpos de prova STCF e CTCF se obteve praticamente os mesmos valores de energia de impacto absorvidos (1,12 e 1,14 respectivamente). A energia absorvida dos corpos de prova que possuíam fibras em sua composição resultou em um valor menor quando

observados os resultados dos ensaios que não possuíam fibras. Fato que pode ser explicado devido ao aparecimento de micro bolhas que acabam por fragilizar ainda mais o material.

Infelizmente as micro bolhas e conseqüentemente micro vazios que são formados não puderam ser controlados de maneira eficaz pela forma que foi conduzida o confeccionamento dos corpos de prova em questão, pois demandariam equipamentos e técnicas superiores às disponíveis e executadas respectivamente.

Outro fator que se observa é que mesmo com o tratamento térmico dado, não houve diferença na energia absorvida. Sabendo que o tratamento no material tende a formar mais ligações cruzadas, e de posse da informação que o adicionamento de fibras aumenta a quantidade micro vazios, explica-se que tais vazios impedem parte dessas ligações de se formarem e se ligarem com as outras cadeias estruturais. A Tabela 4.7 reúne um comparativo entre os corpos de prova STCF e CTCF.

Tabela 4.7 - Comparativo entre os corpos de prova STCF e CTCF, média e desvio padrão

STCF		CTCF	
Nº	Energia (J)	Energia (J)	Nº
1	1,83	1,53	1
2	0,80	1,23	2
3	0,91	0,80	3
4	0,93	1,01	4
Média/Desv.	1,12/0,48	1,14/0,31	Média/Desv.

➤ ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA (STSF) E (STCF)

Para a análise dos corpos de prova STSF e STCF nota-se que há uma pequena diferença de energia absorvida, sendo o STSF=1,26 J +/- 0,61J e o STCF = 1,12J +/- 0,48J. O caso das micro bolhas repete-se aqui, o corpo de prova que possui fibras em sua composição deveria ter aumentado sua energia de impacto, mas devido aos micros vazios que ocorreram devido ao adicionamento das fibras de cana de açúcar, as ligações se formaram de forma incompleta ou não se formaram, não acarretando assim em aumento de resistência. A Tabela 4.8 reúne um comparativo entre os corpos de prova STSF e STCF.

Tabela 4.8 - Comparativo entre os corpos de prova STSF e STCF, média e desvio padrão

STSF		STCF	
Nº	Energia (J)	Energia (J)	Nº
1	0,69	1,83	1
2	2,12	0,80	2
3	1,12	0,91	3
4	1,12	0,93	4
Média/Desv.	1,26/0,61	1,12/0,48	Média/Desv.

➤ *ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA (STSF) E (CTCF)*

Existe uma singela diferença entre os corpos de prova STSF = 1,26J +/- 0,61J e CTCF = 1,14J +/- 0,31J, demonstrando que os corpos de prova STSF ainda absorvem mais energia sendo assim mais resistentes ao impacto. O motivo que ocorre nos corpos de prova CTCF fazendo com que fiquem mais frágeis é devido novamente à quantia de micros vazios que acabam fragilizando o material e interrompendo ligações que poderiam se formar ao longo de sua estrutura cristalina. A Tabela 4.9 reúne um comparativo entre os corpos de prova CTCF e STSF.

Tabela 4.9 - Comparativo entre os corpos de prova CTCF e STSF, média e desvio padrão

CTCF		STSF	
Nº	Energia (J)	Energia (J)	Nº
1	1,53	0,69	1
2	1,23	2,12	2
3	0,80	1,12	3
4	1,01	1,12	4
Média/Desv.	1,14/0,31	1,26/0,61	Média/Desv.

➤ *ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA (STCF) E (CTSF)*

Entre os valores de absorção de energia entre os corpos de prova STCF = 1,12J +/- 0,48 e CTSF = 1,35J +/- 0,37J pode-se notar que o corpo onde não houve o adicionamento de fibra da cana de açúcar e sofreu tratamento térmico conseguiu absorver uma quantidade um pouco maior de energia de impacto, ficando mais resistente.

Neste caso o tratamento térmico pôde ocorrer de tal forma que mais ligações cruzadas se formassem ao longo do Tratamento Térmico (T.T.), pois não havia tantos micros vazios pela falta do adicionamento de fibra. A Tabela 4.10 reúne um comparativo entre os corpos de prova STCF e CTSF.

Tabela 4.10 - Comparativo entre os corpos de prova STCF e CTSF, média e desvio padrão

STCF		CTSF	
Nº	Energia (J)	Energia (J)	Nº
1	1,83	1,01	1
2	0,80	1,83	2
3	0,91	1,43	3
4	0,93	1,12	4
Média/Desv.	1,12/0,48	1,35/0,37	Média/Desv.

➤ *ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA (CTSF) E (CTCF)*

No comparativo entre as energias de absorção dos dois corpos de prova contendo tratamento térmico (CTSF = 1,35J +/- 0,37J e CTCF = 1,14J +/- 0,31J), nota-se claramente que as fibra de cana de açúcar conferem ao material uma menor energia de impacto necessária para a sua fratura causado pela fragilização do material devido às micro bolhas presentes durante seu confeccionamento. A Tabela 4.11 reúne um comparativo entre os corpos de prova CTSF e CTCF.

Tabela 4.11 - Comparativo entre os corpos de prova CTSF e CTCF, média e desvio padrão

CTSF		CTCF	
Nº	Energia (J)	Energia (J)	Nº
1	1,01	1,53	1
2	1,83	1,23	2
3	1,43	0,80	3
4	1,12	1,01	4
Média/Desv.	1,35/0,37	1,14/0,31	Média/Desv.

Em resumo, com a comparação das análises citadas, chega-se a conclusão de que não houve praticamente aumento da resistência entre os distintos grupos de corpos de prova a partir de duas variáveis: tratamento térmico e presença de fibra.

No entanto, o adicionamento de fibras fez com que resultasse em uma redução do custo de produção do material, não podendo deixar de ser notada a grande diferença de densidade entre a fibra e a resina onde houve sensivelmente uma diminuição de seu peso, tornando um material mais leve e com valor mais acessível ao mercado.

Há de se notar ainda que a resistência dos corpos de prova em que estiveram presentes em sua composição as fibras de cana de açúcar foi fortemente prejudicada com o aparecimento de micro bolhas, remetendo ao pensamento de que a resistência poderia ser muito maior.

Ademais, assim como nos ensaios de tração, diversos ensaios charpy nos compósitos foram realizados, supre-se novamente nesse momento a apresentação dos mesmos, pois são materiais frágeis e no seu rompimento instantâneo não possuem deslocamento plástico considerável que beneficiaria sua visualização.

4.2.1 Ensaio de Charpy na máquina universal

Como dito anteriormente, os resultados de ensaio laboratorial de materiais na instituição de ensino superior UNESP, tendo como responsável seu Departamento de Materiais e Tecnologia quando da utilização do método Charpy será mostrado a seguir.

Os materiais e equipamentos utilizados em tal experimento foram: Água com gelo; Ultracriostato MK70; Termômetro; Béquer; Máquina de Ensaio Charpy e 12 corpos de prova do aço 1045 normalizado, sendo testados em pares (-196°C, -19°C, 0°C, 24°C, 100°C, 200°C).

Seguindo descrição do método utilizado, que por sinal foi o mesmo realizado com o charpy construído na presente tese, os corpos de prova foram mantidos por 10 minutos na sua respectiva temperatura de teste e posteriormente foram dispostos na máquina de modo que ficassem bi-apoiados e com a superfície que não continha entalhe voltada para trás, sendo esta a região que receberia o impacto.

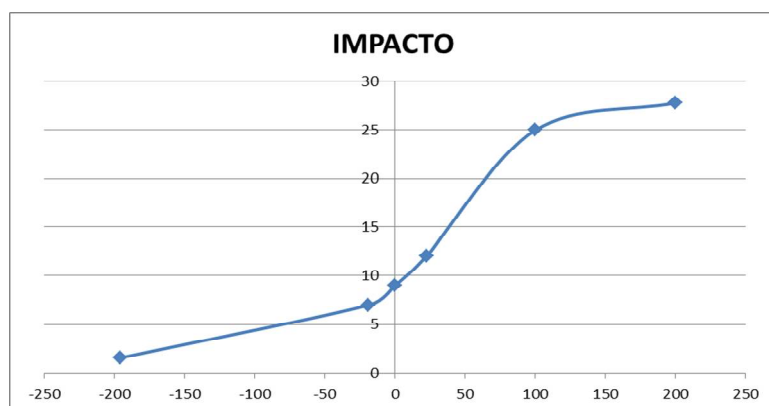
Depois de feito o acerto da posição dos corpos de prova na máquina, o martelo foi solto, impactando o material na temperatura ensaiada, sendo freado lentamente pelo operador.

Para coleta e tratamento de dados foram executados dois rompimentos para cada temperatura. Assim, os resultados produzidos no referido laboratório de materiais estão mostrados na Tabela 4.12 e respectivo gráfico na Figura 4.5.

Tabela 4.12 – Valores da temperatura e da energia absorvida para o aço 1045, UNESP

Temperatura (°C)	Energia Absorvida (J)
-196	1,5
-19	7
0	9
22,5	12
100	25
200	27,75

Figura 4.5 – Gráfico da energia absorvida x temperatura de ensaio, UNESP Guaratinguetá



Notar-se-á que houve uma variação de temperatura que vai de -196 °C a 200 °C. Como na instituição em que foi desenvolvida essa tese não havia equipamento para se utilizar temperaturas abaixo de 0 °C, houve ensaios para o aço 1045 a partir do 0 °C inclusive, ocorrendo vários rompimentos com os principais resultados expressos na Tabela 4.13.

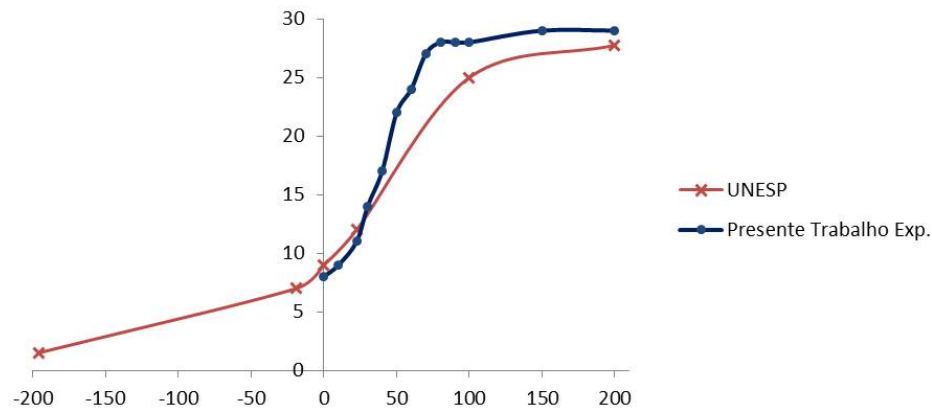
Tabela 4.13 – Valores da temperatura e energia absorvida para o aço 1045, presente trabalho

Temperatura (°C)	Energia Absorvida (J)
0	8
10	9
22,5	11
30	14
40	17
50	22
60	24
70	27
80	28
90	28
100	28
150	29
200	29

Assim, a Tabela 4.14 mostra um comparativo entre resultados laboratoriais UNESP e Presente Trabalho. Já a Figura 4.6 mostra esses mesmos dados em forma de gráfico para uma melhor visualização dos dados e da tendência frágil do mesmo material, ensaiados em máquinas diferentes.

Tabela 4.14 – Valores comparativos da temperatura e energia absorvida para o aço 1045 para mesmas temperaturas entre UNESP e Presente trabalho

Temperatura (°C)	Energia Absorvida (J) UNESP	Energia Absorvida (J) Presente Trabalho
-196	1,5	---
-19	7	---
0	9	8
22,5	12	11
100	25	28
200	27,75	29

Figura 4.6 – Gráfico Comparativo: Energia absorvida (J) x Temperatura (°C) para o aço 1045

Ao se observar este gráfico comparativo, notamos que as curvas obtidas, apesar de não serem idênticas, compartilham uma boa concordância da mesma tendência de região frágil do material, pois nota-se que há um grande aumento na energia absorvida pelo aço 1045 em seu rompimento quando do aumento de sua temperatura, ou seja, pode-se determinar a temperatura de transição dúctil-frágil para esse material. Os dados de rompimento para o mesmo aço podem não ser idênticos devido às condições em que foram submetidos os testes e/ou a própria composição do metal, sendo que fatalmente é variável para fabricantes distintos.

É válido ressaltar que durante a realização do ensaio existem perdas que não são computadas nos dados finais. Tais perdas estão relacionadas, desde ao atrito do ar com o martelo, até perdas devido ao calor e ao som. Essas dissipações não são medidas com certa facilidade, razão pela qual, são desprezadas, até mesmo, devido ao seu baixo poder de influência sobre os dados dos resultados. Como também dito no relatório de impacto charpy realizado na UNESP em comparativo ao presente trabalho.

4.2.2 Ensaio Charpy através da análise de elementos finitos

A título de ilustração e validação do código computacional para o caso de absorção de energia por rompimento, foi realizada simulações no código Computacional ANSYS oriundas dos mesmos moldes dos testes feitos em laboratório. Para tal, algumas formas de engastes e disposição dos corpos de provas foram testadas refletindo em praticamente mesmo resultado. A sequência de imagens ilustrativas das Figuras 4.7, à 4.10 mostra o fato. Tutoriais e o próprio *help* do programa foram exaustivamente utilizados no processo de simulação.

Figura 4.7 – Engastes em forma de cubo e cutelo com dimensões reais

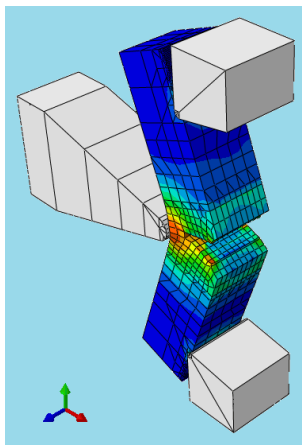


Figura 4.8 – Engastes e cutelo em forma circular

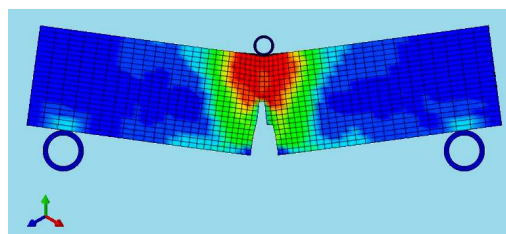


Figura 4.9 – Engastes em forma de chapa dobrada e cutelo com dimensões reais

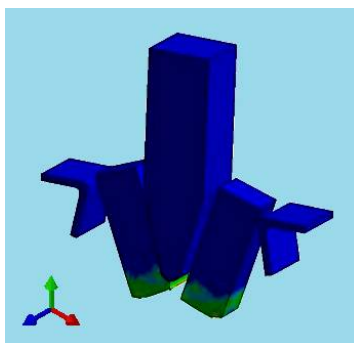
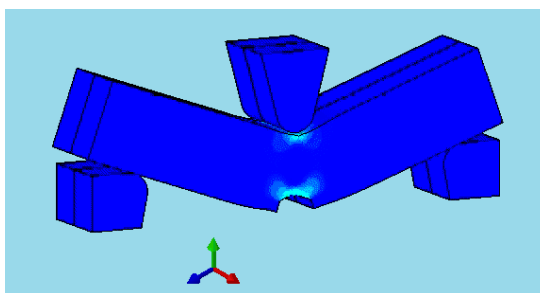
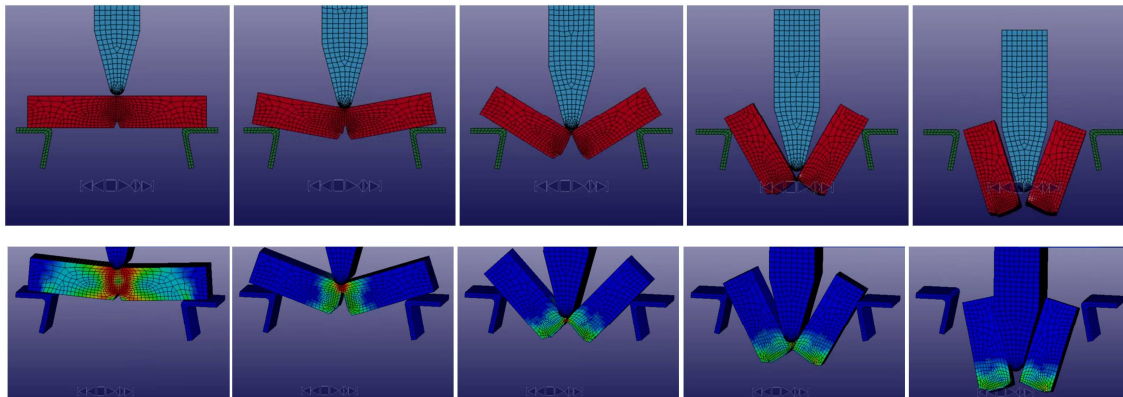


Figura 4.10 – Engastes em forma de cubo arredondado nas extremidades e cutelo com dimensões reais



A sequência de imagens da Figura 4.11 mostra um rompimento de um corpo de prova com as mesmas dimensões das utilizadas nessa tese, tal imagem não produz efeitos significativos, pois não possuíam valores de referência, serve apenas para ilustrar o poder o código computacional empregado.

Figura 4.11 – Sequência retirada da filmagem virtual de um rompimento característico charpy



Nota-se nessa sequência de imagens que se trata do mesmo rompimento, tanto na parte superior quanto na parte inferior da Figura 4.11, sendo a primeira focada apenas na destruição do corpo e a segunda dando ênfase nos pontos de maior tensão através das cores utilizadas.

