



Departamento de  
Engenharia Química  
Escola de Engenharia  
UFMG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

## DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS TÉCNICOS E ECONÔMICOS NA  
PRODUÇÃO DE MADEIRA PLÁSTICA POR MEIO DA UTILIZAÇÃO DE  
MATERIAIS RECICLADOS

Luiz Felipe Cerceau Guimarães

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Geraldo de Sousa

Belo Horizonte – MG, Abril de 2013.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus pela oportunidade de desfrutar de uma universidade pública de alta qualidade e por ter me proporcionado uma família que me apoia incondicionalmente.

A UFMG e o Departamento de Engenharia Química (DEQ) pela minha formação e suporte ao crescimento acadêmico e profissional.

Ao professor orientador Dr. Ricardo Geraldo de Sousa pela compreensão e ensinamentos fundamentais para o desenvolvimento do trabalho.

A Ingra de Queiroz Flecha, aluna de graduação do Departamento de Engenharia Química (DEQ), a Cyntia D'Avila Carvalho Erbeta, técnica do Laboratório de Ciência e Tecnologia de Polímeros - DEQ, pelo auxílio na elaboração das amostras e na execução dos testes.

Ao Prof. Rodrigo Lambert Oréfice do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET), ao Anderson Maia Peres, aluno de doutorado do DEMET, e ao Tulio Pacheco Boaventura, técnico de laboratório do DEMET, pelo auxílio na elaboração das amostras e na execução dos testes.

As empresas Bemplast Indústria e Comércio Ltda, Madeireira Isamar e Madeireira MJ pelo fornecimento do material utilizado neste trabalho.

A Chemtech por apoiar e disponibilizar todo tempo necessário para a realização das atividades pertinentes ao mestrado.

E, por fim, aos amigos e todos que contribuíram de alguma forma para mais essa realização.

## RESUMO

A madeira plástica, objeto deste trabalho, apresenta-se como uma alternativa para reciclagem dos polímeros de maior consumo no Brasil. O fato de não ser atacada por cupins ou fungos, não absorver umidade, ser resistente a agentes químicos em geral e a raios UV, ter um baixo consumo energético em sua produção, ser reciclável, dentre outras propriedades, a coloca como um potencial produto para substituição da madeira, concreto ou aço. Sendo assim, foram propostas formulações para a produção da madeira plástica com polietileno de alta densidade reciclado e restos de madeira (serragem e pó). Para análise das propriedades das amostras produzidas, foram realizados testes mecânicos, analíticos e estatísticos. Foi observado que a inserção da fibra orgânica na matriz polimérica é responsável por diminuir a capacidade de deformação elástica e da capacidade de absorção de energia do PEAD. Além disso, pôde ser observado que na adição da madeira no polímero não ocorreu reação química e, portanto, não foram observados grandes alterações nas temperaturas de transição do mesmo. A análise estatística corroborou os resultados acima e, por fim, a modelagem econômica realizada indica que um empreendimento para a produção da madeira plástica é viável.

## **ABSTRACT**

The wood plastic, object of this work, is presented as an alternative for recycling polymers of higher consumption in Brazil. The fact of not being attacked by termites or fungi, does not absorb moisture, is resistant to chemicals and UV rays in general, have a low energy consumption in its production, is recyclable, among other properties, makes it a potential product for replacement wood, concrete or steel. Thus, formulations have been proposed for producing wood plastic with high density polyethylene recycled and scrap wood (wood shavings and dust). For analysis of the properties of the samples produced, mechanical tests, analytical and statistics were performed. It was observed that the inclusion of organic fiber in the polymer matrix is liable to decrease the capacity of elastic deformation and energy absorption capacity of HDPE. Furthermore, it can be seen that the addition of wood into the polymer did not occur chemical reaction, and therefore were not observed large changes in transition temperatures thereof. Statistical analysis confirmed these results and, finally, the economic modeling performed indicates that a new development for the production of wood plastic is feasible.

# LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

AACE – Association for Advancement of Cost Engineering

ABS – Copolímero de acrilonitrila, butadieno e estireno

ANOVA – Análise de Variância

ASTM – American Society for Testing and Materials

CAPEX – Capital Expenditure

DSC - Calorimetria exploratória diferencial

DTG/DrTGA - Termogravimetria derivada

EBITDA - earnings before interest, taxes, depreciation and amortization

EP – eficiência de plastificação

FEED – Front End Engineering Design

FTIR - Espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier

EVA – Polietileno vinil acetato

HDF – high density fiberboards

MDP - chapa de partículas de média densidade

MAPP - ácido maleico propilênico

MDF – medium density fiberboard

MM – massa molar

OSB - painéis de partículas orientadas

OPEX – Operational Expenditure

PB – particleboard

PC – policarbonato

PEAD – polietileno de alta densidade

PEBD – polietileno de baixa densidade

PE20 – Mistura de polietileno com 20% em peso de madeira

PE30 – Mistura de polietileno com 30% em peso de madeira

PE40 – Mistura de polietileno com 40% em peso de madeira

PE50 – Mistura de polietileno com 50% em peso de madeira

PEE - planejamento estatístico de experimentos

PET – poli tereftalato de etileno

PMMA – polimetil metacrilato

PP – polipropileno

PP20 – Mistura de polipropileno com 20% em peso de madeira

PP30 – Mistura de polipropileno com 30% em peso de madeira

PP40 – Mistura de polipropileno com 40% em peso de madeira

PP50 – Mistura de polipropileno com 50% em peso de madeira

PS – poliestireno

PVC – cloreto de polivinil

RC – razão de compressão

RPB – PB reciclado

RPE – polietileno reciclado

RMDF - MDF reciclado

RSS – resíduos sólidos de saúde

RSU– resíduos sólidos urbanos

SAN – Copolímero de estireno e acrilonitrila

Tendset - Temperatura de final da variação de massa na termogravimetria

TIR – Taxa Interna de Retorno

Tonset - Temperatura de início de variação de massa na termogravimetria

Tmáx deg - Temperatura de máxima degradação na termogravimetria

TG – termogravimetria

VC – Valores Críticos

VPL – Valor Presente Líquido

UV – raios ultravioleta

WPC - Wood Plastic Composite

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1: Exemplo de polimerização (emulsão). Fonte: <a href="http://www.qmc.ufsc.br/qmcweb/artigos/polimeros.html">http://www.qmc.ufsc.br/qmcweb/artigos/polimeros.html</a>	4
Figura 3-2 – Polimerização em Cadeia. Fonte: <a href="http://faculty.uscupstate.edu/llever/Polymer%20Resources/Synthesis.htm">http://faculty.uscupstate.edu/llever/Polymer%20Resources/Synthesis.htm</a> .	6
Figura 3-3 – Polimerização em etapas. Fonte: <a href="http://faculty.uscupstate.edu/llever/Polymer%20Resources/Synthesis.htm">http://faculty.uscupstate.edu/llever/Polymer%20Resources/Synthesis.htm</a> .	6
Figura 3-4 – Avanço da polaridade em grupos funcionais com respectivos avanços na $T_g$ e na $T_m$ (CANEVAROLO, 2006).	10
Figura 3-5 – Comportamento de um polímero em função da massa molecular, $T_g$ , $T_m$ e temperatura na qual a medida está sendo realizada.	13
Figura 3-6 – Ilustração da fluência.	14
Figura 3-7 – Processos utilizados na produção de transformados plásticos no Brasil em 2010 (ABIPLAST, 2011).	16
Figura 3-8 – Esquema de uma extrusora básica. Fonte: <a href="http://www.romanplast.com.br">www.romanplast.com.br</a>	17
Figura 3-9 – Esquema de uma injetora. Fonte: <a href="http://vandersolidworks.blogspot.com/2010/04/maquina-injetora.html">http://vandersolidworks.blogspot.com/2010/04/maquina-injetora.html</a> .	18
Figura 3-10 – Esquema do processo de moldagem por sopro. Fonte: <a href="http://www.demet.ufmg.br/docentes/rodrigo/processamento.htm">http://www.demet.ufmg.br/docentes/rodrigo/processamento.htm</a> .	19
Figura 3-11 – Esquema do processo de moldagem por compressão. Fonte: <a href="http://www.parafusoautovedante.com.br/CapasDeSilicone/MoldagemDeCompressao.asp">http://www.parafusoautovedante.com.br/CapasDeSilicone/MoldagemDeCompressao.asp</a>	20
Figura 3-12 – Esquema do processo de termoformagem. Fonte: <a href="http://www.sinotech.com/products/archived/thermoforming.html">http://www.sinotech.com/products/archived/thermoforming.html</a>	21
Figura 3-13 – Produção mundial de plástico (ABIPLAST, 2011).	22
Figura 3-14 – Produção de transformados plásticos no Brasil (em mil de toneladas) (ABIPLAST, 2011).	22
Figura 3-15 – Segmentação do Mercado de Transformados Plásticos por Aplicação (ABIPLAST, 2011).	23
Figura 3-16 – Códigos de identificação dos plásticos. Fonte: <a href="http://www.qca.ibilce.unesp.br/prevencao/codigos-plasticos.gif">http://www.qca.ibilce.unesp.br/prevencao/codigos-plasticos.gif</a> .	24
Figura 3-17 - Quantidades de Municípios por Macrorregião e Brasil em que existem Iniciativas de Coleta Seletiva.	25
Figura 3-18 - Destinação Final dos RSU Coletados no Brasil em 2011.	26
Figura 3-19 - Evolução da Reciclagem Mecânica de Plásticos (IRMP) no Brasil de 2003 a 2010: Quantidade Total Reciclada x Capacidade Total Instalada.	27
Figura 3-20 – Exemplo de uma linha de reciclagem mecânica de plásticos. Fonte: <a href="http://www.kie.com.br">www.kie.com.br</a>	30
Figura 3-21 – Fluxograma básico para a produção da madeira plástica.	41
Figura 3-22 – Produtos de madeira plástica.	44
Figura 3-23 – Produtores de madeira plástica no Brasil.	45
Figura 3-24 – Critérios de decisão para $H_0$ .	48

Figura 3-25 – Regiões críticas.	49
Figura 3-26 – Probabilidade para o erro tipo II quando $\mu = X+Y$ e $n=10$ .	50
Figura 3-27 – Probabilidade para o erro tipo II quando $\mu = X+Y'$ e $n=10$ .	50
Figura 4-1 - (a)PEAD reciclado; (b)PP reciclado; (c) Madeira paraju em pó.	59
Figura 4-2 – Equipamentos utilizados: A) Moinho de bolas; B) Moinho de Facas; C) Extrusora de rosca simples; D) Liquidificador industrial; E) Moinho analítico; F) Thermo Haake; G) Máquina universal de ensaios; H) Máquina de teste de impacto; I) FTIR; J) Prensa térmica; K) Guilhotina; L) Peneira manual; M) Entalhador; N) DSC; O) TG; P) Triturador acoplado a extrusora; Q) Injetora; R) Balança de precisão.	61
Figura 4-3 – Modelo de uma amostra linear completamente randomizada.	63
Figura 4-4 – Fotografia da granulometria da serragem após moagem pelo moinho de facas.	64
Figura 4-5 – Fotografia do PP puro, PE puro, PE20, PE30, PE40 e PE50, após processados pelo Thermo Haake.	65
Figura 4-6 – Fotografia dos corpos de prova formados incompletamente.	66
Figura 4-7 – Fotografia dos corpos de prova para o teste de tensão das amostras de PP puro, PE puro, PE20, PE30, PE40 e PE50.	66
Figura 4-8 – Fotografia das placas cortadas com o auxílio de uma guilhotina – Teste de resistência ao impacto.	67
Figura 4-9 – Fotografia dos corpos de prova entalhados para o teste de resistência a impacto	67
Figura 4-10 – Layout do empreendimento.	68
Figura 5-1 – Comportamento das amostras de acordo com os valores dos testes de força máxima de tensão, módulo elástico e a deformação máxima.	73
Figura 5-2 – Comportamento das amostras de acordo com os valores dos testes de tensão na ruptura e deformação na ruptura.	74
Figura 5-3 - Comportamento das amostras de acordo com os valores da energia absorvida por área.	76
Figura 5-4 – Espectros obtido das amostras de polietileno e polietileno com adição de pó de madeira.	77
Figura 5-5 – Resultados obtidos na análise temogravimetria.	78
Figura 5-6 – Curvas obtidas na análise de DSC – 2ª corrida.	80
Figura 5-7 – Representação gráfica da distribuição F.	82
Figura A 1 – Relatório de Ensaio - PE.....	88
Figura A 2 – Relatório de Ensaio – PE20 .....	89
Figura A 3 – Relatório de Ensaio – PE30 .....	90
Figura A 4 – Relatório de Ensaio – PE40 .....	91
Figura A 5 – Relatório de Ensaio – PE50 .....	92
Figura C 1 – Espectro FTIR – PE. ....	95
Figura C 2 – Espectro FTIR – PE20.....	95
Figura C 3 – Espectro FTIR – PE30.....	96
Figura C 4 – Espectro FTIR – PE40.....	96



Figura C 5 – Espectro FTIR – PE50.....	97
Figura D 1 – Curva TG/DRTG – PE.....	98
Figura D 2 – Curva TG/DRTG – PE20.....	98
Figura D 3 – Curva TG/DRTG – PE30.....	99
Figura D 4 – Curva TG/DRTG – PE40.....	99
Figura D 5 – Curva TG/DRTG – PE50.....	100
Figura E 1 – Curva DSC 1ª Corrida – PE – Massa: 4,23mg.....	101
Figura E 2 – Curva DSC 2ª Corrida – PE – Massa: 4,23mg.....	101
Figura E 3 – Curva DSC 1ª Corrida – PE20 – Massa: 5,43mg.....	102
Figura E 4 – Curva DSC 2ª Corrida – PE20 – Massa: 6,02mg.....	102
Figura E 5 – Curva DSC 1ª Corrida – PE30 – Massa: 5,78mg.....	103
Figura E 6 – Curva DSC 2ª Corrida – PE30 – Massa: 6,08mg.....	103
Figura E 7 – Curva DSC 1ª Corrida – PE40 – Massa: 5,85mg.....	104
Figura E 8 – Curva DSC 2ª Corrida – PE40 – Massa: 5,85mg.....	104
Figura E 9 – Curva DSC 2ª Corrida – PE50 – Massa: 6,20mg.....	105
Figura E 10 – Curva DSC 1ª Corrida – PE50 – Massa: 6,20mg.....	105

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 – Primeira Ocorrência e produção industrial de alguns polímeros (CANEVAROLO, 2006).	2
Tabela 3-2 – Classificação dos Polímeros (CANEVAROLO, 2006).	3
Tabela 3-3 – Métodos de polimerização de acordo com a cinética da reação (CANEVAROLO, 2006).	5
Tabela 3-4 – Métodos de polimerização de acordo com o meio físico da reação (CANEVAROLO, 2006).	5
Tabela 3-5 – Polidispersões típicas de alguns tipos de polímeros (CANEVAROLO, 2006).	7
Tabela 3-6 – Exemplos de faixas de massas moleculares de alguns polímeros comerciais (MANRICH, 2005).	8
Tabela 3-7 – Classificação dos polímeros de engenharia quanto à sua temperatura de uso. (CANEVAROLO, 2006).	9
Tabela 3-8 – Valores típicos de coeficientes de expansão térmica de alguns materiais (DALFRÉ, 2007).	11
Tabela 3-9 – Ensaio para determinar as propriedades mecânicas (MANRICH, 2005).	12
Tabela 3-10 - Características da indústria brasileira de reciclagem de plásticos pós-consumo (ABIPLAST, 2011).	27
Tabela 3-11 – Propriedades da Madeira.	33
Tabela 3-12 – Produtos de madeira e suas principais características.	34
Tabela 3-13 – Decisões em um teste de hipóteses.	49
Tabela 3-14 – Análise de variância para teste de fator único.	53
Tabela 3-15 – Análise de variância para teste de significância da regressão	54
Tabela 3-16 - Metodologia para estimativa de CAPEX. Fonte: AACE.	55
Tabela 3-17 – Significado do VPL em razão do seu valor com respectiva decisão a ser tomada.	56
Tabela 4-1 – Definição do fator e nível do experimento.	62
Tabela 4-2 – Número de amostras por tratamento.	62
Tabela 4-3 – Composições dos compostos plásticos.	63
Tabela 4-4 – Principais premissas adotadas para a análise econômica.	69
Tabela 4-5 – Estimativa de mão de obra.	70
Tabela 4-6 – Custos com a construção e Infraestrutura.	70
Tabela 4-7 – Custos com equipamentos.	71
Tabela 4-8 – Custos operacionais.	71
Tabela 4-9 – Formação dos preços.	71
Tabela 5-1 – Média dos resultados obtidos – Teste de Tensão.	72
Tabela 5-2 – Dados do PEAD comercial. Fonte: Hipermetal Comércio e Indústria Ltda	73
Tabela 5-3 – Média dos resultados obtidos – Teste de Resistência ao Impacto.	75
Tabela 5-4 – Comparação das propriedades observadas nas curvas TG	78
Tabela 5-5 – Comparação das propriedades observadas nas curvas obtidas pelo DSC.	79
Tabela 5-6 – Valores de entrada para a análise estatística.	80
Tabela 5-7 – ANOVA para Tensão (força máxima) versus %Madeira na composição.	81
Tabela 5-8 – ANOVA para Módulo de Elasticidade versus %Madeira na composição.	81
Tabela 5-9 – ANOVA para Energia absorvida por área ( $J/m^2$ ) versus %Madeira na composição.	82
Tabela 5-10 – Comparação entre o valor observado ( $F_0$ ) e o valor tabelado ( $f_0$ ).	82

Tabela 5-11 Síntese da comparação entre o valor observado ( $F_0$ ) e o valor tabelado ( $f_0$ ).	82
Tabela 5-12 – Regressão linear ( $y = \beta_0 + \beta_1 X + erro$ )	83
Tabela 5-13 – VPL, TIR e payback do projeto.	83
Tabela 5-14 – Análise de sensibilidade do projeto.	84
Tabela B 1 – Resultados obtidos para o teste de resistência ao impacto. ....	93
Tabela G 1 – Análise econômica do projeto.....	111

# SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
<b>3.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>2</b>
<b>3.1</b>	<b>CIÊNCIA DOS POLÍMEROS .....</b>	<b>2</b>
3.1.1	Estrutura Molecular e Classificação .....	3
3.1.2	Síntese .....	4
3.1.3	Massa Molecular .....	6
3.1.4	Propriedades Térmicas .....	8
3.1.5	Propriedades Mecânicas .....	12
3.1.6	Propriedades Elétricas .....	15
3.1.7	Outras Propriedades .....	15
3.1.8	Processamento.....	16
<b>3.2</b>	<b>PLÁSTICOS .....</b>	<b>21</b>
3.2.1	Classificação .....	23
3.2.2	Identificação .....	24
<b>3.3</b>	<b>RECICLAGEM .....</b>	<b>25</b>
3.3.1	Reciclagem Química .....	28
3.3.2	Reciclagem Energética .....	29
3.3.3	Reciclagem Mecânica .....	29
<b>3.4</b>	<b>TÉCNICAS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>30</b>
<b>3.5</b>	<b>MADEIRA.....</b>	<b>32</b>
<b>3.6</b>	<b>MADEIRA PLÁSTICA.....</b>	<b>34</b>
3.6.1	Estudos Recentes .....	36
3.6.2	Processo de produção .....	39
3.6.3	Destinações/Aplicações .....	44

3.6.4	Análises e Ensaios .....	44
3.6.5	Madeira Plástica no Brasil .....	45
<b>3.7</b>	<b>ANÁLISE ESTATÍSTICA .....</b>	<b>46</b>
3.7.1	Teste de Hipóteses.....	47
3.7.2	Análise de Variância (ANOVA).....	51
3.7.3	Regressão Linear Simples .....	53
<b>3.8</b>	<b>ANÁLISE ECONÔMICA DE PROJETOS.....</b>	<b>54</b>
3.8.1	Juros .....	55
3.8.2	Valor Presente Líquido (VPL).....	56
3.8.3	TIR (Taxa Interna de Retorno) .....	57
3.8.4	Capital de Giro.....	57
3.8.5	CAPEX e OPEX .....	58
3.8.6	Fluxo de Caixa.....	58
3.8.7	Tempo de <i>Payback</i> .....	59
<b>4.</b>	<b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>59</b>
<b>4.1</b>	<b>Materiais e Equipamentos .....</b>	<b>59</b>
4.1.1	Materiais .....	59
4.1.2	Equipamentos.....	60
<b>4.2</b>	<b>Procedimento Estatístico .....</b>	<b>61</b>
4.2.1	A Análise de Variância em Experimentos de Fator Único - ANOVA .....	61
4.2.2	Regressão Linear Simples .....	63
<b>4.3</b>	<b>Procedimentos realizados .....</b>	<b>63</b>
<b>4.4</b>	<b>Análise Econômica.....</b>	<b>68</b>
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>72</b>
<b>5.1</b>	<b>Testes Mecânicos.....</b>	<b>72</b>
5.1.1	Testes de Tração.....	72
5.1.2	Testes de Resistência ao Impacto .....	74

<b>5.2</b>	<b>Testes Analíticos</b> .....	<b>76</b>
5.2.1	Análise por Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) .....	76
5.2.2	Análise Termogravimétrica (TG) .....	77
5.2.3	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) .....	79
<b>5.3</b>	<b>Análise Estatística</b> .....	<b>80</b>
<b>5.4</b>	<b>Análise Econômica</b> .....	<b>83</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>84</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>85</b>
	<b>ANEXO A – TESTE DE TRAÇÃO</b> .....	<b>88</b>
	<b>ANEXO B – TESTES DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO</b> .....	<b>93</b>
	<b>ANEXO C – ANÁLISE POR ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)</b> .....	<b>95</b>
	<b>ANEXO D – ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG)</b> .....	<b>98</b>
	<b>ANEXO E – CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC)</b> .....	<b>101</b>
	<b>ANEXO F – ANÁLISE ESTATÍSTICA – OUTPUT DO MINITAB</b> .....	<b>106</b>
	<b>ANEXO G – ANÁLISE ECONÔMICA</b> .....	<b>111</b>

# 1. INTRODUÇÃO

Com o passar do tempo, a necessidade de reutilização dos materiais que foram descartados se torna inevitável. A escassez de recursos, o aumento da demanda e o apelo ambiental, fortalecem e sustentam a tendência do desenvolvimento sustentável. Nesse contexto, o plástico representa grande parte do resíduo sólido existente na atualidade.

Conforme estudos realizados (ABDI, 2009; ABPLAST, 2011; ABRELPE, 2011) pelas principais entidades relacionadas a destinação de resíduos no Brasil, o índice de reciclagem mecânica dos plásticos é em torno de 20%, o que demonstra que a maioria dos produtos produzidos não são reaproveitados.

O plástico é um material que, por características inerentes a alguns polímeros, possui boas habilidades de reprocessamento. Além disso, é um composto com conteúdo energético elevado, podendo então ser estabelecido duas possíveis rotas energéticas:

- Economia de energia por meio da sua reciclagem;
- Geração de energia por meio da sua queima.

Entre a possibilidade de reciclagem do plástico para reutilização no processo de produção do mesmo, o plástico reciclado pode ser utilizado para a confecção de diversos outros produtos, dentre eles a madeira plástica.

Considerado um produto inovador e com boas perspectivas de mercado, a madeira plástica alia consciência socioambiental e inovação tecnológica, podendo substituir o plástico virgem, a madeira, o concreto e metais em diversas aplicações. Portanto, o presente trabalho visa apresentar e estudar aspectos técnicos e econômicos da produção da madeira plástica.

No capítulo a seguir foram elencados os objetivos do presente estudo. No capítulo três foi realizada uma revisão bibliográfica, passando desde a origem do plástico, suas propriedades e formas de processamento, até uma apresentação da madeira plástica e um resumo do que já foi avaliado por outros pesquisadores e entidades. Nesse capítulo é abordado, também, o embasamento teórico estatístico da realização dos testes e as considerações e premissas para a análise econômica. Seguindo adiante para o capítulo quatro, nele foi apresentado o procedimento experimental realizado e, no capítulo cinco, foram abordados os resultados e a discussão dos mesmos. Por fim, no capítulo seis, são apresentadas as conclusões e no sétimo constam as referências bibliográficas utilizadas nessa dissertação.

## 2. OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo geral investigar o efeito causado nas propriedades da matriz polimérica quando incluída fibras de madeira na mesma, visando à produção de madeira plástica e avaliar economicamente seu processo de produção.

Como objetivos específicos, destacam-se os seguintes tópicos:

1. Propriedades mecânicas e analíticas para diferentes composições de madeira plástica;
2. Teste de hipótese para a validação da influência da fibra orgânica nas propriedades da matriz polimérica;
3. Verificação da hipótese de relação linear entre a proporção de fibra orgânica na matriz polimérica e as propriedades mecânicas da madeira plástica obtida;
4. Avaliação econômica de um projeto de produção da madeira plástica.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos tópicos a seguir, poderão ser observadas as informações técnicas pertinentes para ao estudo.

#### 3.1 CIÊNCIA DOS POLÍMEROS

O primeiro contato do homem com materiais resinosos é datado da época do império romano, por meio dos carimbos, colas e substâncias para vedar vasilhames. Na época dos grandes descobrimentos, século XVI, portugueses e espanhóis tiveram o primeiro contato com um produto extraído de uma árvore. Atraídos pelas suas características, alta elasticidade e flexibilidade, o mesmo, levado à Europa, foi utilizado como borracha. Até 1839 sua utilização não foi significativa e nenhum avanço pode ser citado, porém, com o advento da vulcanização, descoberta por Charles Goodyear, a borracha começou a se difundir. Em 1846, Christian Schönbien, reagiu algodão com ácido nítrico obtendo a nitrocelulose. Outros pesquisadores, empiricamente, contribuíram para a evolução dos estudos desse novo material. No entanto, é a partir de 1920 que as primeiras teorias foram propostas e, como marca desta nova fase, poliamidas e poliésteres foram sintetizados, sendo batizados de Nylon (CANEVAROLO, 2006).

Após a segunda guerra mundial, os polímeros ganharam espaço e avançaram tecnologicamente, com várias sínteses, até os dias de hoje. Na Tabela 3-1, pode ser observada a primeira ocorrência e a primeira produção industrial de alguns polímeros comerciais.

Tabela 3-1 – Primeira Ocorrência e produção industrial de alguns polímeros (CANEVAROLO, 2006).

Polímero	Primeira Ocorrência	Primeira Produção Industrial
PVC	1915	1933
PS	1900	1936/7
PEBD	1933	1939
Nylon	1930	1940
PEAD	1953	1955
PP	1954	1959
PC	1953	1958



O nome “Polímero” é composto das palavras “Poli” (muitos) mais “meros” (unidade de repetição), os quais refletem exatamente a característica básica desse composto: uma macromolécula constituída pelo conjunto de monômeros, os quais devem possuir funcionalidade maior do que dois, unidos por ligações covalentes. Funcionalidade de uma molécula é o número de pontos reativos presentes na mesma. Os polímeros podem ser classificados em três grandes classes: plásticos, borrachas e fibras (CANEVAROLO, 2006).

### 3.1.1 Estrutura Molecular e Classificação

A estrutura molecular de um polímero constitui-se, em sua grande maioria, de ligações covalentes intermoleculares e intramoleculares. Intramoleculares são as ligações primárias entre os átomos de carbono na cadeia polimérica. Já as ligações intermoleculares ocorrem entre as cadeias poliméricas.

As cadeias poliméricas podem ser lineares ou ramificadas. A ramificação vai influenciar diretamente em algumas propriedades físicas da molécula, como, por exemplo, densidade, dureza, flexibilidade e viscosidade. O principal efeito das cadeias laterais é inibir a cristalização e plastificar o polímero. Quanto maior for o grau de ramificação, menor a cristalinidade e menores serão as coesões intermoleculares (AKCELRUD, 2007).

Além da forma molecular, determinada pelas ligações químicas, e suas respectivas características (ângulos e comprimentos), as cadeias poliméricas podem, devido a possibilidade de rotação de seus átomos em torno das ligações covalentes, obter diferentes tipos de conformações. Cada conformação está relacionada diretamente às propriedades físicas de um polímero, dando origem ao seu estado: amorfo ou cristalino (AKCELRUD, 2007).

Os polímeros podem ser classificados conforme apresentado na Tabela 3-2.

**Tabela 3-2 – Classificação dos Polímeros (CANEVAROLO, 2006).**

Classificação	Tipos	Características
Quanto ao método de preparação	Adição	São aqueles em que durante a formação não há perda de massa na forma de compostos de baixa massa molecular.
	Condensação	São aqueles formados a partir de reações entre dois grupos funcionais reativos em que há perda de massa na forma de compostos de baixa massa molecular.
Quanto ao comportamento mecânico	Plásticos	Material polimérico sólido na temperatura de utilização. Podem ser subdivididos em termoplásticos e termorrígidos.
	Elastômeros	Polímeros que possuem a capacidade de deformar-se no mínimo duas vezes o seu comprimento inicial, retornando ao comprimento original rapidamente após retirar a força.
	Fibras	Termoplástico orientado que satisfaz a condição geométrica de Comprimento/Diâmetro $\geq 100$ .

### 3.1.2 Síntese

Os polímeros podem ser obtidos por meio de vários tipos de processos e de inúmeras substâncias diferentes. As principais fontes de matéria prima são:

- Produtos naturais: celulose e borracha (látex);
- Hulha/Carvão mineral;
- Petróleo.

Basicamente, o material classificado como polímero é obtido por meio da reação de polimerização. Sua obtenção, dependendo do tipo, pode ser exemplificada por meio da Figura 3-1.

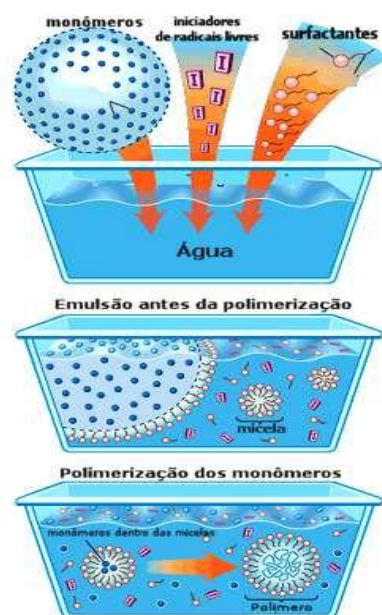


Figura 3-1: Exemplo de polimerização (emulsão). Fonte: <http://www.qmc.ufsc.br/qmcweb/artigos/polimeros.html>

A polimerização consiste em uma reação entre os monômeros, formando cadeias longas, denominadas polímero. Esses polímeros podem formar-se por reação em cadeia ou por meio de reações de adição ou condensação. A polimerização pode ser reversível ou não e pode ser espontânea ou provocada.

Os processos de classificação podem ser determinados de acordo com (CANEVAROLO, 2006):

- Número de monômeros: homopolimerização ou, simplesmente, polimerização e copolimerização;
- Tipo de reação química: esterificação, acetilação, amidação, adição, dentre outras;
- Cinética de polimerização: polimerização em etapas, polimerização em cadeia e polimerização com abertura de anel;
- Tipo de arranjo físico: processo homogêneo (em massa e em solução) e processo heterogêneo (suspensão e emulsão).

Na Tabela 3-3 e Tabela 3-4 estão as principais características e os principais aspectos da classificação das reações de polimerização, quanto à cinética e quanto ao arranjo físico das mesmas.

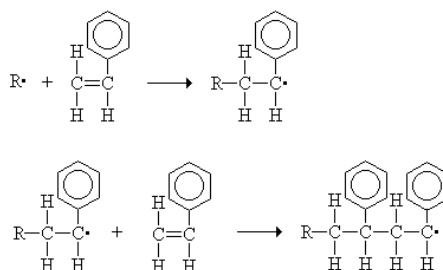
**Tabela 3-3 – Métodos de polimerização de acordo com a cinética da reação (CANEVAROLO, 2006).**

Classificação	Reação	Principais Características	Exemplo
Polimerização em Etapas	Condensação sucessiva de grupos funcionais reativos.	Formação de subprodutos; Aumento da MM com o tempo; Monômeros consumidos nos primeiros estágios; Não há necessidade de iniciadores.	Reações de esterificação
Polimerização em Cadeia	Instabilização da dupla ligação de um monômero e sua sucessiva reação com outras ligações duplas de outros monômeros.	Dois tipos: via radicais livres e iônicas (catiônica e aniônica); Monômero consumido lentamente e está presente durante toda a reação; Três etapas: iniciação, propagação e terminação.	Poliestireno, Poli metacrilato de metila
Polimerização por Abertura de Anel	Por meio da abertura do anel é obtido a bifuncionalidade que, ao se reagir com a molécula geradora, formará o polímero.	Não há formação de subprodutos.	Nylon 6

**Tabela 3-4 – Métodos de polimerização de acordo com o meio físico da reação (CANEVAROLO, 2006).**

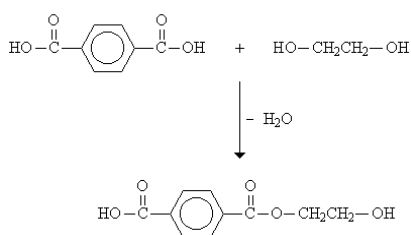
Classificação	Reação	Principais Características	Exemplo
Massa	Iniciador adicionado ao monômero na presença de aquecimento.	Produto livre de impurezas; Dificuldade no controle da temperatura nos reatores (polimerização é uma reação exotérmica).	Chapas de acrílico
Solução	Iniciador adicionado ao monômero na presença de aquecimento na presença de um solvente.	Desenvolvida para resolver o problema da polimerização em massa; Pode ser obtida uma solução polimérica (polímero solúvel no solvente) ou polimerização em lama (polímero insolúvel no solvente).	Poli(olefinas)
Suspensão	Polimerização em meio aquoso na presença de um agente de suspensão, que será o responsável por dispersar a solução de monômero e iniciador em pequenas gotas.	Obtenção de pérolas, na dimensão de 0,01 a 1mm.	PVC
Emulsão	Outra forma de manter uma substância orgânica dispersa em meio aquoso. A polimerização ocorrerá nas misturas.	Obtenção de um pó fino, com granulometria de 0,05 a 1 micron.	Tintas

Na Figura 3-2 e na Figura 3-3 podem ser observadas as reações em dois tipos de síntese, polimerização em cadeia e polimerização em etapas.



**Figura 3-2 – Polimerização em Cadeia. Fonte:**

<http://faculty.uscupstate.edu/llever/Polymer%20Resources/Synthesis.htm>.



**Figura 3-3 – Polimerização em etapas. Fonte:**

<http://faculty.uscupstate.edu/llever/Polymer%20Resources/Synthesis.htm>.

### 3.1.3 Massa Molecular

A massa molecular de um polímero está diretamente ligada às propriedades que esse apresenta. Juntamente com a estrutura química do mesmo, ela é um parâmetro fundamental para aplicabilidade do material (MANRICH, 2005). No entanto, o poder de influência da massa molecular em determinada propriedade é assintótico. Ou seja, se for considerada uma determinada variação de massa molecular, essa provocará maiores alterações nas propriedades quando ocorrer em moléculas de baixa massa molecular quando comparadas com moléculas de massas moleculares maiores (CANEVAROLO, 2006).

Cadeias são consideradas poliméricas quando a massa molar (MM) é superior a 10.000 g/mol. Valores abaixo desse e não menores do que 1.000 são considerados oligômeros, e cadeias poliméricas com MM acima de 250.000 são considerados de alta massa molecular (CANEVAROLO, 2006).

Devido à característica de síntese dos polímeros, os mesmos possuem diversas cadeias, com diferentes tamanhos e massas moleculares, resultando então, em uma substância polidispersa. A dispersividade pode ser medida por meio da divisão da massa molecular ponderal média pela massa molecular numérica média. Esses dois tipos são comuns para cálculos de massas moleculares e, juntamente com outras médias estatísticas, determinam as massas moleculares dos polímeros

(MANRICH, 2005). Na Tabela 3-5 estão alguns valores típicos de polidispersão, de acordo com o tipo de polímero.

Tabela 3-5 – Polidispersões típicas de alguns tipos de polímeros (CANEVAROLO, 2006).

Tipo de polímeros	$\overline{M}_w / \overline{M}_n$
Polímeros vivos (polimerização aniônica)	1,01 a 1,05
Polímeros de condensação	2
Polímeros de adição	2 a 5
Polímeros de coordenação	8 a 30
Polímeros ramificados	10 a 50

Para determinar as massas moleculares são necessários métodos experimentais. Cada método é único e característico para cada tipo de massa molecular. Se  $N_i$  é o número de moléculas presentes na cadeia polimérica em consideração e  $M_i$  a massa molecular de cada uma das cadeias, a massa total do polímero ( $w_i$ ) é dada pela equação 3-1.

$$w_i = \sum N_i M_i \quad (3-1)$$

Portanto, as massas moleculares médias são comumente calculadas das seguintes formas:

- Massa molecular numérica média:  $\overline{M}_n = \frac{\sum_i N_i M_i}{\sum_i N_i}$ , leva em conta, principalmente, o número de cadeias. Pode ser calculada por meio da análise de fins de cadeia, das propriedades coligativas, osmometria, ebuliometria, crioscopia e cromatografia de exclusão por tamanho;
- Massa molecular ponderal média:  $\overline{M}_w = \frac{\sum_i w_i M_i}{\sum_i w_i}$ , a massa das cadeias poliméricas é o mais importante. Pode ser calculada por meio do método de espalhamento de luz e da ultracentrifugação;
- Massa molecular viscosimétrica média:  $\overline{M}_v = \left( \frac{\sum_i N_i (M_i)^{1+a}}{\sum_i N_i M_i} \right)^{1/a}$ , em que “a” é uma constante que depende do polímero, do solvente e da temperatura. É utilizada para soluções poliméricas podendo ser obtida por meio da viscosimetria de soluções diluídas;
- Massa molecular Z-média:  $\overline{M}_z = \frac{\sum_i N_i (M_i)^3}{\sum_i N_i (M_i)^2}$ , quando o interesse é de se levar em conta a massa de cada fração. É determinada por meio dos dados de massa molecular obtidas na ultracentrifugação.

Partindo da definição de cada média, é possível provar matematicamente que  $\overline{M}_z > \overline{M}_w > \overline{M}_v > \overline{M}_n$  (MANRICH, 2005; CANEVAROLO, 2006). Na Tabela 3-6 podem ser observadas faixas de valores de massa molecular para alguns polímeros.

Tabela 3-6 – Exemplos de faixas de massas moleculares de alguns polímeros comerciais (MANRICH, 2005).

Polímeros	Faixa de Massas Moleculares Médios
PEBD	Mn entre 20000 - 40000
PEAD	Mn entre 20000 - 60000
PP	Mn entre 30000 - 50000
PS	Mv entre 50000 - 200000
PVC	Mn entre 40000 - 80000
PVC rígido	Mn entre 30000 - 50000
Nylon 66	Mn entre 10000 - 40000
PET	Mn entre 15000 - 50000 Mw entre 25000 - 90000
PC	Mn entre 15000 - 40000

### 3.1.4 Propriedades Térmicas

As propriedades térmicas dos polímeros determinam as características físicas do produto, seja esse um plástico duro e frágil, borrachoso e tenaz ou um fluido viscoso. O determinante para definir qual será o comportamento da cadeia é a mobilidade da mesma, a qual está relacionada diretamente com a temperatura. Portanto, o conhecimento das características físico-químicas inerentes de um polímero é fundamental para a compreensão de seu desempenho termomecânico (CANEVAROLO, 2006).

Nesse contexto, as principais propriedades térmicas estão relacionadas às baixas temperaturas de fusão dos polímeros, que variam da temperatura ambiente até 250°C (podendo chegar a 400°C para alguns casos especiais). Portanto, é de se esperar um baixo consumo de energia para conformação, refletindo em baixos custos de produção. Por outro lado, é importante notar que, ao contrário dos outros materiais (madeira, cerâmicos e grande parte dos metais) os polímeros tendem a mudar consideravelmente suas dimensões com a mudança na temperatura (DALFRÉ, 2007).

#### 3.1.4.1 Temperaturas de transição

A temperatura de fusão cristalina ( $T_m$ ), para os polímeros semicristalinos, e a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), para os polímeros amorfos, são as principais transições térmicas dos polímeros, uma vez que, estão associadas com a mudança de estado físico dos materiais (DALFRÉ, 2007).

A seguir serão detalhadas as três principais faixas de temperaturas de transição: transição vítrea, fusão cristalina e cristalização.

- Temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ): é o valor médio de temperatura que, durante o resfriamento de um material polimérico, permite que as cadeias da fase amorfa percam mobilidade, ou seja, percam a capacidade de mudar sua conformação.  $T_g$  é uma transição termodinâmica de segunda ordem e, portanto, influencia diretamente nas propriedades termodinâmicas secundárias. São elas: módulo de elasticidade, coeficiente de expansão, índice de refração, calor específico, dentre outras.

- Temperatura de fusão cristalina ( $T_m$ ): é o valor médio de temperatura em que, durante o aquecimento, desaparecem as regiões cristalinas. Nesse ponto, a energia do sistema atinge o nível necessário para vencer as forças intermoleculares secundárias entre as cadeias da fase cristalina.  $T_m$  é uma mudança termodinâmica de primeira ordem e, portanto, possui influência direta nas propriedades termodinâmicas primárias. São elas: volume específico, entalpia, dentre outras.
- Temperatura de cristalização ( $T_c$ ): partindo do estado fundido, isto é, acima de  $T_m$ , a temperatura de cristalização é aquela em que um número grande de cadeias poliméricas se organiza espacialmente de forma regular. Vale ressaltar que seu valor está entre  $T_m$  e  $T_g$  (CANEVAROLO, 2006).

Na engenharia, a temperatura máxima de uso de uma dada peça de plástico é determinada pela sua temperatura de amolecimento, que, para polímeros pouco cristalinos e amorfos, é próxima e abaixo de  $T_g$  e para polímeros altamente cristalinos é próxima e abaixo de  $T_m$ . Na Tabela 3-7, pode ser observada a classificação dos polímeros quanto a sua temperatura de uso e respectivas características (CANEVAROLO, 2006).

**Tabela 3-7 – Classificação dos polímeros de engenharia quanto à sua temperatura de uso. (CANEVAROLO, 2006).**

Classificação	T <sub>uso</sub>	Características	Exemplos
Elastômeros	$T_{uso} > T_g$	Apresentam $T_g$ abaixo da temperatura ambiente, pois possuem alta mobilidade das cadeias e elasticidade	Borrachas vulcanizadas
Polímeros Estruturais Amorfos	$T_{uso} > T_g$	São rígidos e vítreos à temperatura ambiente	PS, PMMA, SAN e PC
Polímeros com Comportamento Couráceo	$T_{uso} \approx T_g$	Aceitam alguma deformação e possuem aspecto de couro	PVC e PPVC
Polímeros Altamente Cristalinos e Polímeros Orientados	$T_{uso} \ll T_m$	Podem ser usados a temperaturas de no máximo 100°C e abaixo de $T_m$ . Neste caso, $T_g$ não é importante, pois a fração volumétrica amorfa é pequena.	Nylon e PET
Polímeros com Cristalinidade Média	$T_g < T_{uso} < T_m$	Rigidez e resistência mecânica moderadas	PEAD e PEBD

Industrialmente são usados dois métodos para se medir a temperatura de amolecimento. São eles:

- Temperatura de amolecimento VICAT: normalizada pela norma técnica ASTM 1525, na qual é medida a temperatura em que a amostra penetra até uma profundidade de 1mm por uma agulha, com ponta plana de 1 milímetro quadrado circular ou quadrado de seção transversal. Uma carga de 10 N é usada. Para o teste B Vicat, a carga é de 50 N;
- Temperatura de distorção térmica HDT: normalizada pela norma técnica ASTM 648, na qual é medida a temperatura que, durante o aquecimento a uma taxa constante de 2°C/min, uma barra de seção retangular de espessura de 13mm e comprimento entre apoios de 100mm, posicionada de lado e tensionada no centro, deforma em 0,25 mm.

