

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**INGRID FERREIRA COUTINHO
IVANA FLÁVIA MONTEIRO MARINHO
JANAINA APARECIDA TAVARES BARBOSA
LUCIANO DE ALMEIDA BEILER**

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS A PARTIR
DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS PARA APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO
CIVIL**

VOLTA REDONDA

2017

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS A PARTIR
DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS PARA APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO
CIVIL**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Civil do UniFOA como requisito à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Alunos:

INGRID FERREIRA COUTINHO

IVANA FLÁVIA MONTEIRO MARINHO

JANAÍNA APARECIDA TAVARES BARBOSA

LUCIANO DE ALMEIDA BEILLER

Orientador:

Prof. Bruno Chaboli Gambarato

VOLTA REDONDA

2017

FOLHA DE APROVAÇÃO

Alunos:
Ingrid Ferreira Coutinho
Ivana Flávia Monteiro Marinho
Janaina Aparecida Tavares Barbosa
Luciano de Almeida Beiller

Desenvolvimento de compósitos poliméricos a partir de resíduos industriais
para aplicação na construção civil

Banca Examinadora:

Professor Orientador

Prof Dr. Bruno Chaboli Gambarato

Professor Avaliador

Prof.

Professor Avaliador

Prof.

DEDICATORIA

Dedicamos a todos os alunos e
Mestres do Curso de Engenharia Civil,
que reservam todo seu tempo em busca
de sabedoria.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que nos ajudou ao longo desses anos como universitários.

Às nossas famílias e amigos que com paciência e companheirismo abriram mão de nossas poucas horas de convívio permitindo a execução deste trabalho.

RESUMO

Com o crescente desperdício e lançamento de detritos no meio ambiente, intensifica-se a necessidade de estudos a respeito da reciclagem e reaproveitamento de materiais. Este projeto objetiva desenvolver um material compósito a partir do Polipropileno reciclado, sendo este fortalecido por outros resíduos, tais qual a serragem e a escória de aciaria, e testar sua aplicabilidade na Engenharia Civil. Para isto, estabeleceram-se os percentuais de cada composto para serem estudados. Através da homogeneização de tais materiais por meio de um Homogeneizador para Plásticos, obtêm-se os compostos com suas diferentes proporções. Estes, por sua vez, são submetidos ao Moinho Granulador, para a fragmentação do material. Este processo se repete até que o compósito esteja bem homogêneo. Desta maneira, torna-se possível a confecção dos corpos de prova, que são expostos a testes de tração e flexão, nos quais é aplicada uma carga que definirá sua resistência mecânica. Os corpos de prova também são submetidos à análise térmica, por meio de um Analisador Térmico Simultâneo, no qual uma pequena quantidade do material é submetida à variação de temperatura para que se possam definir seus pontos de fusão e solidificação, além de verificar se há ganho ou perda de massa. À vista disso, é possível analisar a aplicabilidade do Compósito desenvolvido no campo da Engenharia Civil e elaborar um quadro comparativo de esforços mecânicos para diferentes frações das matérias-primas selecionadas.

Palavras-chaves: Reciclagem; Polipropileno; Serragem; Escória de Aciaria.

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--------------------------------------------------|----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 | Problema Abordado..... | 2 |
| 1.2 | Justificativa..... | 2 |
| 1.3 | Objetivo Geral | 3 |
| 1.4 | Objetivos Específicos | 3 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 4 |
| 2.1 | Materiais Compósitos | 4 |
| 2.2 | Matriz..... | 8 |
| 2.2.1 | Matriz Polimérica | 10 |
| 2.3 | Polipropileno..... | 14 |
| 2.3.1 | Reforço | 17 |
| 2.3.2 | Fibras Naturais..... | 22 |
| 2.3.3 | Fibras Vegetais | 23 |
| 2.3.4 | Escória de Aciaria | 25 |
| 2.4 | Ensaio de Tração..... | 27 |
| 2.4.1 | Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)..... | 30 |
| 2.5 | Temperatura de Fusão (TM)..... | 32 |
| 2.5.1 | Temperatura de Cristalização (TC) | 32 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS..... | 34 |
| 3.1 | Material..... | 34 |
| 3.2 | Métodos..... | 36 |
| 3.2.1 | Preparação dos Compósitos..... | 36 |
| 3.2.2 | Análise Térmica | 40 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 50 |
| 4.1 | Ensaio de tração..... | 50 |