Ressalta-se nesse ponto que mesmo na atualidade e com os poderosos computadores capazes de processar simultaneamente milhares de informações por segundo, os programas modernos como o ANSYS e outros de sua natureza exigem um poder computacional extremamente elevado quando se tem o objetivo de fazer simulações realísticas, ou seja, com o intuito de se obter filmagens e longos tempos de testes e simulações.

Visto tamanha dificuldade de se processar todos os cálculos, nessa tese a ênfase foi dada na captura de dados pontuais e posterior processamento das imagens.

4.2.3 Comparação Charpy dos ensaios experimental e computacional

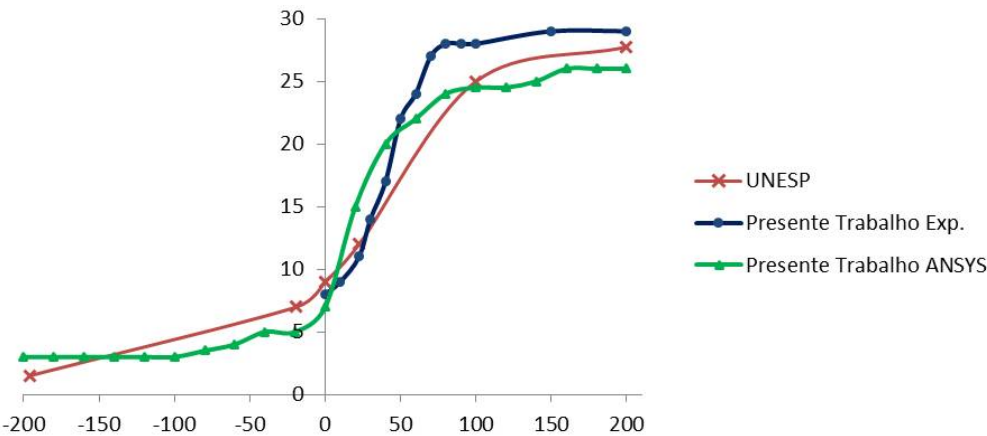
A partir de dados retirados nas bibliografias de um aço 1045, os mesmos foram inseridos no ANSYS, assim pôde-se de uma forma razoavelmente fácil extrair os dados de absorção de energia para diferentes temperaturas de simulação (variação de -200°C a 200°C). A Tabela 4.15 mostra os dados capturados pelo programa.

Tabela 4.15 – Valores da temperatura e energia absorvida para o aço 1045, ANSYS

Temperatura (°C)	Energia Absorvida (J)
-200	3
-160	3
-120	3
-80	3,5
-60	4
-40	5
-20	5
0	7
20	15
40	20
60	22
80	24
120	24,5
160	26
200	26

Finalmente, unindo os dados laboratoriais (UNESP e presente trabalho UCDB Campo Grande) e dados da simulação numérica realizada a partir do ANSYS em um mesmo gráfico, criou-se a Figura 4.12 que mostra as três curvas simultaneamente.

Figura 4.12 – Gráfico Comparativo das três curvas: Energia absorvida (J) x Temperatura (°C) para o aço 1045



O fato de os corpos de prova apresentarem valores muito diferentes para a mesma temperatura de ensaio pode ser explicado pela existência de defeitos internos no material, por exemplo, ou por um tempo maior de exposição à temperatura ambiente antes de ocorrer o impacto, como se remeteu a estas mesmas conclusões nos ensaios UNESP.

Os defeitos propiciam o surgimento de tensões internas, o que pode fazer com o que material dúctil apresente um comportamento frágil em situações em que o mesmo deveria ser dúctil, devido à nucleação de trincas e sua rápida propagação pelo corpo-de-prova. Isto se traduz em menores valores de energia absorvida durante o impacto.

4.2.4 Ensaio charpy nos compósitos

Com relação ao material metálico Aço 1045 ensaiado pelo charpy, os resultados foram condizentes com a bibliografia, pois a literatura dispõe de material de consulta. Já para as análises Charpy de materiais compósitos a literatura é escassa, principalmente no que tange aos materiais aqui utilizados. Assim, reúnem-se na Tabela 4.16 os resultados de energia absorvida dos materiais compósitos, sendo os mesmos ensaiados à 25°C.

Tabela 4.16 – Energia absorvida (charpy) para materiais compósitos pelos grupos de CP's

Grupo (CP's)	Material Compósito	Energia absorvida 25°C (J)
1	Sem Fibra	01,7
2	Fibra de Coco (3%)	01,2
3	Fibra de Coco (5%)	01,8
4	Fibra de Coco (10%)	01,7
5	Fibra de Coco (20%)	01,3
6	Fibra de Bambu (15%)	03,8
7	Fibra de Cana (35%)	01,3
8	Fibra de Borracha (25%)	01,2
9	Fibra de Technyl (15%)	02,6
10	Fibra de Nylon (15%)	02,6
11	Fibra de Vidro (30%)	08,7
12	Fibra de Kevlar (50%)	13,3

Finalmente, a energia de impacto para os vários grupos de compósitos em diferentes temperaturas analisadas através de dois métodos: ensaios práticos laboratoriais Charpy e ensaios ANSYS foram realizados.

A Figura 4.13 mostra o gráfico comparativo entre Energia absorvida (J) x Temperatura (°C) para as fibras de coco e resina pura. Além de análise ANSYS para fibra de coco de maior energia absorvida por interpolação no seu rompimento. Já a Figura 4.14 mostra o mesmo gráfico comparativo para os demais materiais ensaiados.

Figura 4.13 – Gráfico Comparativo: Energia absorvida (J) x Temperatura (°C) para Fibra de coco

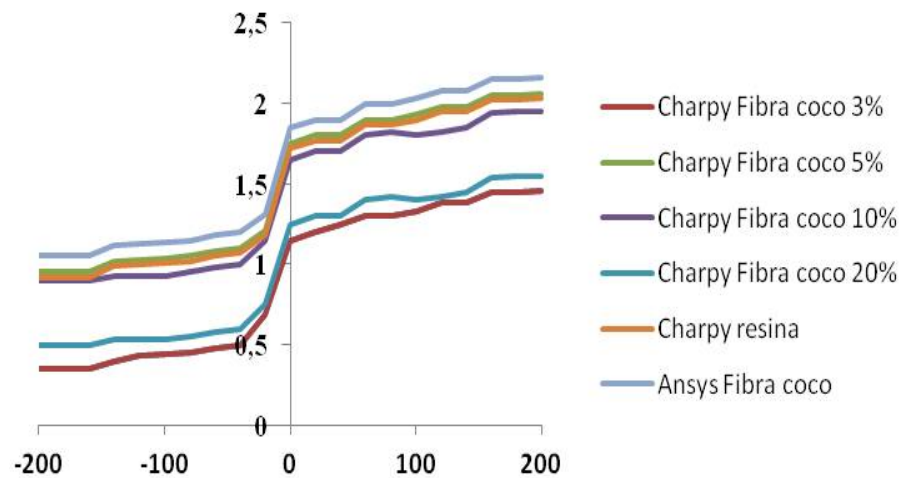
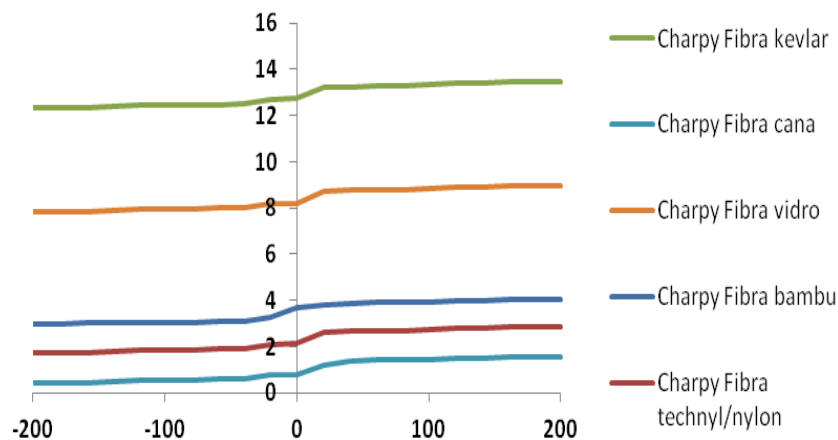


Figura 4.14 – Gráfico Comparativo: Energia absorvida (J) x Temperatura (°C) para demais compósitos



Há de se notar que os valores mostrados nos gráficos das Figuras 4.13 e 4.14 foram compostos por ensaios Charpy e resultados ANSYS. Observa-se então que a fibra de coco (7% em massa) substitui muito bem a resina em se tratando das propriedades: Tensão de

Escoamento, Elasticidade, Energia Absorvida em diferentes temperaturas, entre outras, com a vantagem de ser mais econômica e mais leve.

O mesmo discurso se remete para as fibras naturais ensaiadas, principalmente o bambu, superando a resina pura em 40% na Tensão de Escoamento, 10% no Módulo de Elasticidade e 220% na Energia Absorvida necessária para seu rompimento.

4.3 RESULTADOS TRAÇÃO SIMULAÇÃO-EXPERIMENTAL

4.3.1 Ensaio de tração nos compósitos

Assim como os demais corpos de provas foram ensaiado, os corpos de prova de compósitos também foram analisados com a retirada de dados principalmente do limite de resistência à tração, tensão de escoamento e módulo de elasticidade no intuito da inserção desses valores no código computacional ANSYS, assim o regime elástico dos compósitos para o ensaio de tração se deu a contento e podem-se observar alguns dados exportados pela máquina universal de ensaios no ANEXO B da presente tese.

A Tabela 4.17 reúne as propriedades mecânicas: Tensão de Escoamento e Módulo de Elasticidade obtido para os conjuntos de corpos de provas (CP's).

Tabela 4.17 – Propriedades mecânicas: Tensão de Escoamento e Módulo de Elasticidade para CP's

Grupo (CP's)	Material Compósito	Tensão de Escoamento (GPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
1	Sem Fibra	<i>17,8</i>	<i>10,3</i>
2	Fibra de Coco (3%)	<i>14,0</i>	<i>09,5</i>
3	Fibra de Coco (5%)	<i>17,5</i>	<i>10,4</i>
4	Fibra de Coco (10%)	<i>13,4</i>	<i>10,0</i>
5	Fibra de Coco (20%)	<i>12,2</i>	<i>09,4</i>
6	Fibra de Bambu (15%)	<i>24,8</i>	<i>11,3</i>
7	Fibra de Cana (35%)	<i>11,5</i>	<i>05,5</i>
8	Fibra de Borracha (25%)	<i>10,5</i>	<i>04,1</i>
9	Fibra de Technyl (15%)	<i>20,9</i>	<i>11,4</i>
10	Fibra de Nylon (15%)	<i>20,6</i>	<i>11,3</i>
11	Fibra de Vidro (30%)	<i>37,7</i>	<i>18,0</i>
12	Fibra de Kevlar (50%)	<i>105,0</i>	<i>25,7</i>

Em se tratando dos ensaios de tração experimental realizados nos compósitos, os mesmos foram executados a contento em uma máquina de ensaios universal deixando seus principais resultados em forma de gráfico Tensão x Deformação, donde propriedades como: LRT, limite de escoamento e Elasticidade puderam ser observados.

Para os materiais compósitos feitos de resina e fibras naturais, além de menor custo e peso, no ensaio de tração ocorreram resultados parecidos com a resina pura, excetuando o bambu, que novamente supera a resina pura, dessa vez em 40% na Tensão de Escoamento e 10% no Módulo de Elasticidade.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Apresentou-se no decorrer deste trabalho o projeto e fabricação de uma máquina de ensaio de rompimento destrutivo Charpy. Em sua instrumentação foram elaborados dois mecanismos para a aferição dos valores de energia absorvida e resistência ao impacto: digital e analógica. O equipamento será utilizado por alunos no decorrer de diferentes cursos de graduação contribuindo significativamente com o processo de ensino-aprendizagem.

CHARPY materiais metálicos e compósitos

Foi possível obter a energia de impacto de corpos de prova Charpy tipo A através de diferentes ensaios e materiais, determinando a resistência ao impacto dos corpos de prova com resultados condizentes no gráfico de Energia absorvida X Temperatura, remetendo a conclusão de que a medida que o corpo é aquecido, necessita-se de maior energia para sua fratura, já a baixa temperatura é um fator importante no comportamento frágil dos metais.

Para os materiais compósitos feitos de resina e fibras naturais, houve em média um aumento na energia de absorção sob diferentes temperaturas destacando o bambu com aumento de 220% na energia necessária para o rompimento quando comparado à resina pura.

Há de se notar ainda que a resistência dos corpos de prova foi fortemente prejudicada com o aparecimento de micro bolhas e consequentemente micro vazios que não puderam ser controlados de maneira eficaz, remetendo ao pensamento de que a resistência poderia ser maior. No entanto, o adicionamento de fibras naturais fez com que resultasse em uma redução do custo de produção do material, não deixando de comentar a grande diferença de densidade entre as fibras naturais e a resina pura, tornando o compósito mais leve e com valor mais acessível ao mercado.

TRAÇÃO materiais metálicos e compósitos

Quando se trata dos experimentos e propriedades encontradas nos ensaios de tração aplicados a materiais metálicos, os resultados foram perfeitamente satisfatórios e dentro de sua normalidade, como era de se esperar, pois o mesmo mantém um padrão aceitável de fácil abundância. Já para os compósitos, os materiais foram ensaiados a contento deixando seus principais resultados em forma de gráfico Tensão x Deformação, donde propriedades como: LRT, limite de escoamento e Elasticidade puderam ser observados. Para os materiais compósitos feitos a partir de resina e fibras naturais, além de menor custo e peso, no ensaio de tração ocorreram resultados próximos à resina pura, excetuando o bambu, que novamente supera a resina pura em 40% na Tensão de Escoamento, 10% no Módulo de Elasticidade.

ANSYS – Tração e Charpy

Para os resultados de ensaios de tração em materiais metálicos comerciais através do programa Ansys foram observados dois pontos importantes de um gráfico de engenharia: Limite de Escoamento (σ_e) e Limite de Resistência à Tração (σ_u ou LRT). Assim observou-se uma boa coerência na tendência dos valores, tendo resultados mais próximos da literatura. As simulações computacionais para os materiais compósitos puderam proporcionar resultados condizentes após inserção de dados e curvas no software comercial.

Com relação à energia de absorção de impacto para os materiais metálicos (aço, alumínio e cobre), analisada pelo software, surtiram efeitos de uma boa coerência dos valores entre dados da literatura, simulação virtual e ensaios laboratoriais, com erros absolutos menores que os mesmos materiais quando ensaiados por tração (menores de 10%). Novamente os dados que mais se aproximam da literatura foram as simulações virtuais, pode-se explicar este fato devido às mesmas utilizarem em seu código fonte uma formulação matemática oriunda das próprias referências bibliográficas.

Simulações realizadas pelo software no ensaio Charpy para o aço 1045 variando a temperatura de ensaio foram feitas. Assim, notou-se que o Ansys reproduz bem a tendência da curva de aquecimento por energia de absorção de impacto quando comparado aos resultados experimentais realizados, onde se remete as mesmas conclusões para os materiais compósitos.

Visto toda tese, a principal contribuição deste doutoramento foi a de que os materiais fibrosos naturais abundantemente encontrados no Brasil substituem com boa qualidade e resistência aos muitos materiais sintéticos usados sem restrições, ademais, muitas das propriedades adquiridas com os compósitos feitos a partir de fibras naturais superam os materiais sintéticos originalmente utilizados.

PERSPECTIVAS FUTURAS

Em se tratando da produção de corpos de prova de compósitos, seria necessário encontrar uma solução para eliminar os micro-vazios criados no decorrer da mistura, que aumentam consideravelmente quando se aumenta a porcentagem em massa de fibras através de um método eficiente de vácuo, por exemplo, além de equipamento para ensaios em temperaturas muito distante da ambiente.

Foi mostrada no presente trabalho como a ferramenta computacional Ansys pode ser poderosa para simulação e visualização de dados, no entanto, pecou-se na produção de imagens e vídeos das simulações realísticas pela falta de recurso computacional, visto a enorme capacidade de processar simultaneamente milhares de informações por segundo que o Ansys possui. Mesmo assim, os resultados que eram objetivos desta tese foram alcançados e expostos de maneira clara quando necessária.

Assim posto, embora nem toda simulação não tenha sido ideal, visto a complexidade do programa e inserção de dados não precisos, esta foi capaz de mostrar que as simulações desenvolvidas estão apresentando resultados coerentes, devendo ainda ser mais estudado e mais explorado, no tocante à entrada de dados, para que possa, tornar-se uma ferramenta útil nos estudos da modelagem de materiais diversos sujeito à ação de cargas aplicadas.

Por fim, um estudo comparativo acerca de energia de absorção de materiais compósitos (Resina vs Fibra) entre Máquina Charpy e Simulação Ansys seria, do ponto de vista econômico, um assunto interessante. Mas para tal, um poder computacional maior e melhor há de ser possuir.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINHO, O. L.; VILELLA, R. C.; BUTTON, S. T. **Processos de fabricação e planejamento de processos**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, 2004.

ALMEIDA C. N. **Propriedades mecânicas e térmicas do sistema epóxi DEGEBA/ETILENODIAMINA modificado com nanoplateformas de silsesquioxano substituídas com grupos ésteres**. 2005. Disponível em: <<http://www.fqm.feis.unesp.br/pos/teses/disser-36.pdf>> Acesso em: 04 mar. 13.

ALMEIDA P. M. M. C.; MAGALHÃES V. H. S. **Polímeros**. 2004. Disponível em: <http://www2.ufp.pt/~madinis/Trabalhos/CMAT/2003_2004/Pedro%20e%20Victor.pdf> Acesso em: 20 jun. 13.

ALVARENGA JUNIOR, E. R. Cultivo e aproveitamento do sisal, 2012. Disponível em: <<http://www.respostatecnica.org.br/dossie-tecnico/downloadsDT/NjExOQ==>> Acesso em: 20 jun. 13.