### 3.1.4.2 Relação entre a estrutura química com as temperaturas de transição

Todo e qualquer fator que resulte em um aumento nas forças intermoleculares secundárias e na rigidez da cadeia polimérica, irá aumentar a  $T_g$  e a  $T_m$ . Ou seja, a flexibilidade da cadeia polimérica é a principal característica estrutural que define as temperaturas de transição, uma vez que afeta diretamente a mobilidade segmental, isto é, a liberdade para girar em torno de ligações covalentes (AKCELRUD, 2007).

Entre os fatores estruturais que influenciam diretamente nas temperaturas de transição, um deles é a simetria. Quanto mais simétrica for a cadeia polimérica em relação aos seus grupos laterais, maior é a diferença entre  $T_m$  e  $T_g$ .

Outros fatores que influenciam diretamente na  $T_g$  e na  $T_m$  são as presenças de grupamentos rígidos, responsáveis por aumentar as temperaturas de transição, por exemplo, p-fenileno. Ou de grupamentos flexíveis, responsáveis por diminuir as temperaturas de transição, por exemplo, cadeias com heteroátomos de oxigênio ou enxofre (CANEVAROLO, 2006).

A polaridade também influencia nas temperaturas da seguinte maneira: quanto mais polar, maior a proximidade entre as cadeias, o que aumenta a intensidade das interações intermoleculares, resultando em  $T_g$  e  $T_m$  mais elevadas. A Figura 3-4 ilustra o avanço da polaridade de acordo com o grupo funcional (AKCELRUD, 2007).

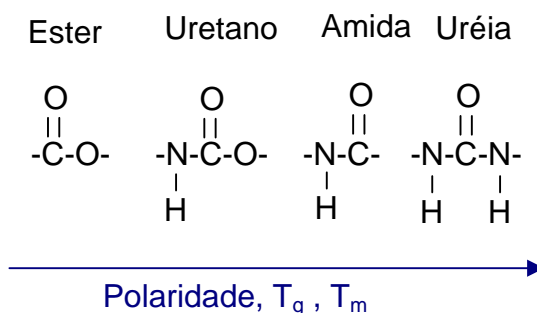


Figura 3-4 – Avanço da polaridade em grupos funcionais com respectivos avanços na  $T_g$  e na  $T_m$  (CANEVAROLO, 2006).

O efeito estéreo do grupo lateral por meio do volume e do comprimento, a isomeria e as ramificações entram no grupo de fatores que exercem influência nas temperaturas de transição. Para todos eles valem o mesmo princípio básico: menor mobilidade, maiores temperaturas (CANEVAROLO, 2006).

Para os polímeros com grupos laterais com volumes maiores é necessário adquirir maior quantidade de energia para obter-se mobilidade, por isso, tende a possuir maiores temperaturas de transição. Já os mesmos com maiores comprimentos e, com isso, maiores distâncias entre as cadeias, levando a interações intermoleculares mais fracas, tendem a ter menores temperaturas de transição. No caso da isomeria, é observado que, os isômeros *trans* possuem maior mobilidade em relação aos isômeros *cis* e, portanto, possuem menores temperaturas de transição. As ramificações implicam em um aumento de pontas de cadeia, o que aumenta o volume livre. Isso facilita a movimentação, reduzindo a quantidade de energia necessária para se atingir a mobilidade da cadeia, logo, menores temperaturas de transição podem ser observadas (CANEVAROLO, 2006).



Nos casos de copolímeros,  $T_g$  e  $T_m$  são ponderadas de acordo com a contribuição de cada constituinte (monômero) na composição final da cadeia polimérica. Várias fórmulas e teorias baseadas no empirismo e a partir de conceitos termodinâmicos já foram desenvolvidas visando prever os valores das temperaturas do copolímero em função das frações ponderais ou volumétricas de cada componente (CANEVAROLO, 2006).

Por fim, e não menos importante, a massa molecular também exerce sua influência nas temperaturas de transição. Quanto maior a massa, menor tende a ser o volume livre e, conseqüentemente, a mobilidade da cadeia, levando a maiores temperaturas de transição vítrea e de fusão cristalina (AKCELRUD, 2007).

#### 3.1.4.3 Influência dos fatores externos nas temperaturas de transição

O fator externo mais significativo é a presença de substâncias conhecidas como plastificantes. A adição dessas substâncias é responsável por provocar uma separação entre as cadeias, diminuindo as forças de atração intermoleculares e, conseqüentemente, a diminuição da  $T_g$  e  $T_m$  (podendo ser eliminada). A  $T_g$  pode ser calculada em função do conteúdo do plastificante por meio de equações disponíveis na literatura (AKCELRUD, 2007).

#### 3.1.4.4 Outras propriedades

Além das temperaturas de transição, outras propriedades são importantes para determinadas aplicações. A condutividade térmica e o coeficiente de expansão térmica também devem ser levados em consideração.

Os polímeros são conhecidos como bons isolantes térmicos, apresentando cerca de 300 a 2500 vezes menor condutividade comparada aos metais. Em relação ao coeficiente de expansão, valores típicos podem ser observados na Tabela 3-8. Comparando-se o polietileno com o aço, pode-se ver que o primeiro possui cerca de 17 vezes maior capacidade de expansão quando submetido ao tratamento térmico. Além disso, a presença de aditivos na matriz polimérica tende à diminuição do coeficiente de expansão, como pode ser observado comparando-se o policarbonato reforçado com fibra de vidro com o policarbonato sem aditivo (DALFRÉ, 2007).

**Tabela 3-8 – Valores típicos de coeficientes de expansão térmica de alguns materiais (DALFRÉ, 2007).**

Material	$\alpha$ (m/m/°C)
Poli(etileno)	$7,8 \times 10^{-5}$
Acrílicos	$3,3 \times 10^{-5}$
Poli(carbonato)	$2,1 \times 10^{-5}$
Alumínio	$7,2 \times 10^{-6}$
Poli(carbonato) reforçado com fibra de vidro	$5,0 \times 10^{-6}$
Aço	$4,4 \times 10^{-6}$
Vidro	$2,2 \times 10^{-6}$

### 3.1.5 Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas de um polímero são caracterizadas pelo modo como esses respondem às solicitações mecânicas (tração, compressão, flexão e cisalhamento). A estrutura química, temperatura, tempo e condições de processamento do material, são variáveis de extrema importância para a análise dos fenômenos mecânicos. O tipo do material, juntamente com o fenômeno envolvido, pode apresentar os seguintes tipos de comportamento:

- Puramente elástico;
- Puramente viscoso;
- Viscoelástico;
- Borrachoso.

A combinação entre o comportamento viscoso (característico de líquidos) com o comportamento elástico (característico de um sólido hookiano), ou seja, um comportamento viscoelástico, pode ser observado nos plásticos e nas fibras. Já os elastômeros, apresentam um comportamento único, o borrachoso, que possui como principal característica, uma alta elasticidade (AKCELRUD, 2007).

Os ensaios mecânicos, basicamente, podem ser realizados de duas maneiras:

- Curta duração: ensaios realizados sob impactos, ou seja, o polímero é submetido a solicitações em um curto espaço de tempo (ms);
- Longa duração: conhecidos como ensaios de fluência e relaxação de tensão, são aqueles em que o polímero é submetido a solicitações em um espaço de tempo maior (anos).

A avaliação das propriedades mecânicas pode ser realizada de forma estática ou dinâmica, com ou sem ruptura. O conhecimento do módulo elástico, tensão e deformação no escoamento e tensão máxima são exemplos de testes mecânicos sem a ruptura do material. Já tensão e deformação na ruptura, resistência ao impacto e número de ciclos de vida sob fadiga são propriedades determinadas por meio da ruptura do corpo de teste (CANEVAROLO, 2006).

As propriedades mecânicas podem ser mensuradas por meio de ensaios normatizados, conforme pode ser visto na Tabela 3-9.

Tabela 3-9 – Ensaios para determinar as propriedades mecânicas (MANRICH, 2005).

Propriedade	Normas
Tração	
Módulo de Elasticidade	ASTM D6638 ISSO/R527 DIN 53.455
Resistência à Tração	
Alongamento	
Resistência à Compressão	ASTM D695
Resistência à Flexão	ASTM D790
Resistência ao Impacto IZOD	ASTM D256 ISSO 180
Densidade	ASTM D792

### 3.1.5.1 Viscoelasticidade

Conforme citado no item anterior, a viscoelasticidade é definida como um fenômeno em que o polímero apresenta comportamento de um fluido viscoso e de um sólido elástico ao mesmo tempo. A fração elástica é devida a variações do ângulo e à distância de ligação entre os átomos da cadeia polimérica. A fração plástica ocorre devido ao atrito entre as cadeias. Juntas, essas duas contribuições são responsáveis por criar um diferencial de tempo entre a solicitação e a resposta, gerando uma defasagem entre elas (CANEVAROLO, 2006).

Para analisar esta propriedade, alguns fatores devem ser conhecidos: massa molecular;  $T_g$ ,  $T_m$ , e temperatura na qual a medida está sendo feita. Como resultados, três possíveis comportamentos podem ser observados. A Figura 3-5 ilustra a relação dessas variáveis com o tipo de comportamento.

- Sólido:  $T < T_g$ . O polímero não possui energia suficiente para adquirir mobilidade, sendo rígido e frágil;
- Borrachoso:  $T_g < T < T_m$ . Apenas a fase amorfa possui mobilidade. A flexibilidade é função da mobilidade da fase amorfa, restrita pela rigidez da fase cristalina;
- Líquido Viscoso:  $T > T_m$ . Forte contribuição da resposta plástica à deformação. Estado de processamento dos polímeros.

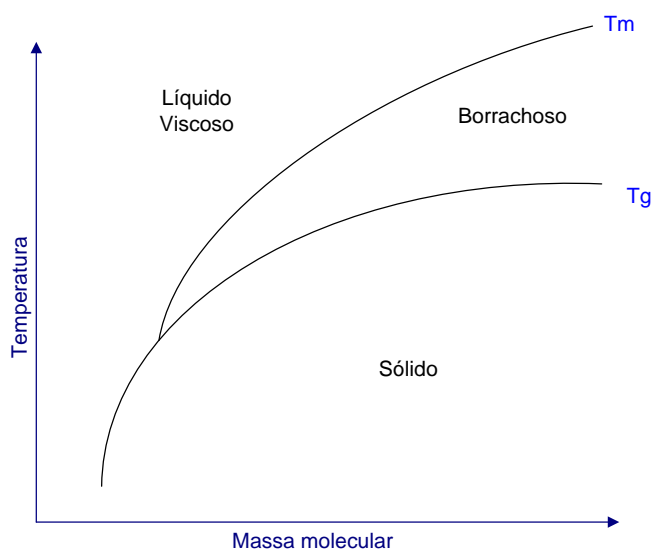


Figura 3-5 – Comportamento de um polímero em função da massa molecular,  $T_g$ ,  $T_m$  e temperatura na qual a medida está sendo realizada.

### 3.1.5.2 Relaxação de tensão

É uma propriedade em que, se o material é submetido a uma tensão súbita e a deformação produzida for mantida constante sem variação na temperatura, a tensão necessária para manter aquela deformação diminui com o tempo. Este comportamento reflete um rearranjo molecular das cadeias do polímero para se adaptar à força aplicada (CANDIAN, 2007).

O módulo de relaxação em tração ou em cisalhamento, a baixas tensões, foi definido como sendo a divisão da tensão, que é função do tempo e da temperatura, e pela deformação, aplicada no tempo zero (AKCELRUD, 2007).

### 3.1.5.3 Fluência

O oposto da relaxação é a fluência, ou seja, é o aumento da deformação ao longo do tempo, sob tensão constante. É uma característica inerente aos plásticos, que pode ocorrer à temperatura ambiente (CANDIAN, 2007).

A variação da deformação é acompanhada em relação ao tempo, sendo que, no início, a deformação é proporcional à força aplicada, seguida de um período de escoamento, até que a taxa de variação da deformação fique constante (AKCELRUD, 2007). Na Figura 3-6 pode ser observado esse fenômeno.

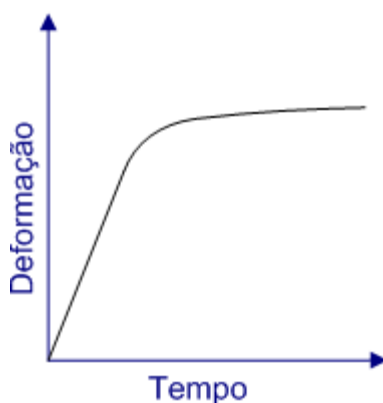


Figura 3-6 – Ilustração da fluência.

A fluência é influenciada pela carga (tensão), temperatura, duração da carga e ambiente

### 3.1.5.4 Fatores que influenciam nas propriedades mecânicas

Vários fatores influenciam o desempenho dos polímeros frente às solicitações mecânicas. Considerando os diversos tipos de ensaios e seus respectivos parâmetros, as respostas vão variar de acordo com os aspectos internos, isto é, características estruturais do polímero, assim como fatores externos, como, por exemplo, a presença dos plastificantes (AKCELRUD, 2007).

Dentre os fatores internos, os principais responsáveis por influenciar o comportamento mecânico são:

- Estrutura química: o módulo elástico ou a rigidez do polímero é função da  $T_g$  e  $T_m$ ;
- Cristalinidade: quanto mais cristalino o polímero, maior é o módulo elástico, a rigidez e a dureza;
- Massa molecular: em relação a tensão no escoamento, a massa molecular, possui efeito maior para polímeros de baixa massa molecular, que, em geral, quanto maior for a massa molecular, maior é a  $T_g$  e, com isso, as consequências relacionadas a esse aumento. Já para os polímeros de massas moleculares maiores, as propriedades na ruptura são diretamente relacionadas a essa propriedade.

Já em relação aos fatores externos, os principais responsáveis por influenciar o comportamento mecânico é a adição de compostos, entre eles:

- **Plastificantes:** como o próprio nome sugere, os plastificantes são adicionados de modo a diminuir a dureza do polímero;
- **Fibras:** as fibras para reforçamento possuem função contrária a dos plastificantes, isto é, elas são adicionadas à matriz polimérica com o objetivo de aumentar o módulo de elasticidade, a resistência ao escoamento e a ruptura.
- **Elastômeros:** os elastômeros são adicionados nas sínteses das blendas poliméricas visando obter um composto mais tenaz (CANEVAROLO, 2006).

### **3.1.6 Propriedades Elétricas**

Em geral, os polímeros são bons isolantes térmicos. No entanto, a adição de cargas especiais condutoras, por exemplo, limalha de ferro, pode os tornar fracamente condutores, sendo evitado o acúmulo de eletricidade estática, que, dependendo da aplicação, pode ser perigosa (DALFRÉ, 2007).

As propriedades elétricas dos materiais poliméricos, isto é, a resistividade (volumétrica e superficial), rigidez e resistência dielétricas, o fator de potência e a resistência ao arco, vão depender do tipo de material e podem ser determinadas de acordo com normas específicas.

### **3.1.7 Outras Propriedades**

Além das propriedades citadas nos tópicos anteriores, outras propriedades merecem atenção, de acordo com a aplicação. São elas:

- **Propriedades Óticas:** polímeros amorfos puros são transparentes e polímeros cristalinos podem ser translúcidos, opacos ou transparentes, dependendo do grau de cristalinidade, do tamanho dos cristais e da posição relativa entre eles (MANRICH, 2005);
- **Desgaste:** as medidas de desgaste indicam a resistência de determinado polímero a riscos, abrasão, perda de material (cisalhamento entre dois componentes) e à capacidade de uma superfície manter a aparência durante uma movimentação (DALFRÉ, 2007);
- **Usinabilidade:** apesar de possuir usinagem similar a de metais, os polímeros devem possuir maiores tolerâncias no processo, devido à expansão térmica e às alterações na forma que o material sofre em consequência da relaxação de tensões internas (DALFRÉ, 2007);
- **Absorção de água:** em geral, os materiais poliméricos são insolúveis em água. No entanto, alguns polímeros podem ter a capacidade de absorção e ter algumas propriedades afetadas, como a resistência elétrica e as propriedades mecânicas (DALFRÉ, 2007);
- **Inflamabilidade:** a inflamabilidade dos polímeros depende do tipo de aplicação, como, por exemplo, é indesejável que os materiais utilizados na construção civil sejam inflamáveis. Portanto, os polímeros utilizados nesse nicho intuitivamente não deverão ter inflamabilidade;

- Intemperismo: assim como todo material, os compostos poliméricos sofrem degradação quando sujeitos à exposição solar, umidade, substâncias tóxicas, dentre outros. No entanto, a principal característica relacionada entre o meio ambiente e os polímeros é sua baixa degradabilidade quando exposto ao tempo.

### 3.1.8 Processamento

O processamento de um polímero consiste na transformação do mesmo em um produto comercial. A escolha do processo e seu tipo variam de acordo com as características da peça (forma e dimensões), do polímero em si e da quantidade de peças a serem produzidas (escala de processamento).

Dentre os diversos tipos de técnicas de processamento, os mais importantes e utilizados atualmente são a extrusão e moldagem (injeção e sopro), conforme pode ser observado na Figura 3-7.

Nos tópicos a seguir serão abordados aspectos gerais de cada um desses processos.

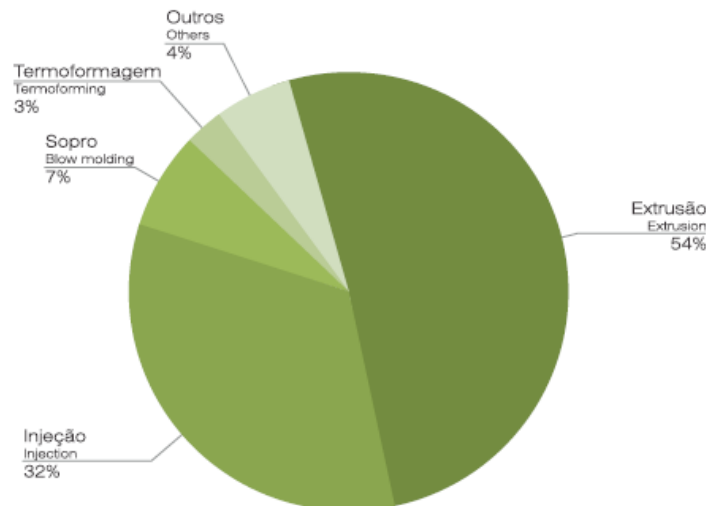


Figura 3-7 – Processos utilizados na produção de transformados plásticos no Brasil em 2010 (ABIPLAST, 2011).

#### 3.1.8.1 Extrusão

Extrusão é um processo de transformação dos termoplásticos em que a extrusora, por meio de seus componentes, é a responsável por fornecer maior parte da energia térmica e mecânica necessária para tal transformação.

Pelo fato dos polímeros possuírem baixa condutividade térmica e alta viscosidade no estado plástico, a extrusão é um processo que facilita o amolecimento ou fusão desses materiais. Portanto, é necessário que a plastificação do polímero esteja associada ao trabalho mecânico (cisalhamento), uma vez que, por meio de apenas calor, seriam necessários tempos muito longos para a realização dessa transformação (MANRICH, 2005).

Conforme pode ser observado na Figura 3-8, a extrusora é composta por diversos componentes sendo que, dentre eles, a rosca, é um dos mais importantes, já que ela é responsável por transportar,

fundir ou amolecer, homogeneizar e plastificar o polímero. É devido ao movimento, e consequente cisalhamento sobre o material, que a rosca gera cerca de 60% da energia térmica e mecânica necessária para transformar o polímero. A outra parte da energia é obtida por meio de aquecedores externos (MANRICH, 2005).

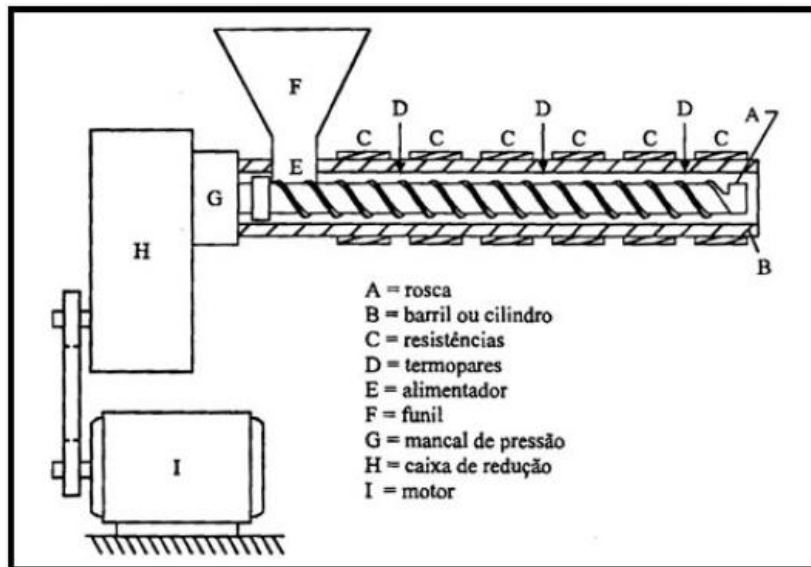


Figura 3-8 – Esquema de uma extrusora básica. Fonte: [www.romanplast.com.br](http://www.romanplast.com.br)

Durante o processo de extrusão, o polímero amolece e elimina o ar que está dentro da cadeia, fazendo com que a densidade aumente. Para compensar esse aumento de densidade e manter os níveis de cisalhamento adequados, é necessário que o material seja comprimido pela rosca, o que gera um gradiente de pressão decrescente ao longo do canal rosca fazendo com que o material escoe (MANRICH, 2005).

Ao longo da rosca é possível identificar três regiões básicas:

- Zona de alimentação;
- Zona de compressão;
- Zona de controle de vazão.

O perfil de pressão e velocidade nessas regiões irá variar de acordo com a matriz e grelha, forma de alimentação, atrito entre a rosca e o material e as paredes do canhão, principalmente na região do funil. A temperatura, e consequente viscosidade, também contribui para a variação da pressão (MANRICH, 2005).

A eficiência da extrusão é função de inúmeras variáveis envolvidas no processamento, sendo essas desde o material propriamente dito até as dimensões da extrusora. A otimização da produção está intimamente ligada aos parâmetros de processamento. Por exemplo, em alguns casos é necessário aumentar a rotação  $N$  da rosca para aumentar a taxa de cisalhamento, que gera maior atrito, maior temperatura, diminuição da viscosidade, que, por sua vez, causa melhor mistura devido ao fluxo de

contrapressão podendo ser o responsável pelo aumento da eficiência de plastificação (EP) (MANRICH, 2005).

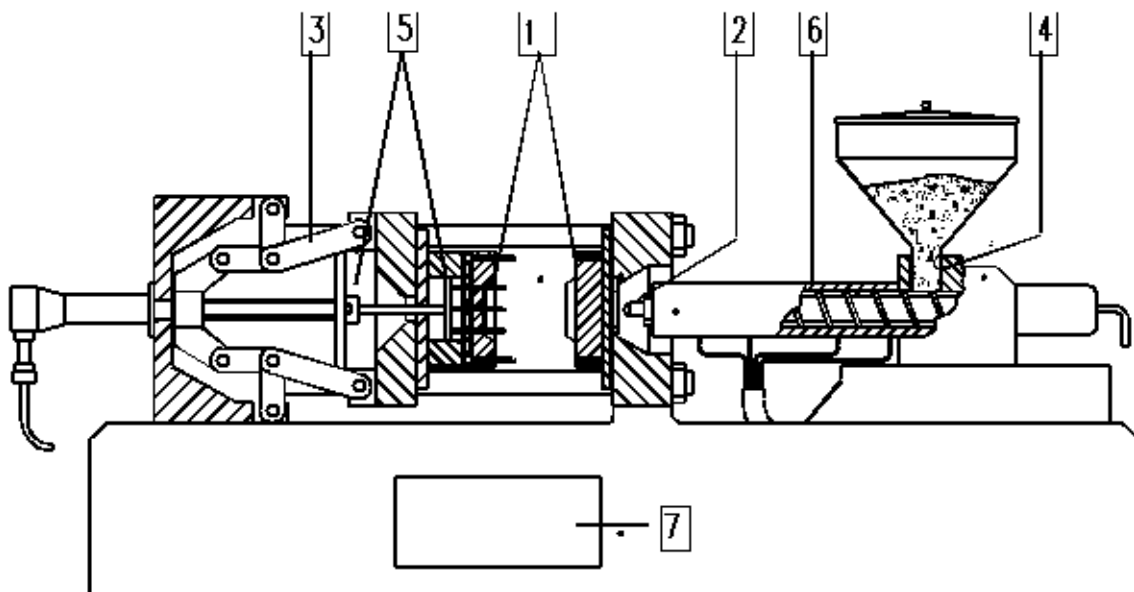
Por meio das teorias de fluxo e transporte desenvolvidas na literatura juntamente com o empirismo associado às mesmas foram desenvolvidas fórmulas para dimensionamento, modelamento e cálculo dos pontos de operação do processo de extrusão. Softwares para simulações também estão disponíveis no mercado, sendo a empresa Polydynamics Inc. a referência nesse mercado.

### 3.1.8.2 Moldagem

Existem diversas formas de moldagem. Todas possuem características semelhantes, diferenciando-se, principalmente, no princípio físico adotado.

#### 3.1.8.2.1 Moldagem por Injeção

A injetora é composta por um sistema capaz de homogeneizar e injetar o polímero fundido, sendo esse formado, basicamente, por uma rosca recíproca, um canhão e mantas elétricas. Além disso, é acoplado um molde que é capaz de dar forma à massa polimérica, sendo essa injetada no molde sob alta pressão e com velocidade controlada. O molde é capaz de gerar o resfriamento do produto de forma adequada por meio de fluidos que circulam em seu interior. Para retirada da peça, o molde conta com um mecanismo capaz de executar a ejeção do produto após a abertura do molde. Na Figura 3-9 pode ser observado um desenho esquemático de uma injetora (MANRICH, 2005).



- 1 - Área do molde
- 2 - Área da unidade de injeção (movimento do bico)
- 3 - Área do mecanismo de fechamento
- 4 - Área da alimentação de material
- 5 - Área dos extratores de machos e peças (se existentes)
- 6 - Área das resistências de aquecimento
- 7 - Área da descarga de peças

Figura 3-9 – Esquema de uma injetora. Fonte: <http://vandersolidworks.blogspot.com/2010/04/maquina-injetora.html>.



Portanto, a moldagem por injeção conta com dois ciclos, sendo eles:

- Ciclo da rosca recíproca: o polímero é alimentado na injetora por meio de um funil, sendo carregado pela rosca ao longo de seu comprimento (como se fosse uma extrusora). No entanto, o polímero fica depositado na parte frontal da rosca ao invés de sair para o molde. Assim que a rosca homogeneiza a quantidade necessária de polímero para preencher o molde, a rosca assume a função de pistão, movimentando-se para frente e injetando a massa polimérica no molde. Devido a essa dupla funcionalidade da rosca, ela é chamada de rosca recíproca. Após injetar todo o material, a rosca continua exercendo pressão sobre o injetado durante certo tempo. Esse tempo é comumente chamado de tempo de empacotamento ou de pressurização e recalque;
- Ciclo do molde: o molde, fechado, recebe a massa polimérica até todo seu preenchimento, sendo resfriado desde o início do processo. Após o tempo de empacotamento, o molde continua fechado por um tempo para que o processo de resfriamento termine. Assim que o tempo de resfriamento é atingido, o molde se abre e a peça é ejetada (MANRICH, 2005).

#### 3.1.8.2.2 Moldagem por sopro

Processo em geral utilizado na obtenção de peças ocas por meio da insuflação de ar no interior do molde, de forma a permitir a expansão da massa plástica até a obtenção da forma desejada. Aplicável geralmente à fabricação de frascos a partir de termoplásticos, conforme exemplo da Figura 3-10.

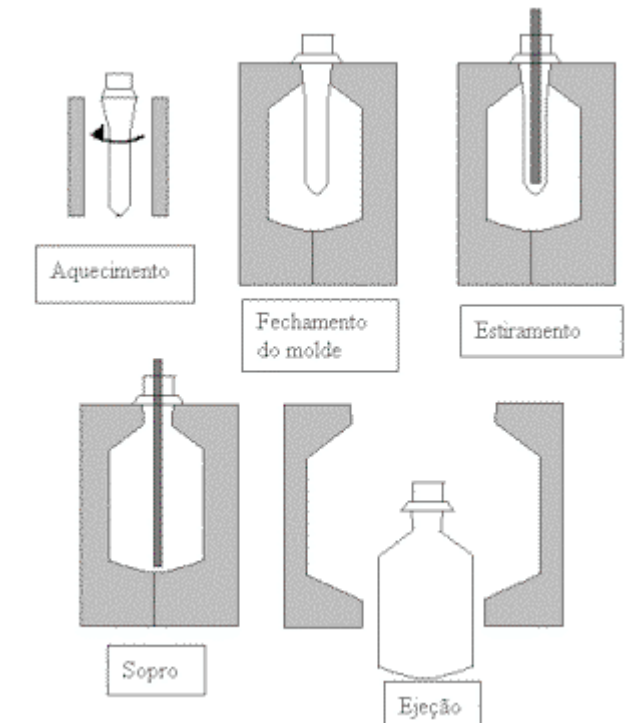


Figura 3-10 – Esquema do processo de moldagem por sopro. Fonte: <http://www.demet.ufmg.br/docentes/rodrigo/processamento.htm>.

#### 3.1.8.2.3 Moldagem por compressão

Moldagem por compressão é a técnica mais antiga de moldagem de polímeros e é usada, principalmente, para termoplásticos. Esse processo é análogo à estampagem de chapas metálicas. A Figura 3-11 ilustra o seu funcionamento (VLACHOPOULOS, 2003).

A injeção de polímeros substituiu a moldagem por compressão, devido às vantagens de manuseio de materiais e automação. No entanto, a moldagem por compressão tem uma vantagem na transformação de polímeros reforçados (VLACHOPOULOS, 2003). Devido aos níveis modestos de deformação e estresse envolvido na moldagem por compressão, as fibras de reforço não são danificadas. Fibras de alta densidade e fibras mais longas podem ser incluídas na moldagem por compressão para a obtenção de produtos (VLACHOPOULOS, 2003).

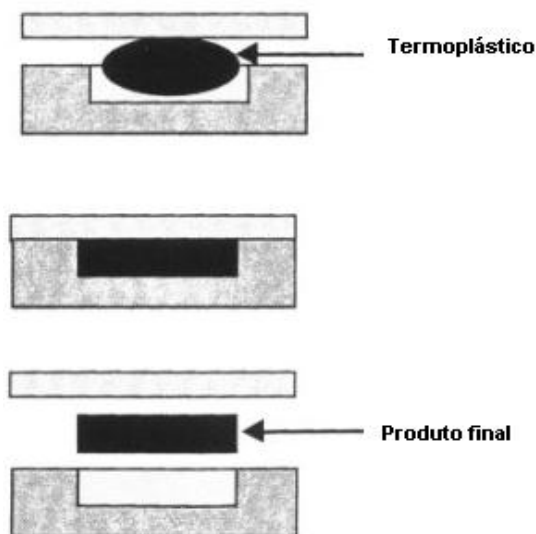


Figura 3-11 – Esquema do processo de moldagem por compressão. Fonte: <http://www.parafusoautovedante.com.br/CapasDeSilicone/MoldagemDeCompressao.asp>

#### 3.1.8.2.4 Termoformagem

Termoformagem é uma técnica que utiliza placas plásticas aquecidas e moldadas por meio da aplicação de vácuo ou pressão. Conforme pode ser observado na Figura 3-12, o processo consiste em colocar o material termoplástico aquecido entre dois moldes. Ao entrar em contato com os mesmos, o calor é perdido e o material recupera rigidez enquanto esfria. Geometrias de produtos termoformados são geralmente simples (caixas, bandejas de comida, diversos recipientes, os forros de geladeira, caixas do computador, dentre outros) (VLACHOPOULOS, 2003).

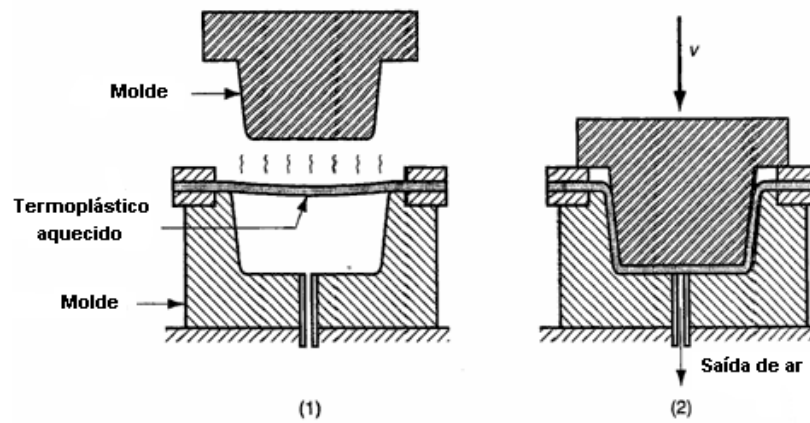


Figura 3-12 – Esquema do processo de termoformagem. Fonte: <http://www.sinotech.com/products/archived/thermoforming.html>

Termoformagem compete com moldagem por sopro e moldagem por injeção. As principais vantagens desse processo são o custo relativamente baixo de máquinas e o custo baixo para os moldes, além da facilidade de formação de grandes peças com área de seção finas. As desvantagens estão na limitação das formas do produto, dificuldades em obter a espessura necessária, controlar a orientação molecular e as limitações em relação à temperatura. (VLACHOPOULOS, 2003).

## 3.2 PLÁSTICOS

Desde o início da produção de plásticos até os dias de hoje, pode ser observado um crescimento vigoroso no ramo industrial de produção de plásticos. Conforme ilustrado na Figura 3-13, a produção de plásticos no mundo passou de 1,5 milhões de toneladas em 1950 para 265 milhões de toneladas em 2011. Ou seja, um aumento em torno de 17.000% em 60 anos.

Tomando como base a última década, a produção de transformados plásticos no Brasil segue a tendência mundial e, no geral, apresenta um crescimento crescente a cada ano que passa. Assim como a produção, o consumo de plástico *per capita* no Brasil também aumentou com o passar do tempo. Maiores informações podem ser observadas na Figura 3-14.

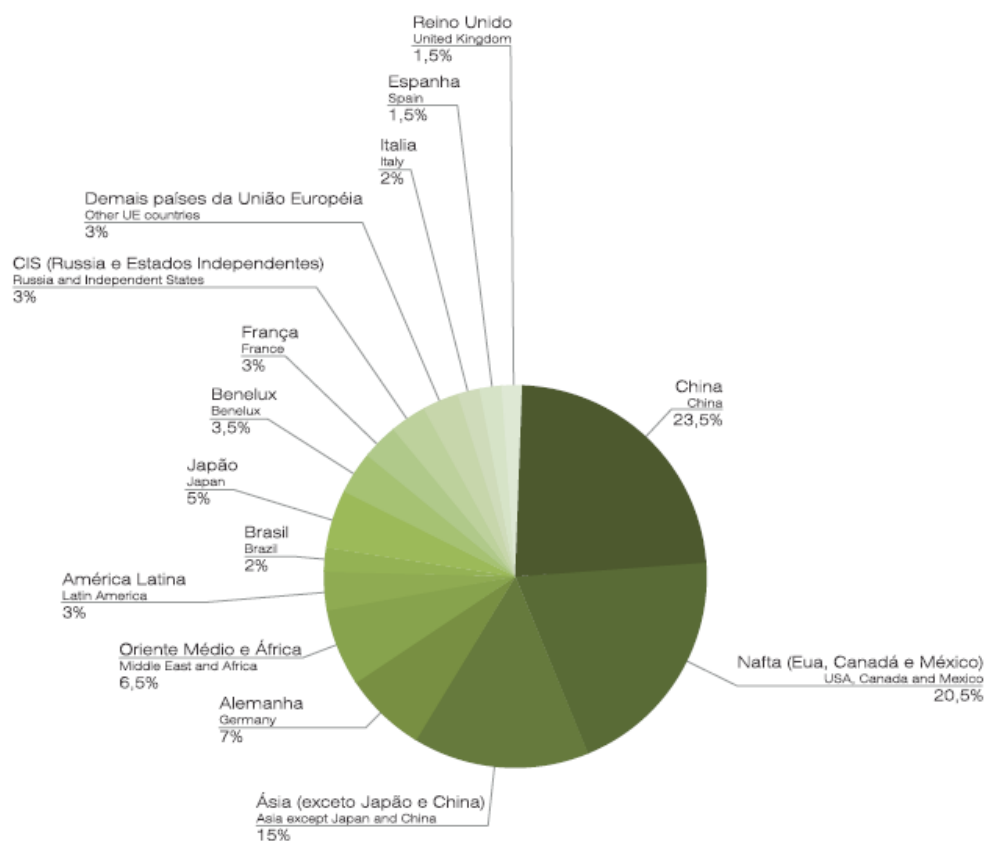


Figura 3-13 – Produção mundial de plástico (ABIPLAST, 2011).

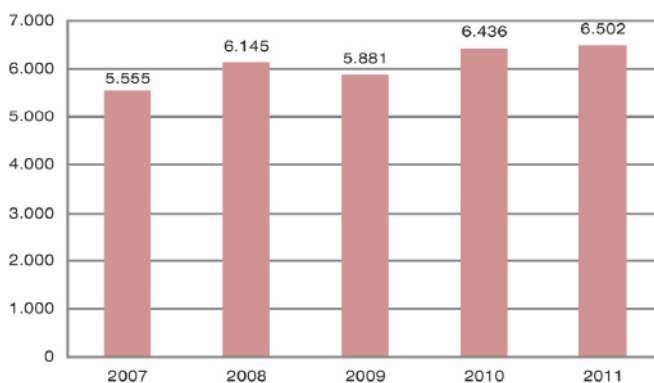


Figura 3-14 – Produção de transformados plásticos no Brasil (em mil de toneladas) (ABIPLAST, 2011).

A indústria brasileira de transformados plásticos caracteriza-se por uma estrutura pulverizada e bastante heterogênea, o que lhe impõe uma série de desafios competitivos, pautados por sua relação com os demais elos da cadeia produtiva. Tais desafios englobam tanto fornecedores, basicamente os dois primeiros elos da cadeia petroquímica, compostos por grandes empresas integradas verticalmente, quanto clientes, como, por exemplo, os setores automotivos e de construção civil, também relativamente mais concentrado (ABDI, 2009).

Tais desafios estão relacionados principalmente a:

- Capacidade de inovação e diferenciação de produtos;
- Capacidade na gestão de processos;

- Acesso a financiamentos, capacidade de realização de investimentos e atualização tecnológica;
- Articulação com os demais níveis da cadeia produtiva;
- Oferta e qualificação de mão de obra;
- Desenvolvimento da logística e da distribuição.

Os plásticos são utilizados em quase todos os setores da economia, tais como: construção civil, agrícola, de calçados, móveis, alimentos, têxtil, lazer, telecomunicações, eletroeletrônicos, automobilísticos, médico-hospitalares e distribuição de energia.

O setor de embalagens para alimentos e bebidas vem se destacando pela utilização crescente de tais materiais, em função de suas excelentes características, entre elas: transparência, resistência, leveza e atoxicidade. A segmentação do mercado de acordo com a aplicação pode ser observada na Figura 3-15.

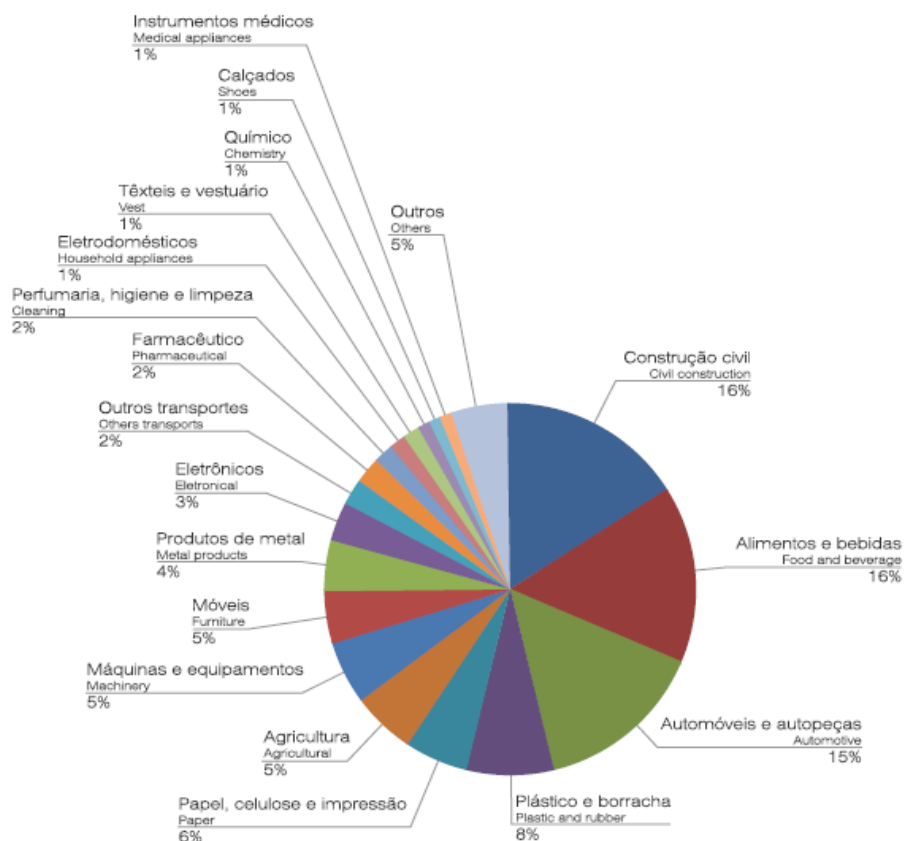


Figura 3-15 – Segmentação do Mercado de Transformados Plásticos por Aplicação (ABIPLAST, 2011).

### 3.2.1 Classificação

Os plásticos são divididos em duas grandes categorias: termoplásticos e termofixos. Os termoplásticos são aqueles que podem ser aquecidos, conformados e resfriados várias vezes sem perda das propriedades físicas. Já os termofixos não possuem tal propriedade (PIVA, 2004).

Os plásticos são reunidos em sete grupos ou subcategorias: 1. Poli(tereftalato de etileno) - PET, 2. Polietileno de alta densidade - PEAD 3. Policloreto de vinila - PVC 4. Polietileno de baixa densidade – PEBD, 5. Polipropileno - PP, 6. Poliestireno - PS e 7. Outros.

### 3.2.2 Identificação

O polímero pode ser facilmente identificado pelo código adotado mundialmente, conforme pode ser visto na Figura 3-16. Conforme pode ser observado, tal código consiste na relação entre um número e o polímero reciclável e/ou o nome do polímero utilizado (PIVA, 2004).



Figura 3-16 – Códigos de identificação dos plásticos. Fonte: <http://www.qca.ibilce.unesp.br/prevencao/codigos-plasticos.gif>.

Uma alternativa para a identificação do polímero constituinte de certo material é por meio da separação por densidade. Para tal, é necessária a preparação de soluções de densidade abaixo e acima de  $1,0 \text{ g/cm}^3$  por meio de adição de álcool ou sais respectivamente. Ao colocar a mistura polimérica em tais soluções alguns polímeros vão afundar enquanto outros iram flutuar (PIVA, 2004).