| | | |
|-------|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1.1 | Compósitos contendo somente serragem..... | 50 |
| 4.1.2 | Compósitos contendo somente escória de aciaria..... | 52 |
| 4.1.3 | Compósitos contendo 5% de serragem e diferentes teores de escória..... | 53 |
| 4.1.4 | Compósitos contendo 10% de escória e diferentes teores de serragem | 54 |
| 4.1.5 | Compósitos contendo 10% de serragem e diferentes teores de escória..... | 56 |
| 4.1.6 | Compósitos contendo 5% de escoria e diferentes teores de serragem | 57 |
| 4.2 | Análise Térmica..... | 58 |
| 4.3 | Sugestões de aplicação na Indústria da Construção Civil..... | 59 |
| 5 | CONCLUSÃO | 62 |
| 6 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 64 |
| 7 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 65 |
| 8 | ANEXO | 69 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Representações esquemáticas de compósitos reforçados com fibras contínuas e alinhadas (a), descontínuas e alinhadas (b), descontínuas e orientadas aleatoriamente (c). | 8 |
| Figura 2: Aplicação de esforços compressivos (esquerda) e cisalhantes (direita) em fibras vegetais..... | 9 |
| Figura 3: Limite de resistência à tração e a temperatura ambiente | 11 |
| Figura 4: Tipos de matriz dos compósitos. | 12 |
| Figura 5: Exemplo de uma reação química que ocorre durante o processo de cura da resina de poliéster insaturado..... | 12 |
| Figura 6: Polimerização do monômero adquirido do gás propileno para obtenção de PP. | 15 |
| Figura 7: Representações da maneira que as trincas são impedidas de se propagar devido às fibras existentes no percurso..... | 18 |
| Figura 8: Estrutura da fibra vegetal. | 24 |
| Figura 9: Produção da escória de alto forno e escória de aciaria..... | 25 |
| Figura 10: Esboço do basculamento, resfriamento e beneficiamento da escória de aciaria, a granulometria de saída pode variar em cada unidade siderúrgica. | 26 |
| Figura 11: Desenho esquemático de um corpo de prova submetido ao ensaio de tração..... | 28 |
| Figura 12: Dimensões e forma de um corpo de prova de seção retangular..... | 30 |
| Figura 13: Exemplo de uma curva DSC | 31 |