ALVES C. S. **Aplicação de resina biodegradável de base vegetal em isoladores acústicos automotivos**. 2010. Disponível em: <http://www.automotiva-poliusp.org.br/mest/banc/pdf/TCC_CAlves_08_09_10_Rev_final00.pdf> Acesso em: 26 fev. 13.

ALVES, G. T. **Avaliação de absorção de energia de impacto**. uma abordagem baseada em testes com estruturas similares. 2009. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009..

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials. In: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM standards: metals test methods and analytical procedures**. Danvers: ASTM, 1996. p.136-155. (ASTM E23).

ANDRADE, R.; ORNELAS, J.; BRANDÃO, W. **Situação atual do sisal na Bahia e suas novas possibilidades de utilização e aproveitamento**. Disponível em: <http://www.seagri.ba.gov.br/pdf/3_comunicacao01v9n1.pdf> Acesso em: 13 fev. 13.

ANGRIZANI C. A et al. **Influência do comprimento da fibra de sisal e do seu tratamento químico nas propriedades de compósitos com poliéster**, 2006. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/238097456_INFLUENCIA_DO_COMPRIMENTO_DA_FIBRA_DE_SISAL_E_DO_SEU_TRATAMENTO_QUIMICO_NAS_PROPRIEDADES_DE_COMPOSITOS_COM_POLIESTER>. Acesso em: 01 jul. 2016.

ANSYS MYLTIPHYSICS 8.0. **ANSYS Release 8.0 Documentation**: ANSYS Inc. Theory Reference. United States: SAS IP, Inc., 2003.

ANSYS Inc. **Ansys Structural**. versão 5.7. Engineering simulation software.

ARCELOR MITTAL. **Aços para construção mecânica**. Disponível em: http://www.belgo.com.br/produtos/industria/solucoes/acos_construcao_mecanica/pdf/acos_construcao_mecanica.pdf. Acesso em: 11 nov. 2011.

ARAUJO L. A. **A mecatrônica na indústria de entreterimento**, 2011. Disponível em: <http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/C%EAnica/Pesquisa/a_mecatronica_na_industria_de_entretenimento.pdf>. Acesso em: 15 mai. 13.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials**. Danvers: ASTM, 1994. (Standard E 23-94a).

ASHBY, M. ; JONES, D. **Engenharia de materiais**. Rio de Janeiro: Campus, 2007. V. 2.

ASSAN, A. E. **Método dos elementos finitos**. Campinas: Ed. Unicamp, 2003. (Primeiros Passos).

AZEVEDO, A. F. M. **Mecânica dos sólidos**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1996.

BAÊTA, F. C.; SARTOR, V. **Resistência dos materiais e dimensionamento e estruturas para construções rurais**. Viçosa: Ed. da UFV, 1999.

BARROS C. **Apostila de polímeros**. 2011. Disponível em: <<http://edificacoes.files.wordpress.com/2011/04/apo-polimeros-completa-publicac3a7c3a3o.pdf>>. Acesso em: 24 fev. 2013.

BARTZ A. B.; SILVA D. I.; FIGUEREDO T. W.; SPOHR C. B. **Processo de corte em máquinas laser**. 2011. Disponível em: <http://www.fahor.com.br/publicacoes/sief/2011_Processo_corte_maquinas_laser.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2013.

BILESKY, L. R.; DE CONTI, C. **Análise de convergência da malha da simulação numérica do ensaio de tração off-axis em madeira de eucalyptus citriodora no plano It**, 2010. Disponível em:<<http://ec2-107-21-65-169.compute->

1.amazonaws.com/content/ABAAABUqcAI/analise-convergencia-malha-simulacao-numerica-ensaio-tracao-off>. Acesso em: 01 jul. 2016.

BILESKY, L. R.; DE CONTI, C. **Estudo numérico da geometria do corpo de prova “off-axis” para a madeira eucaliptus citriodora**. 2010. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABGHcAF/estudo-numerico-geometria-corpo-prova-201coff-axis201d-amadeira-eucaliptus-citriodora>>. Acesso em: 01 jul. 2016.

BREBBIA, C. A. ; FERRANTE, A. J. **The finite element technique**. Porto Alegre: Ed. UFRS. 1975.

BORGES, J. B. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina. Araranguá: CEFET/SC, 2009.

BURMAN, A. G.; FILGUEIRAS, T. S. A review of the wood bamboo genera of Brazil (Gramineae: Bambusoideae: Bambuseae). **Thaiszia**, Kosice, n. 3, p. 53-88, 1993.

BURNETT, D. S. **Finite element analysis**: from concepts to applications. New York: Addison-Wesley Pub. 1987.

CALLISTER, Jr., W. D. **Materials science and engineering**. 7. ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.

CALLISTER Jr., W. D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

CALLISTER Jr, W. D. **Introdução a ciência e engenharia dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson - Prentice Hall, 2009.

CANEVAROLO JÚNIOR, S. V. **Ciência dos polímeros**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2002.

CANEVAROLO JÚNIOR, S. V. **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo: Artliber, 2007.

CARTZ, L. **Nondestructive Testing**. Danver: A S M International, 1995.

CARVALHO A. O. **Análise da dinâmica do processo de roscamento por conformação na liga de magnésio AM60**. Disponível em: <http://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppmec/Alessandra_Olinda.pdf>. Acesso em: 23 out. 2013.

CARVALHO R. F. **Compósitos de fibra de sisal para o uso em reforços de estruturas de madeira**. 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-10062005-184350/pt-br.php>>. Acesso em: 26 mar. 2013.

CASTELETTI, L.F. **Instrumentação industrial**. Disponível em: <<http://eletricistamazinho.files.wordpress.com/2010/09/instrumentacao.pdf>>. Acesso em: 08 abr. 2013.

- CEPRA. **Processos de furação, mandrilagem e roscagem**. 2000. Disponível em: <<http://opac.iefp.pt:8080/images/winlibimg.exe?key=&doc=59986&img=659>>. Acesso em: 23 out. 2013.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. São Paulo: ABM, 1995.
- CLARO, A. C. R. **Laboratório de materiais, ensaio de impacto**. 2011. Guaratinguetá: Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Departamento de Materiais e Tecnologia, 2011. (Turma 341).
- CLOUGH, R. W. The finite element in plane stress analysis. In: PROCEEDINGS OF THE ASCE CONFERENCE ON ELECTRONIC COMPUTATION, 2, 1960, Pittsburgh. **Proceedings of the...** Pittsburgh: IEEE, 1960.
- COSTA A.P.O. **Estudo do comportamento cinético e mecânico – dinâmico de resinas epóxi a base de óleo de soja epoxidado**. 2001. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/1707/000306388.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 04 mar. 2013.
- COSTA, E. S.; SANTOS D. J. **Processos de usinagem**. Divinópolis: Centro Federal De Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2006. (Curso Técnico Em Eletromecânica, 2006).
- COOK, R. D.; MALKUS, D. S.; PLESHA, M. E.; WITT, R. J. **Concepts and applications of finite element analysis**. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- COPERTEC. **Soldagem**. Disponível em: <<http://www.copertec.com/downloads/pdf/soldagem.pdf>>. Acesso em: 01 out. 2013.
- CRESPO OLIVEIRA, A. L. **Contribuição para a análise de vigas mistas de Madeira laminada colada e concreto (MLC/concreto)**. 2002. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.
- D'ALMEIDA J. R. M.; MONTEIRO S. N. **Efeito da variação da razão resina/endurecedor sobre a resistência ao impacto de uma resina epóxi**. Rio de Janeiro: Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Universidade Católica do Rio de Janeiro Rio de Janeiro - RJ, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos - RJ. 1996.
- DECOM, J. S. **Implementação de um sistema alternativo para acionamento de cadeira de rodas motorizada**. 2012. Disponível em: <<http://www.pergamum.udesc.br/dados-bu/000000/000000000015/000015DC.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2013.
- DELFORGE, D. Y. M. **Instrumentação de um pêndulo para ensaio de impacto Charpy**. 1994. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, Campinas, 1994.
- DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.

DUARTE, A. S. **Metodologia básica para a produção de materiais de referencia para a calibração indireta de máquinas pendulares de impacto charpy**. 2006. 102 f. (Dissertação em Ciências dos Materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006. Disponível em: <

http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/3204/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O_%20MetodologiaBasicaPadr%c3%a3o.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2016.

FARIA P. E. **Estudo sobre a furação de compósito de resina epóxi reforçado com fibras de vidro**, 2007. 231 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007. Disponível em: <

<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/SBPS-7B5NX6>>. Acesso em: 01 jul. 2016.

FERREIRA, A. et al. Avaliação de compósito de poliéster e fibra de cana de açúcar. In: CBECIMat - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17, 2006, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: [S.n.], 2006. p. 4001-4012.

FERREIRA M. G. **Desenvolvimento de produtos plásticos integrando aspectos ambientais**. 2010. Disponível em: <<http://fateczl.edu.br/TCC/2010-1/tcc-114.pdf>> Acesso em: 25 fev. 2013.

FRANCO R. A. V. S. Produção de componentes em materiais compósitos por infusão de resina, 2008. Disponível em: <<https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/251188/1/Dissertacao.pdf>> Acesso em: 04 mar. 2013.

GAMA R. **Eletrônica digital para instrumentação**. 2012. Disponível em: <http://mesonpi.cat.cbpf.br/e2012/arquivos/g15/G15-Aula1_EltDigital.pdf> Acesso em: 08 abr. 2013.

GARCIA, A.; SPIM, A. J.; SANTOS, A. C. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2000.

GARCIA, A. **Ensaio dos materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GORGULHO JÚNIOR, J. H. C.; SOUZA, M. A. **Operação de corte**. 2013. Disponível em: <http://www.iem.unifei.edu.br/gorgulho/eme005/EME005_2015_Parte_4_Corte.pdf> Acesso em: 01 out. 2013.

GORNI, A. A. **Introdução aos plásticos**. 2003. Disponível em: <<http://www.gorni.eng.br/intropol.html>>. Acesso em: 25 fev. 13.

GRANADO, R. M. **Metrologia**. São José do Rio Preto: Universidade Paulista, Área de Ciências Exatas, 2009.

HADDAD, M.; SAMPAIO, R. A. **Polímeros: propriedades, aplicações e sustentabilidade na construção civil**, 2006. Disponível em: <<http://pcc5726.pcc.usp.br/Trabalhos%20dos%20alunos/Polimeros.pdf>>. Acesso em: 24 fev. 13.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2004.

HIBBELER, R. C. **Dinâmica: mecânica para engenharia**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005. V. 2

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2006. Disponível em: <http://www.insertools.com.br/ferramentas_soldadas.htm>. Acesso em: 04 abr. 2011.

IOZZI M. A et al. Estudo da influência de tratamentos químicos da fibra de sisal nas propriedades de compósitos com borracha nitríca. **Polímero: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 20, n. 1, p. 25-32, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v20n1/0435.pdf>> Acesso: 20 fev. 13.

KAWASAKA, R. N.; SILVA, F. A. **Análise de falhas em materiais compostos utilizando o método dos elementos finitos**. Guaratinguetá: FEG; Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho.

LEITE E. A. **Avaliação dos riscos ocupacionais provocados pela resina epóxi aos trabalhadores do setor de mármore e granitos de Cachoeiro de Itapemirim – ES**. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAW3oAG/resina-epoxi>>. Acesso em: 04 mar. 2013.

LEVI NETO, F. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

LEÃO R.M. **Tratamento superficial de fibra de coco e aplicação em materiais compósitos como reforço do polipropileno**. 2012. Disponível em: <http://repositorio.bce.unb.br/bitstream/10482/11071/1/2012_RosineideMirandaLeao.pdf> Acesso em: 11 mar. 13

LÓPEZ, O. H. **Bambu, su cultivo y aplicaciones en: fabricacion de papel, construcción, arquitectura, ingeniería, artesanía**. Cali: Estudios Técnicos Colombianos, 1974.

LOSEKANN, C. R. **Processos de fabricação I**. Itajaí: Universidade do Vale do Itajaí, Campus VII - São José, Direção do Centro de Educação Superior – SC, 2001.

MARCELO, P. C. **Análise de tensões e deformações em estruturas termoplásticas usando o método de elementos finitos**. 2007. 139 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. Disponível em: <<http://repositorio.pucrs.br/dspace/bitstream/10923/3279/1/000397594-Texto%2bCompleto-0.pdf>>. Acesso em: 04 jul. 2016.

MARIO E. S. M. **Tecnologia mecânica II: fundamentos de usinagem**. Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, Fundação Centro Tecnológico Automotivo, Tecnologia Mecânica II – Fundamentos de usinagem – SENAI, FIERGS, Novembro, 2001.

MARTINS. S. M.; LUCENA S. E. Instrumentação de um pêndulo de impacto charpy. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, CBECIMAT , 17, 2006, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: [S.n.], 2006.

MARTINS, S. M.; LUCENA, S. E.; Instrumentação com microcontrolador PIC16F877 de uma máquina de ensaio charpy. **Revista de Ciências Exatas**, Taubaté, v. 13, n. 1, p. 33-37, 2007.

MARTINS, S. M.; LUCENA, S. E.; Instrumentação com microcontrolador PIC16F877 de uma máquina de ensaio Charpy. **Revista de Ciências Exatas**, Taubaté, v. 13, n. 1, p. 33-37, 2007.

MAGALHÃES A. C. T. V. de. **Estudo de fibras vegetais, mucilagem de cacto e gesso em componentes construtivos**. 2009. 123 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2009. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/3907/1/2009_AnaCristinaTinocoVdeMagalhaes.pdf>. Acesso em: 04 jul. 2016.

MANO E. B; MENDES L. C. **Identificação de plásticos, borrachas e fibras**. São Paulo: Edigard Blucher, 2010.

MANO E. B; MENDES L. C. **Introdução a polímeros**. São Paulo: Edigard Blucher, 2010.

MARCOS H. Poliamidas, poliésteres e termoplásticos elastoméricos: uma perspectiva sustentável na indústria moderna. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 22, n. 2, p. 107-110, 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v22n2/a03v22n2.pdf>>. Acesso em: 26 fev. 13.

MARINELLI A.L. et al. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 18, n. 2, p. 92-99, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v18n2/a05v18n2.pdf>>. Acesso em: 11 mar. 04 jul. 2016.

MARINHO N. **Potencione, características das fibras do bambu (Dendrocalamus giganteus) e potencial de aplicação em painéis de fibra de média densidade (MDF)**. Curitiba, Brasil, 2012.

MARTIN A. R et al. Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade Agave sisalana. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 19, n. 1, p. 40-46, 2009. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/85936/1/Proci-09.00016.pdf>>. Acesso: 04 jul. 2016.

MENDES, E. B. M. L. C. **Introdução a polímeros**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 1999.

MENDONÇA, P. T. R. **Materiais compostos e estruturas-sanduiche: projeto e análise**. Barueri: Manole, 2005.

MOCHNACZ S. **Preparação e caracterização de fibras de sisal para utilização em compósitos poliméricos**. 2003. 103 f Dissertação (Mestrado) –Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003. Disponível em: <<http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/dissertacao/048.pdf>> Acesso em: 20 jun. 13.

MODESINI P. J.; MARQUES P. V. **Introdução aos processos de soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2006. Disponível em: <<http://xa.yimg.com/kq/groups/24841409/1334315251/name/SOLDAGEM+UFMG.pdf>> Acesso em: 04 jul. 2016.

MOREIRA A. M. **Materiais compósitos**. 2009. Disponível em: <http://www.estt.ipt.pt/download/disciplina/2932__Compositos_MC1.pdf> Acesso em: 11 mar. 2013.

MULER, R. L. et al. Obtenção e caracterização de compósitos de polipropileno pós-consumo com fibras de cana-de-açúcar com e sem tratamento químico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17, 2006, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: [S.n.], 2006. p. 9300-9311

NASH, W. A. **Resistência dos materiais**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982.

NETO P. S. **Fundamentos para o projeto de componentes de máquinas – departamento de engenharia mecânica**. Belo Horizonte: Instituto Politécnico da Universidade Católica Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC, MG – 2005.

NOGUEIRA, F. C. **Influência do raio de ponta do entalhe, do tipo de carregamento e da microestrutura no processo à fratura do aço estrutural ABNT-4340**. 2006. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006. Disponível em: <<http://repositorio.unesp.br/handle/11449/94491>>. Acesso em: 04 jul. 2016.

AMERICAN STANDART TESTING METALS – ASTM. **ASTM D 638-03**, standard test method for tensile properties of plastics. Denver: ASTM, 2003.

NOVASKI, O. **Introdução à engenharia de fabricação mecânica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1994.

OLIVEIRA, M.A. Encoder, 2007. Disponível em: <<http://www.redeprof.cba.ifmt.edu.br/~marcio/Encoder%20%5BModo%20de%20Com%20patibilidade%5D.pdf>> Acesso em: 20 fev. 13.

OLIVEIRA V. V. **Influência da geometria de brocas na furação do ferro fundido vermicular**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008. Disponível em: <<http://www.ppgem.ct.utfpr.edu.br/dissertacoes/OLIVEIRA,%20Valter%20Vander%20de.pdf>> Acesso em: 23 out. 13.

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia, microestrutura e propriedades**. São Paulo: Hemus, 1997.

PANDEY, M. D.; SHERBOURNE, A. N. Buckling of anisotropic composite plates under stress gradient. **Journal of Engineering Mechanics**, Reston, v. 117, n. 2, p. 260-275, 1991.

PANTEC - PANAMBRA ZWICK. Disponível em: <www.panambrazwick.com.br> Acesso em: 7 jun. 2013

PARMENTIER, C. M. A. V. dos S. **Caracterização da resina termoplástica de polipropileno utilizada na fabricação de cadeiras plásticas**. Porto Alegre: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Faculdade de Engenharia, 2007.