Outro teste comum para a identificação de um polímero é o teste de chama, que consiste na queima de uma amostra e a observação do seu comportamento, isto é, a cor da chama, o odor exalado, a cor dos fumos, dentre outras características. Além disso, pode ser utilizado o teste de solubilidade para reforçar as conclusões sobre o tipo de resina que está sendo analisada.

Várias técnicas instrumentais mais específicas podem ser realizadas, dentro das quais podem-se citar:

- Espectroscopia na região do infravermelho;
- Análise térmica;
- Análise por ultravioleta de transmissão ou fluorescência;
- Análise por raio X ou raios gama.

No entanto, tais técnicas demandam aparelhagem mais cara e complexa, o que torna o custo de identificação mais elevado.

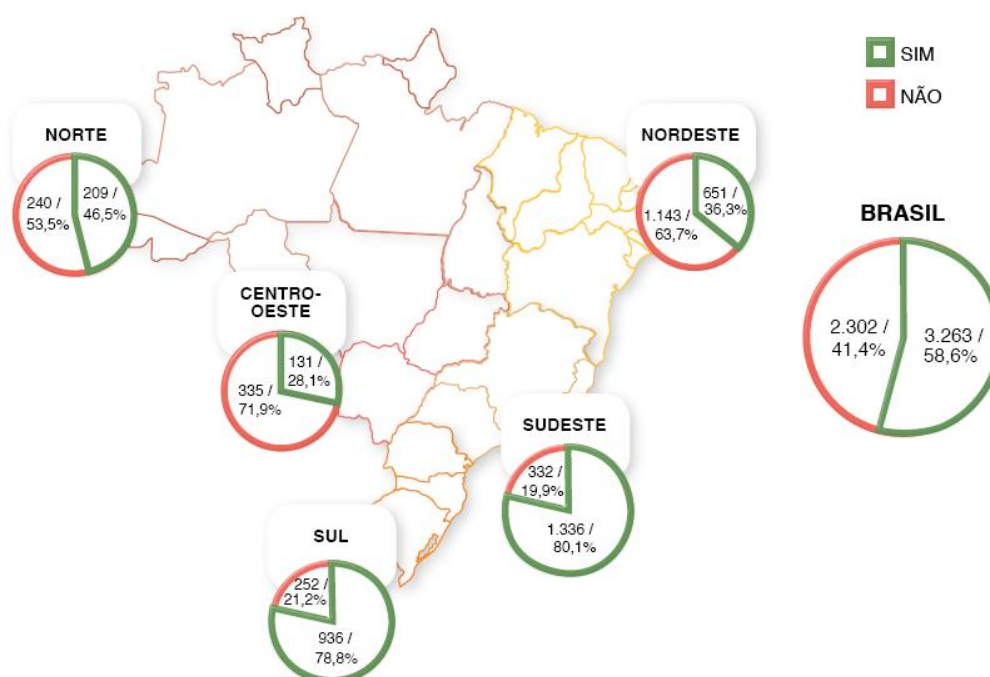
### 3.3 RECICLAGEM

Pode ser definido como “o processo pelo qual passa um material já utilizado para fazer o mesmo produto ou um produto equivalente”. A ideia de se aproveitar resíduos, apesar de não ser nova, tem ganhado espaço, não só por razões econômicas, mas, também, como forma de um desenvolvimento sustentável (PIVA, 2004).

Os fatores motivadores para a reciclagem incluem desde a otimização dos processos, visando poupar e preservar os recursos, até a necessidade de minimização de resíduos. Reciclando, são reduzidos os problemas ambientais e de saúde pública. Do custo de gerenciamento dos resíduos, pode ser observado um aumento de produtividade e competitividade além da possibilidade de inclusão social, por meio da criação de empregos e da consciência ambiental (PIVA, 2004).

Dos 5.565 municípios existentes no Brasil, aproximadamente 58% indicaram a existência de iniciativas de coleta seletiva. Porém, muitas vezes as iniciativas disponibilizadas pelos municípios resumem-se na implementação de pontos de entrega voluntária à população ou na simples formalização de convênios com cooperativas de catadores para a execução dos serviços (ABRELPE, 2011).

Na Figura 3-17, pode ser observada a quantidade de municípios que possuem iniciativas de coleta seletiva de acordo com a região.



Fonte: Pesquisa ABRELPE 2011

Figura 3-17 - Quantidades de Municípios por Macrorregião e Brasil em que existem Iniciativas de Coleta Seletiva.

Na Figura 3-18 é mostrado o destino final dado pelo conjunto dos municípios brasileiros para as 177 mil toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU), coletados diariamente. Se mais da metade dos RSU coletados em 2011 (aprox.58%) receberam destinação adequada (aterros sanitários), fato

registrado pela primeira vez no Brasil, o restante (aprox.42%), mais de 74 mil toneladas diárias de RSU, tiveram destinação inadequada (aterro controlado e/ou lixão) (ABRELPE, 2011).

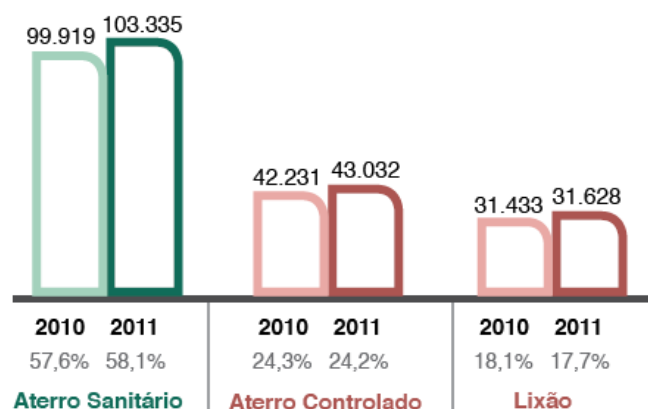


Figura 3-18 - Destinação Final dos RSU Coletados no Brasil em 2011.

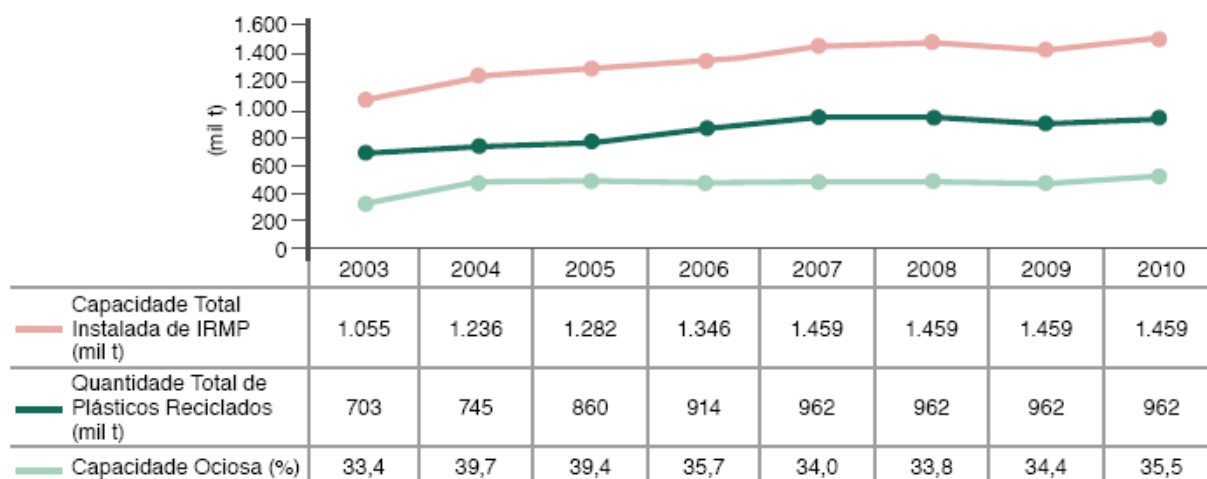
Além dos (RSU), outros tipos de resíduos são observados, entre eles, os resíduos sólidos de saúde (RSS), resíduos sólidos industriais, resíduos de construção e demolição, que, para cada caso, possuem uma legislação específica para o gerenciamento de tais resíduos, de acordo com a sub-classificação dos mesmos.

Atualmente, o plástico passou a ser um resíduo de grande aceitação para o processo de reciclagem, já que, no Brasil, encontram-se disponíveis e acessíveis tecnologias para tal. As etapas desse processo incluem, basicamente, a separação por tipo de plástico e o reprocessamento (PIVA, 2004).

Os dados disponíveis sobre a reciclagem de plásticos no Brasil retratam o universo da indústria de reciclagem mecânica dos mesmos, a qual converte os descartes pós-consumo em grânulos passíveis de serem utilizados na produção de novos artefatos plásticos

A reciclagem mecânica de plásticos atingiu em 2010 o total de 962 mil toneladas. Na Figura 3-19 é apresentada a evolução ocorrida no período de 2003 a 2010, tanto da quantidade total de plásticos reciclados, como da capacidade total instalada de reciclagem do segmento e, por consequência, da capacidade ociosa existente, o que revela um significativo potencial de crescimento. Já na Tabela 3-10, são apresentados alguns indicadores da indústria de reciclagem de transformados de plástico no Brasil.





Fonte: Plastivida – Instituto Sócio Ambiental dos Plásticos

**Figura 3-19 - Evolução da Reciclagem Mecânica de Plásticos (IRMP) no Brasil de 2003 a 2010: Quantidade Total Reciclada x Capacidade Total Instalada.**

**Tabela 3-10 - Características da indústria brasileira de reciclagem de plásticos pós-consumo (ABIPLAST, 2011).**

	Sudeste	Sul	Centro-Oeste	Nordeste	Norte
Número de empresas Number of companies	427	275	27	67	5
Faturamento Bruto (R\$ milhões) Gross Revenue (R\$ milion)	1249	709	59	140	45
Empregados (Diretamente na reciclagem) Employees	9.546	8.070	767	2.530	353
Capacidade Instalada (Pós consumo doméstico e não doméstico) (Em toneladas de material plástico reciclado) Installed capacity	666.689	330.062	50.240	131.767	20.950
Nível Operacional (Pós consumo doméstico e não doméstico) (Produção de Material Reciclado / Capacidade Instalada) Operational level	68%	65%	89%	66%	27%
Consumo de Resíduo Plástico (Volume de material pós-consumo em toneladas) Consumption of plastic waste	452.569	214.294	44.875	87.305	5.719
Perdas no Processo de Reciclagem Loss in the process of recyclin	8%	12%	23%	8%	4%
Produção de Material Reciclado (Volume de material pós-consumo em toneladas) Production of recycled material	414.567	189.509	34.583	80.127	5.518

Na indústria da madeira, uma grande quantidade de resíduos de madeira é gerada em diferentes fases de processamento. É estimado que em todo processo de transformação, o aproveitamento da tora está entre 40 a 60% do seu volume total. Esses resíduos, apesar de considerados não poluidores, apresentam problemas na sua estocagem e sua queima a céu aberto ou em queimadores sem fim energético, liberam gases para o meio ambiente (SANTOS, 2008).

Apesar da maioria das empresas madeireiras terem a serragem como resíduo, em algumas empresas, a mesma é comercializada, sendo então o produto final. A garantia da qualidade é que faz a diferença entre o resíduo de serragem e o produto serragem, uma vez que esse atende a

especificações técnicas de granulometria, teor de umidade, espécie de madeira, cor, além da garantia de fornecimento contínuo (SANTOS, 2008).

A reciclagem dos resíduos de madeira tem sido favorecida pelo aumento das obrigações quanto ao manejo dos resíduos que permitiram o desenvolvimento de novos produtos reciclados. Entretanto, sabe-se que o processo da reciclagem não é tão simples. Apesar da viabilidade da reciclagem desses resíduos, existem alguns obstáculos técnicos e econômicos, tais como o custo do transporte dos resíduos, teor de umidade dos resíduos, mistura de espécies, a contaminação do material por agentes químicos, entre outros (SANTOS, 2008).

Durante muitas décadas, a utilização mais comum desses resíduos da madeira tem sido como combustível para caldeiras, porém, muitas vezes, os resíduos são simplesmente queimados a céu aberto. Uma aplicação mais recente dos resíduos de madeira está na produção de aglomerados e “Medium Density Fiberboard” (MDF). A madeira aglomerada possui múltiplas aplicações, entre as quais se destaca a fabricação de móveis, tampos de mesas, laterais de portas e armários, divisórias, laterais de estantes e, de forma secundária, produtos para a indústria de construção civil. Outra utilização dos resíduos de madeira é como polpa para produção de papel (SANTOS, 2008).

Uma forma alternativa para aplicação dos resíduos de madeira é sob a forma de carga em compostos poliméricos. O uso dos resíduos de madeira como aditivo de polímeros termoplásticos é bastante viável e possui diversas aplicações. Dentre esses produtos, os compósitos plástico-madeira estão se tornando o material mais importante dentro da reciclagem de resíduos da indústria madeireira (SANTOS, 2008).

### **3.3.1 Reciclagem Química**

A reciclagem química reprocessa plásticos, transformando-os, quando possível, em petroquímicos básicos que servem como matéria-prima em refinarias ou centrais petroquímicas. Seu objetivo é a recuperação dos componentes químicos individuais para reutilizá-los como produtos químicos ou para a produção de plásticos.

Os novos processos desenvolvidos de reciclagem química permitem a reciclagem de misturas de plásticos diferentes, com aceitação de determinado grau de contaminantes como, por exemplo, tintas, papéis e outros materiais.

Entre os processos de reciclagem química existentes, destacam-se (PIVA, 2005):

- Hidrogenação: as cadeias são quebradas mediante o tratamento com hidrogênio e calor, gerando produtos capazes de serem processados em refinarias;
- Gaseificação: os plásticos são aquecidos com ar ou oxigênio, gerando-se gás de síntese, contendo monóxido de carbono e hidrogênio;
- Quimólise: consiste na quebra parcial ou total dos plásticos em monômeros, na presença de Glicol/Metanol e água;
- Pirólise: é a quebra das moléculas pela ação do calor na ausência de oxigênio. Esse processo gera frações de hidrocarbonetos capazes de serem processados em refinaria.

### 3.3.2 Reciclagem Energética

É a recuperação da energia contida nos plásticos por meio de processos térmicos. Distingue-se da incineração por utilizar os resíduos plásticos como combustíveis na geração de energia elétrica (a energia contida em 1 kg de plástico é equivalente à contida em 1 kg de óleo combustível). A simples incineração não reaproveita a energia dos materiais. Além da economia e da recuperação de energia, com a reciclagem ocorre ainda uma redução de 70 a 90% da massa do material, restando, apenas, um resíduo inerte esterilizado. Outras características e benefícios podem ser apontados, dentre eles (PIVA, 2005):

- A presença dos plásticos é de vital importância, pois aumenta o rendimento da incineração de resíduos municipais;
- O calor pode ser recuperado em caldeira, utilizando o vapor para geração de energia elétrica e/ou aquecimento;
- Testes em escala real na Europa comprovaram os bons resultados da co-combustão dos resíduos de plásticos com carvão, turfa e madeira, tanto técnica, econômica, como ambientalmente;
- A queima de plásticos em processos de reciclagem energética reduz o uso de combustíveis (economia de recursos naturais);
- A reciclagem energética é realizada em diversos países da Europa, EUA e Japão e utiliza equipamentos da mais alta tecnologia, cujos controles de emissão são rigidamente seguros, anulando riscos à saúde ou ao meio ambiente.

### 3.3.3 Reciclagem Mecânica

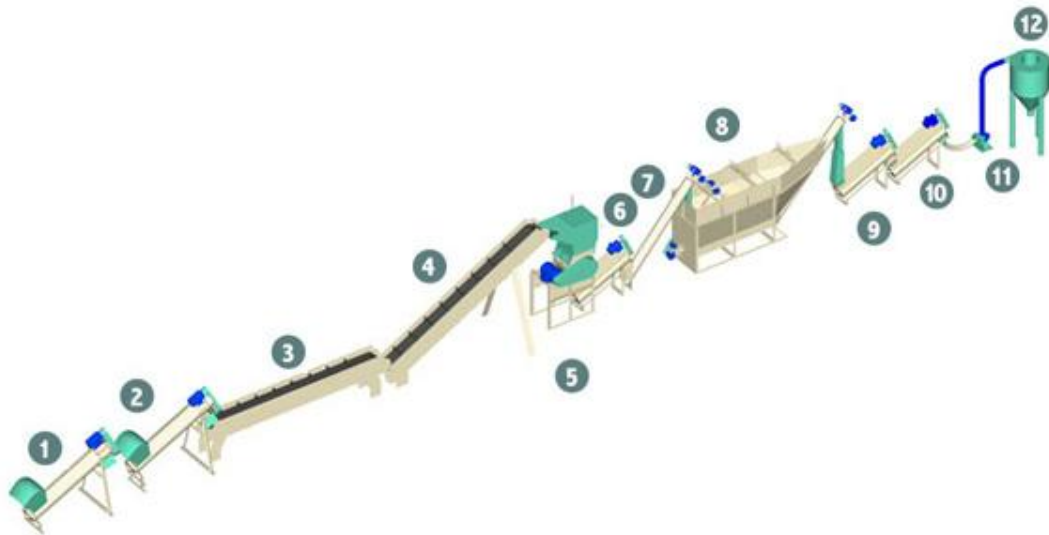
A reciclagem mecânica consiste na conversão dos descartes plásticos pós-industriais ou pós-consumo em grânulos que podem ser reutilizados na produção de outros produtos, como sacos de lixo, solados, pisos, condutores, mangueiras, componentes de automóveis, fibras, embalagens não alimentícias e outros.

Esse tipo de processo passa pelas seguintes etapas:

- Separação: em uma esteira, diferentes tipos de plásticos são separados, de acordo com a identificação ou com o aspecto visual. Nessa etapa, são separados também rótulos de diferentes materiais, tampas de garrafas e produtos compostos por mais de um tipo de plástico, embalagens metalizadas, grampos, etc.
- Moagem: depois de separados os diferentes tipos de plásticos, esses são moídos e fragmentados em pequenas partes.
- Lavagem: depois de triturado, o plástico passa por uma etapa de lavagem com água para a retirada dos contaminantes. É necessário que a água de lavagem receba um tratamento para a sua reutilização ou emissão como efluente.

- Aglutinação: além de completar a secagem, o material é compactado, reduzindo-se, assim, o volume que será enviado à extrusora. O atrito dos fragmentos contra a parede do equipamento rotativo provoca elevação da temperatura, levando à formação de uma massa plástica. O aglutinador também é utilizado para incorporação de aditivos, como cargas, pigmentos e lubrificantes.
- Extrusão: a extrusora funde e torna a massa plástica homogênea. Na saída da extrusora, encontra-se o cabeçote, do qual sai um "espaguete" contínuo, que é resfriado com água. Em seguida, o "espaguete" é picotado em um granulador e transformando em *pellets* (grãos plásticos).

Na Figura 3-20 pode ser observado um exemplo de uma linha de reciclagem mecânica de plásticos sem reprocessamento.



• 1. Pré-Lavadora • 2. Esteira de Separação • 3. Esteira de Alimentação • 4. Moinho • 5. Lavadora • 6. Rosca Transportadora • 7. Tanque de Separação • 8. Secadora 1 • 9. Secadora 2 • 10. Ventoinha • 11. Silo.

Figura 3-20 – Exemplo de uma linha de reciclagem mecânica de plásticos. Fonte: [www.kie.com.br](http://www.kie.com.br)

## 3.4 TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

Para a avaliação das propriedades da madeira plástica, alguns testes mecânicos e analíticos são comumente utilizados. Nos itens a seguir, será abordado o princípio de atuação de alguns métodos.

### 3.4.1.1 Testes mecânicos

Os principais testes mecânicos realizados são os ensaios de tensão e de resistência ao impacto.

#### 3.4.1.1.1 Teste de tensão

O método consiste em submeter o corpo de prova a um esforço longitudinal até sua ruptura. Uma das extremidades é presa em uma garra fixa do equipamento e a outra extremidade é presa em uma

garra móvel. A garra móvel inicia seu movimento ao comando do operador e se desloca com velocidade constante, causando um alongamento do corpo de prova. Um gráfico de tensão em função da deformação específica é traçado até que o ensaio é interrompido pela ruptura do corpo de prova.

#### 3.4.1.1.2 Teste de resistência a impacto - Izod

Um pêndulo de massa conhecida percorre uma trajetória de 150°C e impacta contra o corpo de prova em seu entalhe, causando sua ruptura total ou parcial. Para cada composição, corpos de prova são testados e até três resultados podem ser descartados. É medida a espessura e a largura de cada corpo de prova e os valores fornecidos pelo equipamento são: energia absorvida (J), porcentagem da energia absorvida (%), energia por distância (J/m), energia por área (J/m<sup>2</sup>), velocidade de impacto e ângulo alcançado.

#### 3.4.1.2 Testes analíticos

Os testes analíticos utilizados nesse trabalho foram a análise por espectroscopia na região do infravermelho, análise termogravimétrica e a calorimetria exploratória diferencial.

##### 3.4.1.2.1 Análise por espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia no infravermelho fornece evidências da presença de vários grupos funcionais na estrutura orgânica devido à interação das moléculas ou átomos com a radiação eletromagnética, em um processo de vibração molecular.

A radiação no infravermelho atravessa a amostra a ser analisada, a radiação transmitida é comparada com aquela transmitida na ausência de amostra. O espectrofotômetro registra o resultado na forma de uma banda de absorção.

Um espectrofotômetro de grande sensibilidade é o espectrofotômetro com transformada de Fourier (FTIR), que emprega um interferômetro de Michelson, que tem a finalidade de dividir o feixe da radiação da fonte de infravermelho de tal forma que ele reflita simultaneamente a partir de um espelho em movimento e de um espelho fixo. Os feixes refletidos voltam a se combinar, passam através da amostra para o detector e são reproduzidos na forma de um gráfico de tempo em função da intensidade do sinal, denominado de interferograma.

##### 3.4.1.2.2 Análise termogravimétrica (TG)

A análise termogravimétrica é fundamentada na medição da massa de uma substância em função de alterações feitas na temperatura com o decorrer do tempo. O resultado obtido é um gráfico de massa ou porcentagem de massa em função do tempo. Com o intuito de que a curva termogravimétrica possa ser interpretada de forma mais eficaz, é comum fazer a derivada da TG em função do tempo, evidenciando melhor as perdas de massa.

##### 3.4.1.2.3 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A técnica de DSC é usada para investigar as propriedades térmicas de materiais, fornecendo informações quantitativas sobre estas mudanças térmicas, incluindo a taxa de transferência de calor. Na DSC, mede-se a quantidade de calor envolvido na transformação. Quando uma transição térmica ocorre na amostra, energia térmica é transferida tanto para a amostra quanto para a referência, com o objetivo de mantê-las à mesma temperatura. Como esta energia transferida é exatamente equivalente a quantidade de energia absorvida ou liberada na transição, o balanceamento fornece uma medida direta desta energia envolvida no processo, à temperatura na qual ocorreu a transição (ERBETTA, 2010).

### **3.5 MADEIRA**

A madeira é um material resistente e relativamente leve, frequentemente utilizado para fins estruturais e de sustentação de construções. É um material orgânico, sólido, de composição complexa, onde predominam as fibras de celulose e hemicelulose. As plantas que produzem madeira (árvores) são perenes e lenhosas, caracterizadas pela presença de caules de grandes dimensões, em geral denominados troncos, que crescem em diâmetro ano após ano. Pela sua disponibilidade e características, a madeira foi um dos primeiros materiais a ser utilizado pela humanidade, mantendo, apesar do aparecimento dos materiais sintéticos, uma imensidade de usos diretos e servindo de matéria-prima para múltiplos outros produtos. É também uma importante fonte de energia, sendo utilizada como lenha para cozinhar e outros usos domésticos.

A sua utilização para a produção de polpa está na origem da indústria papeleira e de algumas indústrias químicas, nas quais, é utilizada como fonte de diversos compostos orgânicos. A sua utilização na indústria de marcenaria para fabricação de móveis é uma das mais expandidas, o mesmo acontecendo na sua utilização em carpintaria, para construção de diversas estruturas, incluindo navios. A madeira é um dos materiais mais utilizados em arquitetura e engenharia civil.

A madeira é usualmente classificada como madeira dura ou madeira macia. A madeira de coníferas (por exemplo: pinho) é chamada madeira macia e a madeira de árvores latifoliadas (por exemplo: carvalho) é chamada madeira dura. Essa classificação é, às vezes, muito desvantajosa, uma vez que, algumas madeiras duras, como a balsa, são mais moles ou macias do que a maior parte das madeiras macias, e inversamente, também algumas madeiras macias (por exemplo: teixo) são muito mais duras do que a maioria das madeiras duras.

Além disso, madeiras de diferentes tipos de árvores têm diferentes cores e graus de densidade. Isso, aliado ao fato de algumas madeiras terem um crescimento mais longo do que outras faz com que madeiras de diferentes espécies tenham qualidade e valor comercial diferenciado. Por exemplo, enquanto o mogno, de madeira dura e escura, é excelente para a produção artesanal de móveis finos, a balsa, clara e pouco densa, é muito usada para fabricação de cofragens e de moldes construtivos de vários tipos.

A madeira de maçaranduba, pertencente ao grupo de espécies do gênero *Manilkara*, produzem madeiras pesadas, duras, de coloração castanho-avermelhada. Algumas de suas propriedades podem ser observadas na Tabela 3-11 (obtidas para a espécie *Manilkara longifolia*).

**Tabela 3-11 – Propriedades da Madeira.**

Propriedade	Valor
Densidade de massa aparente a 15% de umidade	1000 kg/m <sup>3</sup>
Densidade de massa básica	833 kg/m <sup>3</sup>
Contração radial/tangencial/volumétrica	6,8%/11,0%/19,0%
Resistência a flexão: madeira verde/madeira a 15% de umidade	117,0 MPA/162,0 MPA
Módulo de elasticidade - Madeira verde	14769 MPa
Resistência a compressão paralela: madeira verde/madeira a 15% de umidade	59,8 Mpa/73,9 MPa
Coefficiente de influência de umidade	4,1 %
Resistência ao impacto na flexão - Madeira a 15% (choque)	33,0 Mpa
Cisalhamento - Madeira verde	13,2 MPa
Dureza janka paralela - Madeira verde	9611 N
Tração normal às fibras - Madeira verde	8,2 MPa

Os produtos de madeira podem ser classificados de acordo com a Tabela 3-12. Vale ressaltar que, para cada aplicação, existe uma característica específica a ser atendida pelo produto, ou seja, para uma madeira ser aplicada como um painel MDF ela terá que possuir densidade entre 500 a 800 kg/cm<sup>3</sup> sendo produzida com fibras de madeira aglutinadas com resina sintética termofixa.

**Tabela 3-12 – Produtos de madeira e suas principais características.**

Tipo	Formas de obtenção	Aplicações
Madeira Roliço	Produto com menor grau de processamento da madeira. Consiste de um segmento do fuste da árvore, obtido por cortes transversais (traçamento) ou mesmo sem esses cortes (varas: peças longas de pequeno diâmetro). Na maior parte dos casos, sequer a casca é retirada.	São empregados, de forma temporária, em escoramentos de lajes (pontaletes) e construção de andaimes. Em construções rurais, é frequente o seu uso em estruturas de telhado. Postes de energia elétrica também utilizam esse tipo de produto.
Madeira Serrada	Produzida em unidades industriais - serrarias - onde as toras são processadas mecanicamente, transformando a peça originalmente cilíndrica em peças quadrangulares ou retangulares, de menor dimensão.	Pranchão, prancha, viga, vigota, taibro, tábuas, sarrafo, ripa, dormente, pontaletes e bloco.
Madeira Beneficiada	A madeira beneficiada é obtida pela usinagem das peças serradas, agregando valor às mesmas.	Assoalho, forro, batente, rodapé e taco.
Madeira em Lâminas	As lâminas de madeira são obtidas por um processo de fabricação que se inicia com o cozimento das toras de madeira e seu posterior corte em lâminas. Existem dois métodos para a produção de lâminas: o torneamento e o faqueamento.	Revestimento de divisórias, com fins decorativos.
Painéis	Os painéis de madeira surgiram da necessidade de amenizar as variações dimensionais da madeira maciça, diminuir seu peso e custo e manter as propriedades isolantes, térmicas e acústicas. Adicionalmente, suprem uma necessidade reconhecida no uso da madeira serrada e ampliam a sua superfície útil, por meio da expansão de uma de suas dimensões - a largura - para, assim, otimizar a sua aplicação.	Compensado, chapa dura, MDF (medium density fiberboard), HDF (high density fiberboards), chapas de partículas - aglomerado, MDP (chapa de partículas de média densidade), OSB (painéis de partículas orientadas)

### 3.6 MADEIRA PLÁSTICA

Segundo a “American Society for Testing and Materials” (ASTM), a definição de madeira plástica (plastic lumber) é aplicada em produtos manufaturados, com conteúdo de plástico superior a 50% em peso. Geralmente é composta de poli(olefinas) recicladas, em particular PEAD. Os produtos possuem normalmente seção transversal regular, apresentando dimensões típicas dos produtos de madeira industrializada. Os reforços acrescentados podem ser fibras naturais, como a serragem de madeira,



cargas minerais ou fibra de vidro. A madeira plástica formada por plástico e pó de madeira é chamada de “Wood Plastic Composite” (WPC) (ARRUDA, 2007).

O uso de pó de madeira misturado com plásticos iniciou-se em 1916, quando a Rolls-Royce utilizou plástico com pó de madeira nas “manoplas” de mudança de marcha dos seus carros. O WPC renasceu na Itália nos anos 70 e se popularizou nos Estados Unidos da América (EUA) no início dos anos 90. A aplicação de WPC na substituição de madeira depende da composição e propriedades exigidas para cada utilidade (ARRUDA, 2007).

A madeira plástica apresenta várias vantagens em relação à madeira natural em diversas aplicações e pode ser feita de material plástico pós-consumo como frascos, garrafas, copos, embalagens e outros produtos de pequeno tempo de vida útil no mercado. Isso ajuda a resolver o problema do grande volume de resíduos plásticos destinados aos aterros sanitários. Outro grande benefício observado é que sua utilização evita o consumo de madeira natural, reduzindo os números de árvores derrubadas. As vantagens em relação à madeira natural são mostradas a seguir (ARRUDA, 2007):

- Não é atacada por cupins ou fungos;
- Não absorve umidade;
- Resistente a agentes químicos em geral e a raios UV;
- Baixo consumo energético em sua produção;
- Resistente à água salgada e à deterioração ambiental;
- Não requer elementos de proteção como seladoras e vernizes;
- Fácil instalação e permite uso de pregos e parafusos;
- Não apresenta nós nem farpas;
- Aceita o uso de ferramentas de corte manual;
- Pode apresentar perfis com formatos diversificados;
- É reciclável;
- Possui menor custo de manutenção de rotina, entre outros.

Apesar de todos os benefícios mencionados acima, a madeira plástica apresenta algumas deficiências, como, por exemplo, seu custo inicial em relação à madeira natural, a facilidade de manuseio da madeira natural para pequenos cortes, dentre outras.

Hoje, mais de 1,5 milhões de toneladas de WPC são produzidos em todo o mundo, especialmente nos EUA (cerca de 1 milhão de toneladas), China (200.000 toneladas) e Japão (100.000 toneladas). A Alemanha é o líder europeu, com mais de 70.000 toneladas e líder na fabricação de máquinas. No país germânico, a principal área para a aplicação do WPC está na indústria automotiva, para o interior de veículos. Já WPC na China é mais extensa. A produção chinesa inclui produtos, tais como janelas, portas, sistemas termo isolantes, bancos de jardim, abrigos de jardim e protetores solares para edifícios, todos feitos de WPC. É um mercado em plena expansão e, nos EUA acredita-se que esse

setor deverá continuar crescendo acima dos 9% nos próximos dois anos. Logo, a grande quantidade de madeira plástica já comercializada no EUA, Europa e Ásia podem representar uma tendência para os demais países em desenvolvimento do mundo, como uma possível alternativa ambiental para diminuição do volume de resíduo destinados aos aterros.

Dentre as madeiras plásticas, pode-se citar o IMAWOOD®, marca já registrada pelo Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano (IMA) da Universidade Federal do Rio de Janeiro. O IMAWOOD® é uma madeira plástica constituída de material pós-consumido (sacos e sacolas plásticas), recuperado dos depósitos de lixo.

AMIN (2006) realizou estudos sobre a utilização da fibra de coco como carga de reforços em PEAD e comparou os compósitos (PEAD/fibra de coco), em diversas proporções, com algumas madeiras plásticas e com a madeira natural. Concluiu que o compósito PEAD/fibra de coco verde na proporção 80/20 pode ser utilizado como madeira plástica.

As fibras ligno-celulósicas, são utilizadas como reforço na estrutura de PEAD devido às suas propriedades e características: possuem baixa densidade, não são tóxicas, não abrasivas, facilmente obtidas e resultam em misturas poliméricas com altas propriedades de rigidez. Outra característica que merece destaque é o seu baixo custo, pois são obtidas de resíduos de fontes renováveis. Além disso, sua utilização diminuirá o volume dos resíduos enviados aos aterros.

Estudos verificaram as mudanças nas propriedades mecânicas de elementos estruturais de material plástico reciclado, mais precisamente PEAD expostos ao sol e às intempéries por 11 anos. Os resultados mostraram um prognóstico positivo para a utilização de plástico reciclado, ao menos para o tipo de plástico estudado, o PEAD (ARRUDA, 2007).

### **3.6.1 Estudos Recentes**

Dentre as diversas propriedades, um dos grandes trunfos da madeira plástica é o de absorver menor quantidade de água em relação a madeira natural. MIRBAGHERI (2010) realizou um experimento comparativo entre a madeira plástica, com diferentes porcentagens de plástico reciclado (polietileno), moldadas a compressão a quente, e perfis de madeira MDF e PB reciclados.

Foi observado que os painéis com 60% de fibras possuem o menor valor de absorção de água e que os painéis com 80% de fibras foram o que absorveram maior quantidade. Isso é devido ao fato de que as fibras são hidrofílicas e, portanto, quanto maior a porcentagem da mesma na composição, maior será a absorção.

Além disso, MIRBAGHERI (2010) realizou experimentos para a comparação do módulo de flexão e de elasticidade das amostras. Foi observado que o módulo de flexão aumenta na medida em que o conteúdo de fibra aumenta de 60 para 70%, no entanto, é observada uma inflexão no comportamento quando é aumentado o conteúdo de fibras de 70 para 80%. Para o módulo de elasticidade e para o

teste de impacto, foi observada uma queda com o aumento do conteúdo de fibras de 60 para 70% e de 70% para 80%, respectivamente.

Esse comportamento é devido ao fato de que o plástico age como um adesivo no compósito, unindo as fibras de madeira e, como consequência, aumentando os seus módulos de flexão e elasticidade. A partir do momento em que a quantidade de plástico é insuficiente para unir as fibras, o módulo de flexão tende a diminuir.

FARSI (2010) investigou as propriedades de compósitos à base de polipropileno e serragem de madeira, tratados com diferentes substâncias.

Foi observado que, com a adição de farinha de madeira na matriz de polipropileno, a força e o módulo de tensão aumentaram consideravelmente. Isto pode ser atribuído ao fato de que a presença de fibra na matriz polimérica permite uma distribuição uniforme da tensão da matriz contínua de polipropileno para a fase dispersa das fibras. Além disso, foi observado, também, que na presença do agente de acoplamento, o ácido maleico propilênico (MAPP), a força e o módulo de tensão são superiores as amostras sem presença de tal substância, uma vez que a mesma é responsável pela melhoria da força de ligação entre a farinha de madeira e a matriz polimérica. O mesmo efeito foi observado para as propriedades de flexão.

Já para a força de impacto, foi observada uma diminuição para as amostras com adição da farinha de madeira e dos diversos tratamentos, quando comparado com a matriz polimérica pura. No entanto, com a adição do agente de acoplamento, um aumento na força de impacto pôde ser observado em relação às amostras sem tratamento.

Ou seja, por meio de uma alteração na superfície da matriz polimérica, seja por meio de tratamento, seja por meio de um agente de acoplamento, foi possível aumentar as forças e os módulos de tensão e flexão das amostras, uma vez que, por meio dessa alteração, aumentou-se a compatibilidade entre a madeira e o polipropileno. Já para a força de impacto, foi observado o inverso, já que, com a dispersão das fibras, maior é a absorção de energia nas amostras modificadas.

CRUZ-ESTRADA (2009) também observou os resultados citados acima em relação aos testes das propriedades mecânicas dos compostos à base de madeira e polímeros, corroborando com as observações dos outros pesquisadores.

KOUBAA (2009) realizou os estudos comparativos variando-se espécies, tamanhos de partículas das fibras e proporções de madeira no produto. Foram obtidos os seguintes resultados:

- Por meio da análise de variância obtida, foi concluído que todas as propriedades mecânicas variam significativamente com o tipo de fibra, tamanho e formulação. A absorção de água varia significativamente com o tipo de madeira e formulação, já o tamanho das partículas das fibras não é tão significativo para a absorção de água, no entanto, a interação entre o tamanho e a formulação, mostrou-se significativa;
- Análise do efeito do tipo de fibra: para todas as espécies testadas, em todos os casos, as propriedades de módulo de flexão e tensão da elasticidade, assim como a tensão máxima de flexão e tensão obtidas foram maiores do que o polímero puro. Comparativamente entre as

espécies, foi observado que as propriedades variam de acordo com a taxa de átomos O/C e com a quantidade de lignina na superfície, sendo que a combinação de baixas proporções O/C, com superfícies ricas em lignina, é a combinação menos favorável. Isso se deve ao fato de que, essa combinação, dificulta a formação de ligações entre as fibras e o agente de acoplamento. Na análise da elasticidade e energia na ruptura, a propriedade da superfície é fundamental, sendo que, a força da ligação entre o agente de acoplamento e a celulose na superfície pode ser enfraquecida de acordo com a quantidade de extrativos (substâncias que não fazem parte da parede celular, mas que estão ligadas a mesma) presentes na fibra em questão. A absorção de água varia, logicamente, com a quantidade de materiais hidrofílicos presentes em cada fibra, de modo que, quanto maior essa quantidade, maior é a absorção;

- Análise do efeito do tamanho da partícula: em geral, foi observado que com o aumento do tamanho das partículas, maior é o módulo de elasticidade e força máxima para os testes de tensão e flexão. Analisando os efeitos de acordo com a quantidade de fibras na composição, pôde ser observado, em geral, que as propriedades possuem valores maiores para as fibras com maior proporção (quantidade) na formulação. Já em relação aos testes na ruptura, foi observado uma tendência inversa, isto é, quanto maiores as partículas, menor é a energia e a elasticidade na quebra, no entanto, tais valores são menores para materiais com maiores quantidades de fibras na composição. A absorção de água não é tão significativa com a variação do tamanho da partícula;
- Análise do efeito da proporção de fibra na composição: efeitos similares ao citado anteriormente foram observados para as propriedades mecânicas, isto é, quanto maior a quantidade de fibras na composição, maiores são os valores de tais propriedades, no entanto, menores são a energia e a elasticidade na ruptura. Para a absorção de água, o esperado foi observado, ou seja, quanto maior a quantidade de fibras, maior é a quantidade de água absorvida.

Além de estudos referentes à quantidade de plástico no produto final, de tratamentos e de aditivos utilizados na formulação para melhoria das propriedades mecânicas, CUI (2008) investigou a relação do tamanho das fibras de madeira e seu impacto nas propriedades finais. Foi concluído que quanto maior o tamanho da fibra, menor é a força de flexão do composto. Isto foi explicado por meio das interações superficiais entre a fibra e o polímero, sendo que, quanto menor é a fibra, maior é a interação fibra-polímero e, essa maior interação, leva à maior capacidade de flexão do material. Além disso, por meio da análise da superfície fraturada, foi observado que as superfícies mais fraturadas estavam relacionadas às amostras em que foram utilizadas fibras de madeira de maiores comprimentos. Nesse mesmo estudo, CUI (2008) realizou uma análise térmica e concluiu que quanto maior a quantidade de madeira, maior era a temperatura de fusão da amostra, uma vez que, as fibras são responsáveis por limitar o escoamento das moléculas do polímero (no caso PEAD reciclado) durante o processo de fusão.

Outras propriedades devem ser levadas em consideração, por exemplo, a resistência às intempéries e a flamabilidade. Em relação à exposição ao tempo, duas características chamam atenção: efeitos

dos raios ultravioletas (UV) e a formação de radicais por meio de reações foto oxidantes. Portanto, para melhor performance da madeira plástica, é necessário a adição de estabilizantes e de substâncias anti-chamas.

GARCIA (2009) listou três tipos de substâncias anti-chamas, são elas:

- Componentes fosforados: quando aquecido, produzem uma camada sólida de ácido fosfórico que bloqueia a entrada de gases, esses responsáveis por alimentar a chama;
- Hidróxido de alumínio: podem agir de duas formas, liberando água ou formando uma camada protetora;
- Cianato de melanina: acima de 320°C, essa substância sofre decomposição endotérmica, agindo como consumidora de calor e, portanto, eliminando a chama. Os gases provenientes dessa decomposição são inertes.

Quando realizado o teste de flamabilidade com os três tipos de substâncias listadas acima e comparado com o plástico puro, GARCIA (2009) observou que o polietileno puro começou a queimar e pingar logo que foi exposto a chama, enquanto os compostos de madeira plástica, exceto o adicionado com o cianato de melanina, mantiveram sua geometria durante todo o experimento, afetando, apenas, sua superfície externa.

GARCIA (2009) também avaliou as propriedades da madeira plástica quando exposta a intempéries. Foi observado que a adição de alguns dos agentes anti-chamas aceleravam a descoloração da madeira plástica, principalmente quando foram utilizados componentes fosforados (devido a sua alta propriedade hidrofílica). Foi concluído que a adição de hidróxido de alumínio e estabilizantes é a fórmula otimizada de obter um material com boa resistência às condições climáticas e com boa resistência a chamas.

Os recentes estudos não abordam apenas as propriedades dos materiais devido a alteração na composição e dos parâmetros de processo. DIAZ (2010) desenvolveu um equipamento para inferir as propriedades mecânicas da madeira plástica de forma a substituir os caros equipamentos convencionais. Já BEHRAVESH (2009), estudou os requisitos necessários para o desenvolvimento de moldes para extrusoras. No primeiro, foi concluído que o aparato desenvolvido é aplicável para medição de propriedades mecânicas. Já no segundo, foi observado que, para o desenvolvimento de um molde, é necessário que seja avaliada uma estratégia para atingir um fluxo suave e equilibrado no mesmo. Além disso, o uso de softwares e o conhecimento dos valores corretos das propriedades do material a ser moldado facilitam a execução do projeto.

Diante do exposto, observa-se que vários estudos vêm sendo elaborados visando obter melhores e mais eficientes compostos de madeira plástica.

### **3.6.2 Processo de produção**

Na produção de madeira plástica, inúmeras variáveis devem ser avaliadas, como, por exemplo:

- Fornecimento de matéria-prima (polímero e madeira);

- Materiais a serem utilizados;
- Proporções entre polímero e madeira e o impacto nas propriedades mecânicas finais;
- Aditivos utilizados na formulação;
- Faixa granulométrica do material na alimentação da extrusora;
- Umidade do material a ser extrudado;
- Temperatura e pressão de processamento nas diferentes zonas de extrusão;
- Tipo de equipamento e dimensões dos mesmos.

Na reciclagem, o maior desafio é conseguir matéria-prima de forma regular e com os requisitos técnicos necessários para a sua produção.