LISTA DE FOTOGRAFIAS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Fotografia 1: Máquina Universal para Ensaio de tração (EMIC). | 29 |
| Fotografia 2: Polipropileno doméstico utilizado. | 35 |
| Fotografia 3: Escória de aciaria granulada. | 35 |
| Fotografia 4: Serragem de madeira..... | 36 |
| Fotografia 5: Moinho de facas (a); compósito moído (b). | 38 |
| Fotografia 6: Homogeneizador (a); mistura dos compósitos (b); plástico..... | 38 |
| Fotografia 7: Injetora Ray Ram- modelo TSMP..... | 39 |
| Fotografia 8: Analisador térmico..... | 40 |
| Fotografia 9: Instalação de tubo corrugado num projeto de drenagem de | 61 |
| Fotografia 10: <i>Bubbledeck</i> | 61 |
| Fotografia 11: Aterro Sanitário em Cascavel PR | 69 |
| Fotografia 12: Aterro Sanitário em Cascavel PR..... | 69 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Características Mecânicas à Temperatura Ambiente de Alguns dos Polímeros Mais Comuns..... | 22 |
| Tabela 2: Propriedades mecânicas em tração para os compósitos com serragem...52 | 52 |
| Tabela 3: Valores de elasticidade e tensão dos compósitos contendo somente escória de aciaria CP0, CP0A5B e CP10A10B. | 53 |
| Tabela 4: Valores de elasticidade e tensão dos compósitos contendo 5% de serragem e diferentes teores de escória CP5A0B, CP5A5B e CP5A5B | 54 |
| Tabela 5: Valores de elasticidade e tensão dos compósitos contendo 10% de escoria e diferentes valores de serragem CP0A10B, CP5A10B e CP10A10B. | 55 |
| Tabela 6: Valores de elasticidade e tensão dos compósitos contendo 10% de serragem e diferentes teores de escória CP10A0B, CP10A5B e CP10A10B..... | 57 |
| Tabela 7: Valores de elasticidade e tensão dos compósitos contendo 5% de escória e diferentes teores de serragem CP0A5B, CP5A5B e CP10A5B. | 58 |
| Tabela 8: Valores de ΔT , Pico, ΔH e porcentagens de cristalização dos compósitos. | 59 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1: Comparação qualitativa entre as propriedades de matrizes poliméricas de compósitos..... | 14 |
| Quadro 2: Dados técnicos do polipropileno utilizado nos compósitos..... | 34 |
| Quadro 3: Percentuais analisados. | 37 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1: Diagramas Comparativos entre propriedades de materiais | 6 |
| Gráfico 2: Curvas de tensão x deformação características de um plástico rígido, uma fibra, um plástico flexível e um elastômero. | 16 |
| Gráfico 3: Curvas de tensão x deformação da fibra, resina e compósito. | 18 |
| Gráfico 4: Variação de propriedades dos compósitos em razão do comprimento da fibra..... | 20 |
| Gráfico 5: Resistência específica adquirida ao longo do tempo para diversos materiais. | 21 |
| Gráfico 6: Desenho esquemático de um corpo de prova submetido ao ensaio de tração..... | 29 |
| Gráfico 7: Gráfico de fusão do compósito CP5A0B..... | 41 |
| Gráfico 8: Gráfico de cristalização do compósito CP5A0B..... | 41 |
| Gráfico 9: Gráfico de fusão do compósito CP10A10B..... | 42 |
| Gráfico 10: Gráfico de cristalização do compósito CP10A10B..... | 42 |
| Gráfico 11: Gráfico de fusão do compósito CP10A5B..... | 43 |
| Gráfico 12: Gráfico de cristalização do compósito CP10A5B..... | 43 |
| Gráfico 13: Gráfico de fusão do compósito CP0A10B..... | 44 |
| Gráfico 14: Gráfico de cristalização do compósito CP0A10B..... | 44 |
| Gráfico 15: Gráfico de fusão do compósito CP0A5B..... | 45 |
| Gráfico 16: Gráfico de cristalização do compósito CP0A5B..... | 45 |
| Gráfico 17: Gráfico de fusão do compósito CP5A5B..... | 46 |
| Gráfico 18: Gráfico de cristalização do compósito CP5A5B..... | 46 |
| Gráfico 19: Gráfico de fusão do compósito CP5A10B..... | 47 |
| Gráfico 20: Gráfico de cristalização do compósito CP5A10B..... | 47 |
| Gráfico 21: Gráfico de fusão do compósito CP10A0B..... | 48 |
| Gráfico 22: Gráfico de fusão do compósito CP10A0B..... | 48 |
| Gráfico 23: Gráfico de fusão do Polipropileno Reciclado | 49 |
| Gráfico 24: Gráfico de cristalização do Polipropileno Reciclado | 49 |
| Gráfico 25: Comportamento mecânico dos compósitos contendo somente serragem CP0, CP5A0B e CP10A0B. | 51 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 26: Comportamento mecânico dos compósitos contendo somente escória de aciaria CP0, CP0A5B e CP0A10B..... | 52 |
| Gráfico 27: Comportamento mecânico dos compósitos contendo 5% de serragem e diferentes teores de escória de aciaria CP5A0B, CP5A5B e CP5A10B. | 53 |
| Gráfico 28: Comportamento mecânico dos compósitos contendo 10% de escória e diferentes teores de serragem CP0A10B, CP5A10B e CP10A10B. | 55 |
| Gráfico 29 Comportamento mecânico dos compósitos contendo 10% de serragem e diferentes teores de escória CP10A0B, CP10A5B e CP10A10B..... | 56 |
| Gráfico 30: Comportamento mecânico dos compósitos contendo 5% de escoria e diferentes teores de serragem CP0A5B, CP5A5B e CP10A5B. | 57 |

LISTA DE ABREVIATURAS

CMP- Compósitos de matrizes poliméricas

CMM- Compósitos de matrizes metálicas

CMC- Composito de matrizes cerâmicas

PS- Poliestileno

PP- Polipropileno

PVC- Cloreto de Vinila (Poli)

PEBD- Polietileno

Mpa- Mega Pascal

GPa- Giga Pascal

Psi- *pound force per square inch* (Força Libra por Polegada Quadrada)