PEREIRA E. V.; RODRIGUES R. H. **Projeto e construção de uma máquina de ensaio Charpy para pequenas energias de impacto**, 2011. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/anais/creem/2011/tfp/12.pdf>>. Acesso em: 04 jul. 2016.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de construção**. 7. ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1982.

RAMOS F. P et al. **Polímeros/plásticos**. 2010. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAA0LsAF/polimeros-plasticos>> Acesso em: 24 fev. 2013.

RAZAQPUR, A. G. Method of analysis for advanced composite structures. In: SRINIVASA L. I. (Ed.). **Advanced composite materials in civil engineering structures**. New York: ASCE, 1991.

RESENDE R.C. **Projeto de máquinas agrícolas**: projeto de engenharia, uma aproximação sistemática. Viçosa: Universidade Federal De Viçosa, Departamento De Engenharia Agrícola – Viçosa, MG – 2005.

RENNA R. B. D et al. **Introdução ao kit de desenvolvimento arduino**. 2013. Disponível em: <http://www.telecom.uff.br/pet/petws/downloads/tutoriais/arduino/Tut_Arduino.pdf> Acesso em: 01 out. 2013.

REUBENS, R. Bamboo in sustainable contemporary design. International for Bamboo and Rattan (INBAR). **Working Paper n.60**, Beijing, China, 2010.

RODRIGUES, M. R. A. **Estudo da reação de cura da resina epóxi (ARALDIT F) com anidrido ftálico e trietilamina com iniciador**. 200?. 112 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 200? Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/27640/000048862.pdf?sequence=1>> Acesso em: 04 jul. 2016.

RODRIGUES R. M. **Relatório de ensaio de impacto**. 2012. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfO4kAD/trabalho-ensaios-mecanicos-ensaios-impacto>> Acesso em: 25 mar. 2013.

ROSA L. C. **Torno e o processo de torneamento**. Disponível em: <http://www2.sorocaba.unesp.br/professor/luizrosa/index_arquivos/OMA%20P1%20Torneamento.pdf> Acesso em: 23 out. 2013.

ROSE, T. P. R. **Laboratório de ensaios destrutivos e não-destrutivos (LEDEND), Ensaio de impacto**. 2008. Universidade Federal de Itajubá, EME 411 – Resistência Mecânica, 2008.

SENAI/SP DMD. **Ensaaios tecnológicos**. 3. ed. São Paulo: SENAI, 1990. (Ciências II, 8).

SENGEMEC 2012 – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Disponível em: <<http://www.dem.feis.unesp.br/sengmec/2010/index.html>> Acesso em: 4 jun. 2013

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson, 2008.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de engenharia mecânica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

SILVA, F. A.; Tenacidade de materiais compósitos não convencionais - Rio de Janeiro PUC – Pontifícia Universidade Católica - Departamento de Engenharia Civil, 2004.

SILVA E. et al. Aplicação de fibra de coco em matrizes cimentícias. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, Santa Maria, v. 8 n. 8, p. 1555-1561, 2012. Disponível em: <<http://cascavel.cpd.ufsm.br/revistas/ojs-2.2.2/index.php/reget/article/view/6096/pdf>> Acesso em: 04 jul. 2016.

SKF. **Rolamentos**: rolamentos autocompensadores de esferas. Disponível em: <http://www.skf.com/portal/skf/home/products?maincatalogue=1&lang=pt&newlink=1_2_1> .Acesso em: 06 nov. 2011.

SMITH, I. M. ; GRIFFITHS, D. V. **Programming the finite element method**. New York: John Wiley & Sons. 1998.

SOARES, M. S. **Ensaio de materiais**. Laboratório de Materiais, 2009. Faculdade de Engenharia de Materiais (FEMAT), Campus Universitário do Sul e Sudeste do Pará – Marabá II, 2009.

SPECTRU INSTRUMENTAL CIÊNTIFICO. **Propriedades mecânicas de aços com tratamento térmico**. Disponível em: <<http://www.spectru.com.br/Metalurgia/Nova%20pasta2/protemp.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2011.

STANDARD TEST METHOD FOR DYNAMIC YOUNG’S MODULUS. **Shear modulus, and poisson’s ratio by sonic resonance**: designation: E 1875 – 00. Denver: ASTM International, 2000. 7 p.

STANDARD TEST METHOD FOR DYNAMIC YOUNG’S MODULUS. Shear Modulus, and Poisson’s Ratio by Impulse Excitation of Vibration; designation: E 1876 – 07. ASTM International, 2007. 15 p.

STOETERAU, R. L. **Processos de usinagem: fabricação por remoção de material**. Disponível em: <<http://www.lmp.ufsc.br/disciplinas/Stoterau/Aula-01-U-2007-1-introducao.pdf>>. Acesso em: 04 abr. 2011).

STOLARSKI, T. A.; NAKASONE, Y.; YOSHIMOTO, S. **Engineering analysis with ANSYS software**. Butterworth-Heinemann: MPG Books Ltd., Bodmin, Cornwall.

SOKEI, C. R. **Laboratório de materiais II, ensaio de impacto**. 2010. Ilha Solteira: Faculdade de Engenharia/Universidade Estadual Paulista/Departamento de Engenharia Mecânica, 2010. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABN0sAH/relatorio-2-ensaio-impacto>>. Acesso em: 04 jul. 2016

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. 5. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1982. 286p.

SOUZA A. J. **Processos de fabricação por usinagem**. 2011. Disponível em: <http://www.chasqueweb.ufrgs.br/~ajsouza/ApostilaUsinagem_Parte1.pdf>. Acesso em: 15 maio 2013.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**: fundamentos teóricos e práticos. 5. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1984.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1974.

SOUZA, S. A. **Composição química dos aços**. São Paulo: Edgard Blucher, 1989.

TELECURSO 2000 Apostila 4. Ensaio de tração: procedimentos normalizados. Disponível em: <<http://www.acervotecnico.com.br/2010/02/telecurso-2000-ensaios-de-materiais.html>>. Acesso em: 04 jul. 2016.

THOMAZINI D.; ALBUQUERQUE P. U. B. **Sensores industriais: fundamentos e aplicações**. São Paulo: Erika, 2009.

TITA, V.; FILHO, G. D. S.; CARVALHO, J. Tecnologia de fabricação de componentes mecânicos em compósito polimérico reforçado 2º COBEF, 2003.

TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J. N. **Theory of elasticity**, 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1988.

VAN VLACK, L. H. **Materials for engineering**. New York: Addison Wesley, 1982.

VASCO, J. R. G. **Modelo conceitual de dissipação da energia da onda que se propaga por fundos vegetados**. 2005. 108 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

VIEIRA W. G. **Ciência e tecnologia dos materiais**. 2009. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/45474485/55/Poliamidas>> Acesso em: 26 fev. 2013.

YASUDA A. M. Polímeros superabsorventes, 2012. Disponível em: <<http://fatecsorocaba.edu.br/principal/pesquisas/nuplas/dissertacoes/TCCs1sem-2012/Alex%20Massaki%20Yasuda.pdf>> Acesso em: 24 fev. 13.

ZAIDEN A.R et al. **Ensaio mecânicos de metais**. 2010. Trabalho 1. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAATwAE/ensaios-mecanicos>>. Acesso em: 25 mar. 2013.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. **The finite element method**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 1988.

ANEXO A – Projeto e Sincronismo de dados Charpy

Este anexo é dedicado a extras sobre o confeccionamento da “**Máquina Analógico-Digital de Ensaio de Rompimento Destrutivo Charpy**” e seus resultados. Assim, inicialmente será abordado o projeto e logo após o sincronismo de dados a partir dos dois métodos de captação de resultados disponíveis no maquinário criado no decorrer desta tese.

A.1 O PROJETO MÁQUINA CHARPY

A sequência de imagens (Figuras A.1 a A.11) ilustram as principais partes da máquina de ensaio pendular charpy e seu dimensionamento quando de sua confecção.

Figura A.1 – Vistas esquerda, frontal e direita respectivamente

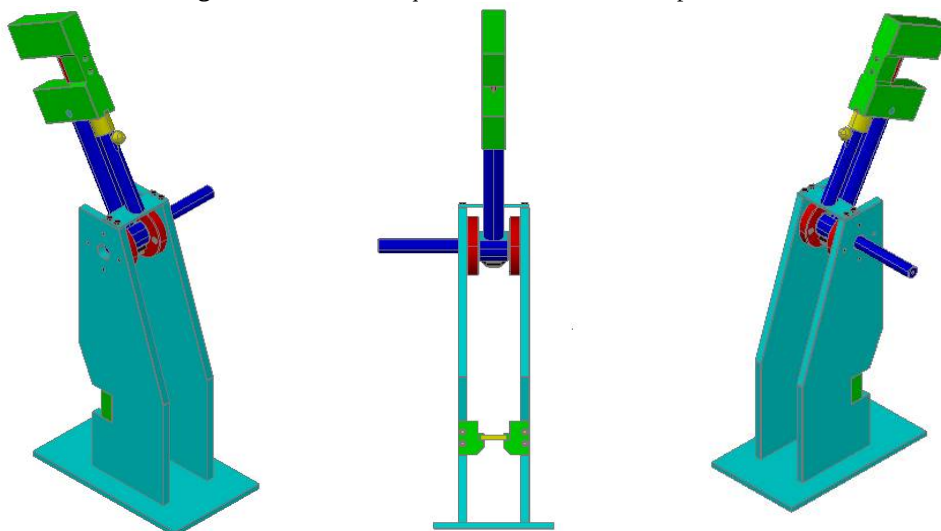


Figura A.2 – Vista explodida e respectiva lista de descrição das peças da Máquina

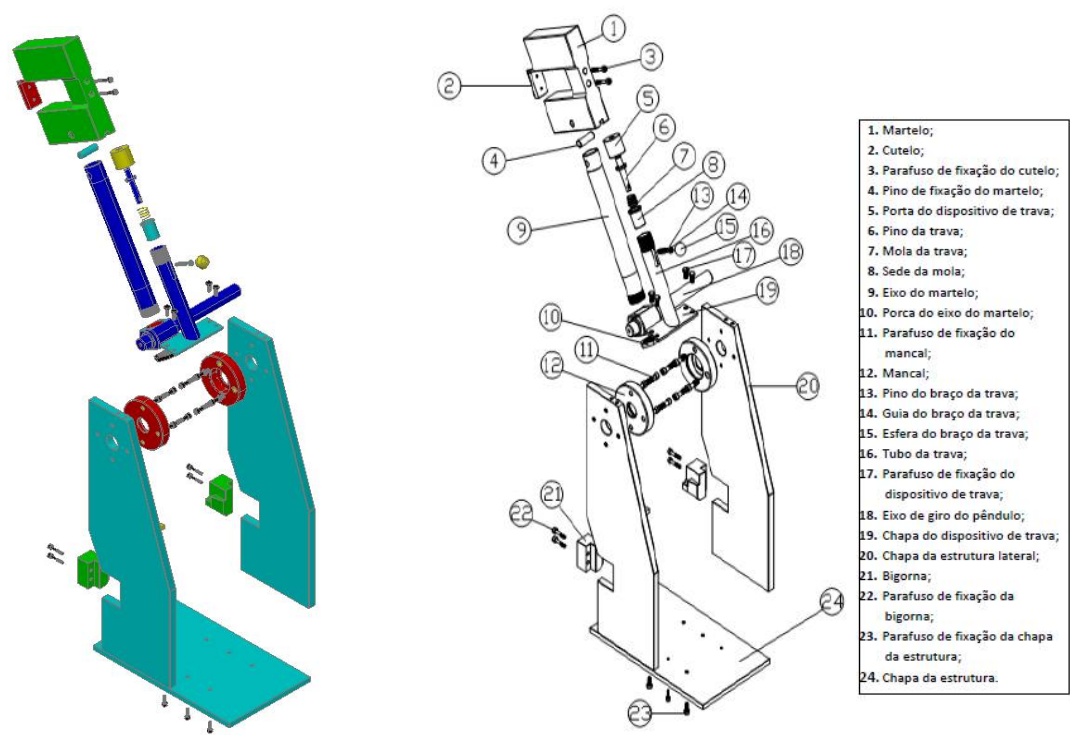


Figura A.3 – Martelo

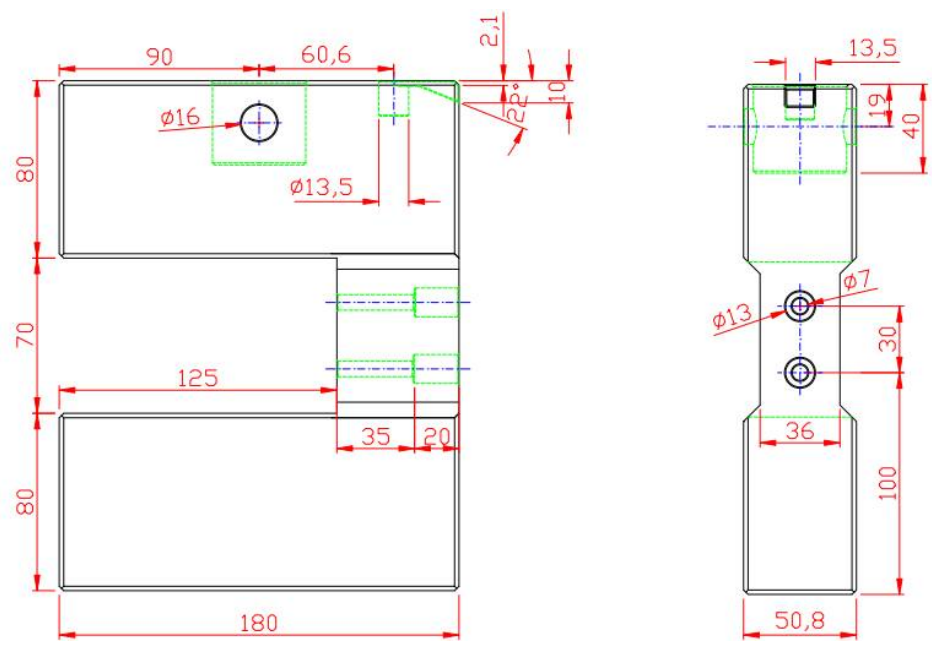


Figura A.4 – Alavanca de Acionamento

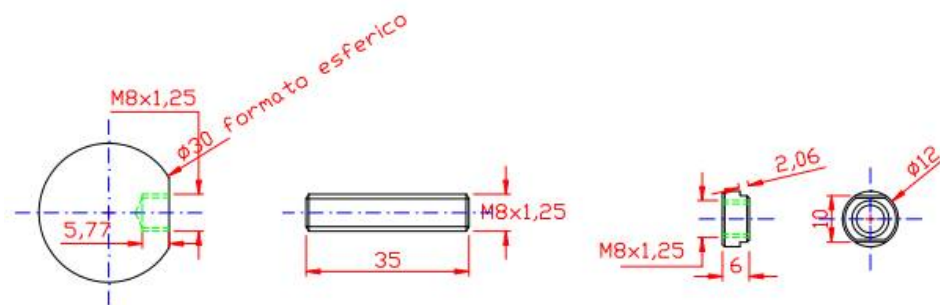


Figura A.5 – Mancal

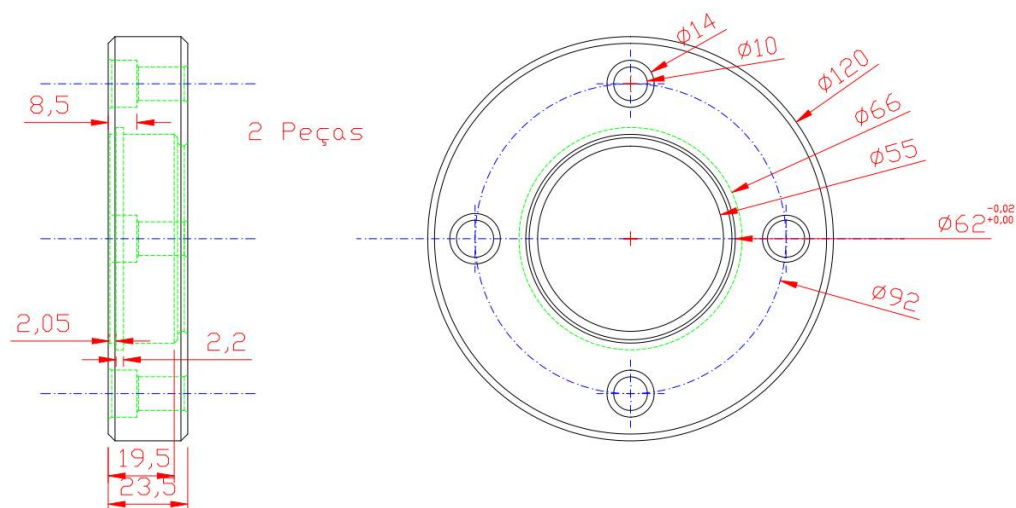


Figura A.6 – Cutelo (Vista Lateral e Frontal)