Conforme afirmado por BEHRAVESH (2009), a adição de fibras naturais é bem atrativa atualmente em relação aos aditivos minerais e inorgânicos, uma vez, que elas possuem oferta abundante, baixo custo, baixo peso, tem propriedades mecânicas interessantes como, por exemplo, tensão próxima à da fibra de vidro, acima de 1Gpa, reduzem o consumo de energia, não são abrasivas para o equipamento e estão dentro do conceito de sustentabilidade. Alguns pesquisadores compararam as propriedades mecânicas da madeira plástica, produzida com polipropileno e farinha de madeira, com compósitos de polipropileno misturados com outros aditivos, como, por exemplo, talco, fibra de vidro e carbonato de cálcio. Foi concluído que as propriedades mecânicas da madeira plástica são maiores do que os materiais aditivados com talco e, aproximadamente, semelhante com o produzido com fibra de vidro.

Os termoplásticos que são comumente utilizados para a matriz polimérica são: PE, PP, PVC, PS e ABS. Esses polímeros possuem temperatura de processamento abaixo da temperatura de degradação da madeira (próximo de 220°C) e, devido a essa característica, são utilizados para a produção da madeira plástica (BEHRAVESH, 2009).

A Figura 3-21 ilustra o fluxograma básico para a obtenção de madeira plástica.

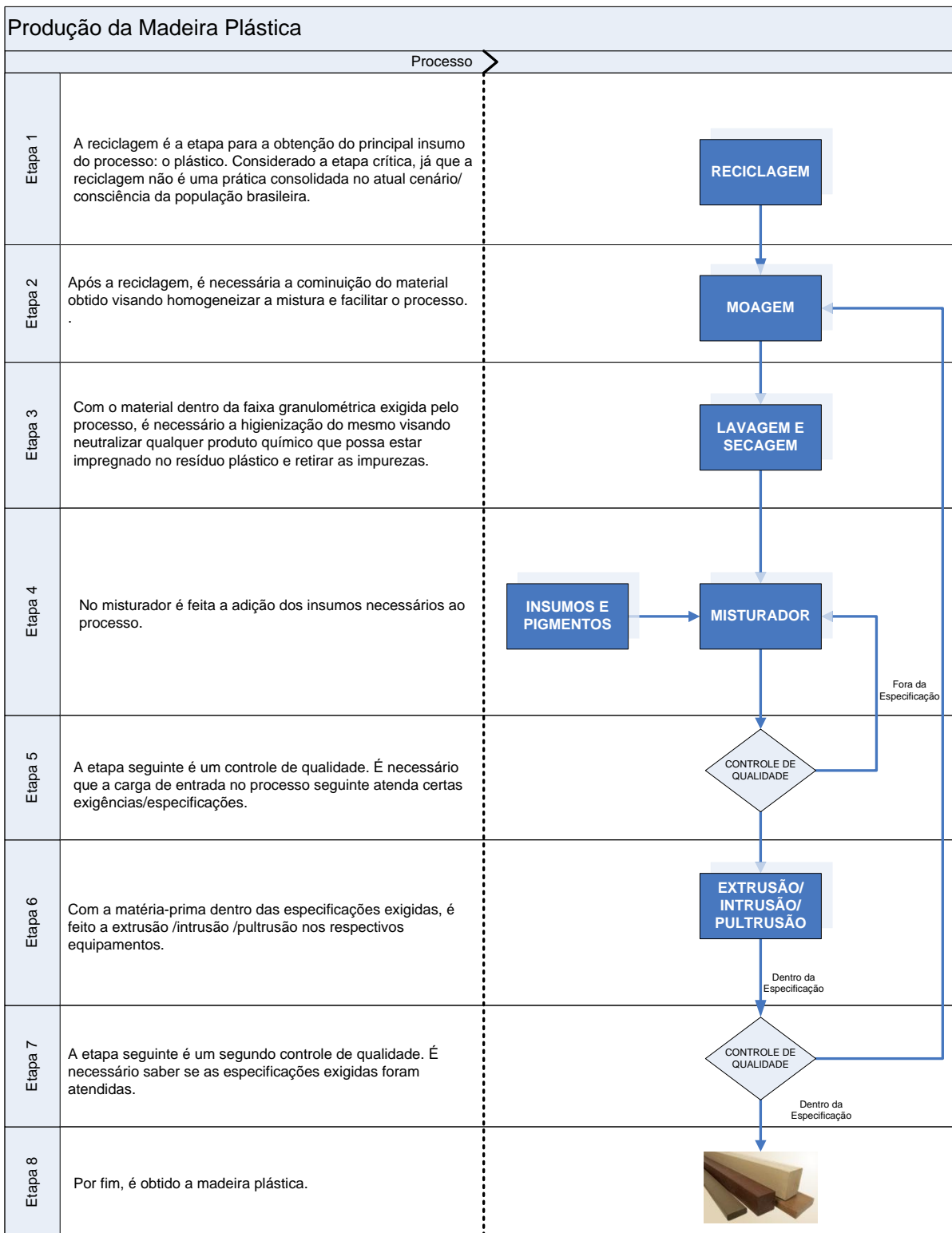


Figura 3-21 – Fluxograma básico para a produção da madeira plástica.

### 3.6.2.1 Reciclagem

Dentre os desafios da reciclagem já mencionados nos itens anteriores, para produção da madeira plástica, é de extrema importância que tenha a informação de:

- Recicladores;
- Quantidades médias recicladas mensalmente de cada tipo de plástico;
- Formas de obtenção do material reciclado;
- Qualidade/condição do material obtido.

#### 3.6.2.2 Moagem

A moagem do material é necessária para que, além de seguir as necessidades físicas dos equipamentos, conforme já foi mencionado no item 3.6.1, a granulometria do material, tanto o polímero, quanto a madeira, influencia diretamente nas propriedades mecânicas do produto obtido.

#### 3.6.2.3 Lavagem e Secagem

A necessidade dessa etapa visa, além de evitar contaminações no produto e danificação do equipamentos, a presença de agentes estranhos no processo, principalmente o excesso de umidade, influencia diretamente no produto obtido, chegando, por exemplo, a inutilidade do material extrudado com conseqüente descarte do mesmo.

#### 3.6.2.4 Homogeneização

Para alimentar o material na extrusora, é necessário que os “pellets” do polímero e as partículas de madeira, juntamente com os aditivos, sejam homogeneizados. Para tal, todos os constituintes são levados a um misturador para realizar a homogeneização da mistura.

Várias pesquisas já foram e estão sendo conduzidas durante as últimas décadas para viabilizar a mistura da madeira, que é irregular, higroscópica, possui alta estrutura cristalina e é polar, com o polímero que é um composto, normalmente, apolar, hidrofóbico e possui altas temperaturas de fusão.

A estratégia adotada é de interferir nas características da superfície dos materiais e de promover uma dispersão das fibras na matriz polimérica, por meio da adição de um agente compatibilizante. O MAPP pode ser utilizado como este agente, por ser capaz de reduzir a interação fibra-fibra, homogeneizando o composto a ser produzido (BERAVESH, 2009).

A adição de MAPP na mistura varia com a proporção do peso das fibras na quantidade total do produto a ser produzido. CUI (2008) recomenda que, para a madeira plástica, a quantidade ótima de MAPP adicionado é de 5% do peso de madeira.

Outro insumo pode ser adicionado na mistura, os pigmentos. Para a produção de perfis de diferentes colorações pode ser utilizado, além da coloração natural do material reciclado, a adição de pigmentos nas tonalidades desejadas.

#### 3.6.2.5 Processamento

Para obtenção da madeira plástica, são observadas duas formas de processamento mais convencionais. São elas:



- Por meio de “pellets” de madeira plástica: nessa estratégia são necessários que os “pellets” de madeira plástica, previamente produzidos, sejam extrudados em uma extrusora de rosca única para moldagem ou por meio de injeção;
- Extrusão direta: o polímero é misturado com a madeira na extrusora que alimenta um molde. É mais utilizado na produção em larga escala, para obtenção de materiais de forma simples. Pode ser utilizada extrusora de rosca simples ou dupla.

Os parâmetros de extrusão devem ser ajustados de acordo com as propriedades do material a ser extrudado e do composto a ser obtido. O tempo de residência deve ser adequado para que seja obtida uma boa dispersão das fibras na matriz polimérica, um amolecimento homogêneo da matriz e que não permita a degradação das fibras. A variável capaz de controlar o tempo de residência é a velocidade rotacional da rosca. Quanto maior a velocidade, menor o tempo.

Alguns estudos investigaram os parâmetros ótimos para a extrusão. Foi concluído que a velocidade rotacional deve estar em torno de 40 a 50rpm e a temperatura de mistura entre 170 a 180°C (BERAVESH, 2009). CUI (2008), sugere a temperatura nas três zonas de alimentação, compressão e vazão, respectivamente, próximos a 185, 190 e 185°C. Foi sugerido, também, que a pressão esteja próxima de 110bar e que a temperatura do molde esteja próxima a 175°C.

CRUZ-ESTRADA (2009) observou por meio de um estudo de termogravimetria, que a o limite máximo para o processamento de uma mistura de plásticos e madeira seria uma temperatura de 250°C. Acima de tal limite, é observada a decomposição da celulose.

A utilização de extrusoras de rosca dupla é usualmente preferida em relação à extrusora de rosca simples, uma vez que, a primeira, proporciona altas taxas de mistura (BERAVESH, 2009).

Para a compressão, CUI (2008) alerta sobre a necessidade de um pré-aquecimento (normalmente em torno de 180°C) e secagem dos “pellets” ou a massa termoplástica antes de inserí-los no molde. Além disso, é necessário observar a velocidade de fechamento do molde, para garantir que o material escoe de maneira uniforme em todo o molde, ocupando o volume disponível, evitando, assim, a formação de cavidades.

Outros processos podem ser utilizados para a produção da madeira plástica, entre eles a injeção. Os principais desafios nesse método é o controle de evaporação da umidade e a possibilidade de queima da madeira durante a injeção.

BERAVESH (2009) investigou o processo de injeção da madeira plástica produzida com matriz à base de polipropileno, variando a pressão de injeção (20 a 60MPa) e o tempo de residência (7 a 20s) e mantendo constante a proporção de fibra de madeira (40%w/w) e a temperatura de processamento (170°C). Foi concluído que atingir uma condição ideal de processamento é extremamente difícil, pois senão, os processos de injeção são prejudicados. Além disso, a presença de grandes vazios na peça é um problema importante a ser tratado. Adicionalmente, foi observado que os módulos elásticos são largamente afetados pelos parâmetros de processamento (pressão de injeção e tempo de detenção), enquanto os efeitos sobre a força e alongamento são menos significativos.

### 3.6.3 Destinações/Aplicações

O produto final pode facilmente substituir a madeira, em alguns casos o cimento e até o aço. Ele pode ser :

- Serrado, aplainado, pregado, grampeado, colado, aparafusado e soldado;
- Tingido em bruto, colorido com massa, pintado.

Pode ser acabado diretamente no formato desejado. Em geral, isto representa uma economia substancial de material e mão de obra.

Portanto, dentre as principais aplicações (ilustradas na Figura 3-22) a madeira plástica pode ser utilizada para:

- Fabricação de perfis variados e consequentes aplicações;
- Dormentes para via férrea;
- Estacas;
- “Pallets”.

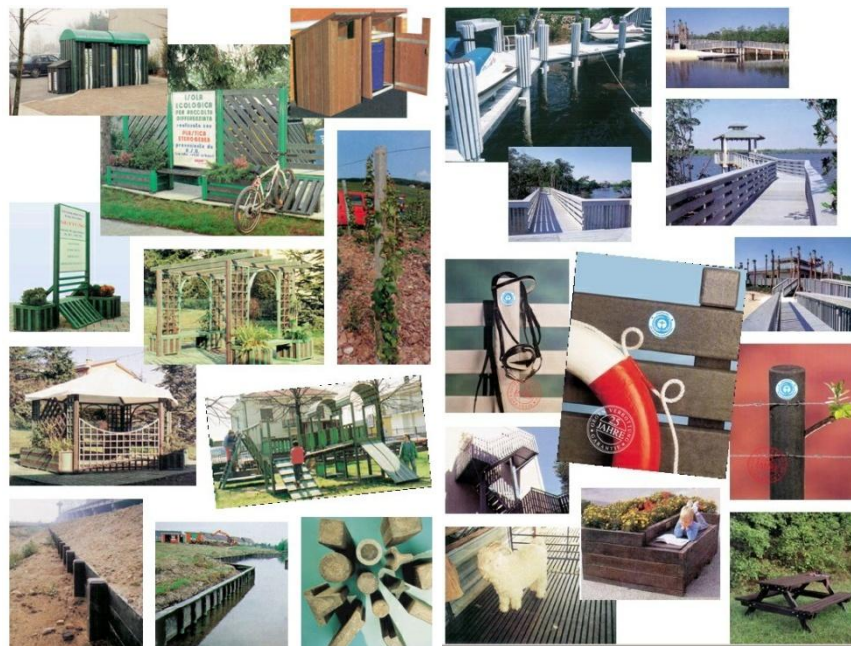


Figura 3-22 – Produtos de madeira plástica.

### 3.6.4 Análises e Ensaio

Conforme observado nos itens anteriores, dentre as análises e ensaios comumente realizados, as principais propriedades de interesse do produto de madeira plástica são:

- Força e módulo de tensão (ASTM D-638);
- Força e módulo de flexão (ASTM D-790);

- Força de resistência ao impacto (ASTM D-256);
- Absorção de água (DIN-EN 317);
- Flamabilidade (EN ISO 11925-2);
- Resistência aos raios na região do ultra violeta (EN 927-6);
- Estabilidade térmica (ASTM E2550).

### 3.6.5 Madeira Plástica no Brasil

Em um levantamento recentemente realizado, foram mapeadas 27 empresas produtoras de madeira plástica no Brasil, conforme pode ser observado na Figura 3-23 (SOARES *et al.*, 2012).



Estado	Empresa	Estado	Empresa
São Paulo	• Madeira Plástica ALLPEX	Minas Gerais	• Ecoblock
	• Wisewood		• Satre
	• Reciplast	Santa Catarina	• Ekoplus
	• WBP		• Eplast
	• Totall Green	Paraná	• Ecoimp
	• Ecocasa		• In Brasil
	• Atec Solução Sustentáveis	• Madeplast	
	• PentagonalecoWood	• Megaperfil	
	• RomanPlast – SP	Bahia	• Totall Green
	• Fibromix		• Plasticwood
Rio de Janeiro	• EcoPlace Madeira Plástica	Pará	• EcoNortecSacotex
	• Cogumelo	Acre	• Plasacre
	• Totall Green		
	• PolyRio		
	• Prima Matéria		

Figura 3-23 – Produtores de madeira plástica no Brasil.

Por ser um produto relativamente novo no mercado, não foram encontradas informações estatísticas do desempenho do setor.

### 3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Um experimento pode ser definido como um teste ou uma série de testes, com variáveis a serem analisadas. A listagem inicial de variáveis candidatas a serem incluídas no experimento é construída pela combinação de conhecimentos e informação acerca do processo (MONTGOMERY, 1998; MONTGOMERY, 2002).

O experimento é realizado por meio de uma sequência de atividades (MATHEWS, 2005; DEVORE, 2006). São elas:

- Conjuntura (hipótese original que motivou o experimento);
- Experimento (realização dos testes propriamente ditos);
- Análise (análise estatística dos dados obtidos);
- Conclusão.

As variáveis podem ser tratadas de três formas: intencionalmente variadas, fixas e sem controle. Além disso, podem ser de dois tipos: as mensuráveis e não mensuráveis. Outra forma de classificação das variáveis é entre quantitativas e qualitativas. Variáveis qualitativas são aquelas que diferenciam em tipos, por exemplo, fabricantes e origem do material. Variáveis quantitativas são aquelas em que são medidos tamanhos ou quantidades, por exemplo, uma blenda produzida com 20% de madeira em relação a outra produzida com 50%. Uma vantagem da variável quantitativa é que os resultados de um experimento podem ser interpolados. Uma variável quantitativa que não pode ser controlada, mas que pode ser medida durante o experimento, é chamada de co-variável. Apesar desse tipo de variável, na maioria das vezes, não possui efeito significativo na resposta, já que é praticamente constante durante a realização dos testes, é importante medi-la e reportá-la, por exemplo, umidade do ar e temperatura ambiente (MATHEWS, 2005).

O planejamento estatístico de experimentos (PEE) é uma técnica formal estruturada que permite o estudo de qualquer situação que envolva uma resposta a qual varia em função de uma ou mais variáveis independentes. O PEE se aplica especificamente no equacionamento de problemas complexos em que mais de uma variável pode afetar a resposta e pode haver interação entre duas ou mais variáveis. A técnica pode ser utilizada sempre que dados experimentais possam ser obtidos e analisados. É uma ferramenta poderosa e eficiente, utilizada, cada vez mais, nos diversos ramos da ciência, incluindo engenharia, biologia, medicina, economia, sociologia, psicologia e agricultura, entre outros. Na engenharia, a título de ilustração, pode ser aplicada na identificação de problemas do processo, no desenvolvimento e otimização de procedimentos, na avaliação de materiais e em testes de desempenho de produto. Quando corretamente utilizada, o PEE pode fornecer respostas para questões específicas sobre o comportamento de um determinado sistema, usando um número ótimo de observações experimentais (MATHEWS, 2005).

Seguindo na linha do PEE, é preciso definir primeiramente os fatores importantes que conduzem a uma resposta ótima. Para tal, um planejamento fatorial de experimentos é recomendado. Em tal planejamento, para cada tentativa completa ou réplica do experimento, todas as combinações

possíveis dos níveis dos fatores são investigadas. Assim, se houver dois fatores A e B, com “x” níveis do fator A e “y” níveis do fator B, então cada réplica conterá todas as “xy” combinações de tratamento (MONTGOMERY, 1998; MONTGOMERY, 2002).

Em alguns experimentos, a diferença na resposta entre os níveis de um fator não é a mesma em todos os níveis dos outros fatores. Quando isto ocorre, há interação entre os fatores, e somente o planejamento com experimentos fatoriais é capaz de identificar interações entre as variáveis. O método de um fator de cada vez (tentativa e erro) é muito utilizado, porém é ineficiente caso haja interação de fatores. Com ele, necessita-se de mais experimentos do que um planejamento fatorial e, não há garantia de produzir resultados corretos, pois nele, não se detecta as interações entre as variáveis, por exemplo.

A partir dos dados experimentais obtidos, com o auxílio do PEE, pode-se construir um modelo. Um modelo representa a descrição matemática de como uma variável-resposta se comporta em função das variáveis estudadas. Ou seja, representa uma correlação matemática entre as variáveis estudadas e a variável-resposta. A construção de um modelo pode ser por meio de princípios/fundamentos ou empiricamente. Com o modelo levantado é possível:

- Determinar como maximizar/minimizar ou atingir a resposta em um determinado valor;
- Aprender como diminuir variações na resposta;
- Identificar quais variáveis são mais importantes;
- Analisar as interações entre as mesmas;
- Melhorar um processo por meio de melhoria no controle;
- Simplificar procedimentos operacionais complexos (MONTGOMERY, 1998; 2002; WERKEMA, 1995; MATHEWS, 2005).

Nos itens a seguir, será apresentado, resumidamente, a teoria que sustenta o PEE.

### **3.7.1 Teste de Hipóteses**

Muitos dos problemas na engenharia requer uma tomada de decisão em relação a alguma afirmação sobre algum parâmetro. Essa afirmação é denominada hipótese, e, o processo de decisão, é chamado de teste de hipóteses.

O teste de hipóteses é composto por duas alternativas, sendo:

- $H_0$ : hipótese nula. É a hipótese a ser testada;
- $H_a$ : hipótese alternativa.

As hipóteses são afirmações sobre uma população ou distribuição, não sobre a amostra em questão. O valor da hipótese nula é comumente determinado de três maneiras:

- Por meio de resultados de experiência passada ou conhecimento do processo: para esses casos, o objetivo do teste de hipótese é o de avaliar quando o parâmetro em questão sofreu alteração;
- Por meio de modelos e teorias: nesse caso, o teste de hipótese pode ser utilizado para confirmar o modelo e a teoria em estudo;
- Quando os valores dos parâmetros de determinada população são determinados por meio de considerações externas, como, por exemplo, especificações de engenharia, obrigações contratuais, dentre outros: para essa situação, o teste de hipótese tem como objetivo testar a conformidade do especificado.

O procedimento de um teste de hipótese consiste em analisar informações de amostras randômicas de uma população de interesse. Caso essa informação seja consistente com a hipótese, pode ser concluído que a hipótese é verdadeira, caso contrário, a hipótese é falsa. No entanto, tal conclusão não pode ser afirmada com 100% de certeza, uma vez que para tal deverá ser examinado toda a população, o que é, normalmente, impossível de ser realizado. Portanto, o teste de hipótese é concluído com graus de incerteza estabelecidos pelo experimentador.

Para realizar o teste de hipóteses, alguns conceitos e definições precisam ser conhecidos e estabelecidos, sendo um deles em relação às propriedades de uma amostra. A média, variância, desvio padrão, dentre outras propriedades de uma amostra, é uma estimativa dos reais valores de uma população, que podem ser conhecidos ou não. Os valores encontrados, vão dar suporte à tomada de decisão em relação a  $H_0$ .

No entanto, uma vez que as propriedades medidas de uma amostra podem assumir valores próximos aqueles definidos de uma população, a aceitação ou não de  $H_0$  poderá ser definida de maneira assertiva ou não, conforme Figura 3-24.

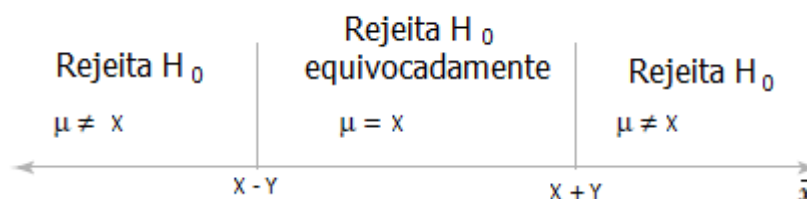


Figura 3-24 – Critérios de decisão para  $H_0$ .

A região entre os valores maiores que  $X-Y$  e menores do que  $X+Y$  é conhecida como região crítica para o teste, uma vez que, nesse intervalo, podemos cometer o erro de rejeitar  $H_0$  quando o mesmo é verdadeiro. Ou seja, para o caso da Figura 3-24, pode ser concluído equivocadamente que a média da amostra não é  $X$ , quando seu valor é  $X$ . Esse erro é conhecido como erro tipo I.

O contrário do erro tipo I, é conhecido como erro tipo II e ocorre quando aceitamos  $H_0$  quando deveríamos tê-lo rejeitado. Na Tabela 3-13 são identificadas as possíveis tomadas de decisão em um teste de hipótese.

Tabela 3-13 – Decisões em um teste de hipóteses.

Decisão	H0 é verdadeiro	H0 é falso
Rejeita H <sub>0</sub> equivocadamente	Correto	Erro tipo II
Rejeita H <sub>0</sub>	Erro tipo I	Correto

Uma vez que o processo de decisão é tomado em cima de variáveis randômicas, probabilidades podem ser associadas aos erros tipo I e II. A probabilidade de cometer o erro tipo I é identificada pelo símbolo  $\alpha$ , é conhecido como o nível de significância do teste de hipótese e pode ser calculado pela Equação 3-2.

$$\alpha = P(\text{errotipoI}) \quad (3-2)$$

Considerando uma situação em que o teorema central do limite é aplicável, ou seja, a distribuição da média da amostra é aproximadamente normal, igual à média da população, e o desvio padrão é calculado por  $\sigma/\sqrt{n}$ , tem-se uma situação conforme a Figura 3-25. A área hachurada corresponde à probabilidade em que se pode rejeitar H<sub>0</sub> quando o mesmo é verdadeiro.

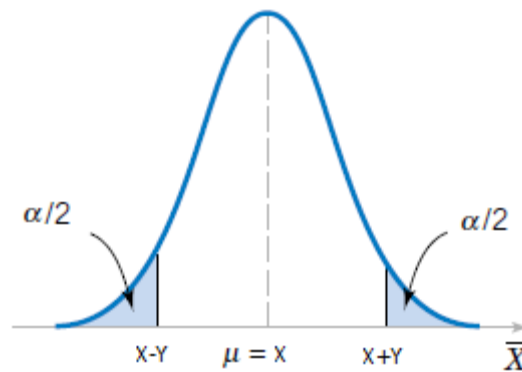


Figura 3-25 – Regiões críticas.

A probabilidade de cometer o erro tipo II é identificado pelo símbolo  $\beta$  e é dado pela Equação 3-3.

$$\beta = P(\text{errotipoII}) \quad \beta = P(\text{erro tipo I}) \quad (3-3)$$

Para o cálculo do erro tipo II deverá ser especificado um outro valor para a propriedade em análise. Tomando como exemplo um caso em que a média  $\mu$  de uma população é  $X$  e é desejado que H<sub>0</sub> seja rejeitado para valores maiores do que  $X+Y$ , deverá ser calculado a probabilidade, dada pela área hachurada do gráfico, de  $\mu = X+Y$ . A Figura 3-26 ilustra um caso para  $n = 10$  amostras e valores críticos VC1 e VC2.

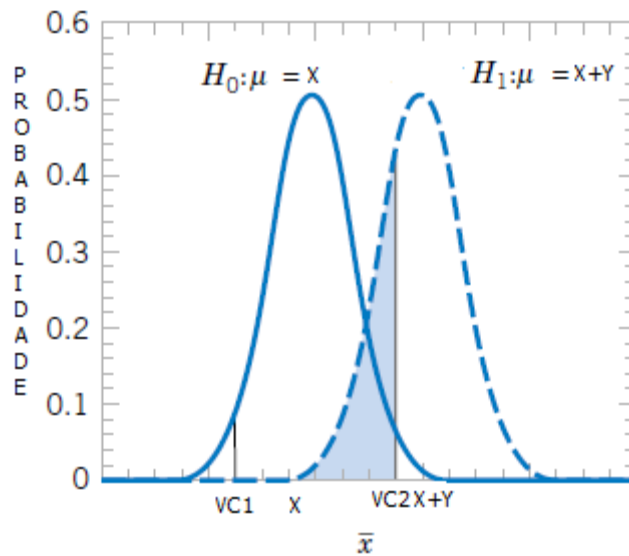


Figura 3-26 – Probabilidade para o erro tipo II quando  $\mu = X+Y$  e  $n=10$ .

Para a situação da Figura 3-26, o erro tipo II será cometido se a média da amostra estiver entre os valores de  $VC1$  e  $VC2$  e o valor da média da população for  $X+Y$ . Ou seja, entre os valores críticos pode-se aceitar  $H_0$ ,  $\mu = X$ , quando de fato  $\mu = X+Y$ .

À medida que  $Y$  diminui, ou seja, o valor alternativo para a propriedade em análise aproxima-se do valor definido em  $H_0$ , a probabilidade de se cometer o erro tipo II aumenta consideravelmente. A Figura 3-27 ilustra uma situação em que  $Y' < Y$ .

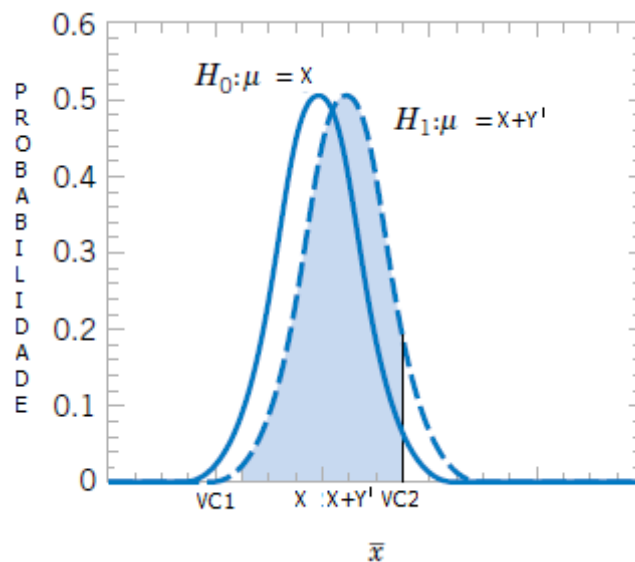


Figura 3-27 – Probabilidade para o erro tipo II quando  $\mu = X+Y'$  e  $n=10$ .

O erro tipo II também depende da quantidade de amostras em análise. Com o aumento do número de amostras,  $n$ , menor é a probabilidade de se cometer o erro tipo II, uma vez que, no cálculo de  $\beta$ , é levado em consideração o tamanho da amostra.

Por meio do exposto nos parágrafos anteriores, pode ser observado que:



- O tamanho da região crítica e, portanto, a probabilidade de cometer o erro tipo I, pode ser reduzido escolhendo os valores críticos adequadamente;
- Os erros tipo I e II estão relacionados. O decréscimo da probabilidade em um dos tipos implica no aumento do outro (considerando n constante);
- O aumento do número de amostras diminui  $\beta$  e  $\alpha$  (para valores críticos constantes);
- O valor de  $\beta$  diminui com o aumento da diferença entre a média verdadeira e a hipotética.

Uma vez que  $\alpha$  é, normalmente, uma escolha do experimentador e  $\beta$  está relacionado a  $\alpha$ , o termo “rejeitar  $H_0$ ” é considerado como uma conclusão forte. Portanto, prefere-se dizer que não foram encontradas evidências para rejeitar  $H_0$ , representado pela força do teste estatístico e calculado por  $1 - \beta$ . A força do teste estatístico é definida como a probabilidade de rejeitar  $H_0$  quando a hipótese alternativa é verdadeira e é utilizada para comparações entre testes estatísticos.

O procedimento geral para a realização de um teste de hipóteses é listado a seguir:

- Identificar o parâmetro de interesse;
- Definir  $H_0$  e  $H_a$ ;
- Escolher um nível de significância,  $\alpha$ ;
- Determinar um testes estatístico apropriado;
- Identificar a região de rejeição (verificar erro tipo I);
- Calcular as quantidades de amostras necessárias (verificar erro tipo II);
- Decidir sobre a rejeição ou não de  $H_0$ .

### 3.7.2 Análise de Variância (ANOVA)

A análise de variância separa a variabilidade total da amostra em duas partes, sendo o teste de hipóteses baseado na comparação de duas estimativas independentes da variância da população. A variabilidade total dos dados é definida pelo somatório das diferenças quadráticas, conforme Equações 3-4, 3-5 e 3-6.

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 \quad (3-4)$$

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_i - \bar{y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (3-5)$$

$$SS_T = SS_{\text{Tratamentos}} + SS_E \quad (3-6)$$

A variabilidade total nos dados, medido por  $SS_T$ , pode ser particionado em um somatório dos quadrados das diferenças entre as médias dos tratamentos e a média geral ( $SS_{\text{Tratamentos}}$ ) e

um somatório dos quadrados das diferenças de observações dentro de um tratamento e a média desse tratamento ( $SS_E$ ).

A diferença entre as médias dos tratamentos observados e a média geral mede as diferenças entre os tratamentos, enquanto a diferença de observações dentro de um tratamento, a partir da média do tratamento, pode ser devido ao erro aleatório.

$SS_T$  pode ser observado por meio da análise dos graus de liberdade. Considerando que  $an = N$  observações e que “a” representa o número de níveis e “n” o número de réplicas, tem-se:

- $SS_T$  possui  $an-1$  graus de liberdade;
- $SS_{\text{Tratamentos}}$  possui  $a-1$  graus de liberdade;
- $SS_E$  possui  $a(n-1)$  graus de liberdade.

Logo, a seguinte igualdade é estabelecida (Equação 3-7):

$$an - 1 = a - 1 + a(n - 1) \quad (3-7)$$

Para entender o funcionamento da análise de variância funciona, deve-se observar os valores estimados para  $SS_{\text{Tratamentos}}$  e  $SS_E$ , que são calculados por meio das Equações 3-8 e 3-9.

$$E(SS_{\text{Treatments}}) = (a - 1)\sigma^2 + n \sum_{i=1}^a \tau_i^2 \quad (3-8)$$

$$E(SS_E) = a(n - 1)\sigma^2 \quad (3-9)$$

A razão do lado direito da Equação 3-10, é denominada média quadrática para tratamentos. Se  $H_0$  é verdadeira,  $MS_{\text{Tratamentos}}$  é um estimador imparcial para  $\sigma^2$ , uma vez que,  $\sum_{i=1}^n \tau_i = 0$ . Contudo, se  $H_a$  é verdadeiro,  $MS_{\text{Tratamentos}}$  estima  $\sigma^2$  com uma contribuição positiva embutida devido a diferenças sistemáticas entre as médias dos tratamentos.

$$MS_{\text{Tratamentos}} = SS_{\text{Tratamentos}}/(a - 1) \quad (3-10)$$

Já a razão do lado direito da Equação 3-11, é denominada média quadrática do erro e é um estimador imparcial para  $\sigma^2$ , independentemente se  $H_0$  é ou não verdadeiro.

$$MS_E = SS_E/[a(n - 1)] \quad (3-11)$$

Na Tabela 3-14 são sintetizados os parâmetros da ANOVA.

Tabela 3-14 – Análise de variância para teste de fator único.

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados médios	F <sub>0</sub>
Tratamentos	SS <sub>Tratamentos</sub>	a -1	MS <sub>Tratamentos</sub>	MS <sub>Tratamentos</sub> /MS <sub>E</sub>
Erro	SS <sub>E</sub>	a (n-1)	MS <sub>E</sub>	-
Total	SS <sub>T</sub>	na-1	-	-

### 3.7.3 Regressão Linear Simples

A regressão linear é uma técnica estatística utilizada para analisar a relação entre duas ou mais variáveis. Por meio da mesma, é construído um modelo que servirá, por exemplo, para encontrar pares em que uma resposta ótima é obtida ou prever valores para condições não conhecidas.

Para o caso da regressão linear simples, a relação entre uma variável x e a resposta y em cada observação pode ser representada pela Equação 3-12.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (3-12)$$

Em que  $\beta_0$  e  $\beta_1$  são os coeficientes da regressão e  $\varepsilon$  é o erro randômico, com média zero e variância desconhecida.

Para estimar valores de  $\beta_0$  e  $\beta_1$  que resultem no melhor ajuste para os dados, Carl Gauss, propôs, em 1795, por meio do método dos quadrados mínimos, as Equações 3-13 e 3-14.

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \quad (3-13)$$

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n}} \quad (3-14)$$

Em que  $\bar{y} = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n y_i$  e  $\bar{x} = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n x_i$  e o numerador é representado por  $S_{xy}$  e o denominador por  $S_{xx}$ .

A linha de regressão é representada pela Equação 3-15.

$$\hat{y} = \tilde{\beta}_0 + \tilde{\beta}_1 \hat{x} \quad (3-15)$$

Em que o erro em cada observação,  $e_i$ , é chamado de resíduo e é calculado pela Equação 3-16.

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (3-16)$$

Um estimador imparcial para a variância de  $e_i$  pode ser calculado por meio da equação 3-17.

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{SS_E}{n-2} \quad (3-17)$$

Em que  $SS_E$  é a soma do quadrado dos erros e, portanto, pode ser calculado conforme Equação 3-18.

$$SS_E = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3-18)$$

Uma forma de avaliar se os estimadores encontrados são confiáveis para a amostra, é realizar o teste de hipóteses e análise de variância dos mesmos. Para tal, deverá ser assumido que os erros possuem distribuição normal e independente, com média zero e variância  $\sigma^2$ .

Como resultado da análise de variância, uma tabela, conforme Tabela 3-15, é elaborada.

**Tabela 3-15 – Análise de variância para teste de significância da regressão**

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados médios	F <sub>0</sub>
Regressão	$SS_R = \hat{\beta}_1 S_{xy}$	1	MS <sub>R</sub>	MS <sub>R</sub> /MS <sub>E</sub>
Erro	$SS_E = SS_T - \hat{\beta}_1 S_{xy}$	n-2	MS <sub>E</sub>	-
Total	SS <sub>T</sub>	n-1	-	-

Em que  $SS_R$ ,  $SS_T$  e  $F_0$  são calculados por meio das Equações 3-19, 3-20 e 3-21 respectivamente.

$$SS_R = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (3-19)$$

$$SS_T = SS_E + SS_R \quad (3-20)$$

$$F_0 = \frac{SS_R/1}{SS_E/(n-2)} = \frac{MS_R}{MS_E} \quad (3-21)$$

Além disso, para validar a regressão, são utilizadas as ferramentas de análise residual e da determinação do coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

Por meio da análise residual, consegue-se checar se a premissa de que os erros podem ser aproximados por uma distribuição normal com variância constante é válida.

O coeficiente de determinação é calculado por meio da Equação 3-22.

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (3-22)$$

Esse coeficiente é utilizado para julgar se a regressão é adequada. Varia entre 0 e 1, sendo que, quanto mais próximo da unidade, melhor é sua regressão.

No entanto, uma vez que, é possível obter valores altos de  $R^2$ , por meio de simples adição de termos no modelo, cuidados devem ser tomados ao concluir sobre a regressão apenas com valores de  $R^2$ .

### 3.8 ANÁLISE ECONÔMICA DE PROJETOS

Um projeto é o conjunto de documentos que estabelece a viabilidade técnica e permite a análise econômica de um dado empreendimento. A viabilidade técnica mostra que o produto desejado

poderá ser gerado na quantidade e qualidade esperada, a partir de uma matéria prima determinada. A análise econômica, por sua vez, indica qual o tamanho do capital a ser investido, para que o empreendimento transforme-se de ideia em estrutura física e opere da maneira que se deseja. Se o empreendimento representa um negócio, a análise econômica mostrará, dentre outras informações, qual será a taxa de lucratividade que o investimento proporcionará e qual o tempo de retorno do capital total investido aos cofres dos investidores.

No que tange a assertividade, uma forma de calcular a estimativa de CAPEX – *Capital Expendure* do empreendimento é seguir a metodologia AACE - *Association for Cost Engineering* (Tabela 3-16), que, no caso, considera a atual fase como sendo de classe 5.

**Tabela 3-16 - Metodologia para estimativa de CAPEX. Fonte: AACE.**

Classe da Estimativa	Característica Primária	Características Secundárias		
	Nível de Definição do Projeto (expressado como % em relação as definições do projeto)	Uso (propósito da estimativa)	Metodologia (método para estimativa)	Expectativa de Acertividade
Classe 5	0% a 2%	Análises de conceitos	Analogias, modelos paramétricos, julgamentos	L: -20% a -50% H: +30% a 100%
Classe 4	1% a 15%	Estudos de Viabilidade	Custos dos principais equipamentos ou modelos paramétricos	L: -15% a -30% H: +20% a 50%
Classe 3	10 a 40%	Aprovações de orçamentos	Projeto básico	L: -10% a -20% H: +10% a 30%
Classe 2	30% a 70%	Controle de licitação/concorrências	FEED (levantamento de materiais para take-off)	L: -5% a -15% H: +5% a 20%
Classe 1	50% a 100%	Verificação do valor licitado/ofertado	Projeto Detalhado	L: -3% a -10% H: +3% a 15%

### 3.8.1 Juros

Os juros, correspondem a uma taxa paga pelo empréstimo de bens. É o preço pago pelo uso de dinheiro emprestado, ou, dinheiro ganho pelo depósito de fundos (SULLIVAN, 2003). Esses bens podem ser dinheiro, ações, bens de consumo, transportes e, até mesmo fábricas inteiras, obtidas por *leasing*. Esses juros são calculados de acordo com o valor dos bens e podem ser considerados como um “aluguel pelo dinheiro”.

Os juros são uma compensação ao proprietário dos bens emprestados aos outros investimentos que ele poderia ter feito com os mesmos. Para se ter o benefício de haver imediatamente os bens, aquele que toma o empréstimo deverá fazer uma minuciosa análise de todas as oportunidades para conseguir pagar aquele que lhe emprestou e ainda lucrar com suas empreitadas.

Existem algumas análises que ajudam a avaliar se um dado investimento, com base em um empréstimo, é sustentável e atrativo, avaliando-se a evolução do capital investido com o tempo.

### 3.8.2 Valor Presente Líquido (VPL)

O Valor Presente Líquido é definido como o valor presente total de uma série temporal de fluxo de dinheiro. É um método padrão para se utilizar o valor temporal de dinheiro para se avaliar projetos a longo prazo. Utilizado para se fazer orçamentos e amplamente utilizado em economia, é uma medida do “superávit” ou “déficit” de fluxos de caixa, em termos de valores no presente, quando as taxas financeiras são cumpridas.

O VPL é definido pelo somatório de todos os valores presentes de recebimentos e pagamentos e é calculado por meio da Equação 3-23.

$$\text{VPL} = \text{VP Custos (taxa } i, \text{ período } n) + \text{VP Recebimentos (taxa } i, \text{ período } n) \quad (3-23)$$

O VPL é um indicador de quanto valor um investimento ou projeto adicionará à companhia. Se em um projeto particular o VPL for um valor positivo, há no respectivo período  $n$  um ganho financeiro; ao passo que se for negativo, nesse período  $n$  há uma perda de dinheiro. O simples fato do VPL ser positivo ou negativo não indica que o projeto deverá ser aceito ou rejeitado, pois ainda deve-se levar em conta outras oportunidades. No entanto, na teoria financeira convencional, diante de duas alternativas mutuamente exclusivas, deve-se optar por aquela com maior VPL.

De modo geral, os valores de VPL têm os significados apresentados na Tabela 3-17.

**Tabela 3-17 – Significado do VPL em razão do seu valor com respectiva decisão a ser tomada.**

Situação	Significado	Decisão
VPL > 0	Investimento agrega valor	Projeto poderá ser aceito
VPL < 0	Investimento subtrai valor	Projeto deverá ser rejeitado
VPL = 0	Investimento não agrega nem subtrai valor	Indiferente. Decisão deve se fundamentar em outros critérios, como, por exemplo posicionamento estratégico.

Algumas considerações devem ser observadas ao se fazer a análise por meio do VPL:

- Se o somatório dos valores presentes ao término do investimento como, por exemplo, devolução de uma lavra em projeto de mineração, uma taxa de retorno alta não é cautelosa mas muito otimista. Para se evitar esse problema, deve-se incluir previsões de capital explícitas para financiamento de quaisquer perdas após o investimento inicial;
- Se o investimento tiver riscos maiores, o método do VPL pode se tornar menos preciso. Para se calcular uma taxa corrigida, levando-se em conta o histórico de cada tipo de investimento, é recomendável o uso de técnicas avançadas como técnicas atuariais ou de Monte Carlo;
- VPL negativo em alguns casos poderá ser aceito. Algumas companhias são forçadas a executar um projeto nesse cenário, pois a não execução poderá acarretar em destruição ainda maior. Como que se fosse um “mal necessário”.

### 3.8.3 TIR (Taxa Interna de Retorno)

A taxa interna de retorno é definida como a taxa de juros sobre o balanço não pago de um empréstimo, de maneira que a agenda de pagamento torna esse balanço do empréstimo igual a zero, quando o investimento final é pago.

Em termos de investimento, será a taxa na qual a agenda de recebimentos tornará o retorno do investimento como sendo zero no seu fim.

Para se calcular essa taxa, deve-se avaliar os valores presentes das quantias a serem ganhas e de todos os custos. A diferença entre ambos será zero se a taxa considerada nesses cálculos for a taxa de retorno interno (Equação 3-24).

$$\text{Valor presente dos ganhos} - \text{Valor presente dos custos} = 0 \quad (3-24)$$

Considerando-se, então, os pagamentos/recebimentos periódicos  $A$ , por  $n$  períodos, a taxa interna de retorno TIR  $i$  é definida pela seguinte Equação 3-25.

$$\text{Valor Empréstimo} - A \times (P/A, i, n) = 0 \quad (3-25)$$

Ou pela Equação 3-26.

$$\text{Valor Empréstimo} - A \left[ \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] = 0 \quad (3-26)$$

A TIR é um indicador da eficiência, qualidade e retorno de um investimento, contrastando com o Valor Presente Líquido (VPL) de um investimento, que é um indicador da magnitude do mesmo.