°C- Graus Celcius

TM- Temperatura de Fusão

TC- Temperatura de Cristalização

TG- Temperatura de Transição Vítrea

DSC- Calorimetria Exploratória Diferencial

Mn- Manganês

P- Fósforo

S- Enxofre

CO₂- Dióxido de Carbono

CaO- Cal

CaCO₃MgCO₃- Dolomita

ASTM- *American Society for Testing and Materials*

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

Kg- Quilograma

m³- Metro Cúbico

KN- Quilo Newton

mm- Milímetro

min- Minuto

mg- Miligrama

%- Porcentagem

ΔH - Variação de Entalpia

ΔT - Variação de Temperatura

$J \cdot g^{-1}$ - Joule por grama

MEV- Microscopia Eletrônica de Varredura

μm - Micrômetro

1 INTRODUÇÃO

Como um dos inúmeros resíduos gerados, temos os materiais plásticos, cuja produção mundial em 2010 foi estimada em 265 milhões de toneladas. Sua constituição é feita a partir do petróleo e tem como principal característica, sua versatilidade (MAGRINI, 2012).

Desta forma, a construção sustentável tem como objetivo de pesquisa e realização o decréscimo nos impactos ambientais por meio da utilização de matérias-primas sustentáveis que por sua vez vão ser destinadas à constituição de edificações que respeitem o meio ambiente (MAZUR, 2015).

Em contrapartida, os resíduos geram impactos ambientais quando descartados incorretamente, pois em regra, não são biodegradáveis e podem gerar danos à saúde dos seres humanos e animais (MAZUR, 2015).

Diante do clamor da sociedade quanto à solução de inúmeros problemas ambientais, em 1991 tem a criação da Lei 203, que abraçava questões como a coleta, tratamento dos resíduos, bem como o transporte e destinação dos resíduos provenientes do serviço de saúde. Com o passar do tempo, e ainda em voga o tema quanto a defesa do meio ambiente, em 2001 a Câmara dos Deputados cria a Comissão da Política Nacional de Resíduos, para que analisasse todos os projetos de lei apensados junto a Lei 203/91 e formular uma proposta substitutiva.

O então Presidente do Brasil Luís Inácio Lula da Silva cria em 2003 o Grupo de Trabalho Interministerial de Saneamento Ambiental, o qual reestrutura o setor de saneamento em nível federal e cria o Programa de Resíduos Sólidos Urbanos.

Ao longo dos anos seguintes, o tema quanto aos resíduos sólidos e saneamento, vem a ser discutido por diversas vezes sendo então instituído em 2010

o Projeto de Lei 12305 o que promove a substituição do então PL 203/91 trazendo em seu texto obrigações aos empresários, aos governos e cidadãos quanto ao gerenciamento de todo e qualquer resíduo.

Dentro deste contexto, pretende-se, neste trabalho, reutilizar resíduos na obtenção de um material aplicável na construção civil. Para tal, foram utilizados serragem, escória de aciaria e embalagens de polipropileno obtidas por coletas domésticas.

1.1 Problema Abordado

Conforme a sociedade e sua economia crescem, seu lixo produzido só aumenta. Uma grande porção de dejetos que poderiam ser reciclados, como os polímeros plásticos, que são descartados em rios, córregos e aterros conforme o anexo mostra nas figuras 11 e 12, de forma indiscriminada e descontrolada, contaminando o meio ambiente. Nesta situação é de extrema importância o ensino de valores como reciclagem e preservação ambiental, abordadas neste trabalho, em que os materiais foram selecionados e preparados para constituição de compósitos que podem ser reinseridos ao mercado e na Construção Civil (LOPES, 2006).

1.2 Justificativa

É possível reaproveitar materiais poliméricos como o polipropileno, um material termoplástico, que pode ser reprocessado por aplicação de temperatura (CALLISTER, 2013). Além disso, os resíduos da aciaria, bem como os resíduos da indústria da madeira podem promover boas propriedades a materiais compósitos.

1.3 Objetivo Geral

Em vista do crescimento do modelo de Construção Sustentável em caráter mundial, o trabalho visa desenvolver e caracterizar um material compósito de Polipropileno reciclado reforçado com resíduos (serragem e escória de aciaria) e avaliar sua utilização na Construção Civil.