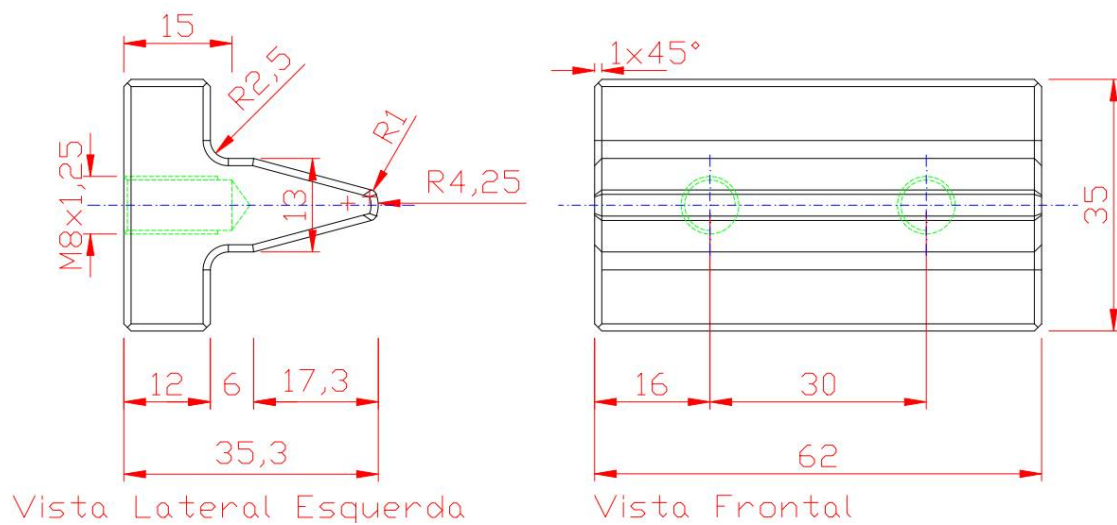


Figura A.7 – Eixo de Giro

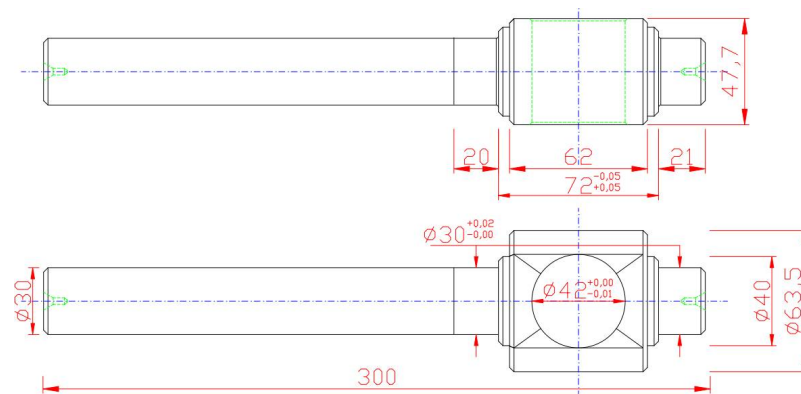


Figura A.8 – Bigorna

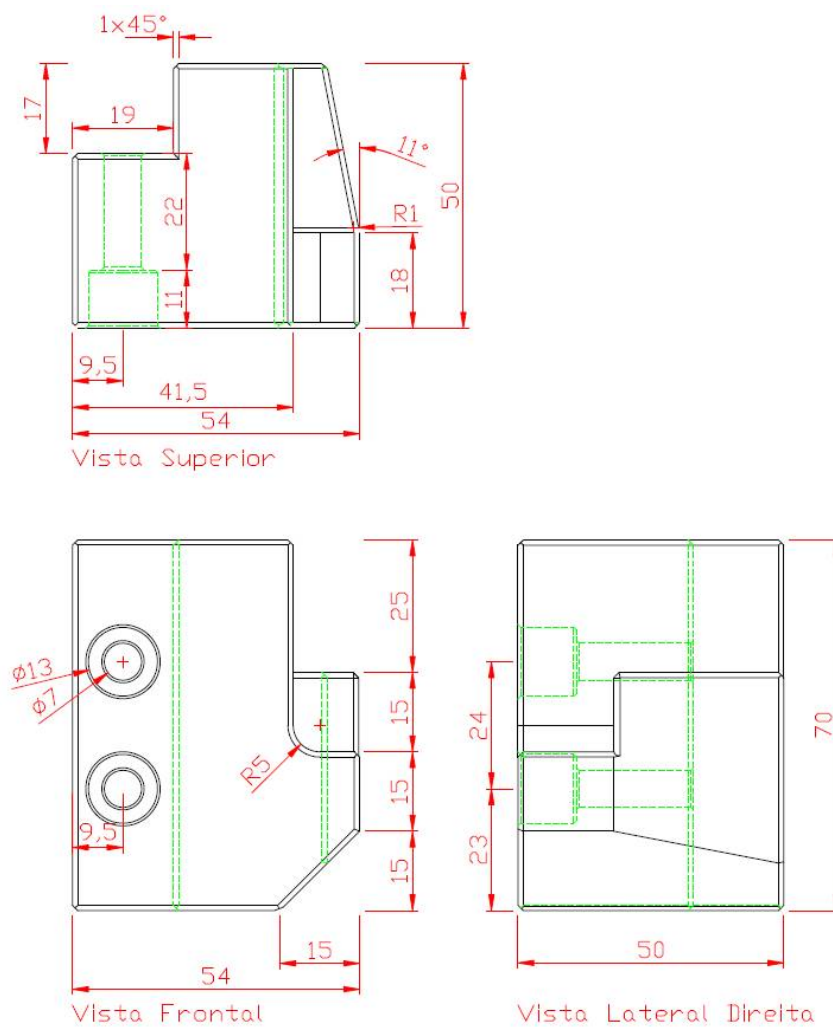


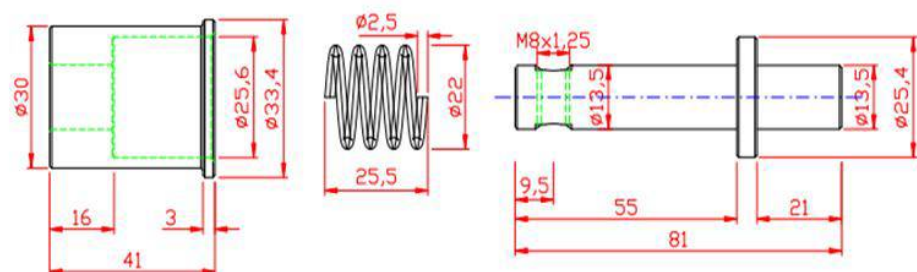
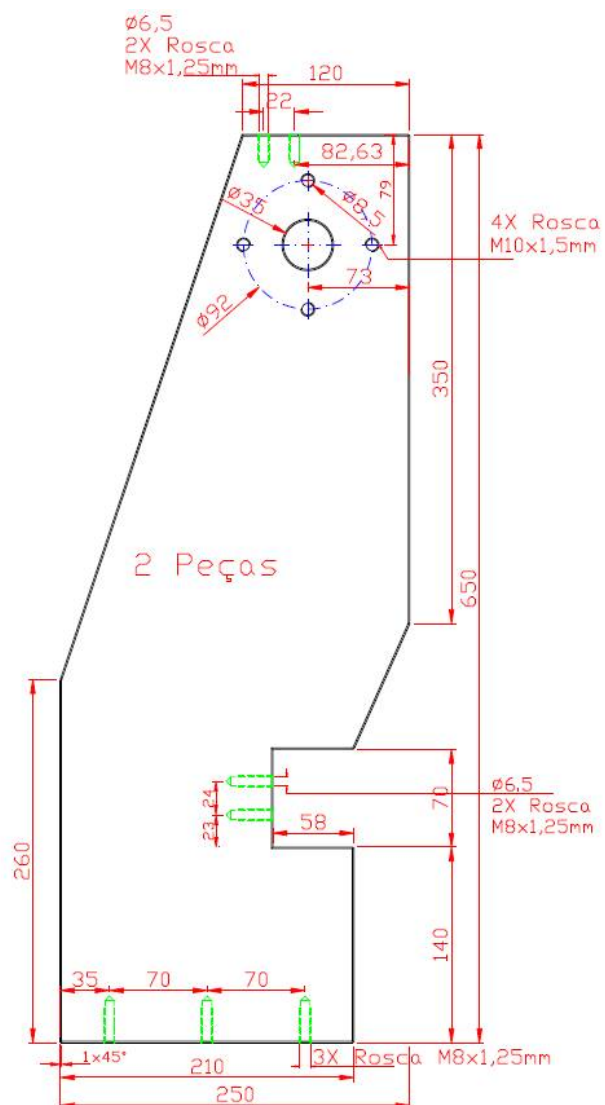
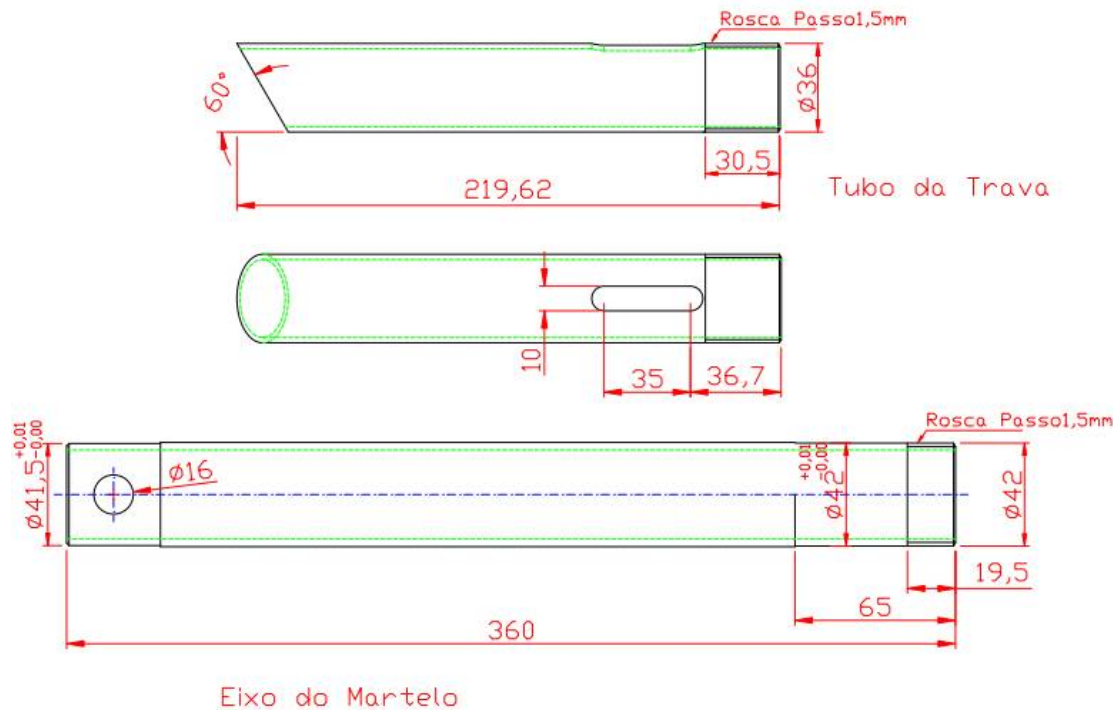
Figura A.9 – Suporte da Mola, Mola e Pino do Dispositivo de Trava**Figura A.10** – Chapa Lateral

Figura A.11 – Tubo da trava e Eixo do Martelo



A.2 O SINCRONISMO DE DADOS CHARPY

A título de demonstração e comparativo foram realizados testes entre os dados analógicos e digitais captados da máquina Charpy sob duas situações distintas, a saber:

- Dados analógicos (captados pelo relógio analógico da instrumentação Charpy);
- Dados digitais (captados pelo aparato digital da instrumentação Charpy).

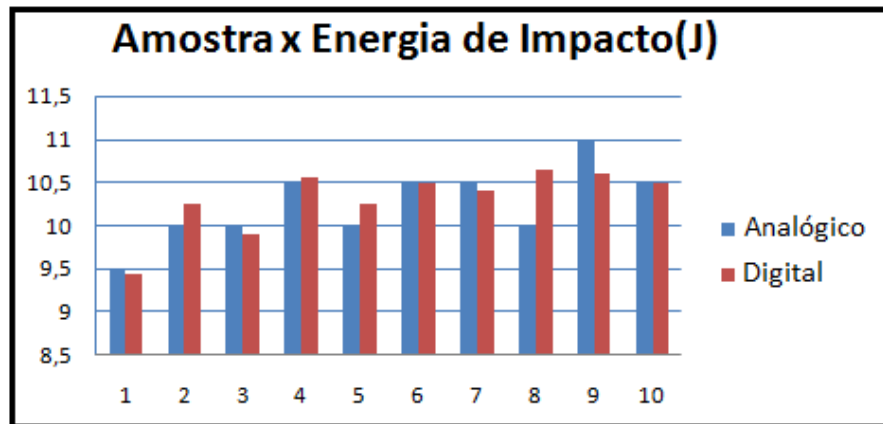
Os testes foram executados com 10 corpos de prova seguindo normas ASTM E-23 para o material alumínio sempre em temperatura ambiente onde um exemplar do mesmo, já rompido, pode ser observado na Figura A.12.

Figura A.12 – Exemplo de corpo de prova de alumínio rompido pelo ensaio Charpy

Após a execução dos testes a Tabela A.1 foi criada, nela contém ambos os resultados captados pela instrumentação dos corpos de prova, bem como análises dos mesmos. Já a Figura A.13 mostra um gráfico dos testes para um melhor entendimento.

Tabela A.1 – Comparativo entre dados captados, analógico e digital para o Charpy criado no presente trabalho

ANALÓGICO		ERRO (%)	DIGITAL	
Nº	Energia (J)		Energia (J)	Nº
1	9,5	0,53	09,45	1
2	10,0	2,44	10,25	2
3	10,0	1,00	09,90	3
4	10,5	0,47	10,55	4
5	10	2,44	10,25	5
6	10,5	0,00	10,50	6
7	10,5	0,96	10,40	7
8	10,0	6,10	10,65	8
9	11,0	3,64	10,6	9
10	10,5	0,00	10,5	10
Média	10,25	0,53	10,31	Média

Figura A.13 – Gráfico de Energia de absorção de impacto para instrumentação analógica e digital

Como se pode verificar nos resultados de ensaios a partir da Tabela A.1 e da Figura A.13, a diferença entre valores captados através dos dois sistemas de instrumentação são pequenos. Nota-se que a instrumentação analógica deixa a desejar quando se trata de precisão em casas decimais devido à limitação do relógio analógico e da necessidade do usuário fazer a leitura (podendo acarretar erros grosseiros, sistemáticos ou erros acidentais), porém, no que tange a média pôde-se concluir que tais resultados foram perfeitamente satisfatórios, cerca de 0,5%, concluindo assim que para uma melhor didática e a fim de evitar erros inesperados, as leituras analógicas e digitais são confiáveis.

Em um comparativo entre literatura e resultados Charpy práticos, temos uma boa concordância, pois 10,5J de energia absorvida confrontando com 12,0J da literatura (CALLISTER) há de se esperar mesmo um valor ligeiramente menor considerando que o material utilizado pode conter defeitos em seu processamento e/ou fabricação.

Nota-se a partir dos resultados obtidos que os corpos de prova aumentaram singelamente suas energias de absorção durante os testes, tal fato pode ser explicado devido ao aumento de temperatura do laboratório já que no dia em questão os testes iniciaram no período matutino com seu término na metade do próximo período, acarretando em um aumento expressivo de temperatura ambiente, cujo valor não foi anotado (por volta dos 30°C).

ANEXO B – Resultados Ensaio Tração de compósitos

Este anexo foi criado apenas para observação de dados captados da máquina universal de ensaios através de “Relatório de Ensaio”, além de cálculo de algumas propriedades como se pode observar a partir das Figuras B.1, B.2 e Tabela B.1.

Figura B.1 – Exemplo de relatório de ensaio para 4 corpos de prova no ensaio de tração

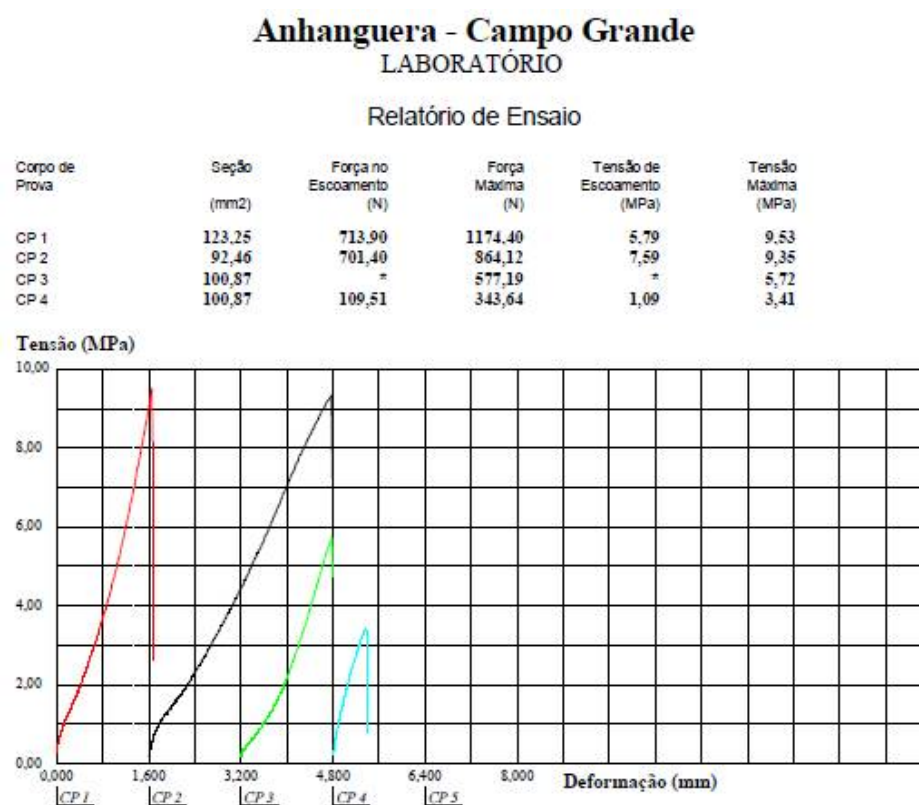
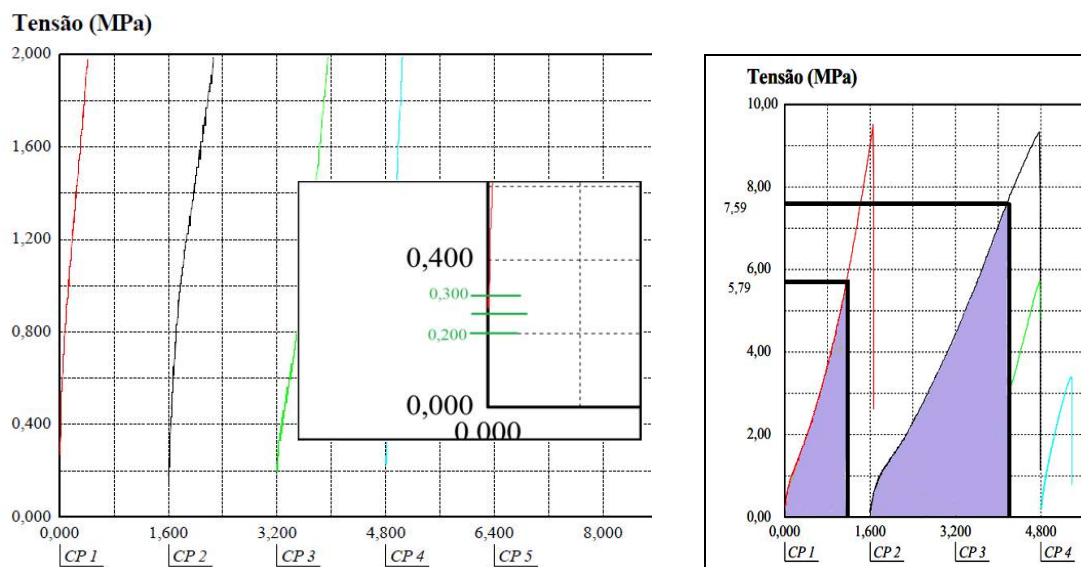