Um investimento é considerado aceitável se sua TIR é maior que uma taxa mínima de atratividade do investimento (que poderá ser determinada pelo custo ajustado do capital para investimentos alternativos). Isso assegura que o investimento é sustentado por acionistas, uma vez que, geralmente, investimentos cuja TIR excedem seu custo de capital, por serem lucrativos, adicionam valor à companhia responsável (MIAN, 2002).

### 3.8.4 Capital de Giro

O capital de giro representa a liquidez operacional disponível em um negócio. Junto com o capital fixo como planta e equipamentos, o capital de giro é considerado uma parte do capital operacional. É calculado pela diferença entre os bens e gastos atuais, de maneira que, se os valores dos bens são menores que os gastos, então a entidade tem déficit no capital de giro.

Uma empresa pode ser taxada como proprietária de bens e rentável, porém com baixa liquidez, se seus bens não podem ser prontamente convertidos em dinheiro. O capital de giro positivo é necessário para se garantir que uma empresa seja capaz de continuar suas operações e que tem fundos suficientes para sanar tanto dívidas ao curto-prazo como despesas operacionais futuras. O gerenciamento do capital de giro envolve gerenciamento de inventários, contas a pagar e a receber e dinheiro.

Ganhos e gastos atuais incluem três contas de especial importância, a saber:

- Contas a receber (ganho atual);
- Inventário (bens atuais);
- Contas a pagar (gasto atual).

A parcela de dívida pagável em 12 meses é crítica, pois representa um corte no curto-prazo dos ganhos/bens e são geralmente sustentadas por ganhos no longo-prazo. Exemplos são empréstimos bancários e linhas de crédito.

Um aumento no capital de giro indica que o negócio aumentou seus bens em uso, por exemplo, recebendo dinheiro ou outros bens ou reduzindo seus custos, por exemplo, pagando dívidas.

O gerenciamento do capital de giro envolve manusear a relação entre os ganhos e gastos no curto-prazo.

### **3.8.5 CAPEX e OPEX**

CAPEX, ou despesa de capital, representa um bem, que é algo tangível, que pode ser utilizado em vários anos de vida útil, no qual o tempo tem um preço ou valor. Portanto, é um termo que aparece na folha de balanço de uma companhia e pode ser vendido ou transferido se necessário, por exemplo, computadores de uma fábrica. O custo capital de um bem, portanto, perde seu valor com o tempo.

OPEX – *Operational Expendures*, ou despesa operacional, é um custo imediato, que não se traduz em algo tangível, não tem valor intrínseco após sua concepção e não pode ser vendido ou aparecer em uma folha de balanço, por exemplo, almoço e treinamentos.

### **3.8.6 Fluxo de Caixa**

O fluxo de caixa refere-se ao movimento de dinheiro entrando e saindo de um negócio, projeto ou produto financeiro. É geralmente medido durante um período de tempo finito e específico e pode ser utilizado para as seguintes finalidades:

- Para determinar o valor ou a taxa de retorno de um projeto. O período de fluxo de caixa pode ser utilizado como *input* para modelos financeiros como a TIR ou o VPL;
- Para avaliar a qualidade dos ganhos gerados na contabilidade cumulativa. Quando os ganhos líquidos são constituídos de muitos itens não financeiros, então é considerado como de baixa qualidade;
- Para avaliar os riscos de um produto financeiro.

Um critério muito utilizado para mensuração do fluxo de caixa é o EBITDA (*earnings before interest, taxes, depreciation and amortization* ou ganhos deduzidos de juros, taxas, desvalorizações e amortizações). Avalia-se o ganho líquido minuciosamente, sem contabilidade cumulativa, além de deduzir impostos, o que ainda anula os efeitos de diferentes estruturas de capital.



### 3.8.7 Tempo de *Payback*

O tempo de *payback* é o período de tempo necessário para um investimento se fazer valer à mesma quantidade de capital inicial. Intuitivamente, mede o quanto de tempo um investimento leva para “se pagar”. Um termo mais amplamente utilizado devido à sua fácil compreensão, independente de experiência acadêmica ou prática, apesar de suas limitações. Tempos de *payback* mais curtos são obviamente preferíveis aos mais longíquos.

As limitações dessa análise são o fato de não levar em conta o valor temporal do dinheiro, riscos, financiamentos e outras considerações relevantes como outros investimentos mais atrativos. Para sanar esses aspectos, análises como a do VPL e TIR são mais adequados.

## 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nos tópicos a seguir, serão descritos os materiais e equipamentos necessários e os procedimentos utilizados para obtenção dos resultados.

### 4.1 Materiais e Equipamentos

A seguir serão listados os materiais e equipamentos que foram utilizados para a realização do trabalho.

#### 4.1.1 Materiais

Os três materiais utilizados para a realização desse trabalho foram: polietileno de alta densidade (PEAD) reciclado, polipropileno (PP) reciclado e madeira do tipo paraju (ou maçaranduba). Em relação aos compostos plásticos, a escolha foi devido ao fato de que tais polímeros são, após o PVC, os plásticos mais consumidos no Brasil e, portanto, com maior oferta para reutilização. Em relação à fibra orgânica, foi escolhida a Paraju, pelo fato de ser a mais utilizada no setor imobiliário em Belo Horizonte.

O PEAD e o PP reciclados foram usados em forma de pellets. A madeira foi utilizada de duas formas: serragem e pó. A Figura 4-1 ilustra alguns dos materiais utilizados para realização dos experimentos.



Figura 4-1 - (a)PEAD reciclado; (b)PP reciclado; (c) Madeira paraju em pó.

## 4.1.2 Equipamentos

Na Figura 4-2 podem ser observados os equipamentos utilizados para a realização dos procedimentos experimentais.



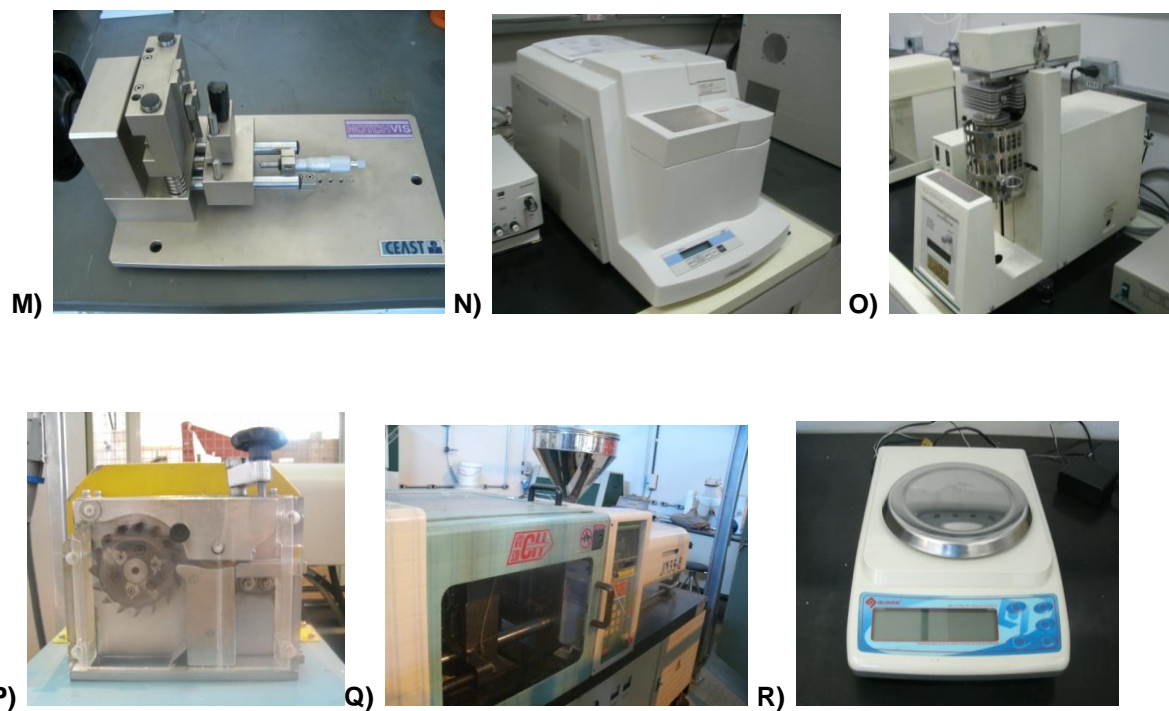


Figura 4-2 – Equipamentos utilizados: A) Moinho de bolas; B) Moinho de Facas; C) Extrusora de rosca simples; D) Liquidificador industrial; E) Moinho analítico; F) Thermo Haake; G) Máquina universal de ensaios; H) Máquina de teste de impacto; I) FTIR; J) Prensa térmica; K) Guilhotina; L) Peneira manual; M) Entalhador; N) DSC; O) TG; P) Triturador acoplado a extrusora; Q) Injetora; R) Balança de precisão.

## 4.2 Procedimento Estatístico

Para o procedimento estatístico foi utilizada a seguinte sequência como método de trabalho.

### 4.2.1 A Análise de Variância em Experimentos de Fator Único - ANOVA

O primeiro passo para a realização de um experimento é definir os fatores, níveis e as repostas que serão observadas, sendo que:

- Fator: variável em análise;
- Níveis/tratamento: “range” da variável;
- Resposta: valores dos resultados dos testes.

Os níveis podem ser definidos de duas maneiras:

- Especificado pelo investigador: para essa situação o teste de hipóteses é feito considerando as médias das observações e as conclusões não podem ser estendidas para tratamentos que não foram considerados no experimento atual. Serve, também, para observar o efeito de cada nível na resposta (“*fixed-effects models*”);
- Especificados aleatoriamente, por meio de uma população maior de tratamentos: para essa situação, o objetivo do teste de hipóteses é de proporcionar conclusão para toda a população, independente se o tratamento foi ou não explicitado no teste em questão.

Para analisar o impacto que a proporção da madeira causa nas variáveis respostas, foram definidos os valores mínimos e máximos conforme apresentado na Tabela 4-1.

**Tabela 4-1 – Definição do fator e nível do experimento.**

Variável	Valor Mínimo	Valor Máximo	Variações
% em peso de madeira na composição	20%	50%	10%

Além disso, foi adotado o modelo de estatística linear e de experimento completamente randomizado (Equação 4-1).

$$Y_{ij} = \mu_i + \epsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (4-1)$$

Portanto,  $i=j$ , ou seja, o número de observações/testes/respostas é igual ao número de níveis/tratamentos, conforme mostrado na Tabela 4-2.

Em que:

- $Y_{ij}$  → resposta do teste;
- $\mu_i = \mu + \tau_i$  → sendo  $\mu$  um valor comum para todas as observações (média) e  $\tau_i$  um valor característico/único de cada observação;
- $\epsilon_{ij}$  → erro. É assumido que o mesmo possui distribuição normal e independente, com média zero e variância  $\sigma^2$ .

**Tabela 4-2 – Número de amostras por tratamento.**

% Madeira	Replica			
	n1	n2	n3	n4
20%	y11	y12	y13	y14
30%	y21	y22	y23	y24
40%	y31	y32	y33	y34
50%	y41	y42	y43	y44

A variável  $\tau_i$  é definida como sendo o desvio da média da população,  $\mu$ , e, portanto, seu somatório para todas as observações é nulo (Equação 4-2), sendo cada observação tratada como uma população normal, com média  $\mu_i$  e variância  $\sigma^2$  (Figura 4-3).

$$\sum_{i=1}^a \tau_i = 0 \quad (4-2)$$

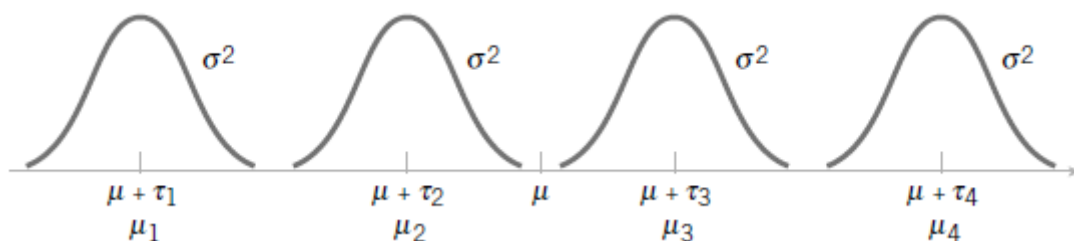


Figura 4-3 – Modelo de uma amostra linear completamente randomizada.

Seguindo o definido, para cada experimento realizado, foram fabricadas 16 amostras, sendo 4 réplicas para cada nível.

Portanto, o seguinte teste de hipóteses foi realizado:

- $H_0: \tau_{11} = \tau_{12} = \dots = \tau_{44} = 0;$
- $H_a: \tau_{ij} \neq 0$  para pelo menos um  $i;$
- $\alpha = 95\%.$

Para o cálculo dos parâmetros da ANOVA, foi utilizado o software Minitab Release 14.0.

#### 4.2.2 Regressão Linear Simples

Após investigar o efeito da composição da madeira na resposta das variáveis, foi realizada uma regressão linear simples para as seguintes propriedades mecânicas avaliadas:

- Tensão: força máxima e na ruptura;
- Módulo de elasticidade;
- Energia absorvida no teste de resistência a impacto.

As regressões também foram realizadas por meio do software Minitab Release 14.0.

### 4.3 Procedimentos realizados

O procedimento experimental executado é descrito a seguir.

#### 4.3.1.1 Obtenção dos Corpos de Provas

As composições das misturas propostas podem ser observadas na Tabela 4-3.

Tabela 4-3 – Composições dos compostos plásticos.

Mistura	Composição (em peso de madeira)				
PE + madeira	0% (PE puro)	20%	30%	40%	50%
PP + madeira	0% (PP puro)	20%	30%	40%	50%



As amostras da Tabela 4-3 serão denominadas nesse trabalho de: PE, PE20, PE30, PE40, PE50, PP, PP20, PP30, PP40 e PP50.

O processo proposto inicialmente para processamento das misturas e obtenção dos corpos de prova foi a extrusão seguida da injeção. Antes de iniciar, constatou-se que a granulometria da serragem estava muito alta e, portanto, inadequada à extrusão. A serragem foi então colocada em um moinho de bolas, mas não foi observado uma diminuição significativa na granulometria da serragem. Outra tentativa de moagem foi feita no moinho de facas, onde a serragem foi passada três vezes. A granulometria final é ilustrada na Figura 4-4.



**Figura 4-4 – Fotografia da granulometria da serragem após moagem pelo moinho de facas.**

Em seguida, procedeu-se à pesagem da serragem e dos polímeros. Foram feitas as misturas de PE ou PP e serragem, sendo que cada mistura possuía massa total de 200g e composição, em peso, segundo a Tabela 4-3. Tal massa deve-se ao fato de que a capacidade da extrusora era reduzida e, portanto, foi adotado um valor que a mesma suportasse. Deu-se início à extrusão das misturas.

A extrusora foi configurada para que as zonas de alimentação, compressão e controle de vazão do cilindro operassem nas temperaturas de 185, 190, 185 e 170°C e a rosca operasse na velocidade de 50rpm (CRUZ-ESTRADA, 2009; BEHRAVESH, 2009; CUI, 2008). A extrusão do PE e do PE20 foram bem sucedidas. Os “espaguetes” obtidos foram passados por um triturador acoplado à extrusora, de forma a obter-se os “pellets” de madeira plástica. Entretanto, a extrusão do PE30 não foi completa porque a extrusora obstruiu-se com a serragem. Chegou-se à conclusão que a granulometria da serragem ainda estava maior do que a suportada pela extrusora. A serragem foi novamente levada ao moinho de facas por mais cinco vezes, mas verificou-se que a granulometria ainda se manteve aproximadamente a mesma.

Para contornar o problema, foi obtida a madeira do tipo paraju em pó. O pó de madeira foi peneirado utilizando-se uma peneira com abertura de 24mesh. Pesou-se novamente o PE e a madeira seca, fizeram-se as misturas nas devidas composições e a nova tentativa de extrusão das misturas. Foi realizada a extrusão do PE e dos PE20, PE30 e PE40, mas alguns problemas foram observados durante a extrusão.

Primeiro, percebeu-se que o “espaguete” não saiu com cor uniforme durante a extrusão de cada mistura, devido à dificuldade de homogeneizar a mistura polímero/madeira antes de colocá-la na extrusora (isso por causa da diferença entre a granulometria dos “pellets” de polímero e do pó da

madeira). Foi observado, também, que alguns “pellets” ficaram com cor significativamente mais escura que outros na extrusão da mesma amostra, provavelmente devido à decomposição do material. O segundo problema foi que, a partir do final da extrusão da mistura PE30, o processo começou a ficar demorado devido à grande quantidade de água (proveniente da umidade da madeira) acumulada no interior da extrusora. Por fim, a extrusão da mistura PE40 produziu “espaguetes” muito quebradiços, que chegavam a apenas cerca de 5 a 10cm de comprimento, dificultando a trituração.

Algumas soluções foram propostas para solucionar os problemas:

- Uso do agente compatibilizante MAPP, mas não foi possível comprar o produto em tempo hábil;
- Uso de uma extrusora de rosca dupla para melhor homogeneização da mistura, mas não foi possível obter acesso a uma extrusora disponível;
- Secagem da madeira em pó na estufa antes de a mistura ser processada;
- Moagem dos “pellets” dos polímeros para diminuição de sua granulometria e, portanto, melhorar a homogeneização das misturas.

Não foi obtido sucesso na tentativa de moer os pellets de PE e PP reciclados utilizando um liquidificador industrial e um moinho analítico. Ao mesmo tempo, foi informado de que a extrusora de rosca simples em uso foi danificada e não havia previsão de conserto. A alternativa escolhida para solucionar o problema da homogeneização foi a utilização de um Thermo Haake.

Foi reiniciado, portanto, a preparação e o processamento das misturas. O pó de madeira foi levado à estufa por 48 horas, à temperatura de 65°C. Posteriormente, o pó seco e os “pellets” de polímeros foram pesados, obtendo-se duas amostras de massa igual a 50g (devido à capacidade do equipamento) para cada composição, segundo a Tabela 4-3. Ou seja, foram preparadas 100g de cada composição, dividida em duas amostras de 50g. Cada amostra de 50g foi levada ao Thermo Haake.

As amostras de PE e madeira foram processadas à temperatura de 150°C e as amostras de PP e madeira à temperatura de 180°C. Depois de dez minutos de processamento, cada amostra foi retirada do Thermo Haake com o auxílio de uma espátula e cortada. Na Figura 4-5, é mostrada uma fotografia com as amostras após serem processadas pelo Thermo Haake.

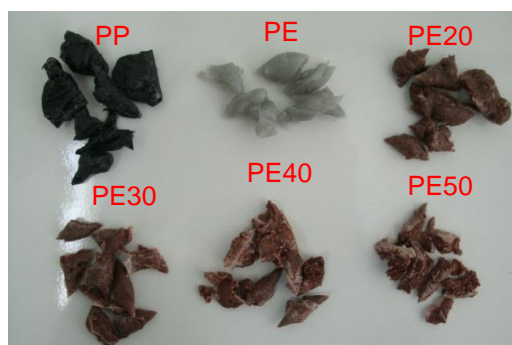


Figura 4-5 – Fotografia do PP puro, PE puro, PE20, PE30, PE40 e PE50, após processamento pelo Thermo Haake.

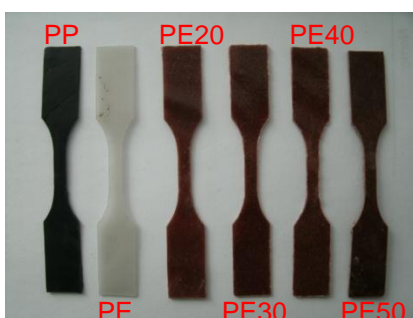
Para obtenção dos corpos de prova, foi utilizado, primeiramente, a injeção das misturas processadas pelo Thermo Haake, no entanto, os corpos de prova obtidos não se formaram completamente. Na Figura 4-6 podem ser observados os copos de prova com má formação.



**Figura 4-6 – Fotografia dos corpos de prova formados incompletamente.**

Portanto, optou-se pela prensagem, para obtenção dos corpos de prova. Para cada composição, três placas foram prensadas. Uma delas foi prensada com a espessura de aproximadamente 0,9mm e as outras duas com a espessura de cerca de 3mm, conforme estabelece a norma. A prensagem foi realizada para o PE e para as amostras de PE e madeira, à temperatura de 150°C. Para a prensagem das amostras com o PP, foi utilizada a temperatura 180°C. As placas de PP foram prensadas, no entanto, não foi possível prensar as placas das amostras de PP e madeira porque a prensa térmica não chegou à temperatura necessária, uma vez que, aparentemente, uma resistência queimou. Portanto, os testes foram realizados com o PE e todas as amostras de PE e madeira.

Para obtenção dos corpos de prova para o teste de tensão (Figura 4-7), a placa com espessura mais fina foi cortada utilizando-se uma faca com este formato e uma prensa para auxiliar o corte.



**Figura 4-7 – Fotografia dos corpos de prova para o teste de tensão das amostras de PP puro, PE puro, PE20, PE30, PE40 e PE50.**

Para obtenção dos corpos de prova para os testes de resistência a impacto, Figura 4-8 e Figura 4-9, as duas placas mais grossas foram cortadas em formato retangular, de comprimento aproximado de 66mm e largura em torno de 12mm, utilizando uma guilhotina. Em seguida, foram feitos os entalhes nos corpos de prova, com profundidade de 2,5mm.



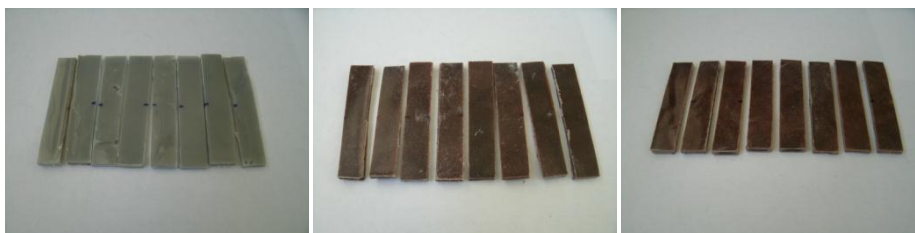


Figura 4-8 – Fotografia das placas cortadas com o auxílio de uma guilhotina – Teste de resistência ao impacto.



Figura 4-9 – Fotografia dos corpos de prova entalhados para o teste de resistência a impacto.

#### 4.3.1.2 Testes mecânicos

Nos tópicos a seguir serão abordados os testes mecânicos realizados.

##### 4.3.1.2.1 Teste de tensão

O teste de tensão foi realizado de acordo com a norma ASTM-D638. Por meio desse ensaio, são obtidas curvas de tensão em função da deformação, a partir das quais, podem ser obtidos o módulo de elasticidade à tração, tensão de deformação no ponto de escoamento, tensão e deformação na ruptura e tensão máxima.

O equipamento utilizado foi a Máquina Universal de Ensaio, EMIC, DL-30KN.

##### 4.3.1.2.2 Teste de resistência ao impacto

O teste de resistência ao impacto foi realizado de acordo com a norma ASTM-D256. O equipamento utilizado foi uma Máquina Instron, CEAST 9050.

#### 4.3.1.3 Testes analíticos

Nos tópicos a seguir serão abordados os testes analíticos realizados.

##### 4.3.1.3.1 Análise por espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros de absorção na região do infravermelho para as amostras, na faixa de  $4000$  a  $650\text{cm}^{-1}$ , foram obtidos em espectrofotômetro FTIR modelo Nicolet 6700 da Thermo Fisher Scientific, no modo ATR, com 64 varreduras e resolução de  $4\text{cm}^{-1}$  (cristal Ge).

##### 4.3.1.3.2 Termogravimetria

A análise termogravimétrica foi realizada com a utilização do equipamento TGA-50 Shimadzu.

Para todas as amostras, foram realizados os testes a partir da temperatura ambiente ( $\pm 20^{\circ}\text{C}$ ) até  $800^{\circ}\text{C}$ , a uma razão de aquecimento  $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . A atmosfera foi inertizada com nitrogênio, a uma vazão de  $50 \text{ mL}/\text{min}$ . A massa utilizada foi de  $7,923$  a  $8,791 \text{ mg}$ .

#### 4.3.1.3.3 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A análise térmica do tipo DSC foi realizada com a utilização do equipamento DSC-60 Shimadzu.

Para todas as amostras poliméricas foram realizadas duas corridas, iniciando o aquecimento da temperatura ambiente ( $\pm 20^{\circ}\text{C}$ ), indo até  $180^{\circ}\text{C}$  para a primeira corrida, e, para a segunda corrida, da temperatura ambiente até  $250^{\circ}\text{C}$ , a uma razão de aquecimento  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , para ambas as corridas. A atmosfera foi inertizada com nitrogênio, a uma vazão de  $50 \text{ mL}/\text{min}$ . Para efeito de determinação das temperaturas de transição, foi utilizado como referência a curva DSC da 2ª corrida. As massas utilizadas foi de  $4,23$  a  $6,20 \text{ mg}$ .

## 4.4 Análise Econômica

A análise econômica foi realizada considerando uma usina de madeira plástica, com capacidade de reciclagem de PE (todos os tipos), PP e fabricação dos seguintes produtos:

- Dormentes;
- Pallets;
- Perfis;
- Estacas.

Durante a análise econômica foram adotadas algumas premissas, como, por exemplo, capacidade e tamanho da planta. Na Tabela 4-4 podem ser observadas as principais premissas do projeto.

Além disso, foi considerado que será adquirido um terreno na região metropolitana de Belo Horizonte a um custo de  $\text{R}\$300,00/\text{m}^2$  para a construção do empreendimento. Na Figura 4-10 pode ser observado o layout preliminar do empreendimento.

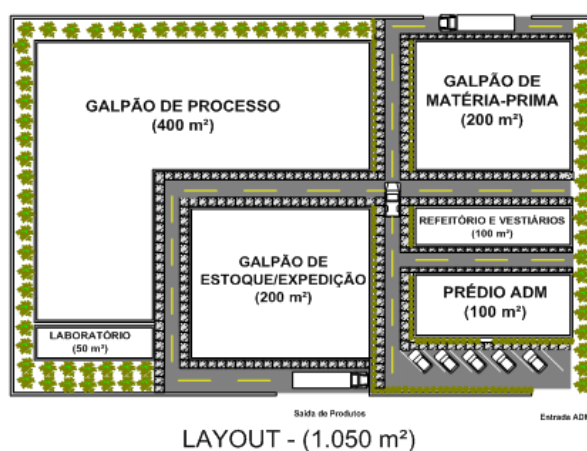


Figura 4-10 – Layout do empreendimento.

**Tabela 4-4 – Principais premissas adotadas para a análise econômica.**

Premissa	Valor	Justificativa
Capacidade Projetada	300 ton/mês	Capacidade inicial de acordo com o CAPEX estimado necessário compatível com as principais linhas de crédito.
Tamanho da Planta	1.050 m <sup>2</sup>	Capacidade planejada de acordo com o cálculo estimado da área necessária.
Taxa mínima de atratividade	10,8%	1,5 vezes a SELIC atual (7,25%)
Inflação	6% a.a	Baseado no histórico atual.
Taxa de Juros	8%	Média dos juros total do programa Pró-Plástico do BNDES.
Tempo de carência	3 anos	Tempo de acordo com o programa pró-plástico do BNDES.
Ciclo de investimento em CAPEX	10 anos	Média da vida útil dos equipamentos.
% Custo de Comercialização (CVV – lucro presumido)	24,93%	Impostos e taxas.
Crescimento de receita	Ano 1: 50% da capacidade instalada; Ano 2 ao 10: 10% a.a. Ano 10 a 15: 2,5%	Estimativa de crescimento elevado nos primeiros anos e depois crescimento de acordo com a estimativa do PIB.
Tempo de análise do projeto	15 anos	1,5 vezes o prazo do financiamento.

Para a análise econômica, faz-se necessário levantar os custos mensais e anuais da empresa. Nas Tabela 4-5 a Tabela 4-8 estão às quantidades e valores estimados e considerados na análise.

A base salarial foi obtida em: <http://www.guiarh.com.br/tabeladesalarios.htm> e <http://www.ceviu.com.br/salario/tabela-pretensao-salarial-estagiario-belo-horizonte-mg>.

Considerou-se que o custo real de mão-obra para a empresa é o dobro do custo com salários pagos aos trabalhadores. Essa consideração é bastante conservadora e visa cobrir gastos como 13º salário, INSS, FGTS, férias, vale-transporte e plano de saúde.

**Tabela 4-5 – Estimativa de mão de obra.**

<b>Quadro Operacional</b>			
Recurso	Quantidade	Salário Mensal Unitário	Salário Mensal
Estagiário (nível superior)	1	R\$ 1,100.00	R\$ 1,100.00
Auxiliares de Produção	8	R\$ 1,100.00	R\$ 8,800.00
Técnico em Mecânica	1	R\$ 2,200.00	R\$ 2,200.00
Técnico em Elétrica	1	R\$ 2,200.00	R\$ 2,200.00
Analista de CQ	1	R\$ 2,200.00	R\$ 2,200.00
Coordenador de Produção	1	R\$ 7,000.00	R\$ 7,000.00
Motorista	2	R\$ 2,500.00	R\$ 5,000.00
		Sub-total	<b>R\$ 28,500.00</b>
<b>Quadro Administrativo</b>			
Recurso	Quantidade	Salário Mensal Unitário	Salário Mensal
Estagiário	2	R\$ 1,100.00	R\$ 2,200.00
Recepcionista	1	R\$ 1,000.00	R\$ 1,000.00
Segurança	2	R\$ 1,500.00	R\$ 3,000.00
Auxiliar ADM	1	R\$ 1,200.00	R\$ 1,200.00
Técnico em Informática	1	R\$ 1,800.00	R\$ 1,800.00
Analista de RH/Assistente DP	1	R\$ 2,000.00	R\$ 2,000.00
Vendedores	5	R\$ 4,500.00	R\$ 22,500.00
CEO	1	R\$ 10,000.00	R\$ 10,000.00
		Sub-total	<b>R\$ 43,700.00</b>

Os investimentos necessários para a construção da infra-estrutura do empreendimento foram estimados usando o valor do Custo Unitário Padrão para o estado de Minas Gerais [WWW.CUB.ORG.BR]. Esses valores foram acrescidos de um fator de segurança de 20%, com o intuito de cobrir itens não contemplados pelo cálculo do custo unitário básico (CUB) como, por exemplo, a remuneração do construtor.

**Tabela 4-6 – Custos com a construção e Infraestrutura.**

Instalação	Área (m <sup>2</sup> )	Custo por metro (R\$/m <sup>2</sup> )	Custo (R\$)
Galpão de Matéria-prima	200	R\$ 531.91	R\$ 106,382.00
Galpão de Processo	400	R\$ 531.91	R\$ 212,764.00
Galpão de Estoque e Expedição	200	R\$ 531.91	R\$ 106,382.00
Refeitório e Vestiário	100	R\$ 1,004.81	R\$ 100,481.00
Laboratório de CQ e PPC	50	R\$ 1,004.81	R\$ 50,240.50
Prédio ADM	100	R\$ 1,004.81	R\$ 100,481.00
		TOTAL	R\$ 676,730.50
Item	Custo Estimado (R\$)		
Mobiliário	R\$ 12,000.00		
Equipamentos eletrônicos (computadores, impressora, etc)	R\$ 22,500.00		
Material de escritório	R\$ 1,000.00		
EPIs	R\$ 5,000.00		
Caminhão 1 (MP)	R\$ 100,000.00		
Caminhão 2 (Produto)	R\$ 100,000.00		
Montagem dos equipamentos	R\$ 79,668.50		
TOTAL	R\$ 320,168.50		

Tabela 4-7 – Custos com equipamentos.

Equipamento	Custo unitário	Quantidade	Custo total
Linha de tratamento de plásticos reciclados completa com lavagem de resíduos	R\$ 255,000.00	1	R\$ 255,000.00
Misturador	R\$ 98,000.00	1	R\$ 98,000.00
Aglutinador	R\$18,100.00	1	R\$ 18,100.00
Extrusora granuladora	R\$ 130,000.00	1	R\$ 130,000.00
Linha de extrusoras para perfis	R\$ 83,880.00	1	R\$ 383,880.00
Conjunto de moldes para dormentes	R\$ 172,520.00	1	R\$ 172,520.00
Conjunto de moldes para pallets	R\$ 138,870.00	1	R\$ 138,870.00
Conjunto de moldes para tábuas	R\$ 165,000.00	1	R\$ 165,000.00
Conjunto de moldes para estacas	R\$ 112,000.00	1	R\$ 112,000.00
Equipamentos para laboratório	R\$ 100,000.00	1	R\$ 100,000.00
Equipamento para manuseio de carga	R\$ 5,000.00	4	R\$ 20,000.00
		SUB-TOTAL	R\$ 1,593,370.00
Frete equipamentos	R\$ 197,296.25	1	R\$ 197,296.25
<b>TOTAL</b>			<b>R\$ 1,790,666.25</b>

Tabela 4-8 – Custos operacionais.

Item	Mensal	Custo Anual	Custo/ton
Mão-de-Obra	R\$ 144,400.00	R\$ 1,732,800.00	R\$ 481.33
Insumos	R\$ 18,112.50	R\$ 217,350.00	R\$ 60.38
Manutenção e Reparos	R\$ 5,968.89	R\$71,626.65	R\$ 19.90
Material de escritório	R\$ 200.00	R\$ 2,400.00	R\$ 0.67
Material de Limpeza	R\$ 500.00	R\$ 6,000.00	R\$ 1.67
Energia Elétrica	R\$ 16,200.00	R\$ 194,400.00	R\$ 54.00
Água	R\$ 2,750.00	R\$33,000.00	R\$ 9.17
Telefone/Internet	R\$ 500.00	R\$ 6,000.00	R\$ 1.67
Seguros	R\$ 1,393.78	R\$ 16,725.39	R\$ 4.65
Marketing	R\$ 1,000.00	R\$ 12,000.00	R\$ 3.33
Treinamentos	R\$ 3,751.07	R\$ 45,012.86	R\$ 12.50
Laboratório	R\$ 5,000.00	R\$ 60,000.00	R\$ 16.67
Contador	R\$ 1,000.00	R\$ 12,000.00	R\$ 3.33
Aluguel	R\$ 7,000.00	R\$ 84,000.00	R\$ 23.33
<b>Sub-Total</b>	<b>R\$ 207,776.24</b>	<b>R\$ 2,493,314.90</b>	<b>R\$ 692.59</b>
Outros	R\$ 10,388.81	R\$ 124,665.74	R\$ 34.63
Transporte e frete	R\$ 1,662.21	R\$19,946.52	R\$ 5.54
<b>Total</b>	<b>R\$ 219,827.26</b>	<b>R\$ 2,637,927.16</b>	<b>R\$ 732.76</b>

Para realizar os cálculos de TIR, VPL e payback, foi estimada a formação dos preços unitários dos produtos que serão comercializados, conforme mostrado na Tabela 4-9.

Tabela 4-9 – Formação dos preços.

Produto	Ton/peça	Preço custo/peça:
Dormentes	0.085	R\$ 62.28
Pallets	0.02	R\$ 14.66
Perfis	0.01	R\$ 7.33
Estacas	0.003	R\$ 2.20

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados serão apresentados de acordo com a categoria da análise, já tratados e formatados. Todos os resultados obtidos dos experimentos, softwares e cálculos realizados estão apresentados nos ANEXO A – TESTE DE TRAÇÃO ao ANEXO G – ANÁLISE ECONÔMICA.

### 5.1 Testes Mecânicos

Nos tópicos a seguir serão apresentados os resultados e discussão dos testes mecânicos realizados.

#### 5.1.1 Testes de Tração

Para os testes de tensão, foram selecionados quatro corpos de prova para cada composição, de forma a garantir uniformidade na análise. Na Tabela 5-1 são apresentadas as médias dos resultados obtidos. Todos os resultados desses testes são apresentados no ANEXO A – TESTE DE TRAÇÃO.

**Tabela 5-1 – Média dos resultados obtidos – Teste de Tensão.**

Propriedade	PE	PE20	PE30	PE40	PE50
Tensão na Força Máxima (MPa)	27,74	21,39	17,61	14,85	12,55
Tensão na Ruptura (MPa)	0,23	19,73	15,66	12,52	9,96
Módulo de Elásticidade (MPa)	140,99	91,77	73,39	64,05	47,41
Deformação na Força Máxima (%)	42,68	43,74	47,21	44,58	42,03
Deformação na Ruptura (%)	0,2	45,22	48,20	46,60	44,24

Comparando-se os valores obtidos para o PE na Tabela 5-1 com os valores comerciais do PEAD (Tabela 5-2) é possível observar a convergência do valor da tensão na tração. Os valores divergentes da tensão na ruptura e sua respectiva deformação podem ser atribuídos ao fato de que, durante a realização dos testes, as amostras, devido a capacidade de deformação plástica do polietileno, esticavam-se, deformavam-se e não se rompiam. No gráfico da Figura A 1 (Anexo A) fica evidente esse fenômeno, uma vez que, é observado que as amostras vão se deformando continuamente, chegando a casos em que não foi possível calcular esses valores.

Ainda em relação a Tabela 5-1 pode ser observado que, com o aumento da quantidade de madeira na formulação, mais próximo é o comportamento da tensão na força máxima do composto em relação ao comportamento característico da tração paralela ou normal às fibras da madeira pura, já que a madeira apresenta baixos valores de deformação quando tracionada conforme pode ser observado na Tabela 3-11 – Propriedades da Madeira. Ou seja, na medida em que a quantidade de fibras

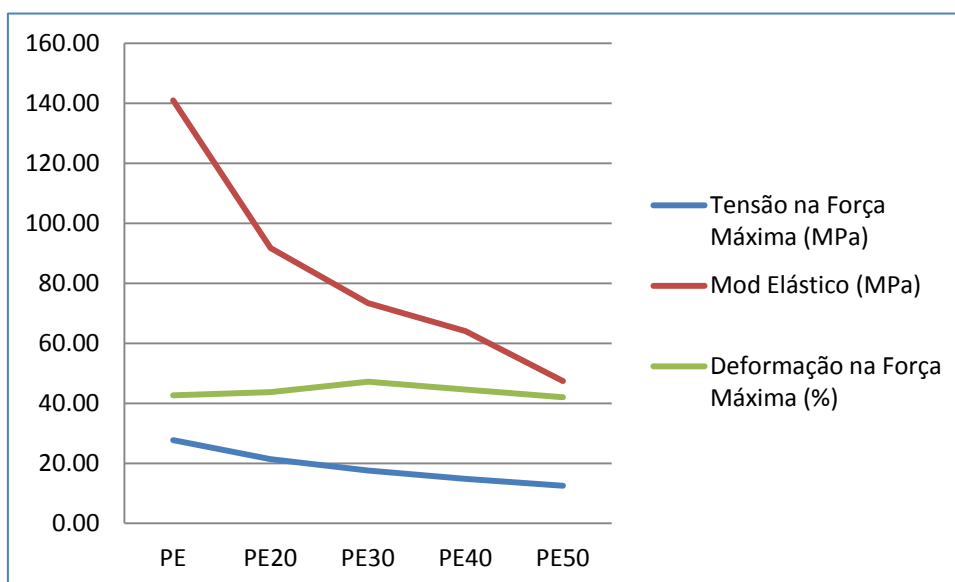
aumenta na composição, mais as propriedades mecânicas do composto se equiparam às propriedades da madeira.

**Tabela 5-2 – Dados do PEAD comercial. Fonte: Hipermetal Comércio e Indústria Ltda**

Propriedades Mecânicas	Unidades	Normas	Valores
- Tensão de escoamento à tração	MPa	DIN 53455 ASTM D638 ISO R 527	29
- Tensão de ruptura à tração	MPa	DIN 53455 ASTM D638	35
- Tensão de ruptura à compressão	MPa	ASTM D695	20
- Tensão de ruptura à flexão	MPa	ASTM D790	---
- Módulo de elasticidade à tração	MPa	DIN 53457 ASTM D638 ISO R527	900
- Módulo de elasticidade à compressão	MPa	ASTM D695	---
- Módulo de elasticidade à flexão	MPa	DIN 53457 ASTM D790	1400
- Elongação até ruptura	%	DIN 53452 ASTM D638 ISO R 527	500
- Resistência ao impacto	KJ/m2	DIN 53453 ASTM D256 ISO R 179	n.q. n.r. n.b.

Nos gráficos das Figura A 2 a Figura A 5 (Anexo A) pode ser observado, também, que a inserção da madeira na matriz polimérica reduz, principalmente, a deformação plástica do material, uma vez que, quando submetida a um esforço de tração, a madeira apresenta uma deformação plástica pequena.

Na Figura 5-1 pode ser observado o comportamento das propriedades, de acordo com a porcentagem de fibras na matriz polimérica. Por meio da curva vermelha, fica evidente a redução do módulo elástico das amostras na medida em que a porcentagem de madeira aumenta na matriz polimérica. O mesmo comportamento é observado para a tensão na força máxima (curva azul), porém com uma intensidade menor. Ou seja, com o aumento da quantidade de fibras na matriz polimérica, tanto a tensão na força máxima quanto o módulo elástico diminuem.



**Figura 5-1 – Comportamento das amostras de acordo com os valores dos testes de força máxima de tensão, módulo elástico e a deformação máxima.**

Conforme relatado no item 3.6.1 (página 36), quanto maior a porcentagem de madeira, menor é a tensão na força máxima, a tensão na ruptura e o módulo elástico do material, já que, com a inserção

da madeira na matriz polimérica, menor é a intensidade das interações entre as cadeias, fazendo com que a capacidade do composto em resistir à tração, diminua.

Uma forma de reverter essa queda nas propriedades mecânicas é a adição de um agente compatibilizante. O mesmo é responsável por homogeneizar o composto fazendo com que a madeira, com características polares, permeie a matriz polimérica, que tem características apolares.

Já em relação à porcentagem da deformação na força máxima, curva verde da Figura 5-1, pode ser observado que os valores obtidos foram próximos, com uma capacidade em deformar-se levemente maior para o PE30. Tal proximidade dos valores pode ser atribuída ao fato de que a capacidade de deformar depende predominantemente do polietileno.

Em relação aos testes na ruptura, Figura 5-2, pode ser observado que a porcentagem de deformação na ruptura (curva roxa) é praticamente constante, com um valor ligeiramente mais elevado para a capacidade do PE30 em deformar-se, no entanto, essa variação não é significativa, uma vez que, os valores estão dentro do desvio padrão. Tal constância pode ser atribuída, também, ao fato de que a capacidade de deformar depende predominantemente do polietileno.