1.4 Objetivos Específicos

- Coleta doméstica de embalagens de polipropileno;
- Obtenção dos compósitos via mistura termocinética em diferentes composições;
- Caracterização das propriedades mecânicas do material;
- Análise térmica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais Compósitos

Os diferentes tipos de compósitos apresentam características bem diversas entre si, e os seus usos, em diferentes aplicações, dependem de fatores, tais como desempenho estrutural, preço e disponibilidade de matérias-primas, e cadência do processo de fabricação, entre outros parâmetros. Atualmente, com a intensificação da inevitabilidade de se conservar o meio ambiente das inúmeras agressões oriundas dos processos industriais, bem como reduzir a dependência de recursos não renováveis como o petróleo, e assim efetivamente promover o desenvolvimento sustentável, o uso de matérias primas de princípio vegetal, e, portanto renováveis, vem progredindo nos últimos anos (NETO; PARDINI, 2006).

Conforme SCHAEGLER (2015) define: “são uma combinação macroscópica de dois ou mais materiais distintos e insolúveis entre si. Essa insolubilidade desencadeia a existência de uma interface definida no material”. Pode-se admitir que os compósitos têm boas qualidades estruturais, térmicas, elétricas, tribológicas e ambientais, permitindo desta forma, ser uma classe vantajosa em que seus componentes mesclados conseguem alcançar propriedades que de modo individual não conseguiriam.

Os materiais compósitos poliméricos assumem um papel cada vez mais importante em quase todos os segmentos da indústria moderna, beneficiando a economia e colaborando para o progresso do país.

O avanço dos compósitos poliméricos tem possibilitado a confecção de estruturas antes reservadas aos metais. A aplicação do material em componentes estruturais promove sua confiabilidade e lhe garante cada vez mais aplicações e reafirmam o potencial dos compósitos e sua capacidade de reduzirem componentes

e massa sem que ocorra comprometimento do comportamento mecânico (MARINUCCI, 2011).

O conceito dos materiais compósitos não é atual, sendo a madeira um tipo de material fibroso (fibras de celulose em uma matriz de lignina, onde as fibras de celulose promovem a resistência à tração e a lignina a flexibilidade, aumento a resistência) assim como os ossos são um compósito natural formado por fibras de colágeno e uma matriz mineral (OLIVEIRA, 2012).

Desta forma, a diligência científica nos materiais compósitos naturais ou artificiais e sua aplicabilidade no cotidiano, trouxeram relevância a seu estudo e definição de alguns critérios para serem adotados, expostos por (CHAWLA, 2011).

- É um material manufaturado, isto é, não se aplica insumos de ocorrência natural, como a madeira;
- É constituído por duas ou mais fases físicas e/ou químicas, apropriadamente arranjadas ou distribuídas, como uma interface separando-as;
- Possui características não encontradas em nenhum outro dos seus componentes isolados.

Data-se do início do desenvolvimento deste tipo de material, a Segunda Guerra Mundial, no qual foi almejada a criação de produtos com rigidez e resistência à tração apropriada para a utilização na indústria aeroespacial, dando origem então aos primeiros materiais compósitos de matrizes poliméricas (CMP), que passaram a ser alternativas às ligas de alumínio então existentes e que eram submetidas às adversidades como fadiga e corrosão. Neste referido período, também passaram a serem utilizados polímeros com reforços de fibra de vidro em motores de foguete, tendo em meados de 1950, sido realizados experimentos mais amplos que ampliaram e melhoraram suas características, como a resistência à corrosão (OLIVEIRA, 2012).

Um decênio adiante, em 1960, os materiais compósitos também passaram a ser empregados em artigos esportivos, ampliando o mercado consumidor destes materiais e o desenvolvimento em pesquisas. No mesmo intervalo os compósitos de matriz metálica (CMM), foram criados, trazendo vantagens e desenvolvimento no campo da eficiência estrutural. Nos primeiros experimentos, os CMM criados, eram feitos com monofilamentos com alta resistência à tração, inicialmente de boro e posteriormente de carboneto de silício. Já os Compósitos Cerâmicos (CMC), foram elaborados devido à significância da criação de produtos com boas propriedades estruturais em altas temperaturas (SCHIAVON, 2012).

Sua essência científica o expõe como um material que possui uma matriz contínua, neste estudo o polipropileno, a escória de aciaria e serragem de madeira. Esta amálgama, balanceada, resulta num composto final com propriedades superiores às individuais, advindas do mecanismo de divisão de cargas. Tem-se sua exemplificação no gráfico 1.