Figura B.2 – Exemplo de método de obtenção de dados e propriedades após ensaio de tração**Tabela B.1** – Propriedades mecânicas obtidas pelo CP 2 após resultados de ensaio de tração

Módulo de Elasticidade $E = \sigma \div \epsilon$	LRT $\sigma_{Max} = F_{max} \div A^2$	Resistência ao Escoamento $\sigma = F_{esc.} \div A^2$	Ductilidade $Al\% = LF - L \div L \times 100$
$\epsilon = 4,2 \text{ mm}$	$F_{max} = 864,12 \text{ N}$	Força no Escoamento = 701,40 N	$L = 94,3 \text{ mm}$
$\sigma = 7,59 \text{ MPa}$	$A^2 = 92,46 \text{ mm}^2$	$A^2 = 92,46 \text{ mm}^2$	$L_f = 99,1 \text{ mm}$
$E = 1,8 \text{ GPa}$	$\sigma_{Max} = 9,34 \text{ MPa}$	$\sigma = 7,58 \text{ MPa}$	$Al\% = 5 \%$

Observa-se a partir da Tabela B.1 que algumas das propriedades como Tensão de Escoamento são facilmente captadas pelo “Relatório de Ensaio”, já para se encontrar o Módulo Elástico do material ensaiado alguns cálculos devem ser executados.

A sequência de imagens de Figura B.3 a B27 ilustram gráficos obtidos dos ensaios de tração realizados para os conjuntos de corpos de prova feitos a partir de compósitos dispostos em ordem crescente de Tensão de Escoamento, além de relatórios extras que não adentraram o corpo desta tese, como se pode observar:

Figura B.3 – Relatório de ensaio de tração para Fibra1 de cavaco de nylon



Figura B.4 – Relatório de ensaio de tração para Fibra2 de cavaco de nylon

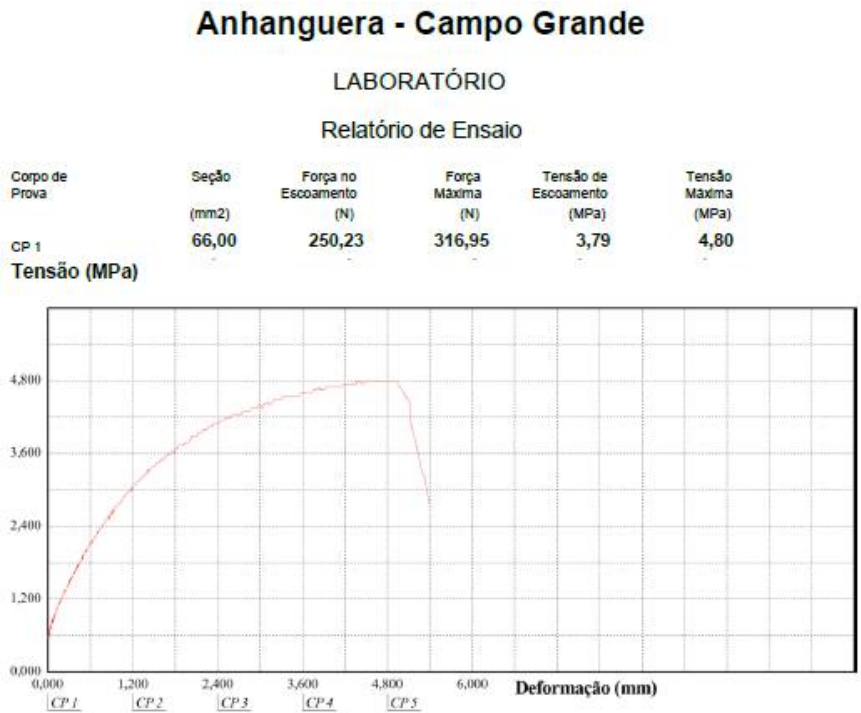


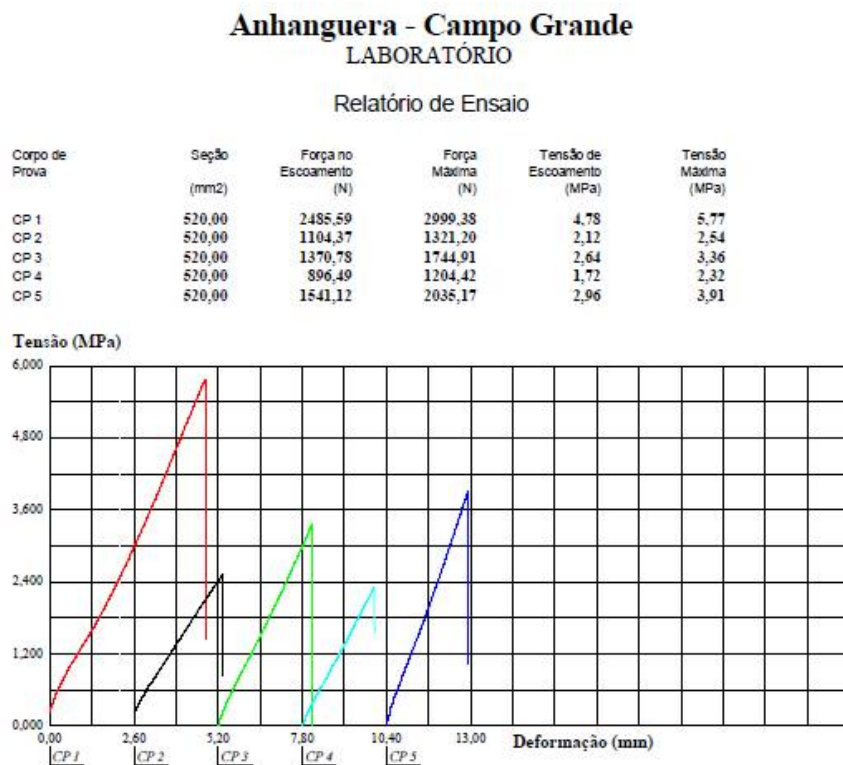
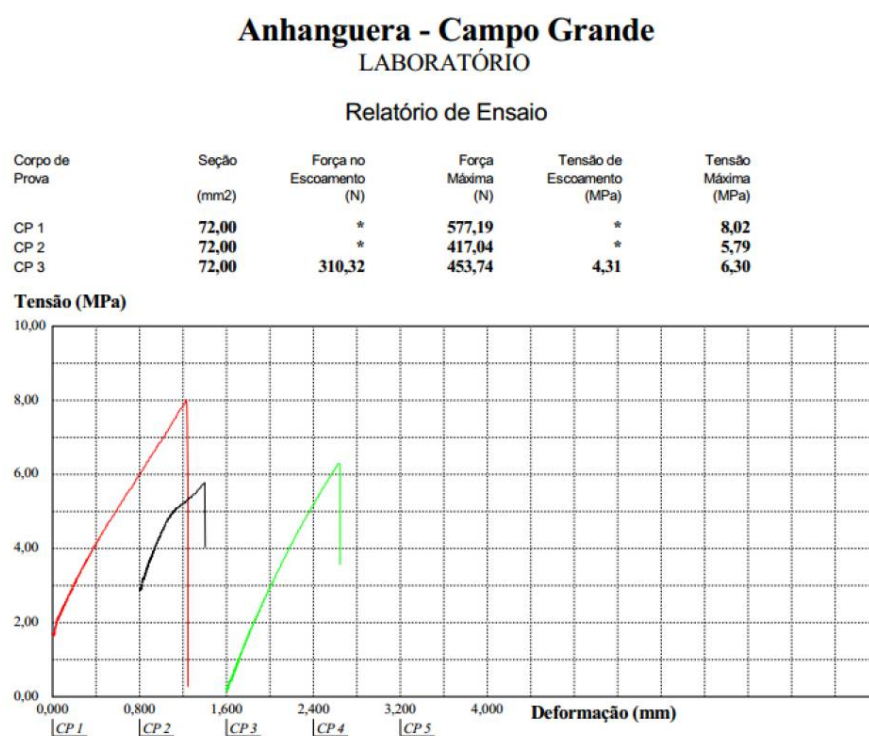
Figura B.5 – Relatório de ensaio de tração para Fibras juta (*Corchorus capsularis*)**Figura B.6** – Relatório de ensaio de tração para Resina + cola 3M