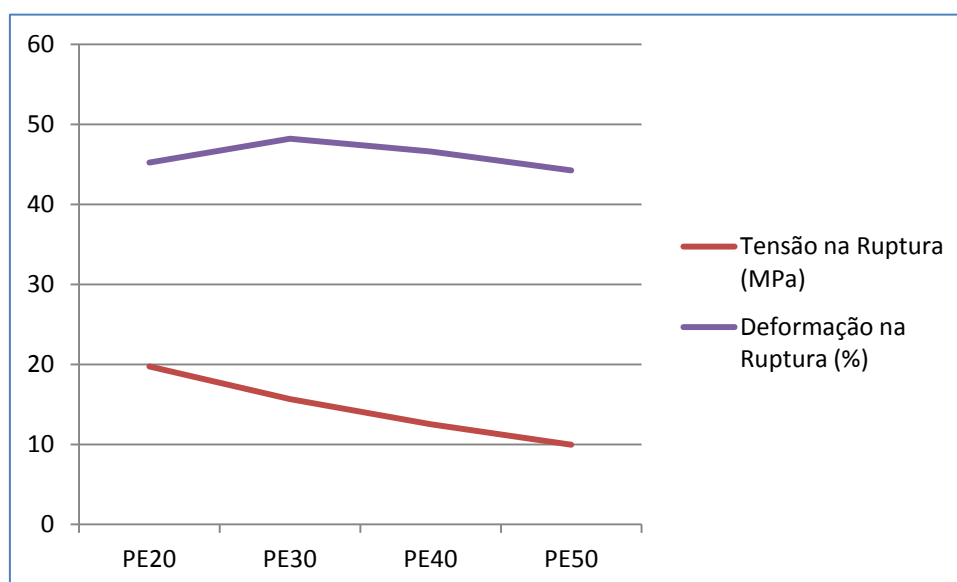


Figura 5-2 – Comportamento das amostras de acordo com os valores dos testes de tensão na ruptura e deformação na ruptura.

Já a tensão na ruptura (curva vermelha) diminui na medida em que a porcentagem de madeira na amostra aumenta. Isso se deve, também, ao fato de que as fibras aloca-se entre as cadeias poliméricas, diminuindo a intensidade das forças intermoleculares dessas cadeias.

### 5.1.2 Testes de Resistência ao Impacto

Semelhantemente ao teste de tensão, para a análise dos resultados dos testes de resistência ao impacto foram selecionados quatro corpos de provas para cada composição. Na Tabela 5-3 são apresentadas as médias dos resultados obtidos, sendo os mesmos apresentados na íntegra no ANEXO B – TESTES DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO.



**Tabela 5-3 – Média dos resultados obtidos – Teste de Resistência ao Impacto.**

Amostra	Espessura (mm)	Largura (mm)	Energia absorvida (J)	(%) Energia absorvida	Energia por distância (J/m)	Energia por área (J/m <sup>2</sup> )	Velocidade de impacto	Ângulo de alcance (°)
PE	3,00	12,21	0,12	2,27	3,42	41,78	3,63	-144,80
PE20	3,11	12,29	0,09	1,66	2,38	29,29	3,55	-145,95
PE30	2,99	12,86	0,10	1,81	2,59	33,24	3,66	-145,66
PE40	3,15	13,17	0,10	1,80	2,39	31,41	3,68	-145,69
PE50	3,24	13,03	0,08	1,53	1,99	25,93	3,61	-146,20

Por meio dos resultados apresentados na Figura 5-3 e na Tabela 5-3 pode-se observar a influência da adição da fibra na matriz polimérica. Fica evidente que, com a adição da madeira, a quantidade de energia absorvida por m<sup>2</sup> diminui. Isto pode ser explicado pelo fato de que, a presença de fibras de madeira no interior do corpo do composto pode ser o ponto de início de uma rachadura, com consequente falha do material. As extremidades das fibras de madeira agem como entalhes e, portanto, geram concentrações de tensões consideráveis, que podem iniciar microfissuras na matriz. Após o carregamento, essas microfissuras coalescem em uma fibra, de modo a formar uma fenda principal. Além disso, a interação entre as fibras vizinhas restringem o fluxo de energia na matriz, o que resulta em fragilidade da amostra.

Uma forma de amenizar a capacidade de absorção de energia no impacto seria a adição de um agente compatibilizante, como, por exemplo, o MAPP. A incorporação dessa substância pode melhorar a ligação interfacial entre os dois materiais, uma vez que, os mesmos possuem polaridade invertida. Com esse reagente, as moléculas de polietileno de alta densidade preenchem as cavidades da superfície das fibras de madeira, formando interbloqueios mecânicos, no entanto, devido a alta viscosidade do PEAD, esse preenchimento irá variar com outras variáveis de processo. Aumentando-se as temperaturas de processamento pode, teoricamente, melhorar a capacidade do polímero escoar. No entanto, temperaturas elevadas (superiores a 200°C) podem levar à decomposição inicial e carbonização das fibras de madeira, com consequente redução das propriedades mecânicas da madeira plástica.

Pode-se notar, também, que dentre as composições de madeira plástica estudada, o PE30 foi a que conseguiu absorver maior quantidade de energia, indicando uma possível vantagem para essa composição em relação às demais.

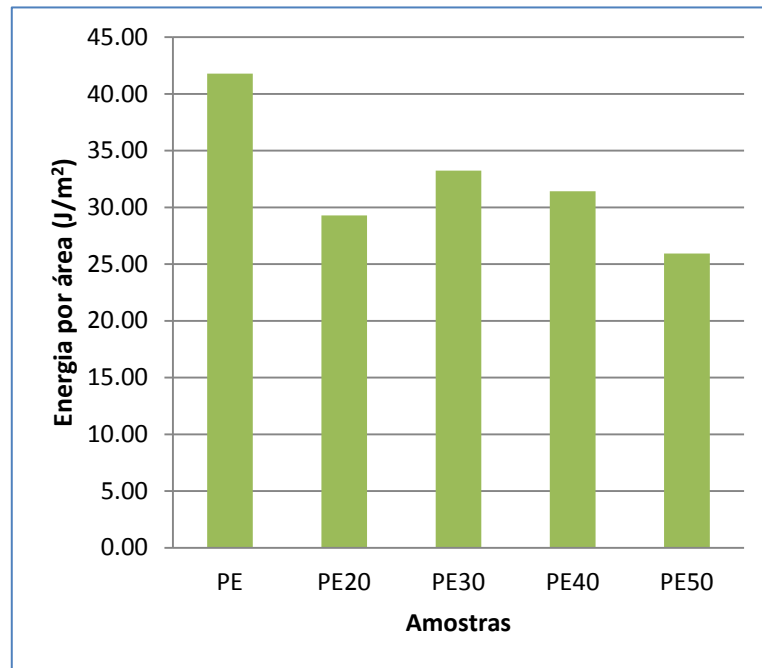


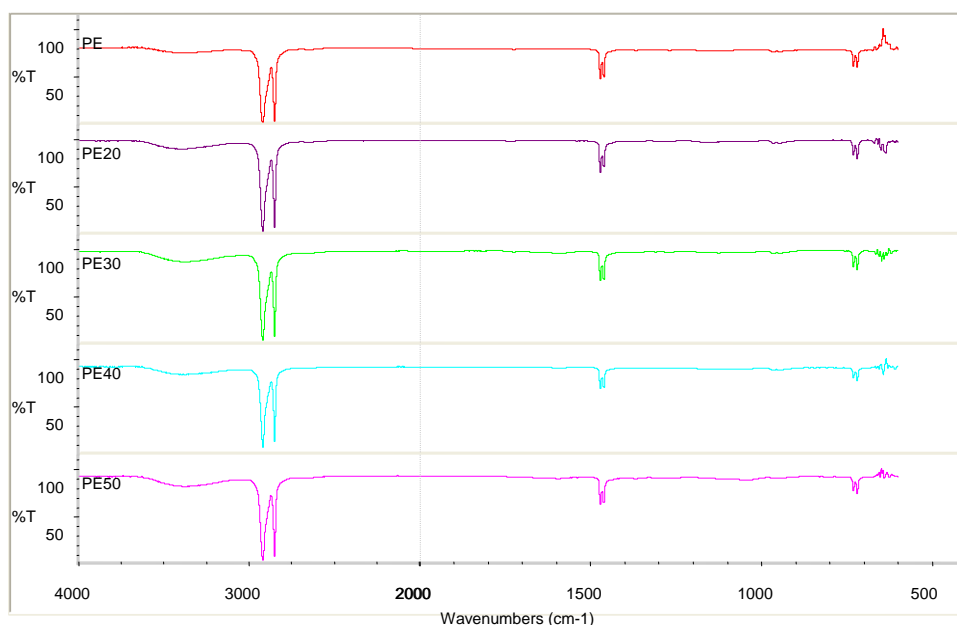
Figura 5-3 - Comportamento das amostras de acordo com os valores da energia absorvida por área.

## 5.2 Testes Analíticos

Nos tópicos a seguir, serão apresentados os resultados e análises dos testes analíticos realizados.

### 5.2.1 Análise por Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Na Figura 5-4 pode ser observado o espectro de FTIR das amostras de polietileno e polietileno com adição de pó de madeira na matriz polimérica. Os resultados obtidos para cada amostra podem ser observados no ANEXO C – ANÁLISE POR ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).



**Figura 5-4 – Espectros obtido das amostras de polietileno e polietileno com adição de pó de madeira.**

Por meio da Figura 5-4, nota-se que, em todos os espectros, foram observadas bandas de absorção características de Polietileno, ou seja, três bandas de absorção associadas aos três modos de vibração da ligação C-H.

Na região entre  $3.000$  e  $2.750\text{ cm}^{-1}$  é a região característica da ligação C-H “stretching”. Entre  $1.500$  e  $1.400\text{ cm}^{-1}$  e entre  $800$  e  $500\text{ cm}^{-1}$  podem ser atribuídas, respectivamente, à ligação C-H “bending” e “rocking” (SNYDER, 1980). A banda de absorção em torno de  $3400\text{ cm}^{-1}$ , que aparece em todos os espectros, é atribuída à presença de umidade (OH).

Ou seja, uma vez que a adição da madeira na matriz polimérica não representa uma mudança nos grupos funcionais do polietileno, não era de se esperar alterações no espectro das amostras, o que pôde ser confirmado pelos resultados obtidos na Figura 5-4.

### 5.2.2 Análise Termogravimétrica (TG)

Os resultados obtidos para cada amostra podem ser consultados no ANEXO D – ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA.

As curvas mostradas nas Figura D 1 a Figura D 5 (Anexo D) representam a perda de massa (%) e a derivada dessa perda (DrTGA) em função da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ). Analisando-se essas figuras, percebe-se que, para todas as amostras contendo madeira, a perda de massa ocorre em três estágios, enquanto que o PE degrada-se em um único estágio. A madeira plástica inicia a degradação (Onset - temperatura em que se inicia a decomposição térmica) antes da degradação do polietileno, por ser menos estável termicamente. No entanto, completa sua degradação (Endset - temperatura de finalização da decomposição térmica) em temperaturas acima da temperatura final de degradação do PE, talvez devido à formação de algum produto de sua degradação inicial. Todas as amostras degradam-se, quase que totalmente, até a temperatura de  $600^{\circ}\text{C}$ , pois as perdas de massa estão em torno de 99%.

Os resultados de termogravimetria apresentados indicam que a madeira plástica é termicamente estável até 250°C, uma vez que, a menor temperatura em que se iniciou o processo de degradação da amostra PE50 foi de 253°C. Isso é devido ao fato de que a madeira, por ter uma estrutura mais susceptível a uma modificação estrutural em relação ao polietileno quando submetido à ação da temperatura, degrada-se a temperaturas inferiores a do polímero e, como o PE50 é a amostra com maior quantidade de madeira, logo foi o corpo de prova em que a degradação iniciou-se a temperaturas menores em relação aos demais. No entanto, para a madeira plástica, essa temperatura, em torno de 250°C, é mais do que suficiente para aplicação nos diversos fins que a mesma pode ser empregada.

Por meio da Tabela 5-4 e Figura 5-5 pode ser observado que, quanto maior a porcentagem de madeira menor é a temperatura de Onset e maior a temperatura de Endset, conforme discutido anteriormente.

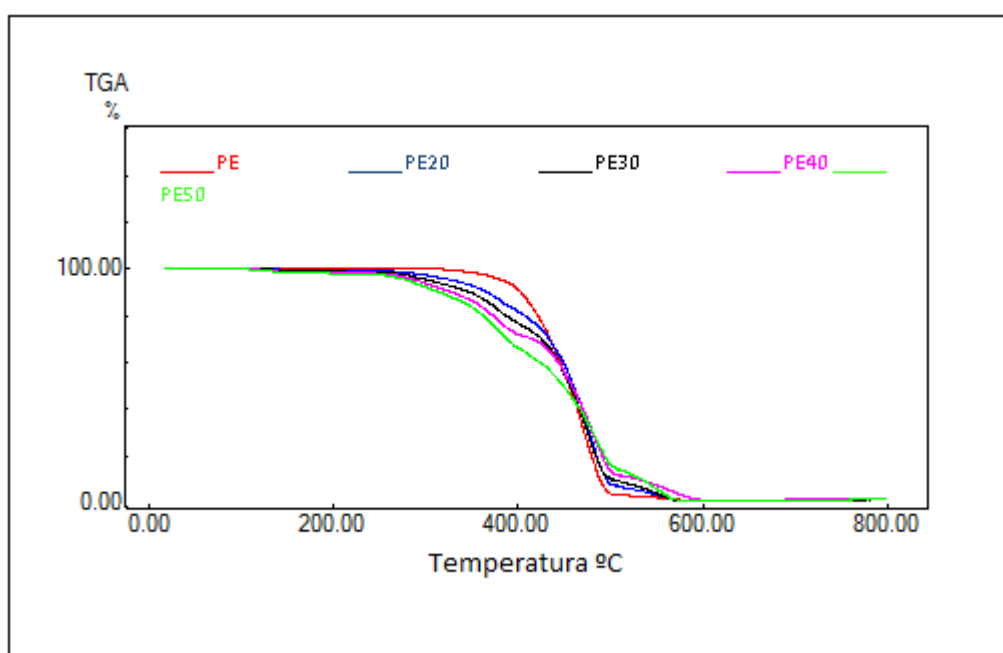


Figura 5-5 – Resultados obtidos na análise termogravimetria.

Tabela 5-4 – Comparação das propriedades observadas nas curvas TG

Amostra	Onset (°C)	Endset (°C)	Weight Loss	
			(mg)	(%)
PE	421,15	493,33	-8,253	-99,099
PE20	417,18	500,63	-7,83	-98,826
PE30	416,97	501,16	-8,69	-98,851
PE40	406,24	511,85	-7,541	-98,976
PE50	360,91	520,89	-8,474	-99,053

### 5.2.3 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

Os resultados obtidos para cada amostra podem ser consultados no ANEXO E – CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL .

Conforme apresentado na Tabela 5-5, pode ser observado que a temperatura de fusão ( $T_m$ ) das amostras se manteve entre 130-133°C (para a segunda corrida). Isso se deve ao fato de que apenas o PEAD fundiu, uma vez que, a madeira não funde e possui uma temperatura de decomposição em torno de 250°C. Além disso, é observado que a energia liberada diminui de acordo com a diminuição do PEAD na composição.

Tabela 5-5 – Comparação das propriedades observadas nas curvas obtidas pelo DSC.

Amostra	PE		PE20		PE30		PE40		PE50	
	1ª corrida	2ª corrida	1ª corrida	2ª corrida	1ª corrida	2ª corrida	1ª corrida	2ª corrida	1ª corrida	2ª corrida
Tm (°C)	132,87	131,51	136,8	130,52	131,35	130,21	130,19	131,76	133,91	132,82
Energia (J/g)	-192,61	-187,48	-152	-154,75	-143,64	-126,74	-144,77	-116,73	-99,2	-92,4

Na Figura 5-6 pode ser observado o resultado obtido para análise da calorimetria exploratória diferencial. Nota-se que, na medida em que a quantidade de madeira aumenta na composição, menor é a diferença do fluxo de energia medida entre os termopares, uma vez que a mesma está associada à fusão do polietileno e, portanto, quanto menor a massa de PEAD na amostra, menor será a energia envolvida nesse fenômeno.

Uma vez que a temperatura de transição vítrea do polietileno está abaixo da temperatura ambiente (-100 a -125°C), nos resultados obtidos para o DSC, Figura E 1 a Figura E 9 (Anexo E), é possível obter apenas as temperaturas de transição de fusão ( $T_m$ ) de cada amostra, sendo as mesmas relacionadas ao PEAD. Isso é devido ao fato de que, como não foi utilizado o agente compatibilizante, como, por exemplo, o MAPP, não houve interação entre as moléculas de madeira e as do polietileno.

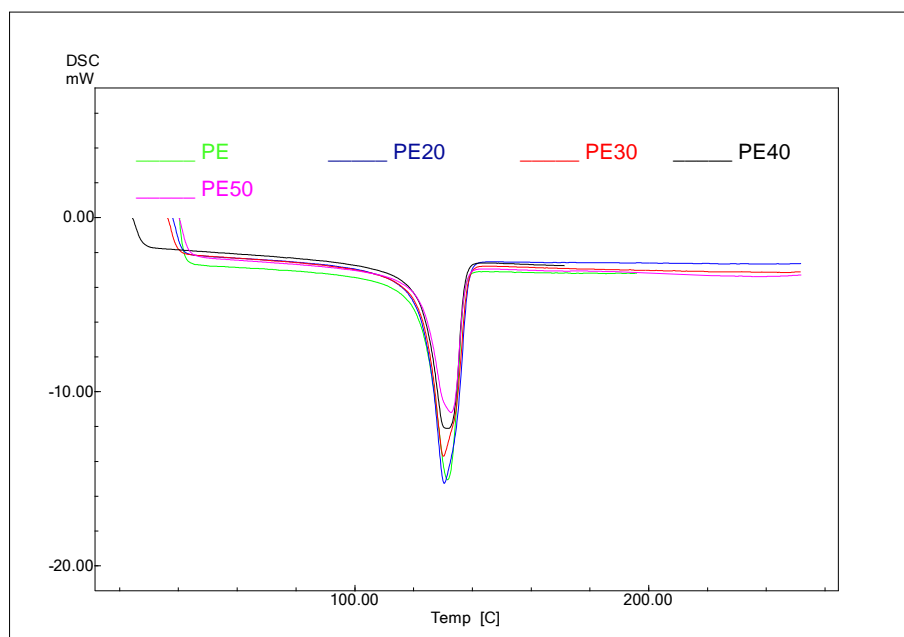


Figura 5-6 – Curvas obtidas na análise de DSC – 2ª corrida.

### 5.3 Análise Estatística

Para a realização da análise estatística, foram selecionadas quatro réplicas de cada fator e respectivos valores de tensão (força máxima), módulo de elasticidade e energia absorvida por área, conforme pode ser observado na Tabela 5-6.

Tabela 5-6 – Valores de entrada para a análise estatística.

Amostra	Corpo de Prova	%Madeira	Tensão na força Max.	Mod. Elast	Energia absorvida por área (J/m <sup>2</sup> )
y11	P201	20	22,00	110,02	40,72
y12	P202	20	18,09	91,47	40,42
y13	P203	20	22,28	91,64	36,43
y14	P204	20	24,18	113,30	38,75
y21	P301	30	17,58	44,54	34,84
y22	P302	30	20,00	108,75	33,27
y23	P303	30	19,29	83,43	34,35
y24	P304	30	16,49	75,52	31,58
y31	P401	40	17,10	83,37	29,90
y32	P402	40	15,73	60,77	28,45
y33	P403	40	14,17	110,26	30,57
y34	P404	40	13,58	35,13	31,73
y41	P501	50	14,61	37,05	27,98
y42	P502	50	13,23	55,85	27,82
y43	P503	50	13,63	67,61	28,75
y44	P504	50	10,12	53,20	25,48

Sendo assim, três testes de hipótese foram avaliados, sendo:

- Teste de hipótese 1: porcentagem de madeira na composição em relação a tensão na força máxima;
- Teste de hipótese 2: porcentagem de madeira na composição em relação ao módulo de elasticidade;
- Teste de hipótese 3: porcentagem de madeira na composição em relação a energia absorvida no impacto por m<sup>2</sup>.

Para todos os testes foi analisado se a porcentagem de madeira na composição interfere ou não na variável resposta, isto é, se  $\tau$  é igual a zero para qualquer amostra.

Portanto, foi aplicado o teste de hipóteses para as três variáveis resposta, conforme afirmações a seguir:

- $H_0: \tau_{11} = \tau_{12} = \dots = \tau_{44} = 0$ ;
- $H_a: \tau_{ij} \neq 0$  para pelo menos um  $i$ ;
- $\alpha = 95\%$ .

Os resultados obtidos no Minitab 14<sup>®</sup> para cada teste de hipótese podem ser consultados no ANEXO F – ANÁLISE ESTATÍSTICA – OUTPUT DO MINITAB.

Nas Tabela 5-7 a Tabela 5-9 podem ser observados os valores encontrados para cada parâmetro da análise de variância em relação à propriedade analisada.

**Tabela 5-7 – ANOVA para Tensão (força máxima) versus %Madeira na composição.**

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados médios	F <sub>0</sub>
Tratamentos	174,29	3	58,10	15,12
Erro	46,11	12	3,84	-
Total	220,40	15	-	-

**Tabela 5-8 – ANOVA para Módulo de Elasticidade versus %Madeira na composição.**

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados médios	F <sub>0</sub>
Tratamentos	4728	3	1576	3,12
Erro	6064	12	505	-
Total	10792	15	-	-

Tabela 5-9 – ANOVA para Energia absorvida por área (J/m<sup>2</sup>) versus %Madeira na composição.

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados médios	F <sub>0</sub>
Tratamentos	298,75	3	99,58	40,55
Erro	29,47	12	2,46	-
Total	328,23	15	-	-

Por meio da Tabela 5-10 pode-se observar  $F_0 > f_0$  em duas situações e que  $f_0 > F_0$  para uma situação. Na Figura 5-7 nota-se que, para valores de  $F_0$  maiores que  $f_0$ , os mesmos estarão dentro da área colorida e, portanto, acima dos valores em que se aceita a hipótese nula. Sendo assim, para valores maiores que  $f_0$  existe evidências para não se aceitar  $H_0$  e, portanto, de afirmar, com 95% de confiabilidade, de que a adição de madeira, influencia nas propriedades do polietileno. Na Tabela 5-11 estão sintetizados os resultados para os testes de hipótese.

Tabela 5-10 – Comparação entre o valor observado (F<sub>0</sub>) e o valor tabelado (f<sub>0</sub>).

Valor Parâmetro	%Madeira x Tensão	%Madeira x Mod. Elástico	%Madeira x Energia/área
F <sub>0</sub>	15.12	3.12	40.55
f <sub>0</sub>	3.49	3.49	3.49

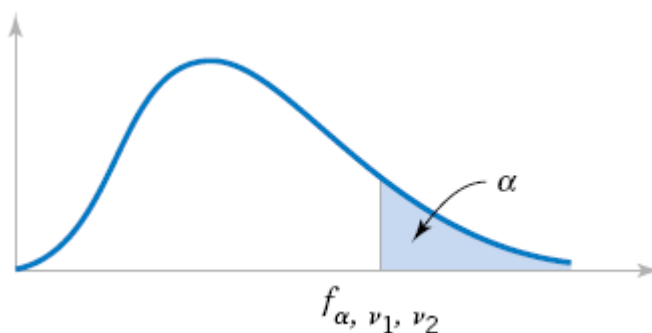


Figura 5-7 – Representação gráfica da distribuição F.

Tabela 5-11 Síntese da comparação entre o valor observado (F<sub>0</sub>) e o valor tabelado (f<sub>0</sub>).

Resultado do Teste	%Madeira x Tensão	%Madeira x Mod. Elasticidade	%Madeira x Energia/área
H <sub>0</sub>	Rejeita	Aceita	Rejeita
H <sub>a</sub>	Aceita	Rejeita	Aceita

Portanto, pode ser afirmado que a adição da madeira na matriz polimérica foi responsável por alterar a resistência a tração e a quantidade de energia absorvida no teste de impacto. Além disso, para esses testes, o P-valor calculado foi de, aproximadamente, nulo. Uma vez que o P-valor representa o menor nível de significância que levaria a rejeitar a hipótese  $H_0$  para os dados em análise, afirma-se,



novamente, que a adição da madeira na matriz polimérica influenciou nessas propriedades da madeira plástica.

Apesar de  $F_0 < f_0$  no teste de hipótese 3, devido à proximidade dos valores, não se pode afirmar que a quantidade de madeira adicionada não influenciou no módulo elástico das amostras. Devem ser realizados outros testes para confirmação dos valores.

Após investigar se a proporção de madeira na composição da madeira plástica influencia ou não certas propriedades, foram realizadas regressões lineares para avaliar se a relação entre a porcentagem de madeira estava diretamente relacionada com a propriedade em questão. Na Tabela 5-12 podem ser observados os parâmetros encontrados.

Tabela 5-12 – Regressão linear ( $y = \beta_0 + \beta_1 X + erro$ )

Parâmetro	%Madeira x Tensão	%Madeira x Mod. Elástico	%Madeira x Energia/área
$\beta_1$	-0,29	-1,50	-0,38
$\beta_0$	27,30	128,95	45,89
$R^2$	0,79	0,42	0,88

Uma vez que o coeficiente de correlação,  $R^2$ , mede o quão linear a relação entre os dados está, pode-se observar que a relação entre as propriedades e a composição das amostras não se comportam de tal maneira e/ou os dados coletados não foram suficientes para que essa relação fosse mais clara.

## 5.4 Análise Econômica

De acordo com o definido no item 4.4, foi calculado o VPL, a TIR e o payback do projeto, conforme pode ser observado na Tabela 5-13. A memória de cálculo pode ser observada no ANEXO G – ANÁLISE ECONÔMICA.

Tabela 5-13 – VPL, TIR e payback do projeto.

Indicador	Valor
VPL	R\$ 1.117.603,97
TIR	19.96%
Payback	11 anos

Uma vez que o VPL é maior do que zero e a TIR está acima da taxa mínima de atratividade estipulada, é possível afirmar que o investimento para a produção de madeira plástica, de acordo com a realidade descrita no item 4.4, é viável, rentável e atrativo para o investidor.

O principal fator para a viabilidade do projeto são os custos para a obtenção do produto. Outra importante variável são os juros de capital ao que o projeto está sendo financiado. Sendo assim, o resultado da avaliação econômica é muito sensível a esses fatores. Na Tabela 5-14 são apresentados os efeitos da variação dos custos do projeto e da taxa de financiamento.

**Tabela 5-14 – Análise de sensibilidade do projeto.**

Mudança no Projeto	TIR	
	Original	Simulação
Queda no custo de 20%	19.96	48.92
Aumento no custo de 5%	19.96	12.34
Aumento no custo de 10%	19.96	3.8
Aumento Taxa de Financiamento para 15% e aumento no custo de 5%	19.96	5.13
Aumento Taxa de Financiam. Para 15%	19.96	13.28

Conforme pode ser observado, a viabilidade do projeto está intimamente ligada aos custos de produção. Ou seja, para que o projeto tenha um resultado dentro das expectativas, é de fundamental importância que as premissas e parâmetros escolhidos se confirmem durante a etapa de implantação do empreendimento.

## 6. CONCLUSÕES

Partindo de uma solução para a reciclagem do plástico e conseqüente diminuição do impacto ambiental devido ao descarte incorreto dos mesmos, o presente estudo propôs avaliar os aspectos técnicos e econômicos para a produção da madeira plástica.

Foi observado que, com a inserção da fibra orgânica na matriz polimérica, a capacidade de deformação e de absorção de energia ao impacto do composto foi reduzida e, portanto, pode-se concluir que a madeira plástica é um material menos susceptível a deformações quando comparado a um polímero puro.

De acordo com as propriedades mecânicas e do ponto de vista das possíveis aplicações citadas no capítulo 3.6, é válido concluir que, para a grande maioria desses fins, esse material é um substituto direto da madeira, concreto e/ou aço. Contudo, para os dormentes e vigas de sustentação, faz-se necessário uma avaliação mais criteriosa ou composições customizadas, visando atingir os requisitos que essas aplicações exigem.

Dos testes analíticos realizados, concluiu-se que a adição da madeira na matriz polimérica não é responsável por mudanças nos grupos funcionais do polímero. Ou seja, não foi observada nenhuma reação química entre os constituintes da madeira plástica e, portanto, suas propriedades não sofrem grandes impactos. Verificou-se, também, que a madeira plástica é termicamente estável até 250°C.

Da análise estatística, pode-se concluir que, de fato, a introdução da madeira na matriz polimérica é responsável por modificar algumas propriedades da matriz polimérica, como, por exemplo, o valor da tensão na força máxima e a quantidade de energia absorvida por m<sup>2</sup>. Já o módulo de elasticidade ficou bem próximo da região de rejeição da hipótese nula e, portanto, um novo teste deve ser realizado para poder afirmar com mais segurança. No que tange a análise econômica, seguindo as premissas estabelecidas, concluiu-se que o projeto proposto é viável, rentável e atrativo para o investidor.

Portanto, com todas essas características, mecânicas, analíticas e econômicas, a tomada de decisão para um projeto de produção e substituição da madeira plástica nos diversos fins que a mesma pode ser empregada pode ser avançada para uma próxima fase do projeto.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDI (2009). Relatório de Acompanhamento Setorial – Transformados Plásticos.
- ABPLAST (2011). O Perfil da Indústria Brasileira de Transformação e Material Plástico.
- ABRELPE (2011). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil.
- AKCELRUD, L. (2007). Fundamentos da Ciência dos Polímeros, 1. ed. Barueri, SP: Manole.
- AMIN, P. R. P (2006). Estudo de misturas de HDPE e fibra de coco como mecanismo de desenvolvimento limpo para utilização em madeira plástica. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.
- ARRUDA, R. A (2007). Avaliação de Possível Obtenção de Créditos de Carbono Através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo a Partir de Madeira Plástica de Polietileno e Fibra de Coco, Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.
- BARROS, N., et al., Planejamento e otimização de experimentos, v.1, 1.ed., Série Manuais, Campinas, UNICAMP, 1995.
- BEHRAVESH, A. H. (2009). Design and Manufacture of an Extrusion Die for Wood-Plastic Composite. Iran: Tarbiat Modares University.
- BEHRAVESH, A. H. (2009). Experimental Investigation of Injection Molding of Wood-Plastics Composites. Iran: Tarbiat Modares University.
- BEHRAVESH, A. H. (2009). Challenge to the Production of Fine Wood-Plastic Injection Molded Composites. Iran: Tarbiat Modares University.
- CANDIAN, M. L. (2007). Estudo do Polietileno de Alta Densidade Reciclado Para Uso em Elementos Estruturais, Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Carlos. 167p.
- CANEVAROLO, V. S. (2006). Ciência dos Polímeros, 2. ed. São Paulo, SP: Artliber Editora. 280p.
- CUI, H. J.(2008). DSC Analysis and Mechanical Properties of Wood—Plastic Composites. China: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics.

CRUZ-ESTRADA, H. R. (2009). A Preliminary Study on the Preparation of Wood-Plastic Composites From Urban Wastes Generated in Merida, Mexico With Potential Applications as Building Materials. Yucatán, México.

DALFRÉ, M. G. (2007). Cruzetas de Polímeros Reciclados: Caracterização dos Materiais, Análise Numérica e Ensaio de Modelos Reduzidos, Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Carlos. 192p.

DIAZ, A. C (2010). Estimation of Modulus of Elasticity of Plastics and Wood Plastic Composites Using a Taber Stiffness Tester. EUA: Michigan State University.

DEVORE, J. L., Probabilidade e estatística para engenharia e ciências, 6ª Ed. São Paulo, Pioneira Thonson Learning, 2006.

FARSI (2010). Wood-plastic composites: influence of wood flour chemical modification on the mechanical performance.

ERBETTA, C. C (2010). Síntese e Caracterização do Copolímero PLGA Visando sua Aplicação em Sistemas de Liberação Controlada de Fármacos. UFMF – Dissertação de Mestrado, Belo Horizonte.

GARCIA, M. (2009). Wood-plastics composites with better fire retardancy and durability performance. CIDEMCO. Azpeitia, Espanha.

GIORDANI, S. D. Estudo comparativo entre observador de estado não-linear de alto ganho e calorimetria associada a redes neurais artificiais para previsão de composição de copolímeros produzidos em emulsão com altos teores de sólidos. Unicamp – Dissertação de Mestrado, Campinas, 2003.

GRIER, L., NAGALINGAM, S. (2000). CIM Justification and optimization. London

KOUBAA, A. (2009). Effects of Fiber Characteristics on the Physical and Mechanical Properties of Wood Plastic Composites. Universidade de Quebec. Rouyn-Noranda, Canada.

MANRICH, S. (2005). Processamento de Termoplásticos, 1. ed. São Paulo, SP: Artliber Editora. 431p.

MATHEWS, P. G., Design of experiments with MINITAB, Milwaukee, Quality Press, 2005.

MIAN, M.A (2002). Project Economics and Decision Analysis: Deterministic Models

MINITAB INC., Conheça o MINITAB 15 para Windows®. EUA, 2006.

MIRBAGHERI, J (2010). Mechanical and Physical Properties of Wood-Plastic Composite Panels. Iran: University of Tehran.

MONTGOMERY, C. Douglas e RUNGER, C. George. Applied Statistics And Probability For Engineers, New York: John Wiley & Sons, Inc. 2002.

MONTGOMERY, C. D.; RUNGER, C. G., Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros, 2ª Ed., LTC, 1998.

PIVA (2004). Reciclagem de Plástico. Como Fazer da Reciclagem um Negócio Lucrativo. 1. Ed. São Paulo, SP: Artliber Editora. 111p.

RIZVI, M. G. (2002). A Novel System Design for Continuous Processing of Plastic-Wood-Fiber Composite Foams with Improved Cell Morphology. Universidade de Toronto. Toronto, Canada.

SANTOS, A. F. (2008). Estudo de Misturas de HDPE e Serragem de Cedro para Obtenção de Madeira Plástica, Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 120p.

SNYDER, R. G.; Academic Press, New York, p.132-143, 1980.

SOARES G.; SANTOS L.; CASTRO V.; SOUZA, V.; GARCIA, T.; PINTO, Y (2012) A Construção de uma Indústria de Madeira Plástica. UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

SULLIVAN, A., SHEFFRIN, S (2003). Economics: Principles in Action. Upper Saddle River, New Jersey

VLACHOPOULOS, J (2003). An Overview Of Polymer Processing. Canada: McMaster University

WERKEMA, C. C. M., Estatística aplicada à qualidade total, Primeira versão, Belo Horizonte, Departamento de Estatística, ICEX/UFMG, 1995.

WINANDY, J. E. (2004). Considerations in Recycling of Wood-Plastic Composites. Madison, EUA.

WOLK, H., DODD, J., TEARNEY, M. (2004). Accounting Theory: Conceptual Issues in a Political and Economic Environment.

ZENID, J. G. (2009). Madeira : uso sustentável na construção civil, 2. ed. São Paulo, SP: Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 103p.

<http://www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/plasticos/como-identificar-plasticos.php>, acessado em 30/01/2011 as 22:00.

<http://www.reciclaveis.com.br/mercado/clasplas.htm>, acessado em 30/01/2011 as 22:00.

[http://ambientes.ambientebrasil.com.br/residuos/reciclagem/reciclagem\\_de\\_plastico.html](http://ambientes.ambientebrasil.com.br/residuos/reciclagem/reciclagem_de_plastico.html), acessado em 06/02/2011 as 23:00.

[www.bndes.com.br](http://www.bndes.com.br) acessado em 01/12/2012 as 16:00.

<http://www.guiarh.com.br/tabeladesalarios.htm> acessado em 01/12/2012 as 16:00.

<http://www.ceviu.com.br/salario/tabela-pretensao-salarial-estagiario-belo-horizonte-mg> acessado em 01/12/2012 as 16:00.

[WWW.CUB.ORG.BR](http://WWW.CUB.ORG.BR) acessado em 01/12/2012 as 16:00.

[http://pt.wikipedia.org/wiki/Condutividade\\_t%C3%A9rmica](http://pt.wikipedia.org/wiki/Condutividade_t%C3%A9rmica) acessado em 05/12/2012 as 12:00.

# ANEXO A – TESTE DE TRAÇÃO

Corpo de Prova	Tensão @Força Max. (MPa)	Tensão @Ruptura (MPa)	Mod.Elástico. (MPa)	Deformação @Força Max. (%)	Deformação @Ruptura (%)
CP 1	28,37	*	173,05	44,40	*
CP 2	30,60	0,15	167,88	51,81	0,0
CP 3	26,25	0,30	159,54	39,85	0,4
CP 4	25,73	*	63,48	34,66	*
Número CPs	4	2	4	4	2
Média	27,74	0,2259	141,0	42,68	0,2129
Mediana	27,31	0,2259	163,7	42,13	0,2129
Desv.Padrão	2,222	0,1079	51,97	7,274	0,3011
Coef.Var.(%)	8,013	47,74	36,86	17,04	141,4

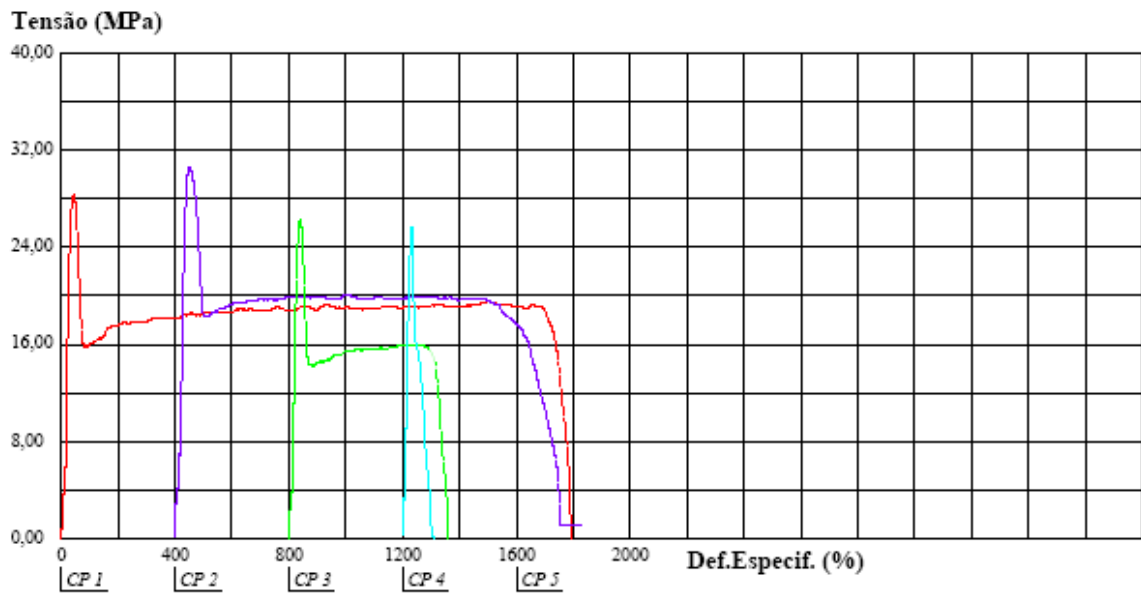


Figura A 1 – Relatório de Ensaio - PE

Corpo de Prova	Tensão @Força Max. (MPa)	Tensão @Ruptura (MPa)	Mod.Elastíc. (MPa)	Deformação @Força Max. (%)	Deformação @Ruptura (%)
CP 1	13,36	13,26	86,94	36,48	36,4
CP 2	9,40	9,40	121,35	26,65	26,6
CP 3	10,38	10,38	22,85	39,84	39,8
CP 4	22,00	20,99	110,02	42,22	43,0
CP 5	18,09	16,61	91,47	43,01	44,3
CP 6	0,30	0,29	*	1,03	1,0
CP 7	20,39	18,33	52,44	41,20	43,0
CP 8	22,28	20,18	91,64	50,63	52,1
CP 9	0,41	0,40	121,85	0,41	0,4
CP 10	24,18	22,56	113,30	41,66	43,7
Número CPs	10	10	9	10	10
Média	14,08	13,24	90,21	32,31	33,04
Mediana	15,73	14,94	91,64	40,52	41,40
Desv.Padrão	8,824	8,082	33,31	17,69	18,22
Coef.Var.(%)	62,67	61,03	36,92	54,75	55,15

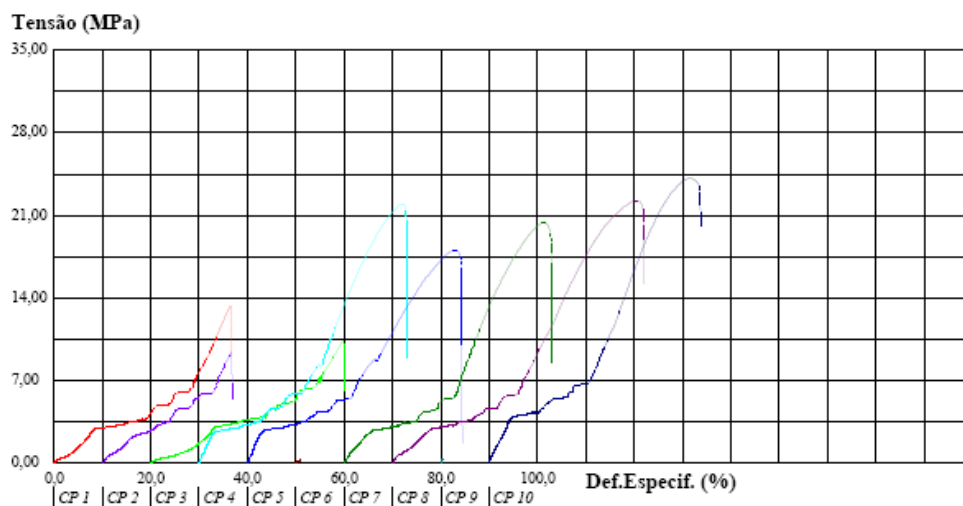
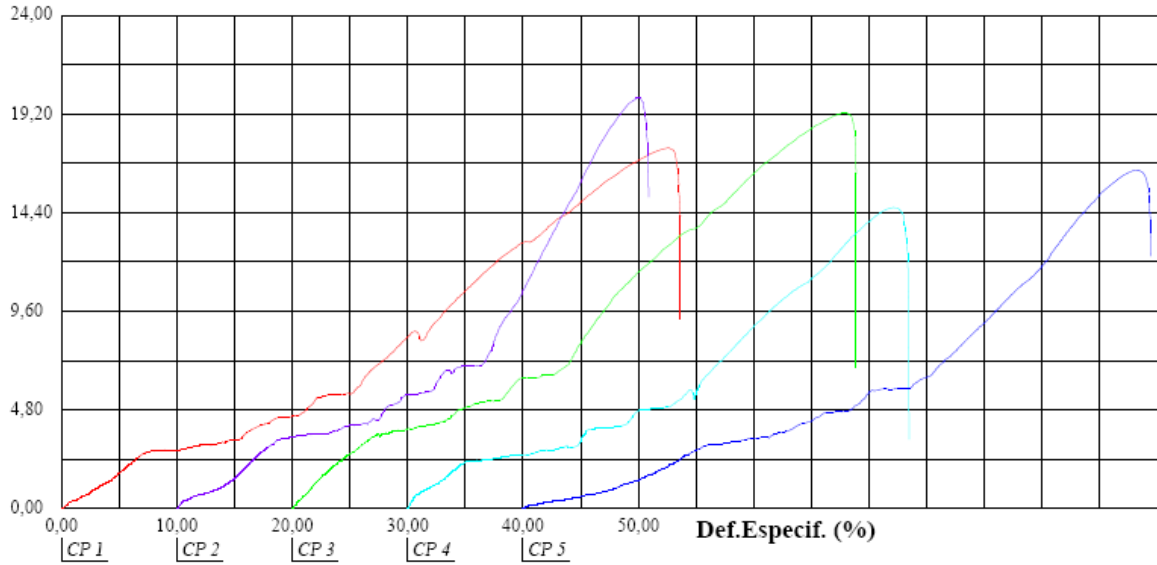