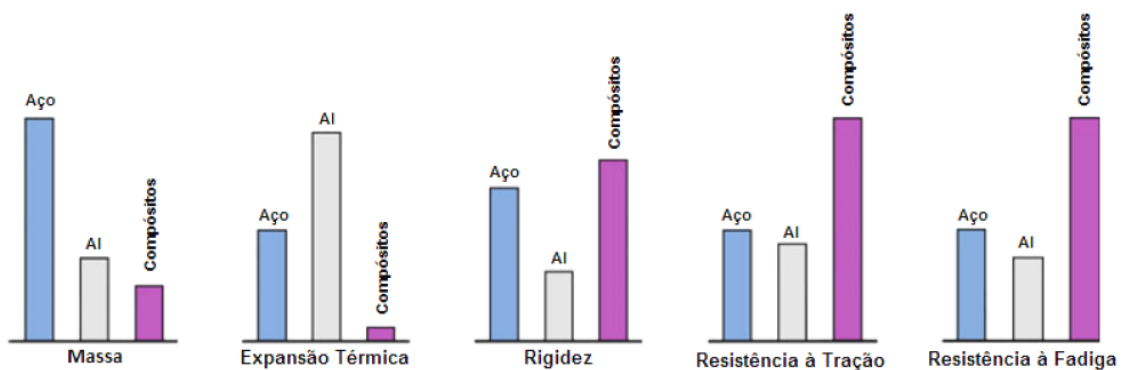


Gráfico 1: Diagramas Comparativos entre propriedades de materiais

Fonte: CHAWLA , 2011.

De acordo com MIRACLE (2001) o reforço possui uma fase, comumente, mais enrijecida que a matriz, sendo capaz em conformidade com seu tipo, adicionar melhor condutividade térmica, elétrica, coeficiente de expansão térmica ínfera à matriz, assim como boa resistência aos desgastes. Há situações ímpares em que o reforço pode ser mais dúctil que a resina, desta forma gerando um compósito final mais tenaz. Admite-se que a rigidez e resistência à tração de um compósito são

guarnecidas pelo reforço, tendo suas propriedades atestadas durante a associação do reforço com a matriz.

A madeira, por exemplo, é relevante material de engenharia convencional, constitui também uma imensa riqueza renovável à disposição do homem. Considerando seu emprego exclusivamente como material de engenharia, pode-se afirmar que a madeira é um compósito natural de extrema complexidade, em que os elementos de resistência são representados pelas fibras de celulose em 60%, o material aglutinante lignina em 25% e 15% de óleos, resinas, amidos, taninos e açúcares (MANO, 2011).

Normalmente, as fibras contínuas são alinhadas, diferente das fibras descontínuas, uma vez que podem ser alinhadas ou então orientadas parcialmente ou aleatoriamente conforme a figura 1.

Obtêm-se melhores propriedades gerais dos compósitos quando esta distribuição das fibras dá-se de maneira uniforme. As reações mecânicas deste tipo de compósito dependem de inúmeras condições, incluindo os comportamentos tensão-deformação das fases fibra e matriz, as porções volumétricas das fases e a direção na qual a tensão ou carga é aplicada, (CALLISTER, 2013).