Figura B.7 – Relatório de ensaio de tração para Resina + cola 3M em excesso

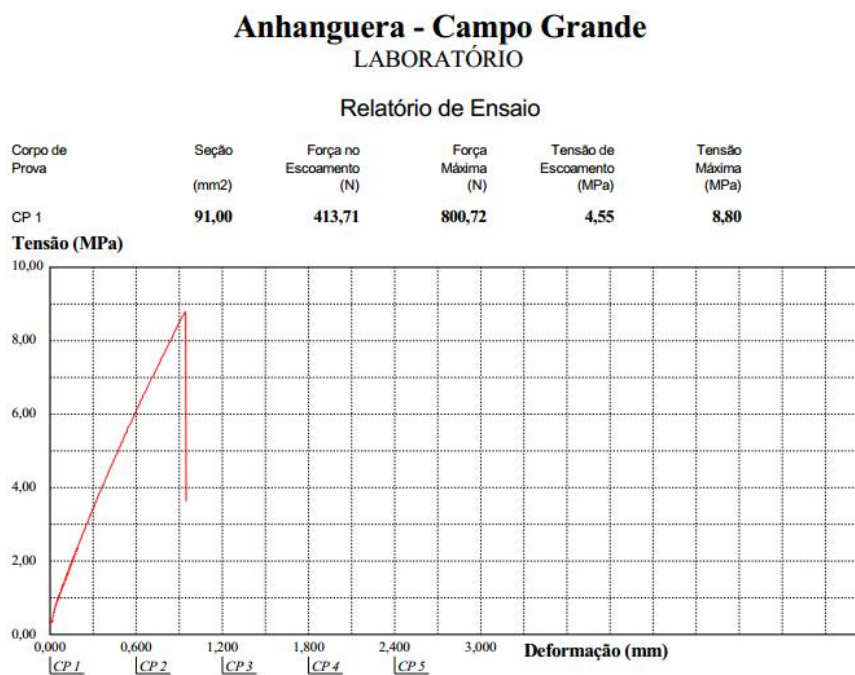


Figura B.8 – Relatório de ensaio de tração para Fibras de cavaco de PVC

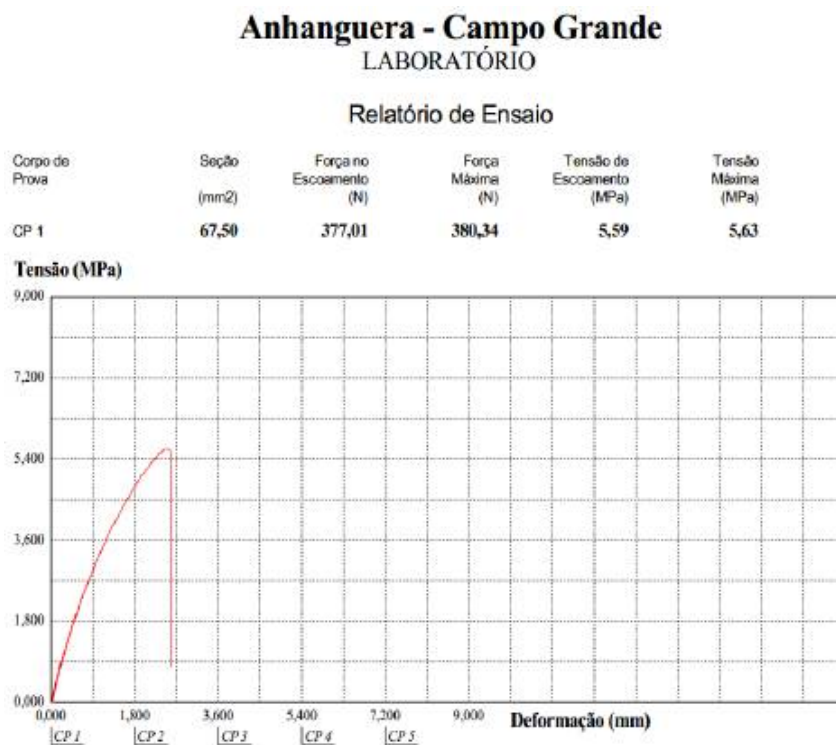


Figura B.9 – Relatório de ensaio de tração para Fibra2 de cavaco de PVC

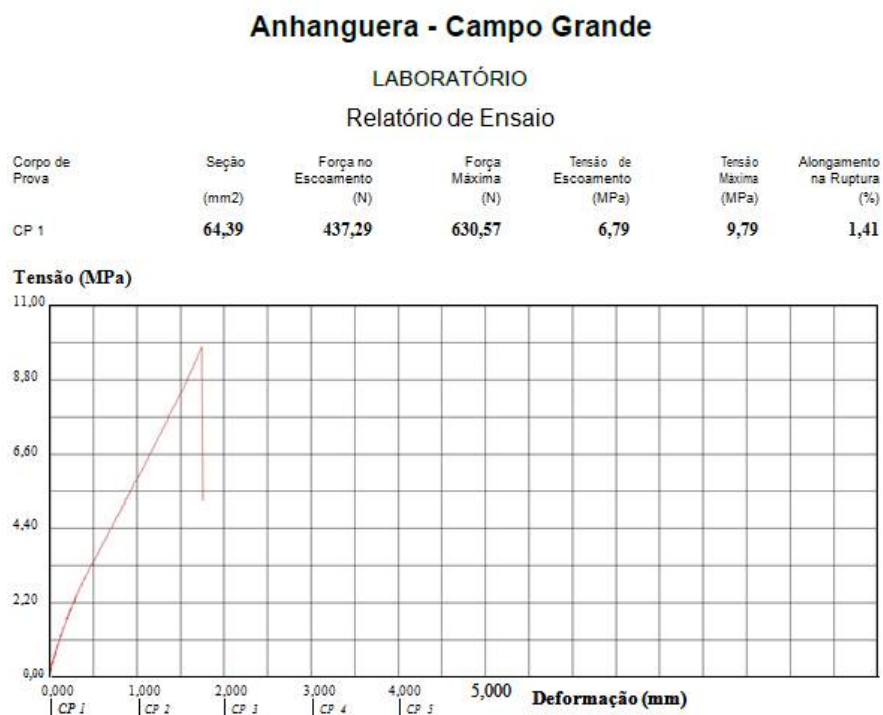


Figura B.10 – Relatório de ensaio de tração para Resina + catalisador em excesso

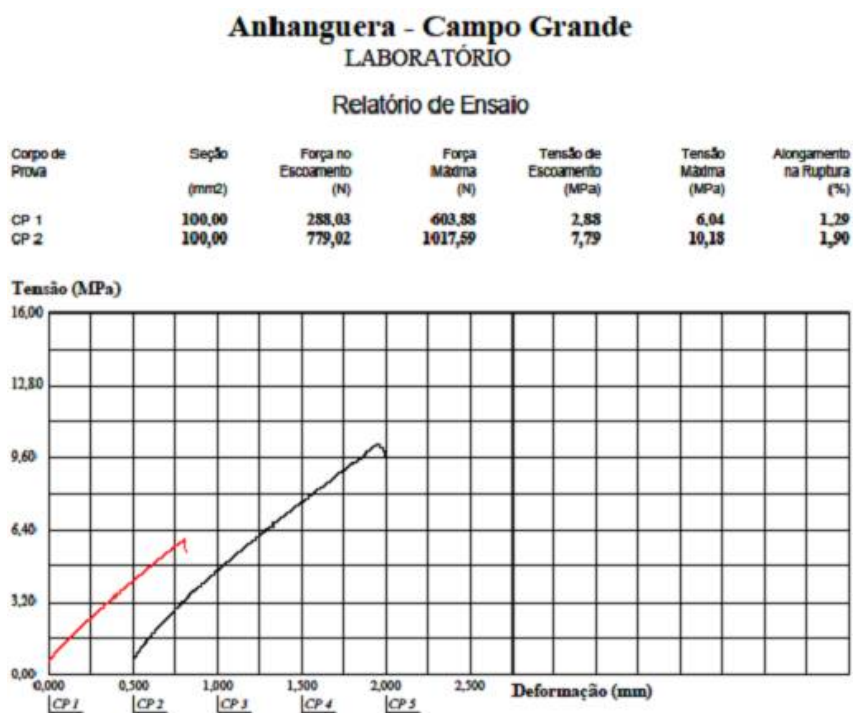


Figura B.11 – Relatório de ensaio de tração para Fibras de borracha

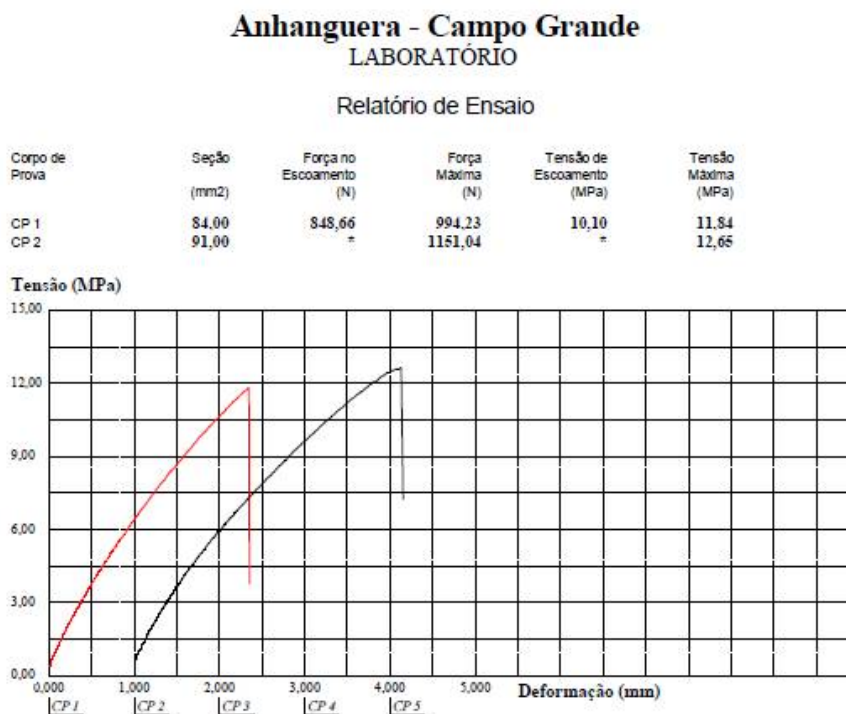


Figura B.12 – Relatório de ensaio de tração para Fibras de borracha

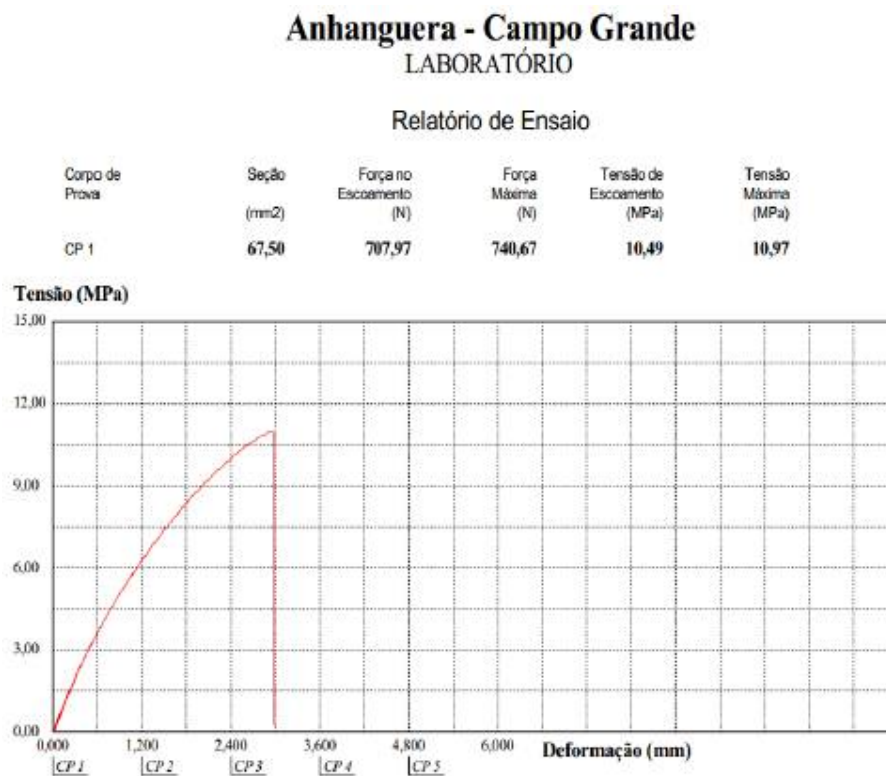


Figura B.13 – Relatório de ensaio de tração para Fibras de cana

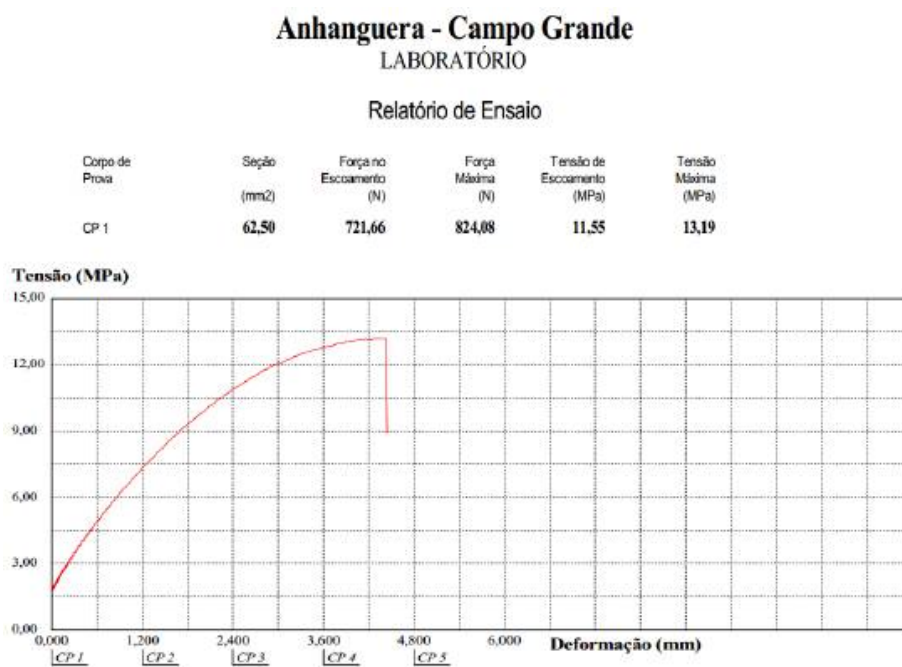


Figura B.14 – Relatório de ensaio de tração para Fibras de cana

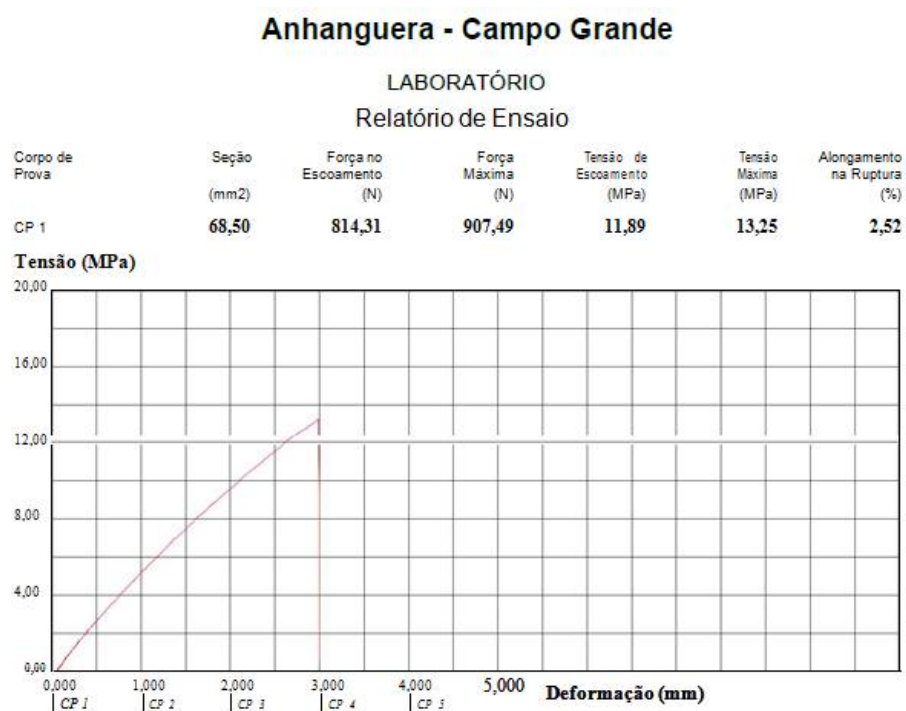


Figura B.15 – Relatório de ensaio de tração para Fibra1 de coco

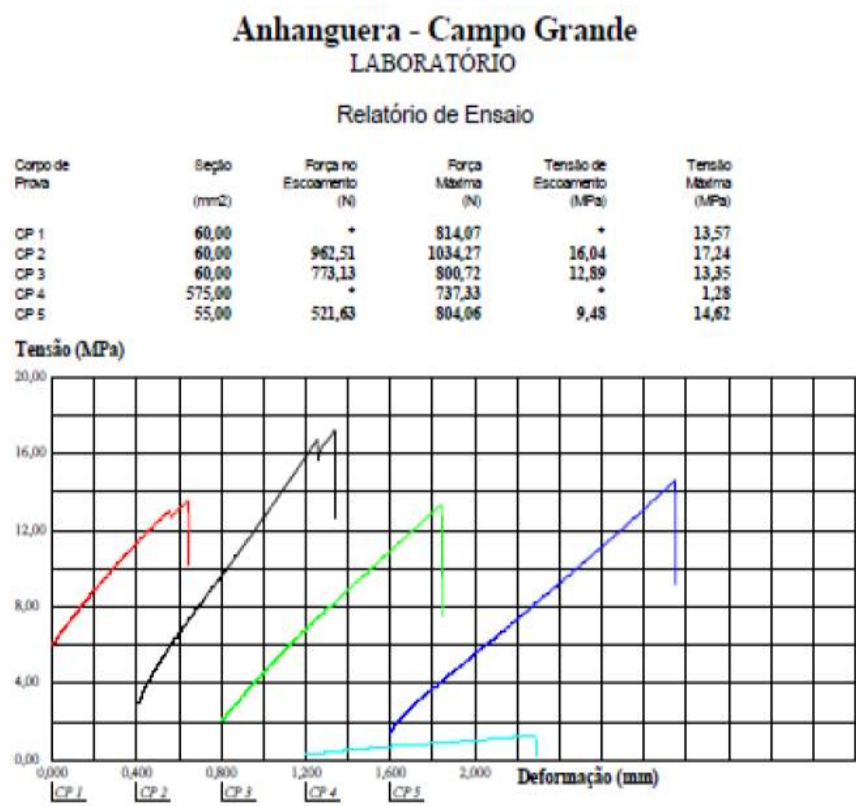


Figura B.16 – Relatório de ensaio de tração para Fibra2 de coco

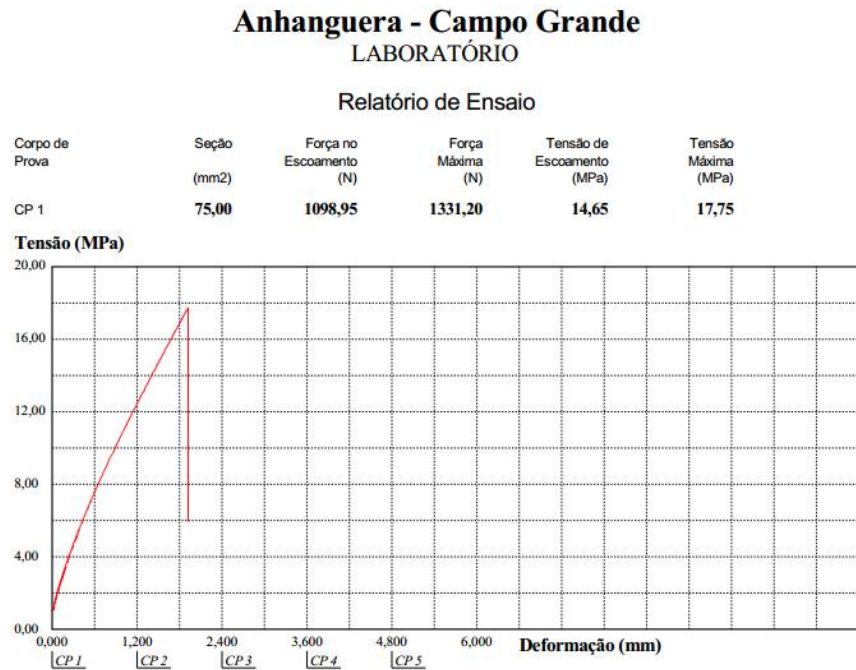


Figura B.17 – Relatório de ensaio de tração para Fibra3 de coco

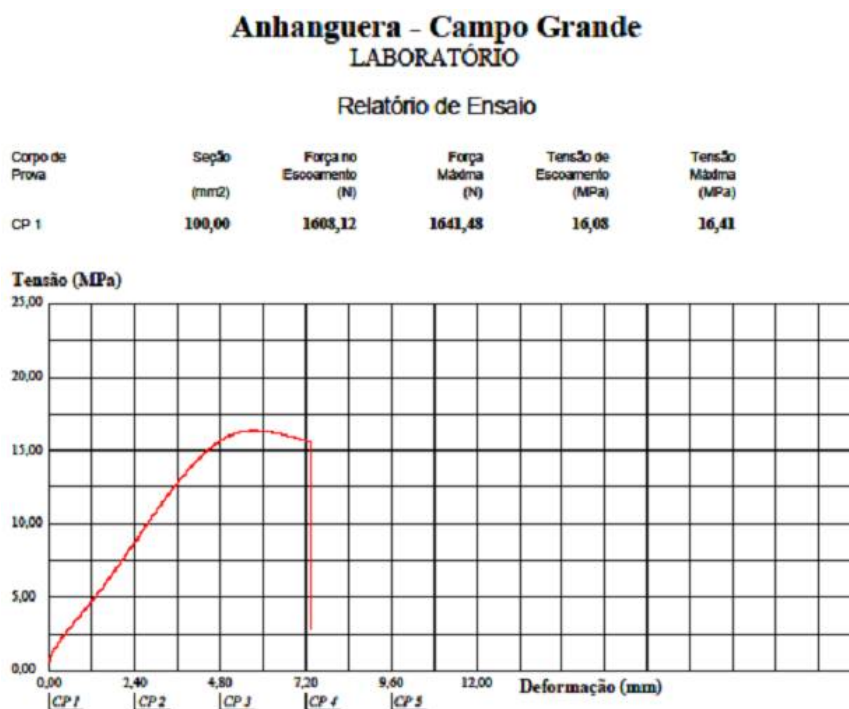