Figura A 2 – Relatório de Ensaio – PE20

Corpo de Prova	Tensão @Força Max. (MPa)	Tensão @Ruptura (MPa)	Mod.Elástico. (MPa)	Deformação @Força Max. (%)	Deformação @Ruptura (%)
CP 1	17,58	15,40	44,54	52,65	53,6
CP 2	20,00	17,78	108,75	40,18	40,8
CP 3	19,29	18,15	83,43	47,70	48,8
CP 4	14,68	12,40	54,72	42,16	43,4
CP 5	16,49	14,56	75,52	53,37	54,4
Número CPs	5	5	5	5	5
Média	17,61	15,66	73,40	47,21	48,18
Mediana	17,58	15,40	75,52	47,70	48,80
Desv.Padrão	2,141	2,377	25,18	5,973	6,025
Coef.Var.(%)	12,16	15,18	34,31	12,65	12,51

**Tensão (MPa)**



**Figura A 3 – Relatório de Ensaio – PE30**



Corpo de Prova	Tensão @Força Max. (MPa)	Tensão @Ruptura (MPa)	Mod.Elástico. (MPa)	Deformação @Força Max. (%)	Deformação @Ruptura (%)
CP 1	9,07	5,64	21,59	33,04	35,0
CP 2	17,10	14,70	83,37	43,49	48,4
CP 3	13,69	11,90	30,70	42,39	43,2
CP 4	15,73	13,34	60,77	48,81	50,2
CP 5	14,17	12,14	110,26	37,70	39,1
CP 6	13,58	10,53	35,13	50,52	52,1
Número CPs	6	6	6	6	6
Média	13,89	11,37	56,97	42,66	44,69
Mediana	13,93	12,02	47,95	42,94	45,83
Desv.Padrão	2,725	3,143	34,55	6,595	6,717
Coef.Var.(%)	19,62	27,63	60,65	15,46	15,03

### Tensão (MPa)

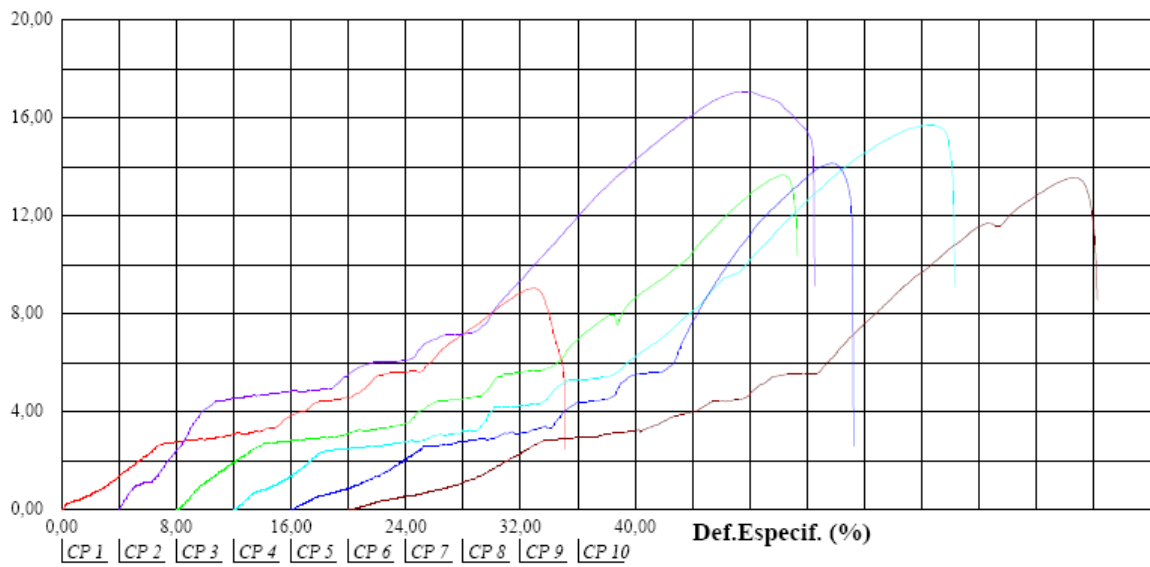


Figura A 4 – Relatório de Ensaio – PE40

Corpo de Prova	Tensão @Força Max. (MPa)	Tensão @Ruptura (MPa)	Mod.Elástico. (MPa)	Deformação @Força Max. (%)	Deformação @Ruptura (%)
CP 1	14,61	11,07	37,05	42,02	44,0
CP 2	13,23	10,10	55,85	43,76	46,6
CP 3	11,15	8,69	23,33	45,58	48,6
CP 4	13,63	11,80	67,61	40,85	41,9
CP 5	10,12	8,14	53,20	37,96	40,1
Número CPs	5	5	5	5	5
Média	12,55	9,960	47,41	42,03	44,24
Mediana	13,23	10,10	53,20	42,02	43,99
Desv.Padrão	1,854	1,548	17,32	2,897	3,424
Coef.Var.(%)	14,78	15,54	36,54	6,892	7,739

### Tensão (MPa)

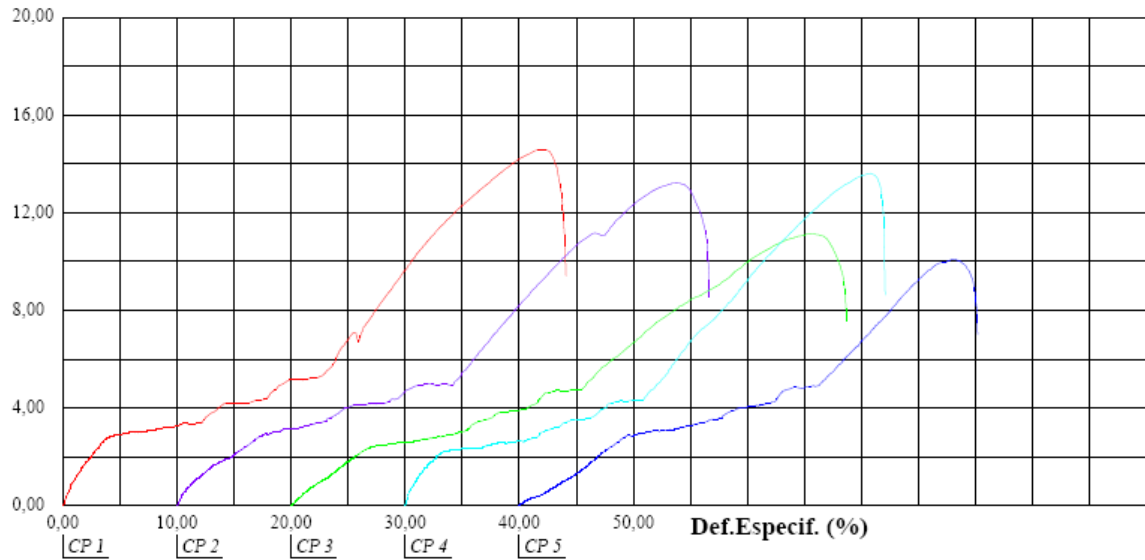


Figura A 5 – Relatório de Ensaio – PE50

# ANEXO B – TESTES DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO

Tabela B 1 – Resultados obtidos para o teste de resistência ao impacto.

Amostra	Espessura (mm)	Largura (mm)	Energia absorvida (J)	Energia absorvida (%)	Energia por distância (J/m)	Energia por área (J/m <sup>2</sup> )	Velocidade de impacto	Ângulo de alcance (°)
<b>PE</b>								
1	3,03	12,08	0,1174	2,135	3,207439949	38,74587459	3,554	-145,05
2	3,35	12,11	0,1338	2,432	3,298125393	39,94029851	3,554	-144,5
3	2,82	12,58	0,1263	2,296	3,560193485	44,78723404	3,763	-144,75
4	2,78	12,3	0,1218	2,215	3,562028426	43,81294964	3,763	-144,9
5	3,04	12,65	0,1443	2,623	3,752340337	47,46710526	3,554	-144,15
6	2,8	11,8	0,1086	1,974	3,286924939	38,78571429	3,554	-145,35
7	3,32	12,11	0,1263	2,296	3,141384697	38,04216867	3,763	-144,75
8	2,82	12,05	0,1204	2,188	3,54315647	42,69503546	3,554	-144,95
Média	2,96	12,07	0,1204	2,189	3,379535	40,79597	3,596	-144,95
Desvio	0,24	0,18	0,0091	0,165	0,161939	2,328348	0,093	0,31
<b>PE20</b>								
1	3,11	12,29	0,0911	1,657	2,383450326	29,2926045	3,554	-145,95
2	3,36	12,1	0,1549	2,816	3,810015742	46,10119048	3,763	-143,8
3	2,63	12,9	0,1071	1,947	3,156777788	40,72243346	3,554	-145,4
4	2,71	12,69	0,0926	1,683	2,69265104	34,1697417	3,554	-145,9
5	2,65	12,75	0,1071	1,947	3,169811321	40,41509434	3,554	-145,4
6	3,63	12,43	0,1218	2,215	2,69941424	33,55371901	3,763	-144,9
7	2,66	12,56	0,0969	1,762	2,900363967	36,42857143	3,554	-145,75
8	2,65	12,59	0,1027	1,868	3,078214216	38,75471698	3,763	-145,55
Média	2,66	12,70	0,1013	1,841	2,999564	38,09811	3,596	-145,60
Desvio	0,03	0,14	0,0064	0,117	0,202437	2,779661	0,093	0,22
<b>PE30</b>								
1	2,63	13,05	0,0825	1,5	2,403741095	31,36882129	3,763	-146,25
2	2,59	12,63	0,0882	1,604	2,696282981	34,05405405	3,554	-146,05
3	3,2	12,28	0,1115	2,027	2,837438925	34,84375	3,763	-145,25
4	3	12,44	0,0998	1,815	2,674169346	33,26666667	3,554	-145,65
5	2,99	13,42	0,1027	1,868	2,559450528	34,34782609	3,554	-145,55
6	2,82	13,45	0,0811	1,474	2,138205595	28,75886525	3,554	-146,3
7	3,35	12,72	0,1263	2,296	2,963953816	37,70149254	3,763	-144,75

8	3,3	12,85	0,1042	1,894	2,457257399	31,57575758	3,763	-145,5
Média	3,02	12,72	0,1013	1,842	2,64492	33,61761	3,638	-145,60
Desvio	0,27	0,44	0,0085	0,154	0,144118	1,27666	0,114	0,29
<b>PE40</b>								
1	3	13,6	0,0897	1,63	2,198529412	29,9	3,763	-146
2	3,61	13,37	0,1027	1,868	2,127805046	28,44875346	3,763	-145,55
3	3,3	13,17	0,11	2,001	2,531004809	33,33333333	3,763	-145,3
4	3,17	13,34	0,0969	1,762	2,29144103	30,56782334	3,763	-145,75
5	3,01	13,35	0,0955	1,736	2,37659736	31,72757475	3,554	-145,8
6	3,07	12,65	0,0825	1,5	2,124344994	26,87296417	3,763	-146,25
7	2,8	12,77	0,0955	1,736	2,670880412	34,10714286	3,554	-145,8
8	3,23	13,09	0,1174	2,135	2,776680613	36,34674923	3,554	-145,05
Média	3,12	13,29	0,0961	1,746	2,333051	30,95026	3,679	-145,78
Desvio	0,30	0,31	0,0046	0,085	0,210937	2,125851	0,114	0,16
<b>PE50</b>								
1	3,31	12,8	0,0926	1,683	2,185611782	27,97583082	3,554	-145,9
2	3,45	12,82	0,0584	1,062	1,320400642	16,92753623	3,554	-147,1
3	3,3	13,66	0,0911	1,657	2,020941479	27,60606061	3,554	-145,95
4	3,18	12,86	0,0683	1,241	1,670138991	21,47798742	3,554	-146,75
5	3,12	12,45	0,0868	1,578	2,234579343	27,82051282	3,554	-146,1
6	3,37	13,43	0,0969	1,762	2,141005897	28,7537092	3,554	-145,75
7	3,32	13,53	0,1042	1,894	2,319700086	31,38554217	3,763	-145,5
8	2,9	12,7	0,0739	1,344	2,006516427	25,48275862	3,763	-146,55
Média	3,20	13,01	0,0883	1,605	2,117731	27,52777	3,596	-146,05
Desvio	0,19	0,51	0,0088	0,160	0,100673	1,222455	0,093	0,31

# ANEXO C – ANÁLISE POR ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

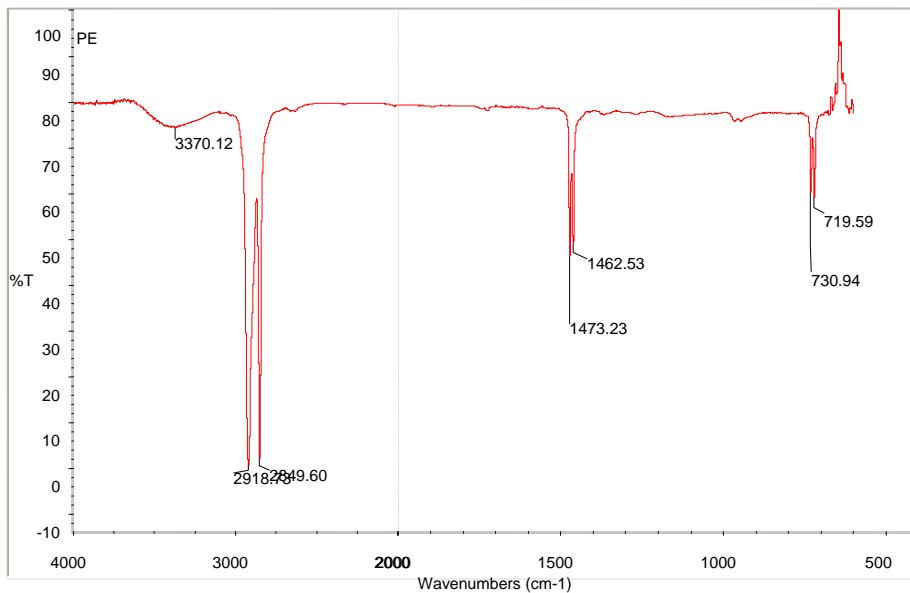


Figura C 1 – Espectro FTIR – PE.

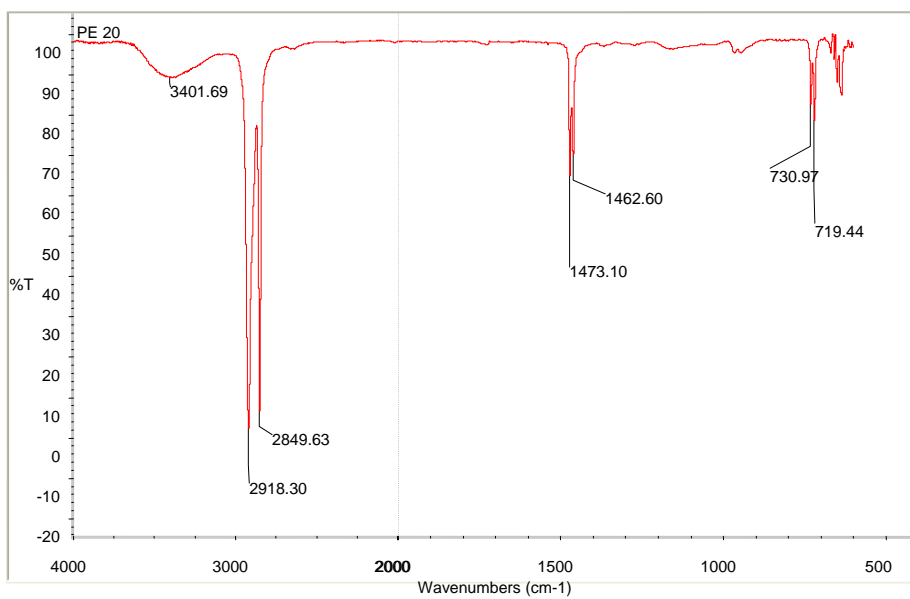
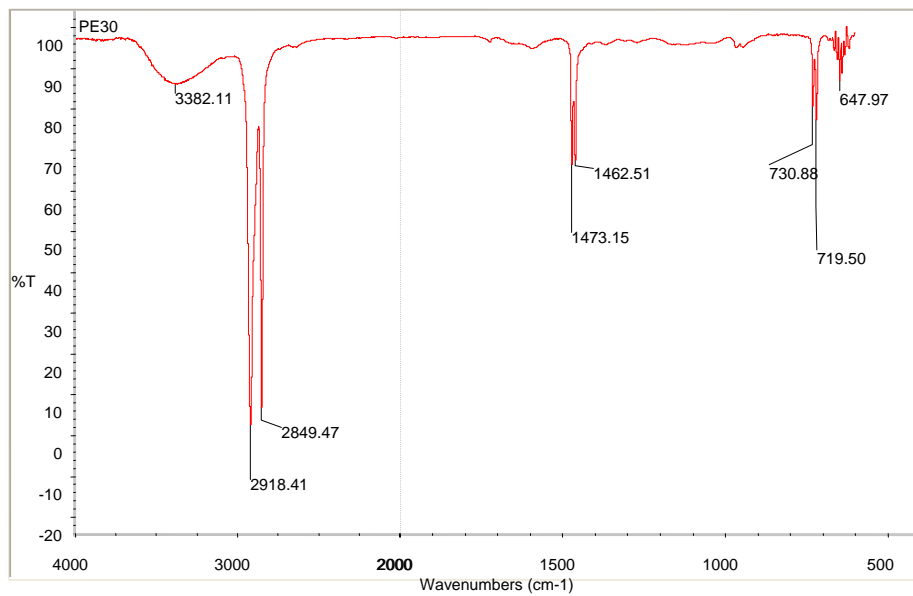
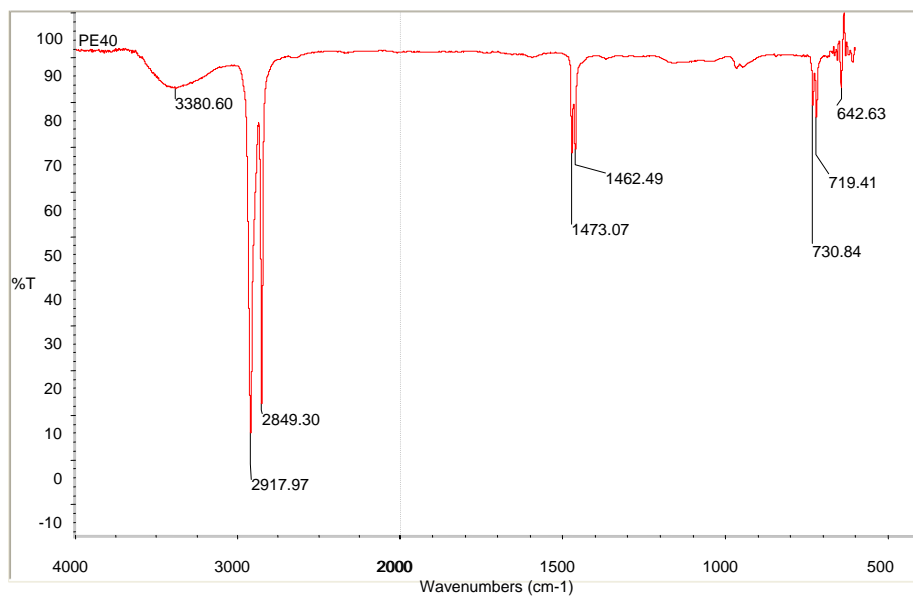


Figura C 2 – Espectro FTIR – PE20.



**Figura C 3 – Espectro FTIR – PE30.**



**Figura C 4 – Espectro FTIR – PE40.**

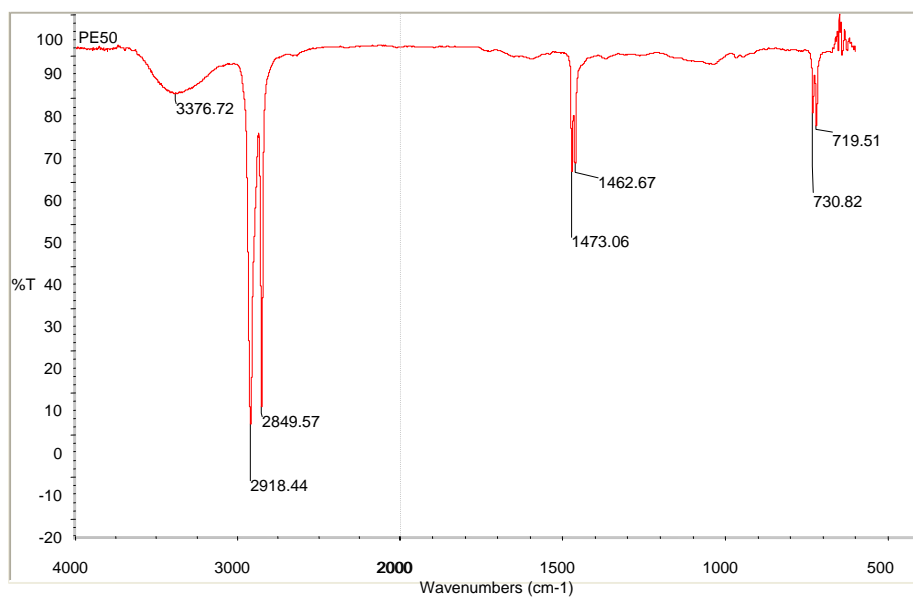


Figura C 5 – Espectro FTIR – PE50.

# ANEXO D – ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG)

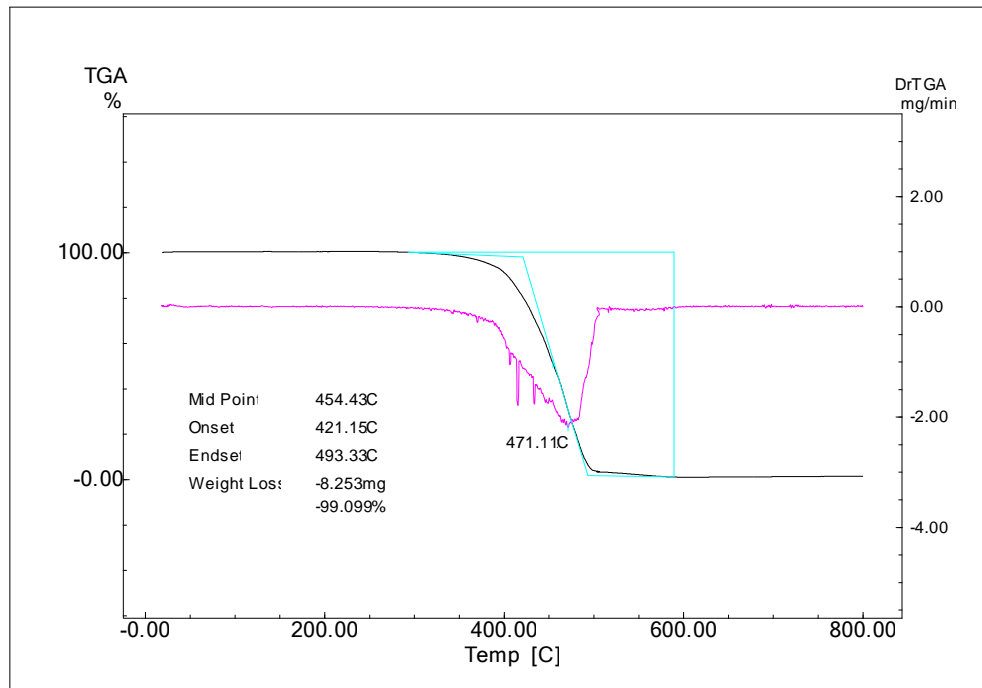


Figura D 1 – Curva TG/DRTG – PE.

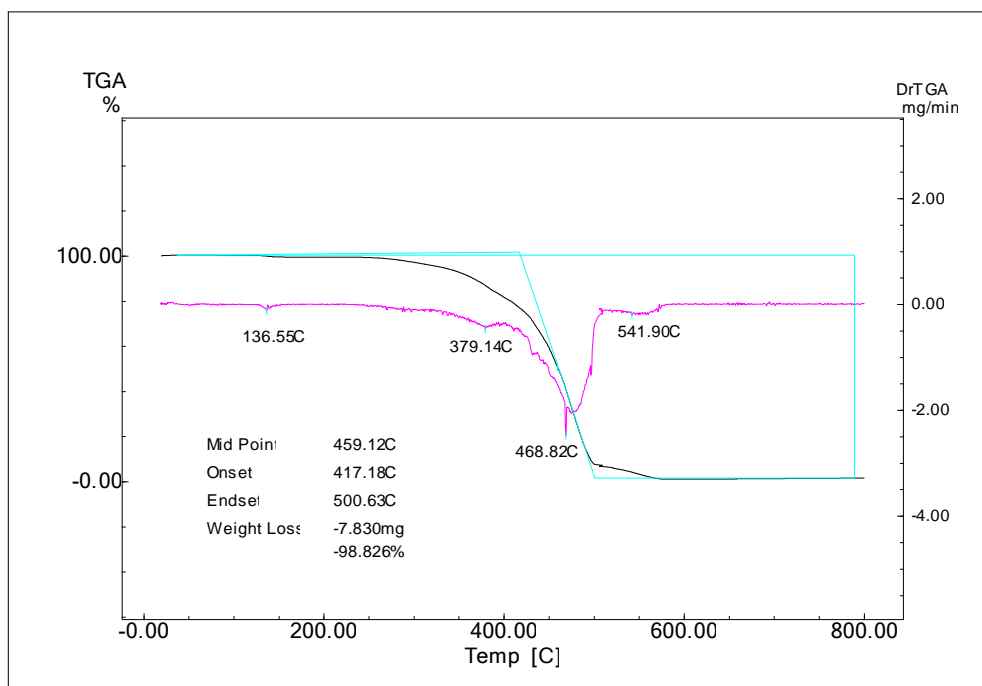


Figura D 2 – Curva TG/DRTG – PE20



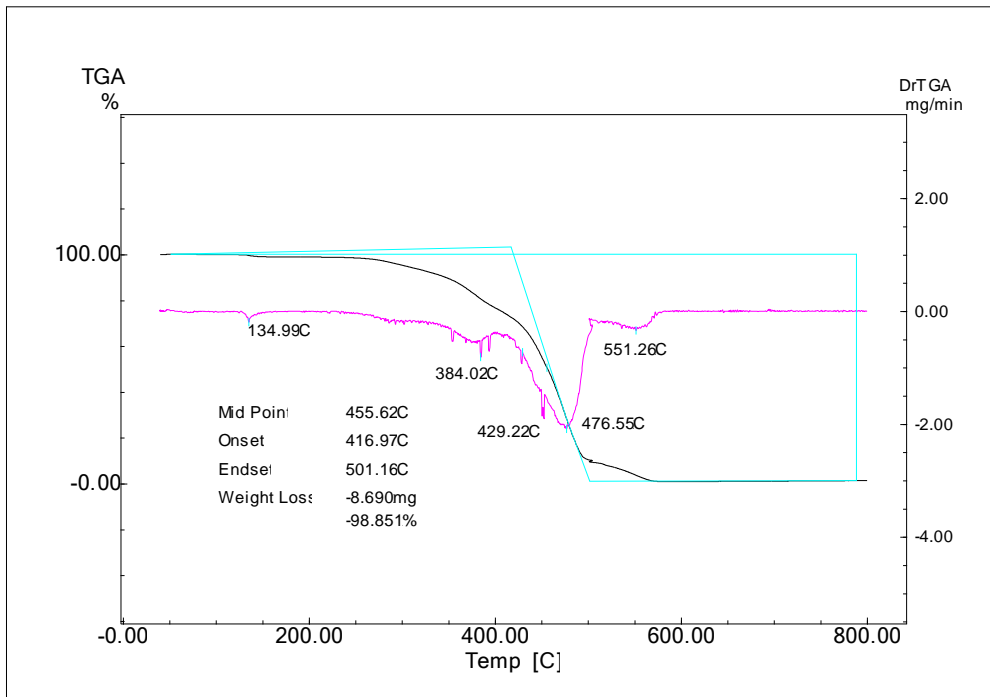


Figura D 3 – Curva TG/DRTG – PE30

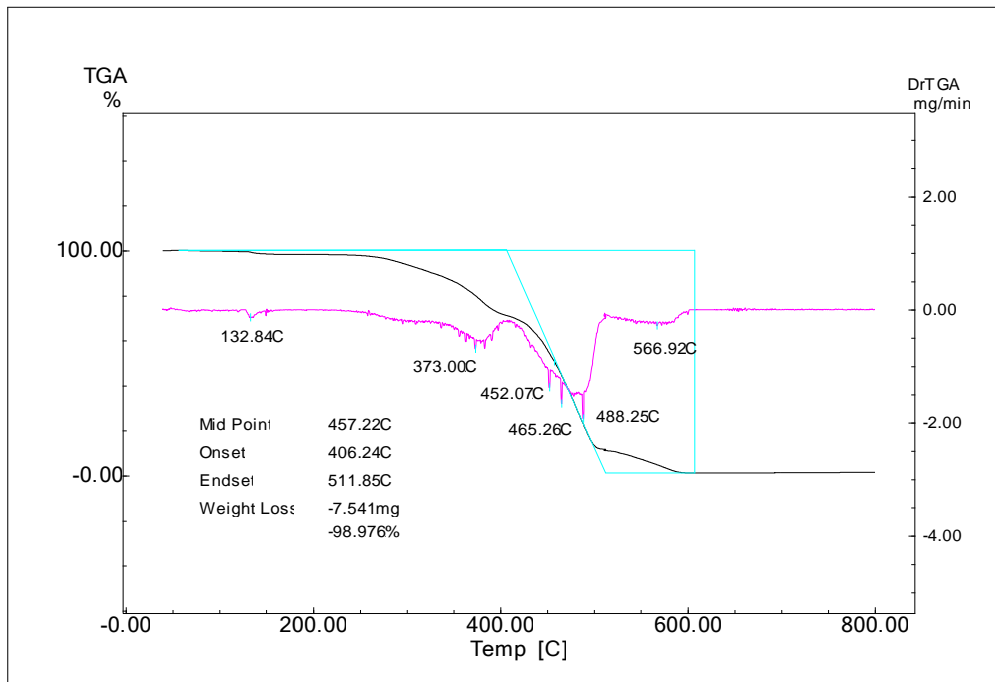


Figura D 4 – Curva TG/DRTG – PE40

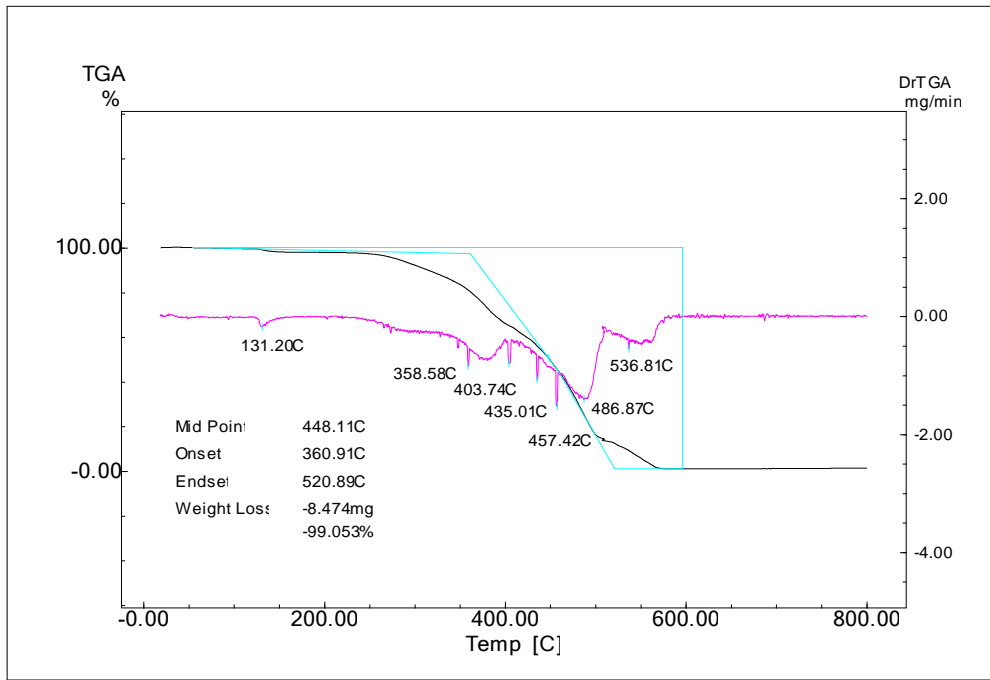


Figura D 5 – Curva TG/DRTG – PE50

# ANEXO E – CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC)

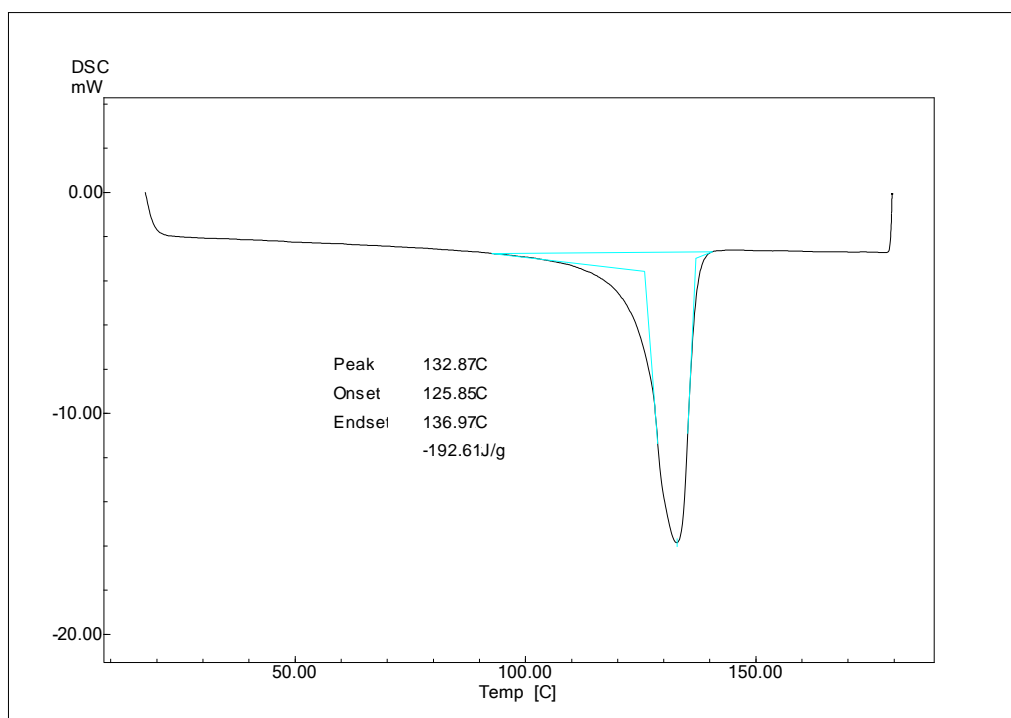


Figura E 1 – Curva DSC 1ª Corrida – PE – Massa: 4,23mg.

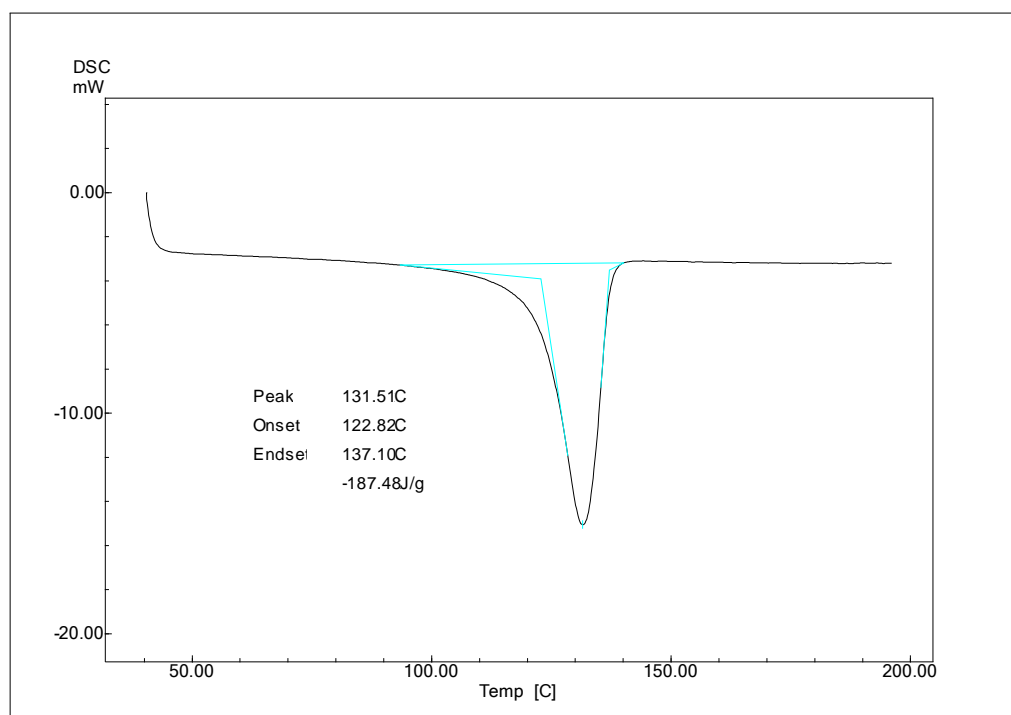
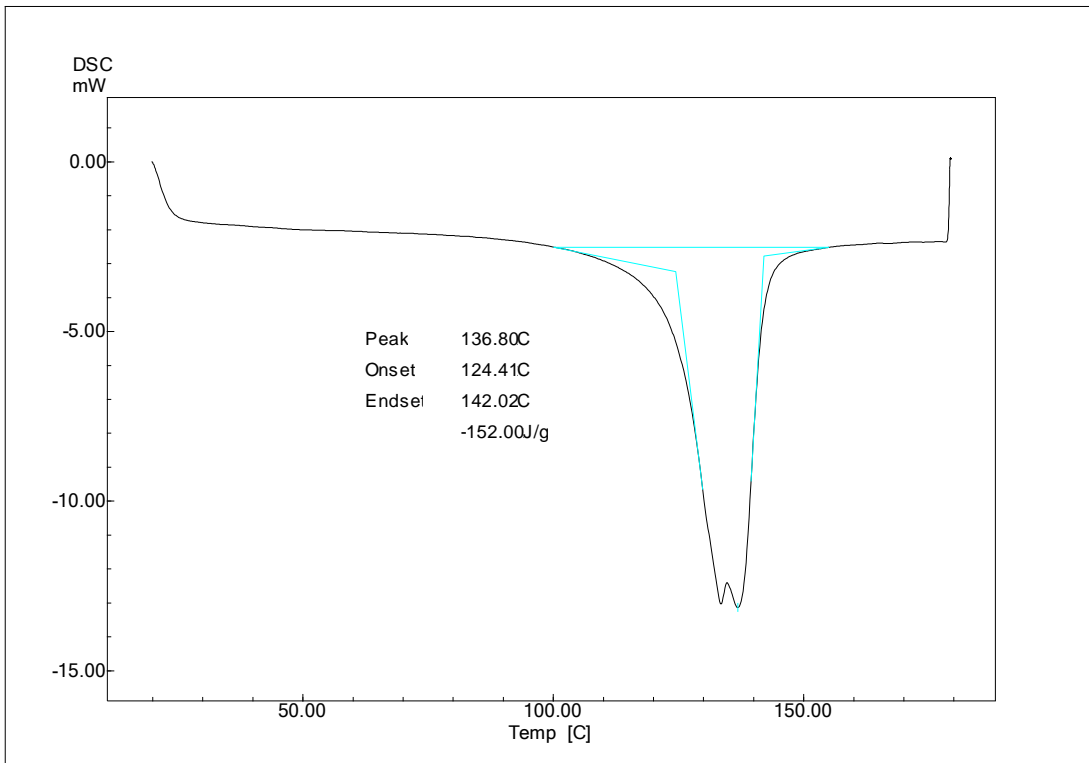
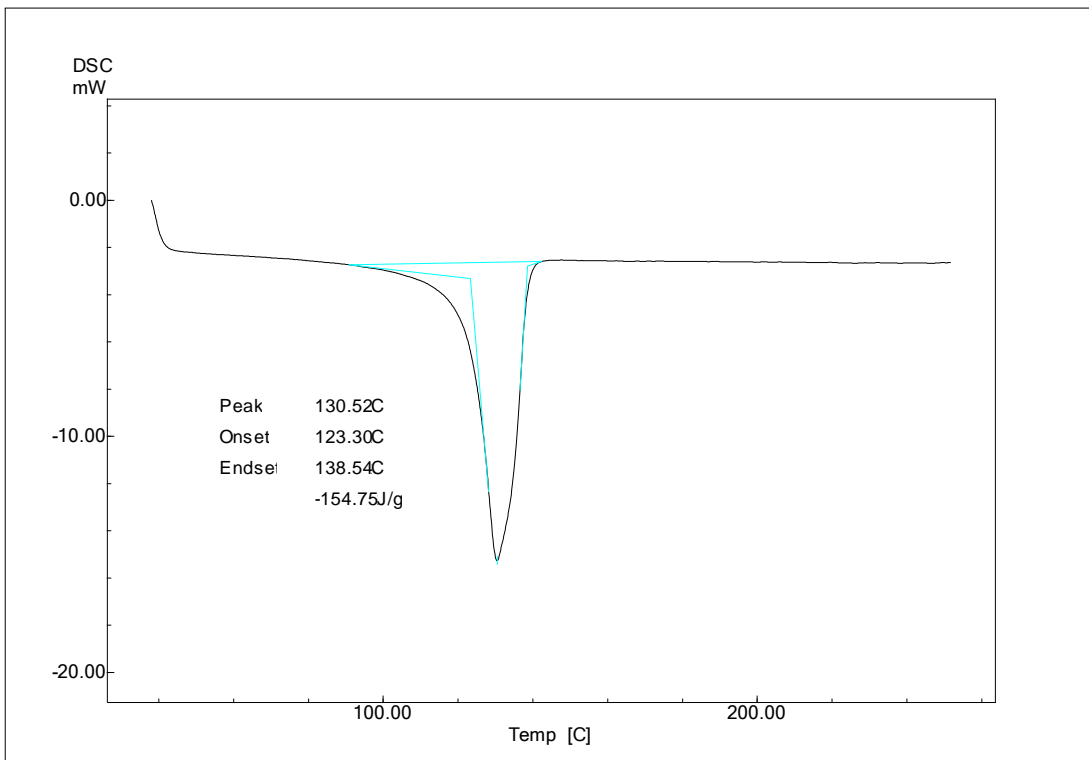


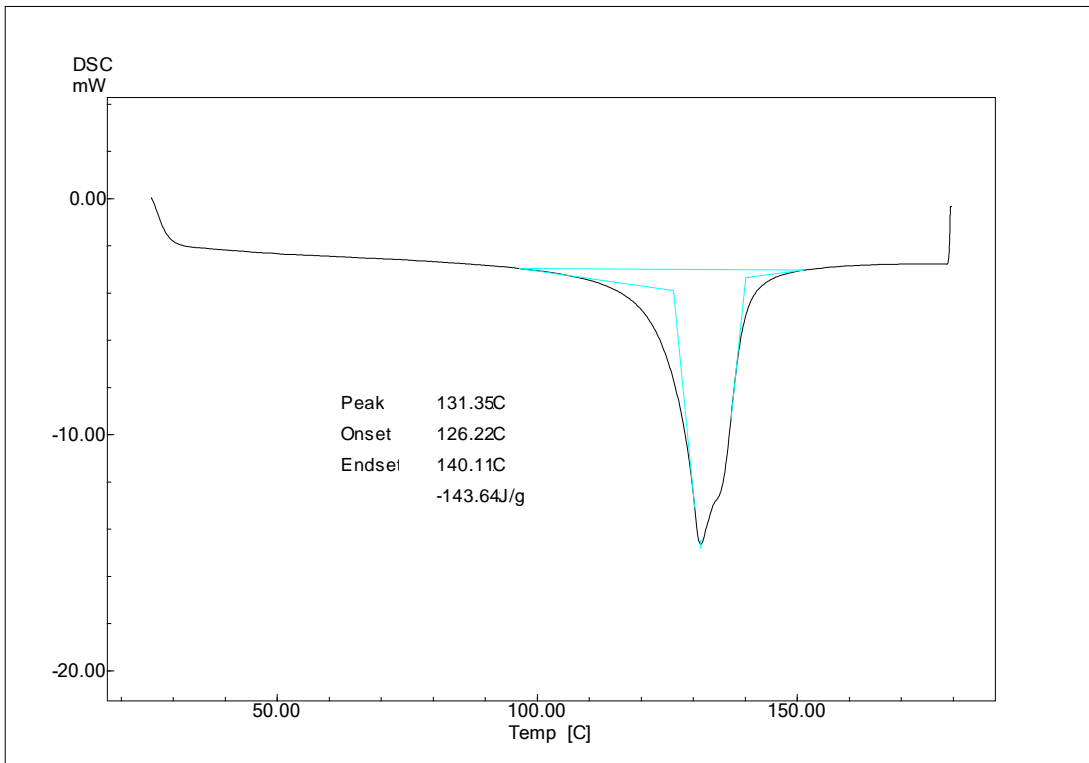
Figura E 2 – Curva DSC 2ª Corrida – PE – Massa: 4,23mg.