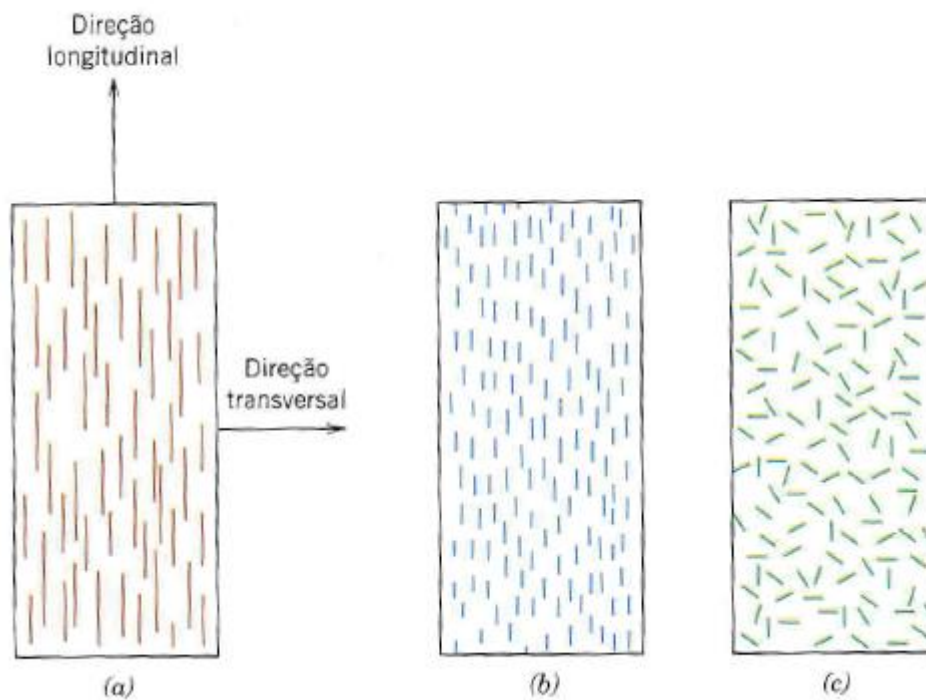


Figura 1: Representações esquemáticas de compósitos reforçados com fibras contínuas e alinhadas (a), descontínuas e alinhadas (b), descontínuas e orientadas aleatoriamente (c).

Fonte: CALLISTER, 2013

2.2 Matriz

Conforme KAW (2006), a matriz é compreendida como a fase contínua e responsável pela distribuição da carga do reforço. Suas atribuições são:

- Unir o reforço posto suas características coesivas e adesivas;
- Transferir a carga para entre o reforço. A matriz o mantém na orientação e posição adequadas para que suporte a carga e a distribua uniformemente ao longo da extensão do compósito;
- Isolar o reforço do ambiente;
- Fornecer reação inelástica quando o produto for solicitado, particularidade fundamental que faz com que pontos de concentração de tensões sejam significativamente amenizados e tensões internas

seja redistribuída a partir de reforços danificados;

- Conceder forma sólida ao compósito, favorecendo a manipulação durante a fabricação, o que é particularmente necessário em compósitos com reforços descontínuos, que não possuem comprimento o bastante para aprovisionar essa estrutura ao produto.

De forma comum, a matriz compõe entre 30 e 40% do compósito criado, tendo maior atuação na composição como um todo quando referente a esforços compressivos e cisalhamento (AKOVALI 2001). A matriz ainda possui propriedades adesivas e de rigidez, estas responsáveis por manter as fibras dos demais componentes na devida posição e mesclada umas às outras, mesmo diante de esforços mecânicos provenientes de uma distribuição de cargas qualquer conforme figura 2.

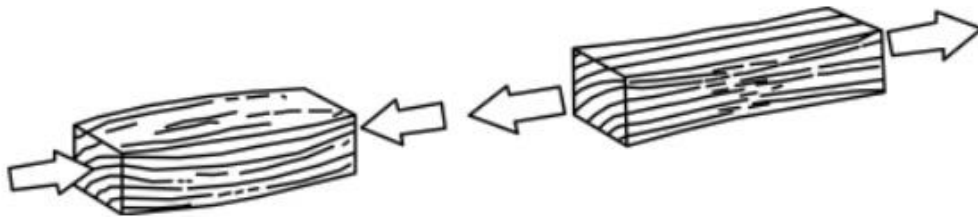


Figura 2: Aplicação de esforços compressivos (esquerda) e cisalhantes (direita) em fibras vegetais.

Fonte: RITTER, 1990

É relevante expor que, analisando a matriz, esta divide os compósitos em três classes (Miracle, 2001):

- CMM: vastamente empregado na indústria automotiva, abarcam materiais de matriz metálica, reforçada com fibras ou partículas em exemplo carbetos de silício;
- CMC: matriz cerâmica mesclada a um reforço de fibras curtas ou com partículas, como os whiskers que compreendem serem partículas formadas por um único cristal;
- CMP: são os polímeros fortalecidos com fibras, dispõem uma resina

polimérica como matriz e seu reforço pode ser realizado, tendo como exemplo, com fibras de carbono, vidro e aramida.

2.2.1 Matriz Polimérica

Atualmente, no meio dos materiais de engenharia estão integrados variados polímeros. Plásticos, borrachas, fibras e adesivos são materiais poliméricos devidamente destacados e indispensáveis à vida moderna. Na sociedade atual sua aplicação está em quase tudo o que se vê. No entanto é interessante ressaltar que a vida útil desses materiais é limitada pelo seu processo de degradação. Mediante a este conceito, pode se dizer que o encadeamento de degradação dos polímeros define-se como o procedimento que altera a ordem química do material, interferindo assim na forma íntegra do mesmo. Pode ser dito mediante as pesquisas que esse processo de degradação se estabiliza através de procedimentos, que podem ser utilizados mediante a um estudo para dificultar a degradação de cada tipo específico de polímero (PAOLI, 2008).