Figura B.18 – Relatório de ensaio de tração para Resina pura

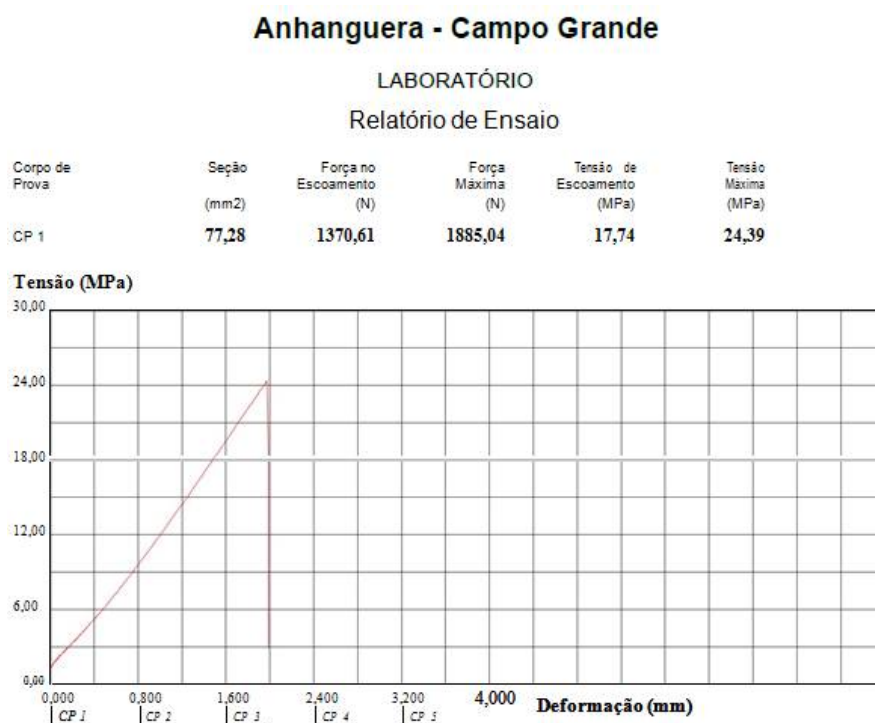


Figura B.19 – Relatório de ensaio de tração para Fibras de fio de Nylon

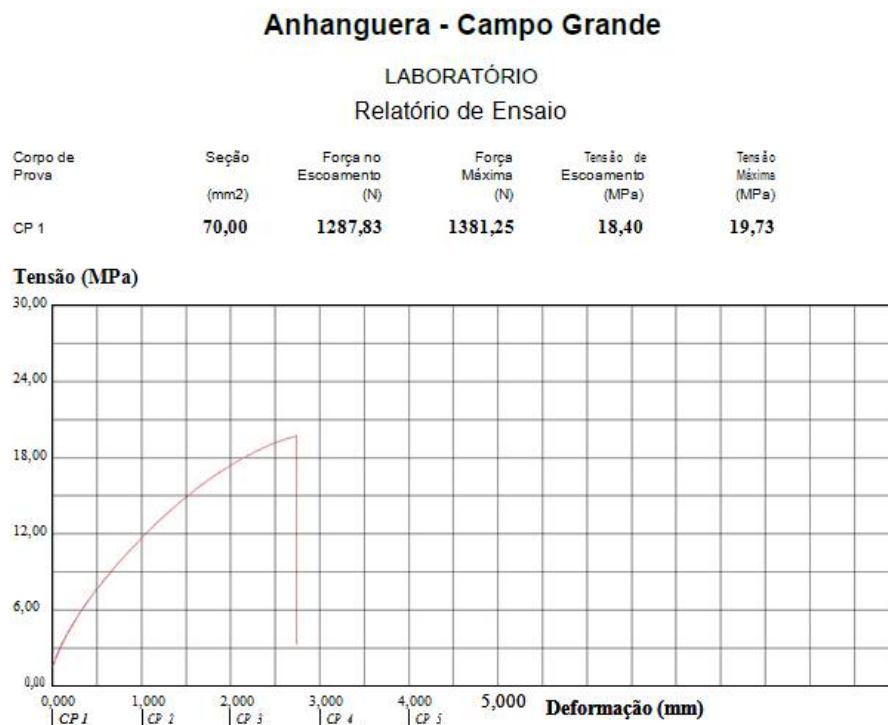


Figura B.20 – Relatório de ensaio de tração para Fibras de fio de Nylon

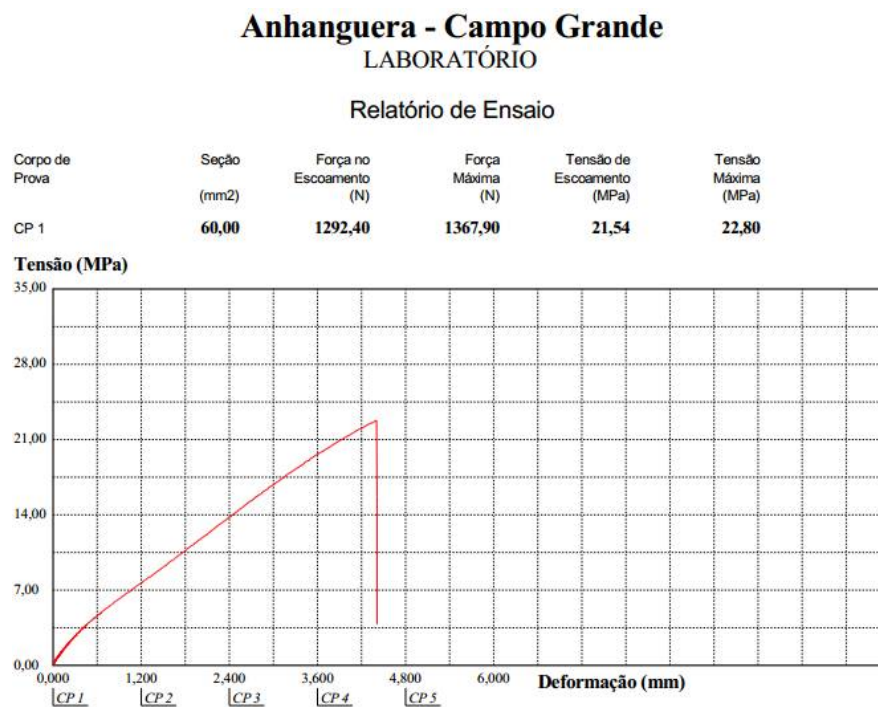


Figura B.21 – Relatório de ensaio de tração para Fibra de technyl

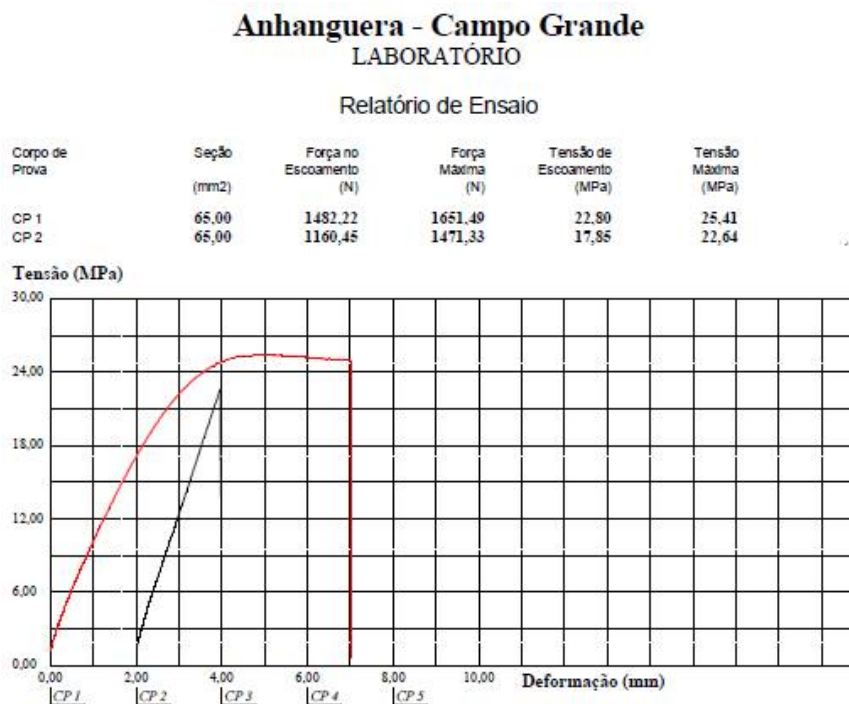


Figura B.22 – Relatório de ensaio de tração para Fibra de bambu

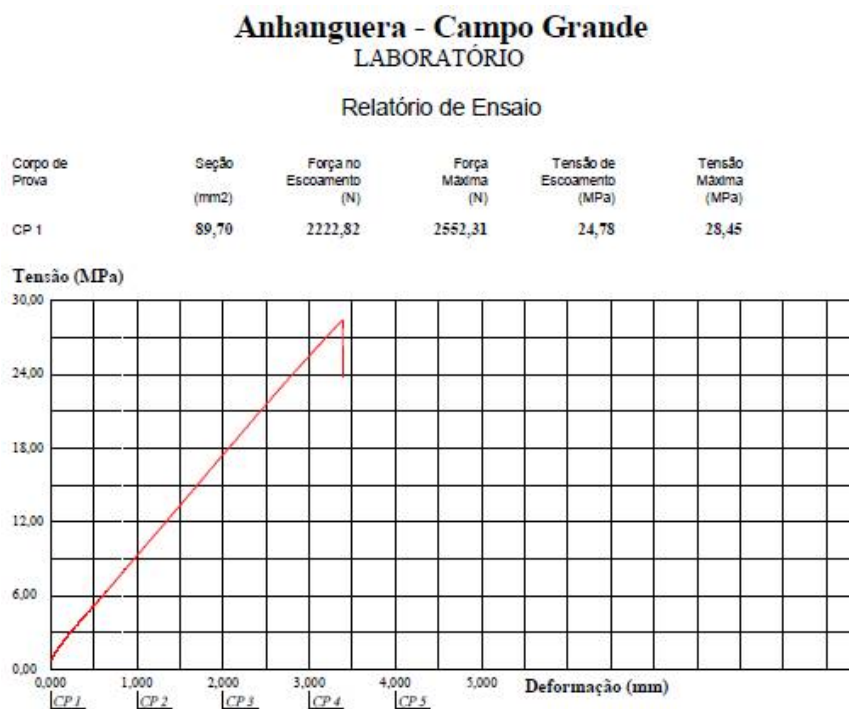


Figura B.23 – Relatório de ensaio de tração para Fibra1 de vidro

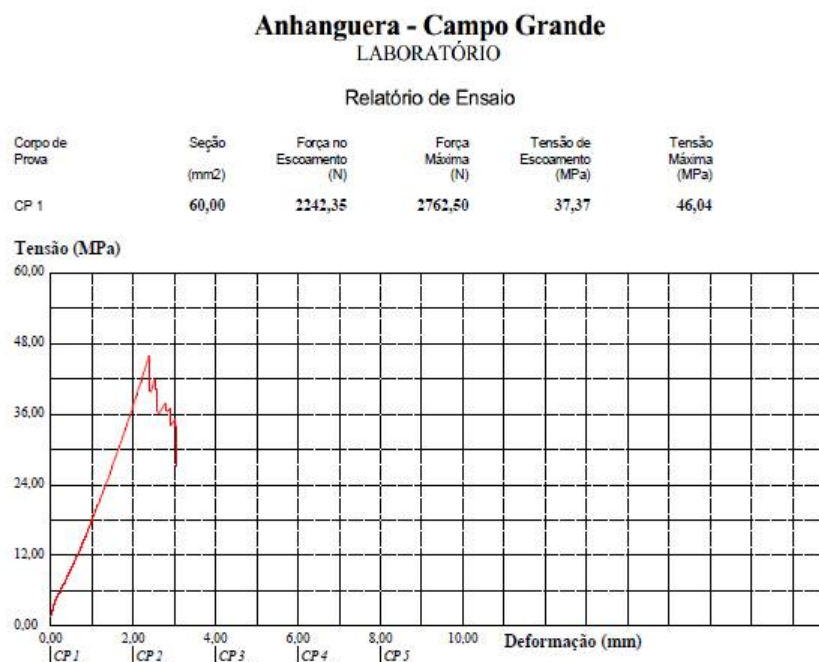


Figura B.24 – Relatório de ensaio de tração para Fibra2 de vidro

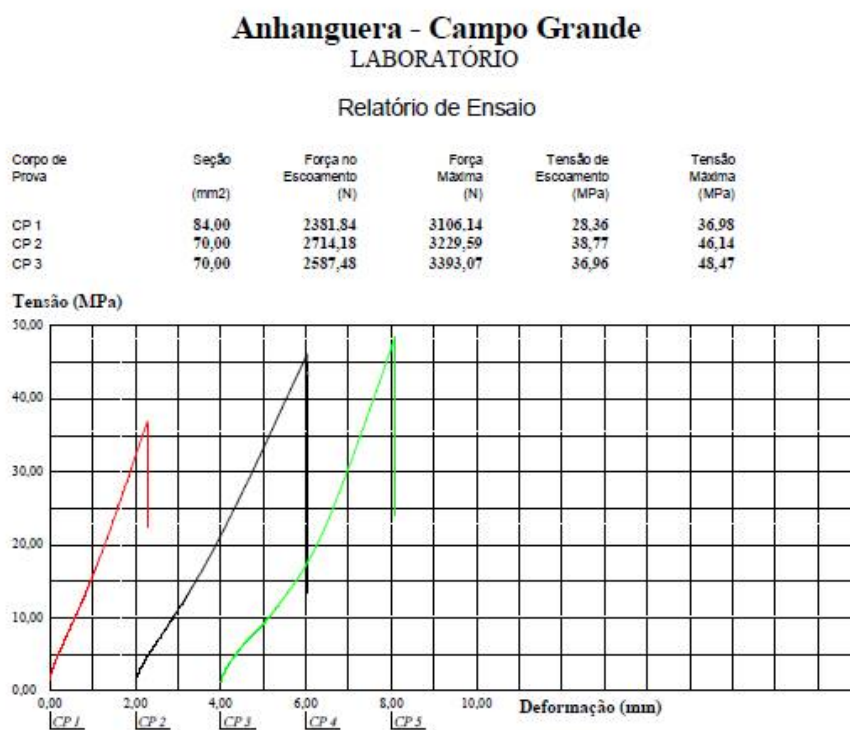


Figura B.25 – Relatório de ensaio de tração para Fibra3 de vidro

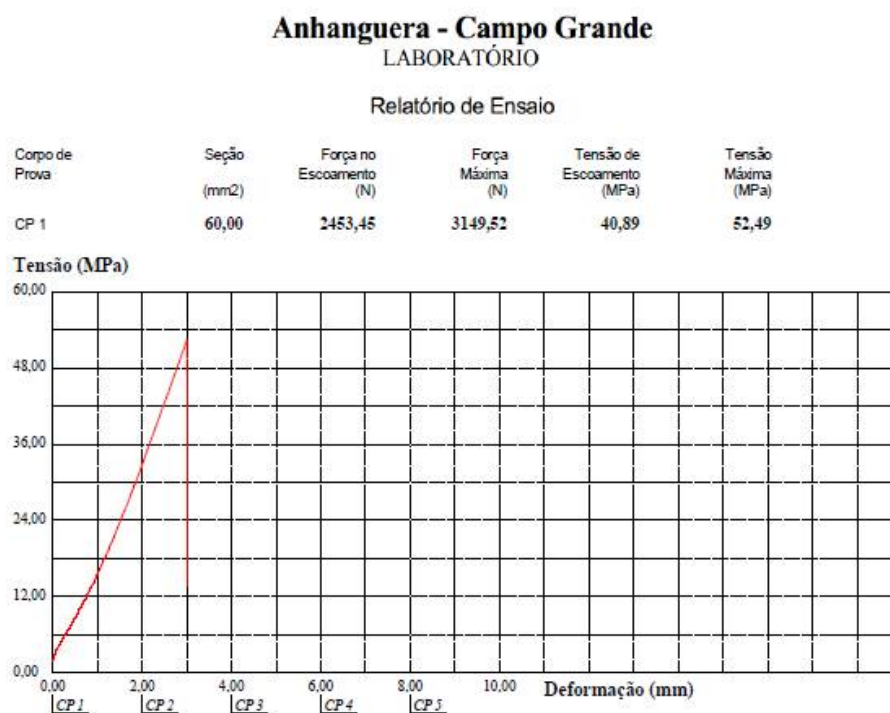


Figura B.26 – Relatório de ensaio de tração para Fibra1 de kevlar

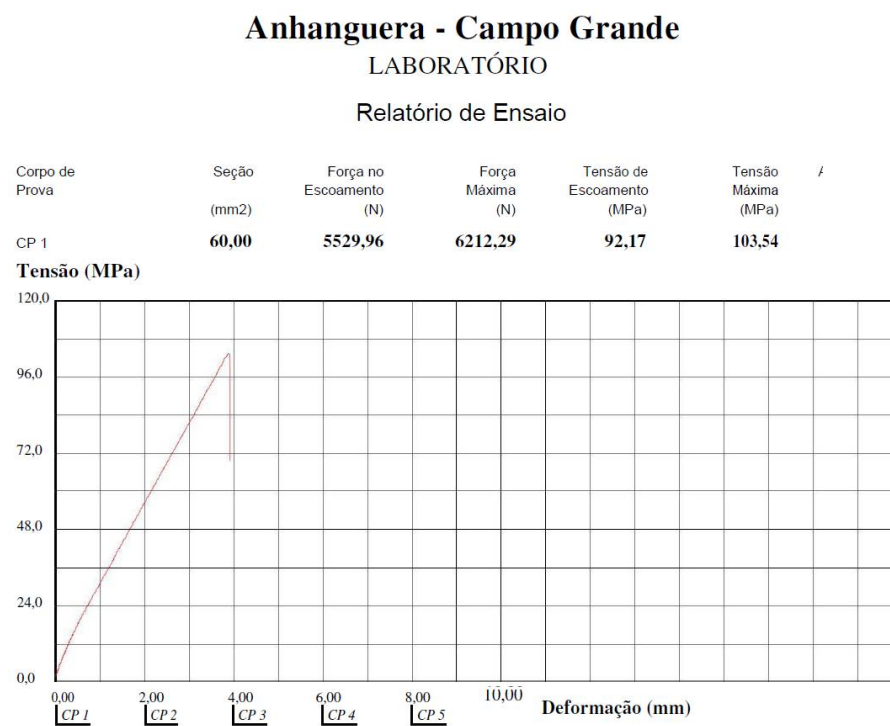
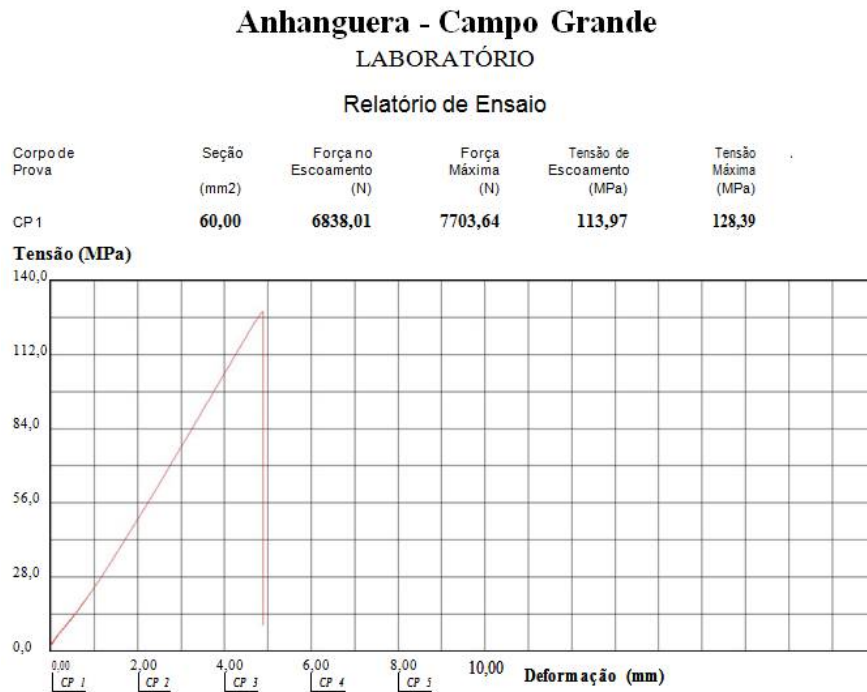


Figura B.27 – Relatório de ensaio de tração para Fibra2 de kevlar



Assim, nota-se que foram feitos dezenas de ensaios, no entanto nem todos foram mostrados devido ao grande espaço que seria ocupado por todos os Relatórios de Ensaios, mesmo estando em anexo.