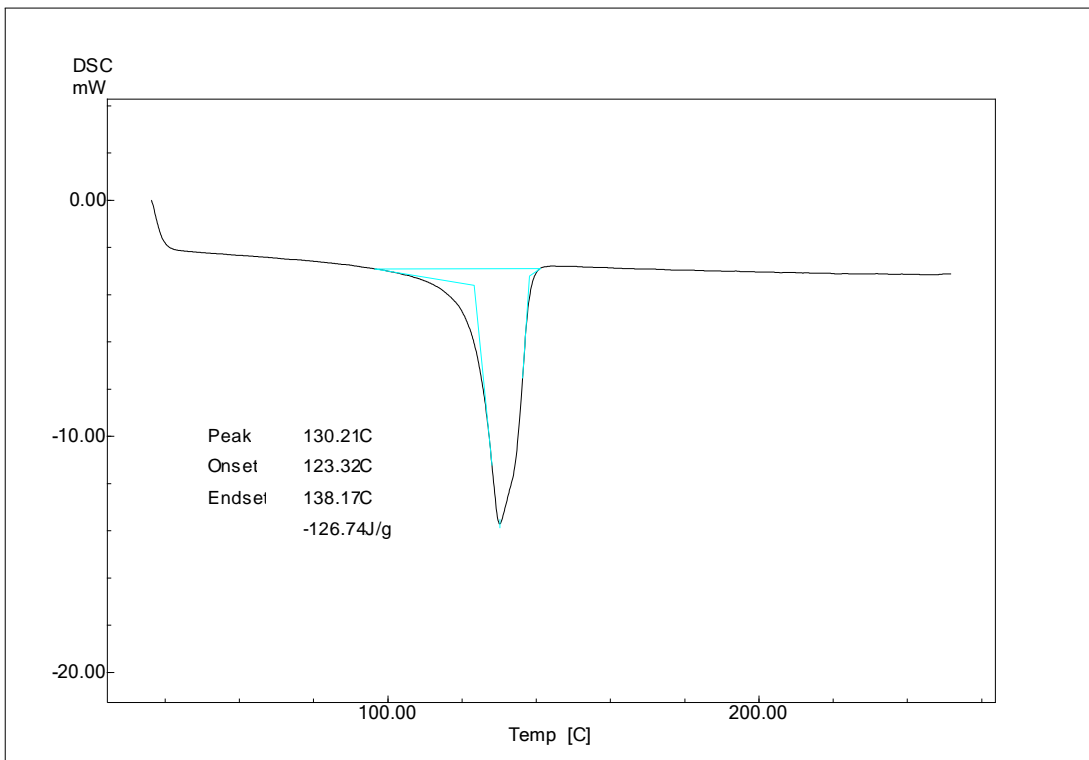
**Figura E 3 – Curva DSC 1ª Corrida – PE20 – Massa: 5,43mg.**



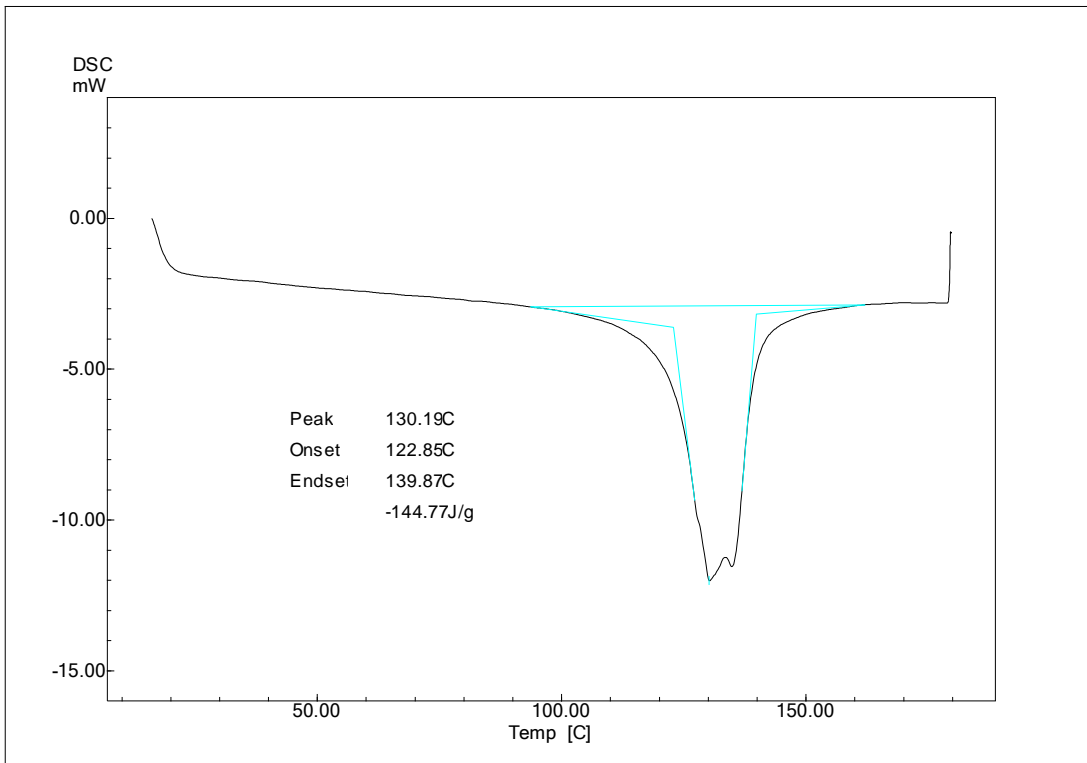
**Figura E 4 – Curva DSC 2ª Corrida – PE20 – Massa: 6,02mg.**



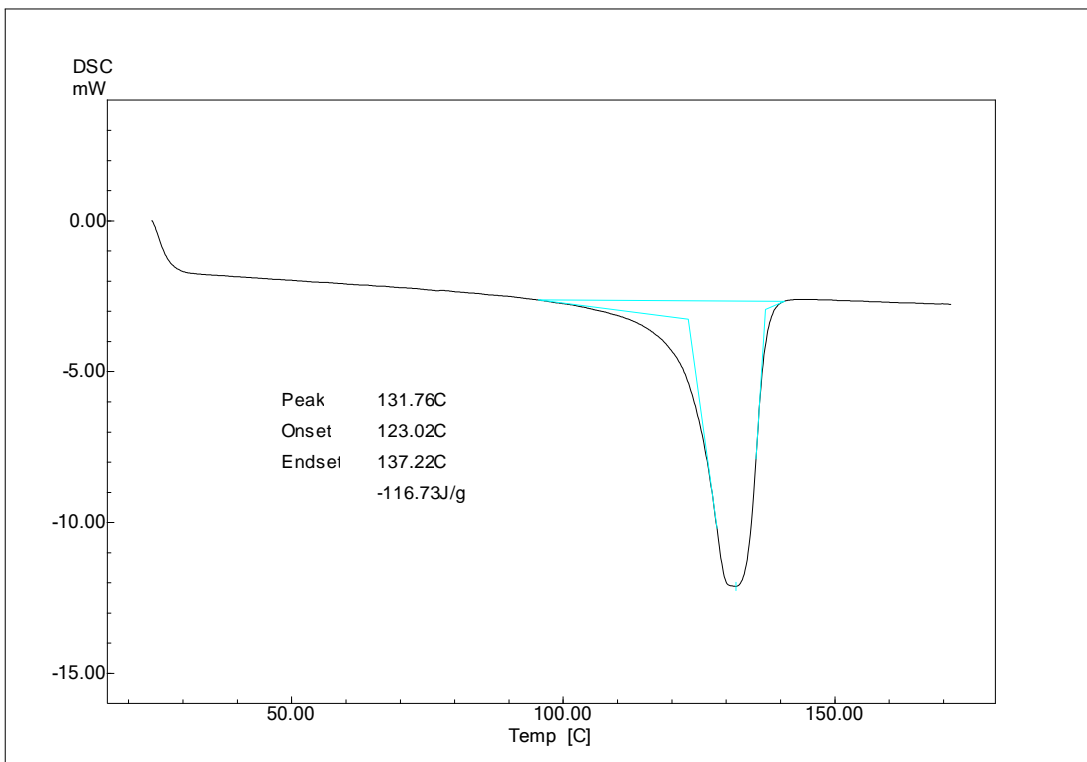
**Figura E 5 – Curva DSC 1ª Corrida – PE30 – Massa: 5,78mg.**



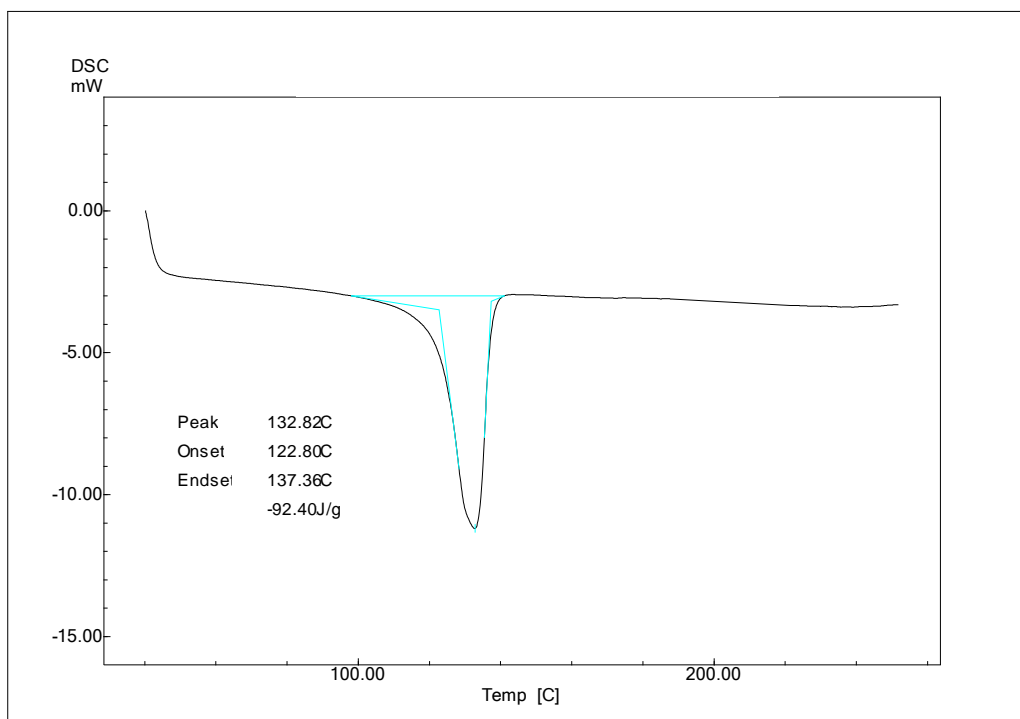
**Figura E 6 – Curva DSC 2ª Corrida – PE30 – Massa: 6,08mg.**



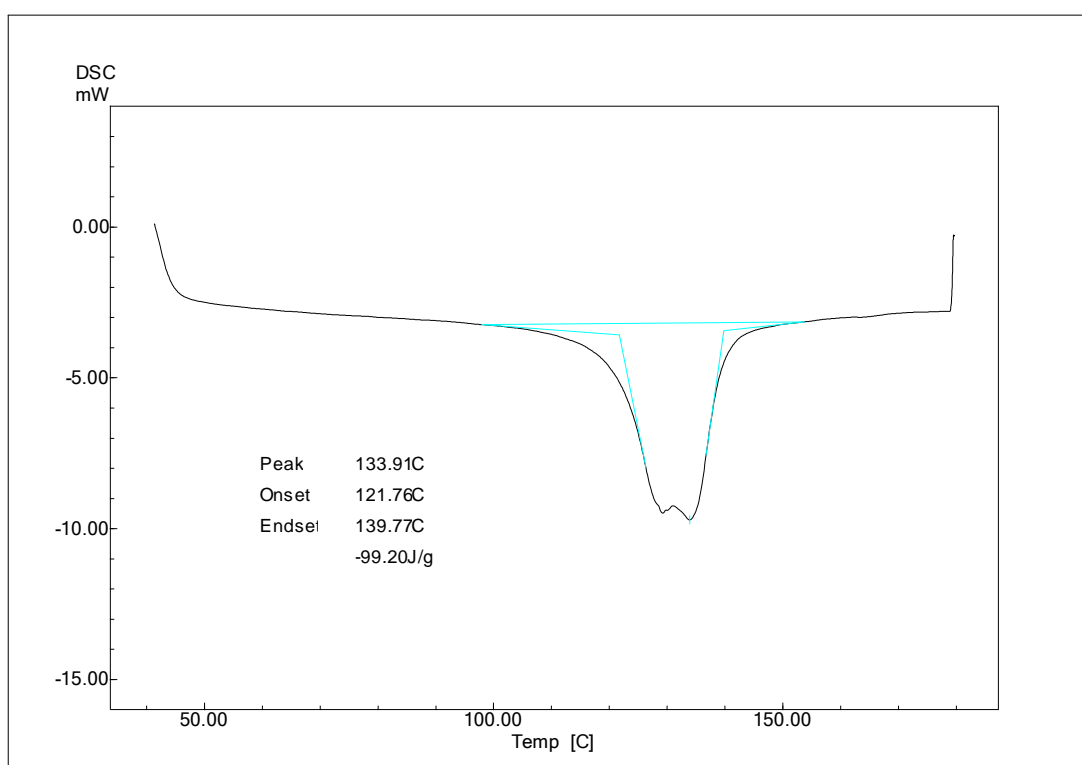
**Figura E 7 – Curva DSC 1ª Corrida – PE40 – Massa: 5, 85mg.**



**Figura E 8 – Curva DSC 2ª Corrida – PE40 – Massa: 5,85mg.**



**Figura E 9 – Curva DSC 2ª Corrida – PE50 – Massa: 6,20mg.**



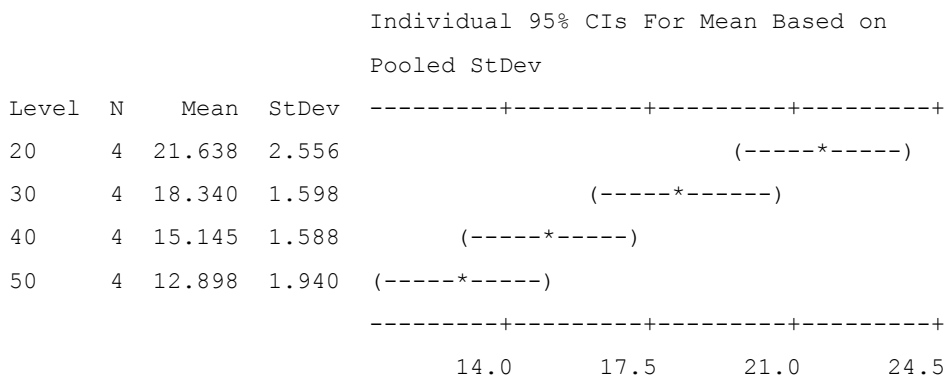
**Figura E 10 – Curva DSC 1ª Corrida – PE50 – Massa: 6,20mg.**

# ANEXO F – ANÁLISE ESTATÍSTICA – OUTPUT DO MINITAB

## One-way ANOVA: Tensão versus Fator

Source	DF	SS	MS	F	P
Fator	3	174.29	58.10	15.12	0.000
Error	12	46.11	3.84		
Total	15	220.40			

S = 1.960    R-Sq = 79.08%    R-Sq(adj) = 73.85%



Pooled StDev = 1.960

## Regression Analysis: Tensão (força máx) versus Madeira

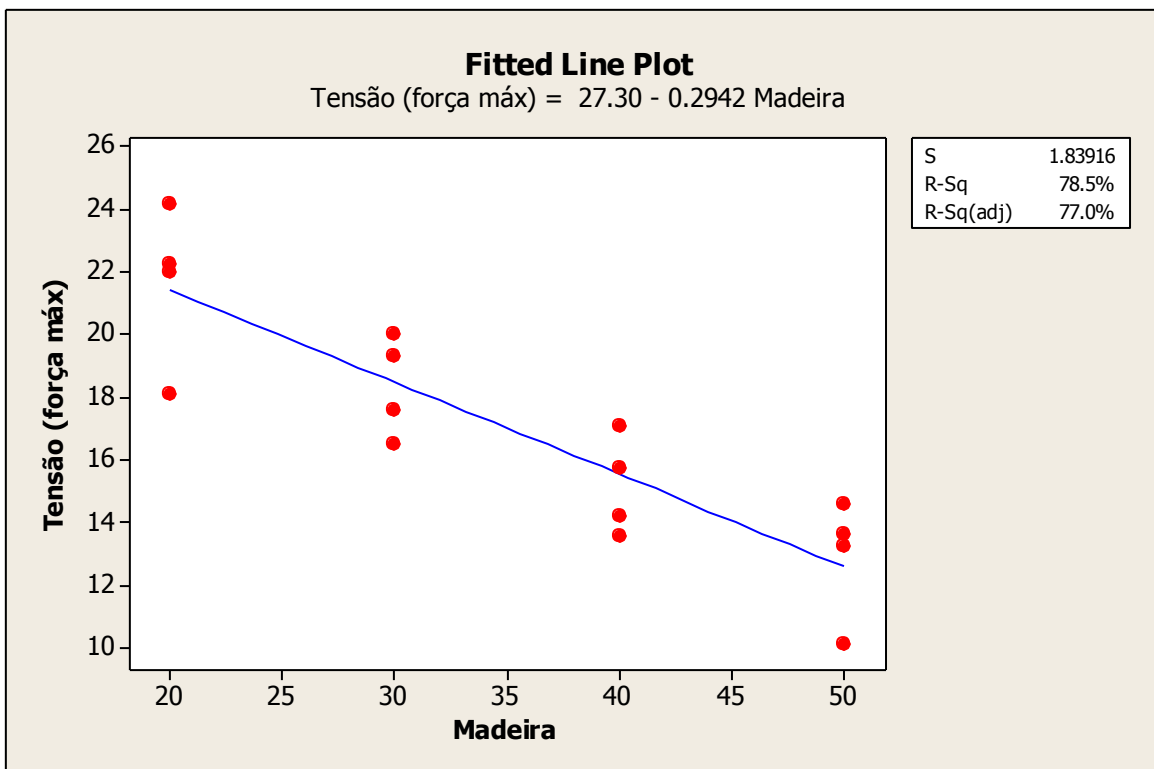
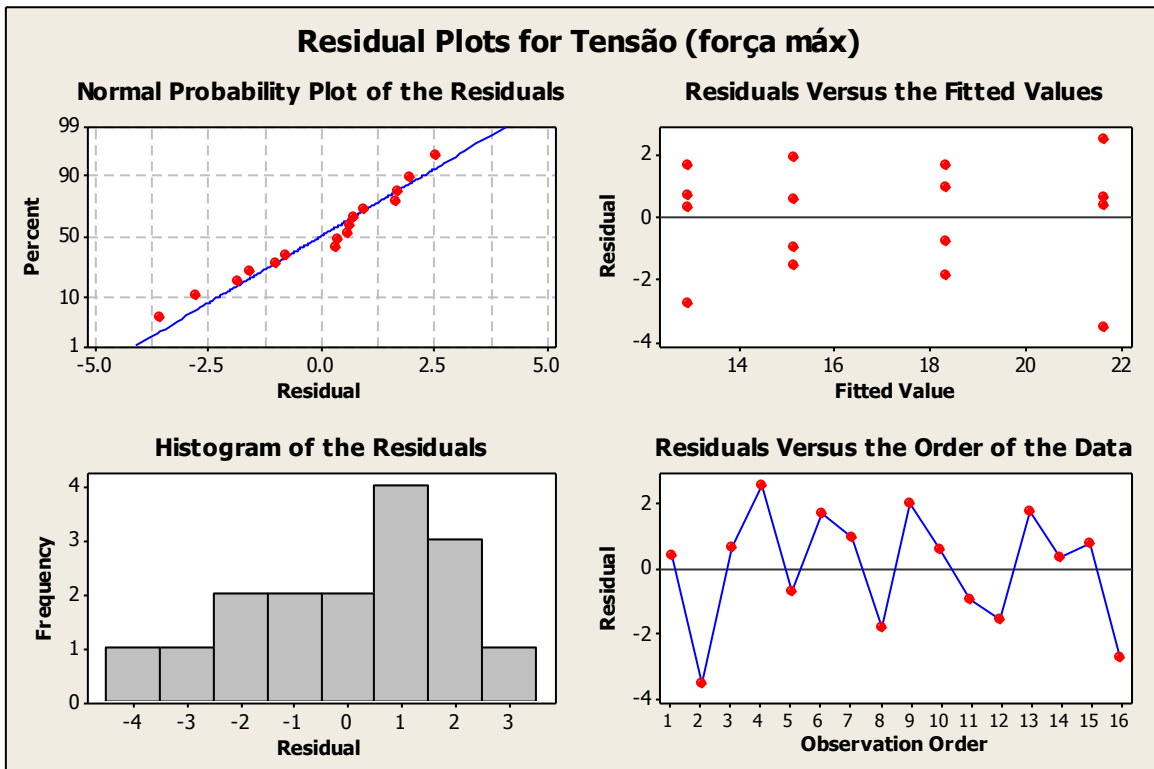
The regression equation is

$$\text{Tensão (força máx)} = 27.3 - 0.294 \text{ Madeira}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	27.300	1.511	18.07	0.000
Madeira	-0.29415	0.04112	-7.15	0.000

S = 1.83916    R-Sq = 78.5%    R-Sq(adj) = 77.0%



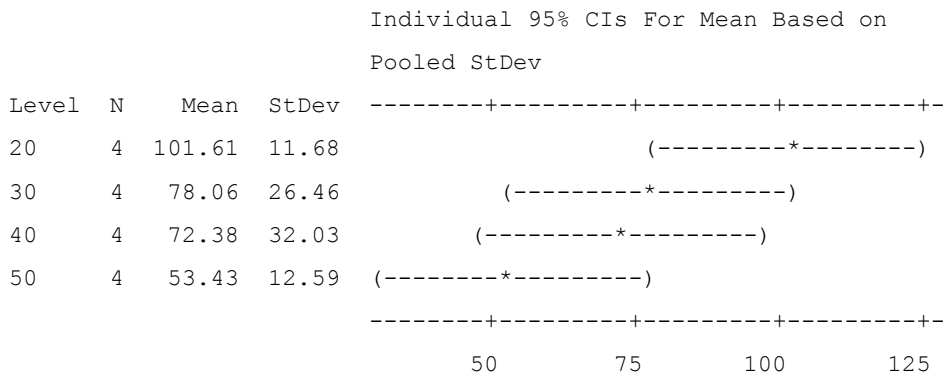


#### One-way ANOVA: Mod. Elast versus %Madeira

Source	DF	SS	MS	F	P
%Madeira	3	4728	1576	3.12	0.066
Error	12	6064	505		

Total 15 10792

S = 22.48 R-Sq = 43.81% R-Sq(adj) = 29.77%



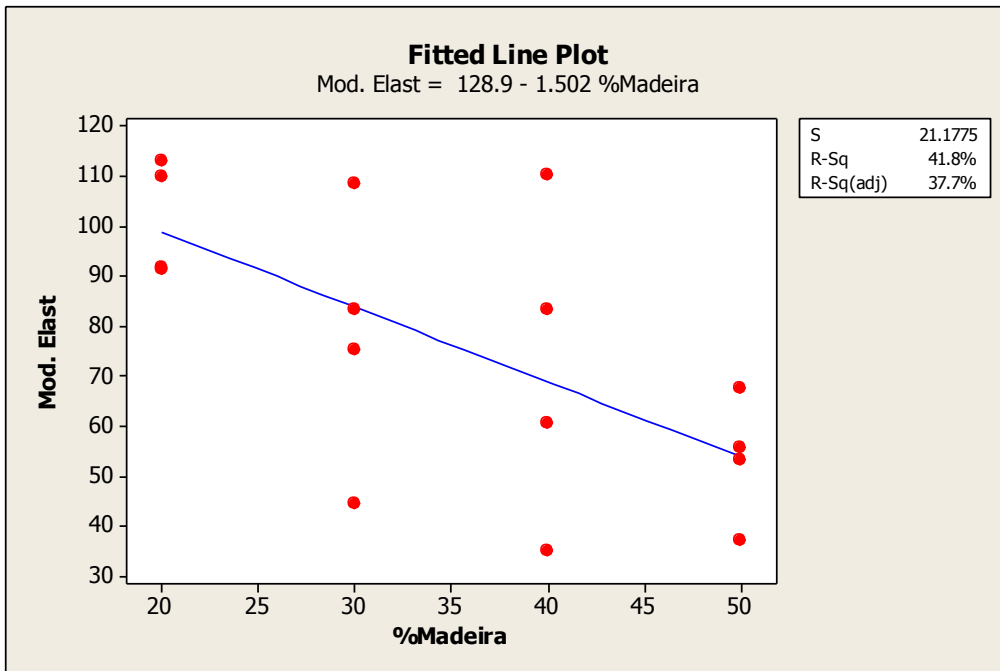
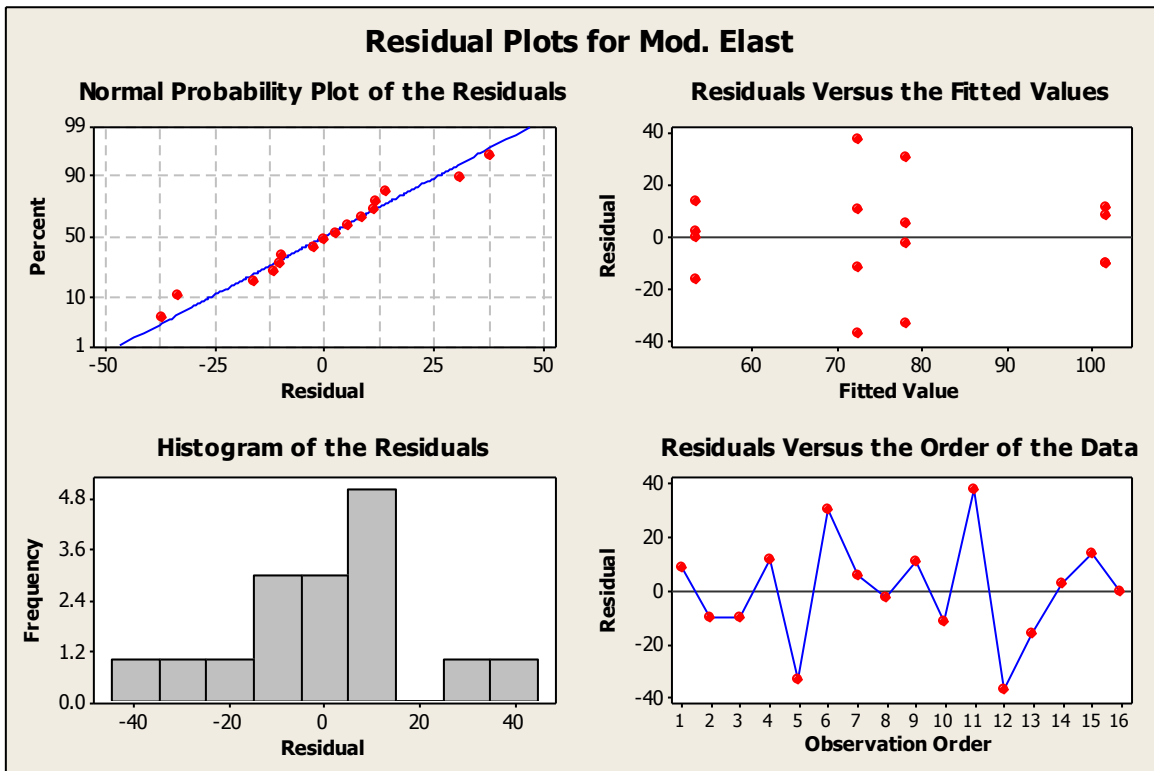
Pooled StDev = 22.48

### Regression Analysis: Mod. Elast versus %Madeira

The regression equation is

$$\text{Mod. Elast} = 129 - 1.50 \% \text{Madeira}$$

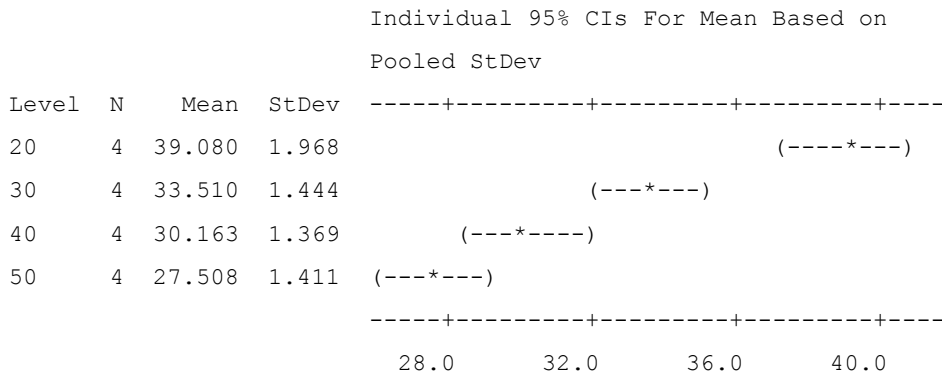
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	128.95	17.40	7.41	0.000
%Madeira	-1.5022	0.4735	-3.17	0.007



### One-way ANOVA: Energia por área (J/m2) versus %Madeira

Source	DF	SS	MS	F	P
%Madeira	3	298.75	99.58	40.55	0.000
Error	12	29.47	2.46		
Total	15	328.23			

S = 1.567 R-Sq = 91.02% R-Sq(adj) = 88.78%



Pooled StDev = 1.567

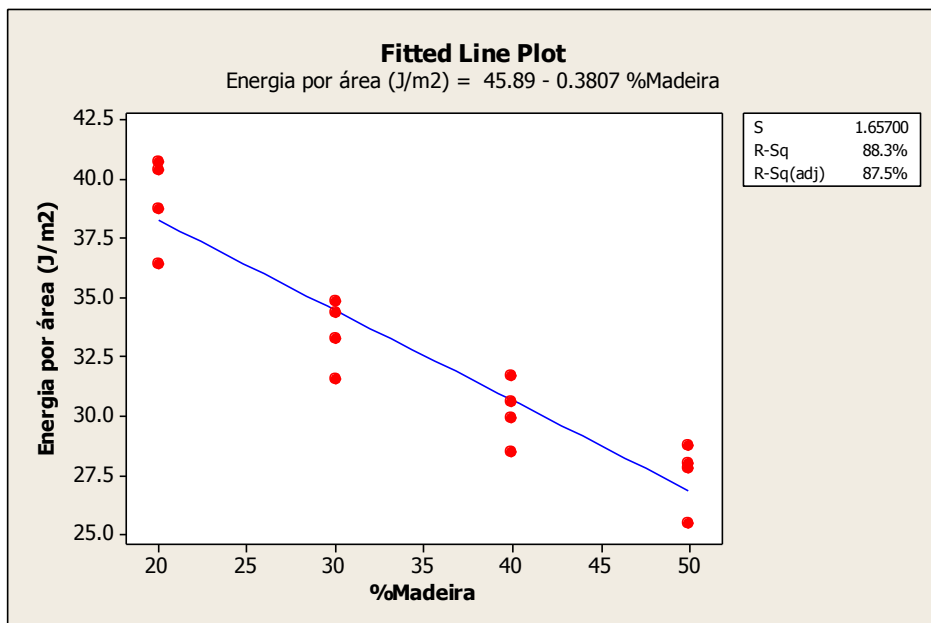
### Regression Analysis: Energia por área (J/m2) versus %Madeira

The regression equation is

$$\text{Energia por área (J/m2)} = 45.9 - 0.381 \% \text{Madeira}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	45.888	1.361	33.71	0.000
%Madeira	-0.38065	0.03705	-10.27	0.000

S = 1.65700 R-Sq = 88.3% R-Sq(adj) = 87.5%



# ANEXO G – ANÁLISE ECONÔMICA

Tabela G 1 – Análise econômica do projeto.

TÍTULO:		AEB-UFMG-201001-001															
PROJETO AVALIAÇÃO FINANCEIRO ECONÔMICA PRODUÇÃO DE MADEIRA PLÁSTICA																	
		ANO 0	ANO 1	ANO 2	ANO 3	ANO 4	ANO 5	ANO 6	ANO 7	ANO 8	ANO 9	ANO 10	ANO 11	ANO 12	ANO 13	ANO 14	ANO 15
IMOBILIZADO	R\$	(315,000.00)															
CAPEX 20 anos	R\$	-															
CAPEX 5 ANOS	R\$	(1,790,666.25)					R\$ -						R\$ (1,790,666.25)				\$ -
Capital de Giro	R\$	(676,810.76)															
<b>TOTAL</b>	<b>R\$</b>	<b>(2,782,477.01)</b>	<b>R\$ -</b>	<b>R\$ -</b>	<b>R\$ -</b>	<b>R\$ -</b>	<b>R\$ -</b>	<b>R\$ -</b>	<b>R\$ -</b>	<b>R\$ -</b>	<b>R\$ -</b>	<b>R\$ -</b>	<b>R\$ (1,790,666.25)</b>	<b>R\$ -</b>	<b>R\$ -</b>	<b>R\$ -</b>	<b>R\$ -</b>
RECEITA OPERACIONAL	R\$	-	R\$ 4,285,750.03	R\$ 4,714,325.03	R\$ 5,185,757.54	R\$ 5,704,333.29	R\$ 6,274,766.62	R\$ 6,902,243.28	R\$ 7,592,467.61	R\$ 8,351,714.37	R\$ 8,560,507.23	R\$ 8,774,519.91	R\$ 8,993,882.91	R\$ 9,218,729.98	R\$ 9,449,198.23	R\$ 9,685,428.19	R\$ 9,927,563.89
DESPESAS OPERACIONAIS	R\$	(2,929,078.80)	R\$ (2,796,202.79)	R\$ (2,963,974.96)	R\$ (3,141,813.46)	R\$ (3,330,322.27)	R\$ (3,530,141.60)	R\$ (3,741,950.10)	R\$ (3,966,467.10)	R\$ (4,204,455.13)	R\$ (4,456,722.44)	R\$ (4,724,125.78)	R\$ (5,007,573.33)	R\$ (5,308,027.73)	R\$ (5,626,509.39)	R\$ (5,964,099.96)	R\$ (6,321,945.95)
RESULTADO OPERACIONAL	R\$	(2,929,078.80)	R\$ 1,489,547.24	R\$ 1,750,350.07	R\$ 2,043,944.08	R\$ 2,374,011.03	R\$ 2,744,625.02	R\$ 3,160,293.19	R\$ 3,626,000.51	R\$ 4,147,259.24	R\$ 4,103,784.80	R\$ 4,050,394.13	R\$ 3,986,309.58	R\$ 3,910,702.25	R\$ 3,822,688.84	R\$ 3,721,328.23	R\$ 3,605,617.94
Despesa Financeira (Juros)	R\$	-	R\$ (388,385.80)	R\$ (388,385.80)	R\$ (388,385.80)	R\$ (388,385.80)	R\$ (388,385.80)	R\$ (388,385.80)	R\$ (388,385.80)	R\$ (388,385.80)	R\$ (388,385.80)	R\$ (388,385.80)	R\$ (388,385.80)	R\$ (388,385.80)	R\$ (388,385.80)	R\$ (388,385.80)	R\$ (388,385.80)
RESULTADO APÓS DESP. FINANCEIRA	R\$	(2,929,078.80)	R\$ 1,101,161.44	R\$ 1,361,964.28	R\$ 1,655,558.29	R\$ 1,985,625.23	R\$ 2,409,182.18	R\$ 2,882,028.75	R\$ 3,409,488.74	R\$ 3,997,440.35	R\$ 4,025,994.22	R\$ 4,050,394.13	R\$ 3,986,309.58	R\$ 3,910,702.25	R\$ 3,822,688.84	R\$ 3,721,328.23	R\$ 3,605,617.94
RESULTADO NÃO OPERACIONAL (VALOR RESIDUAL)								R\$ -									
Depreciação 20 anos	R\$	-	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Depreciação 5 anos	R\$	-	R\$ (358,133.25)	R\$ (358,133.25)	R\$ (358,133.25)	R\$ (358,133.25)	R\$ (358,133.25)	R\$ (358,133.25)	R\$ (358,133.25)	R\$ (358,133.25)	R\$ (358,133.25)	R\$ (358,133.25)	R\$ (358,133.25)	R\$ (358,133.25)	R\$ (358,133.25)	R\$ (358,133.25)	R\$ (358,133.25)
Prejuízo Acumulado Anos Anteriores	R\$	(2,929,078.80)	R\$ (2,186,050.61)	R\$ (1,182,219.58)	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Lucro Tributável	R\$	743,028.19	R\$ 1,003,831.03	R\$ 1,297,425.04	R\$ 1,627,491.98	R\$ 2,051,048.93	R\$ 2,882,028.75	R\$ 3,409,488.74	R\$ 3,997,440.35	R\$ 4,025,994.22	R\$ 4,050,394.13	R\$ 3,986,309.58	R\$ 3,910,702.25	R\$ 3,822,688.84	R\$ 3,721,328.23	R\$ 3,605,617.94	
Lucro Tributável - prejuízos anteriores	R\$	-	R\$ -	R\$ -	R\$ 115,205.46	R\$ 1,627,491.98	R\$ 2,051,048.93	R\$ 2,882,028.75	R\$ 3,409,488.74	R\$ 3,997,440.35	R\$ 4,025,994.22	R\$ 4,050,394.13	R\$ 3,986,309.58	R\$ 3,910,702.25	R\$ 3,822,688.84	R\$ 3,721,328.23	R\$ 3,605,617.94
CSLL (9%)	R\$	-	R\$ -	R\$ -	R\$ (10,368.49)	R\$ (146,474.28)	R\$ (184,594.40)	R\$ (259,382.59)	R\$ (306,853.99)	R\$ (359,769.63)	R\$ (362,339.48)	R\$ (364,535.47)	R\$ (358,767.86)	R\$ (351,963.20)	R\$ (344,042.00)	R\$ (334,919.54)	R\$ (324,505.61)
IR 15% (<R\$240.000,00/ano)	R\$	-	R\$ -	R\$ -	R\$ (17,280.82)	R\$ (36,000.00)	R\$ (36,000.00)	R\$ (36,000.00)	R\$ (36,000.00)	R\$ (36,000.00)	R\$ (36,000.00)	R\$ (36,000.00)	R\$ (36,000.00)	R\$ (36,000.00)	R\$ (36,000.00)	R\$ (36,000.00)	R\$ (36,000.00)
IR 25% (>R\$240.000,00/ano)	R\$	-	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ (346,873.00)	R\$ (452,762.23)	R\$ (660,507.19)	R\$ (792,372.18)	R\$ (939,360.09)	R\$ (946,498.55)	R\$ (952,598.53)	R\$ (936,577.40)	R\$ (917,675.56)	R\$ (895,672.21)	R\$ (870,332.06)	R\$ (841,404.48)
Resultado após Tributação	R\$	(2,929,078.80)	R\$ -	R\$ -	R\$ 87,556.15	R\$ 1,098,144.71	R\$ 1,377,692.30	R\$ 1,926,138.97	R\$ 2,274,262.57	R\$ 2,662,310.63	R\$ 2,681,156.18	R\$ 2,697,260.13	R\$ 2,654,964.32	R\$ 2,605,063.49	R\$ 2,546,974.63	R\$ 2,480,076.63	R\$ 2,403,707.84
PL	R\$	-	R\$ -	R\$ -	R\$ 8,755.61	R\$ 109,814.47	R\$ 137,769.23	R\$ 192,613.90	R\$ 227,426.26	R\$ 266,231.06	R\$ 268,115.62	R\$ 269,726.01	R\$ 265,496.43	R\$ 260,506.35	R\$ 254,697.46	R\$ 248,007.66	R\$ 240,370.78
RESULTADO LÍQUIDO	R\$	(2,929,078.80)	R\$ -	R\$ -	R\$ 78,800.53	R\$ 988,330.24	R\$ 1,239,923.07	R\$ 1,733,525.08	R\$ 2,046,836.31	R\$ 2,396,079.57	R\$ 2,413,040.57	R\$ 2,427,534.11	R\$ 2,389,467.89	R\$ 2,344,557.14	R\$ 2,292,277.17	R\$ 2,232,068.97	R\$ 2,163,337.06
FINANCIAMENTO	R\$	4,854,822.44	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ (661,787.00)	R\$ (714,729.96)	R\$ (771,908.35)	R\$ (833,661.02)	R\$ (900,353.90)	R\$ (972,382.21)	R\$ (1,050,172.79)	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Resultado do ANO Investidor	R\$	(856,733.37)	R\$ (358,133.25)	R\$ (358,133.25)	R\$ (279,332.72)	R\$ (31,590.01)	R\$ 167,059.86	R\$ 961,616.72	R\$ 1,213,175.29	R\$ 1,495,725.67	R\$ 1,440,658.35	R\$ 1,377,361.32	R\$ 2,389,467.89	R\$ 2,344,557.14	R\$ 2,292,277.17	R\$ 2,232,068.97	R\$ 2,163,337.06
Pay Back	R\$	(6,568,289.18)	R\$ (6,926,422.43)	R\$ (7,284,555.68)	R\$ (7,563,888.40)	R\$ (7,595,478.41)	R\$ (7,428,418.55)	R\$ (6,466,801.83)	R\$ (5,253,626.54)	R\$ (3,757,900.87)	R\$ (2,317,242.52)	R\$ (939,881.19)	R\$ 1,449,586.70	R\$ 3,794,143.84	R\$ 6,086,421.01	R\$ 8,318,489.98	R\$ 10,481,827.03
VPL (10,8%/ano)	R\$	1,117,603.97															
TIR		19,96%															
Resultado do ANO - Projeto	R\$	(5,711,555.81)	R\$ (358,133.25)	R\$ (358,133.25)	R\$ (279,332.72)	R\$ 630,196.99	R\$ 881,789.82	R\$ 1,733,525.08	R\$ 2,046,836.31	R\$ 2,396,079.57	R\$ 2,413,040.57	R\$ 2,427,534.11	R\$ 2,389,467.89	R\$ 2,344,557.14	R\$ 2,292,277.17	R\$ 2,232,068.97	R\$ 2,163,337.06
TIR		8,90%															