O polímero é formado pela união de pequenas moléculas, os monômeros, produzido outras bem maiores que são chamadas de macromoléculas. As propriedades de fusibilidade dos polímeros indicam a técnica do processamento do material, que são identificados em termoplásticos e termofixos (MANCINELLI, 2015).

Os materiais termoplásticos manifestam benefícios como razoável resistência química, ressaltada tenacidade, alto volume de produção, baixa densidade, médio investimento nos meios de produção e reutilização do material (reciclagem). São materiais que fundem e fluem sob efeito de temperatura e pressão e endurecem quando resfriados. Essa condição permite que possam ser convenientemente moldados. Aplicando-se pressão e temperatura podem iniciar um novo ciclo de fusão e endurecimento. Portanto, suas propriedades físicas são reversíveis, como no Poliestireno (PS), Polipropileno (PP) e Poli (cloreto de vinila) (PVC), (MARINUCCI, 2011).

Segundo (CALLISTER, 2013), os polímeros são, em muitos aspectos, mecanicamente diferentes dos metais (figura 3). Por exemplo, o módulo dos materiais poliméricos altamente elásticos pode ser tão baixo quanto 7 MPa (10^3 psi), mas também pode ser tão alto quanto 4 GPa ($0,6 \times 10^6$ psi) para alguns dos polímeros mais rígidos; os valores dos módulos para os metais são muito superiores e oscilam entre 48 GPa e 410 GPa (7×10^6 psi a 60×10^6 psi). Os limites máximos de resistência a tração para os polímeros são da grandeza de 100 MPa (15.000 psi) para algumas ligas metálicas, atinge 4100 MPa (600.000 psi). E, enquanto os metais raramente se alongam plasticamente além de 100%, alguns polímeros muito elásticos podem apresentar alongamentos superiores a 1000%.

Além disso, as propriedades mecânicas dos materiais poliméricos designam maior sensibilidade à mudanças de temperatura próximas à temperatura ambiente (figura 3).

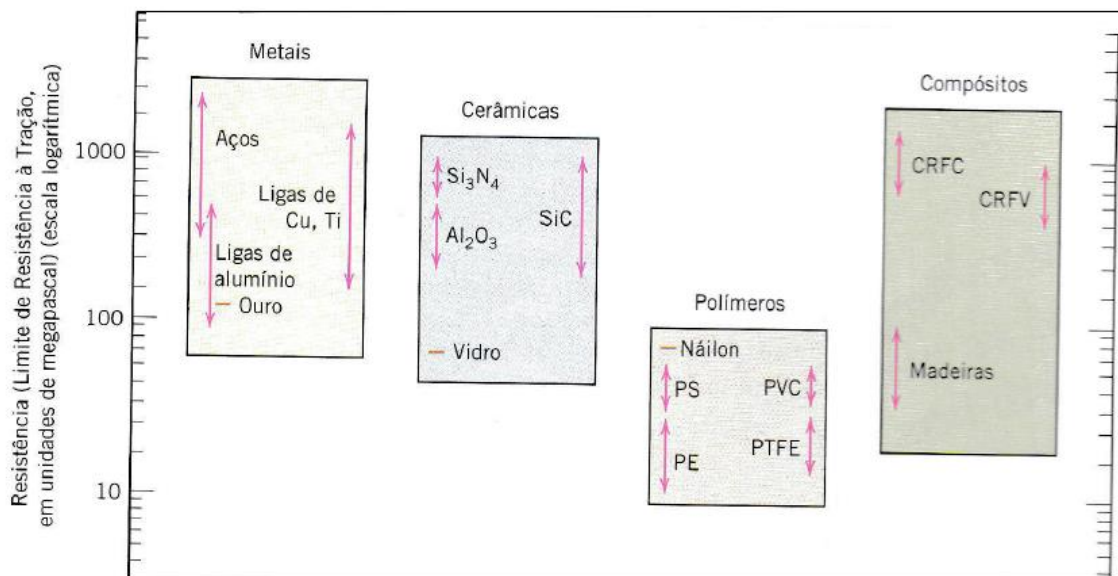


Figura 3: Limite de resistência à tração e a temperatura ambiente

Fonte: CALLISTER, 2013

Neste projeto tem-se como parâmetro de controle a análise de compósitos de matriz polimérica (PP), ainda podendo ser categorizadas de maneira termofixa ou termoplástica (Figura 4).

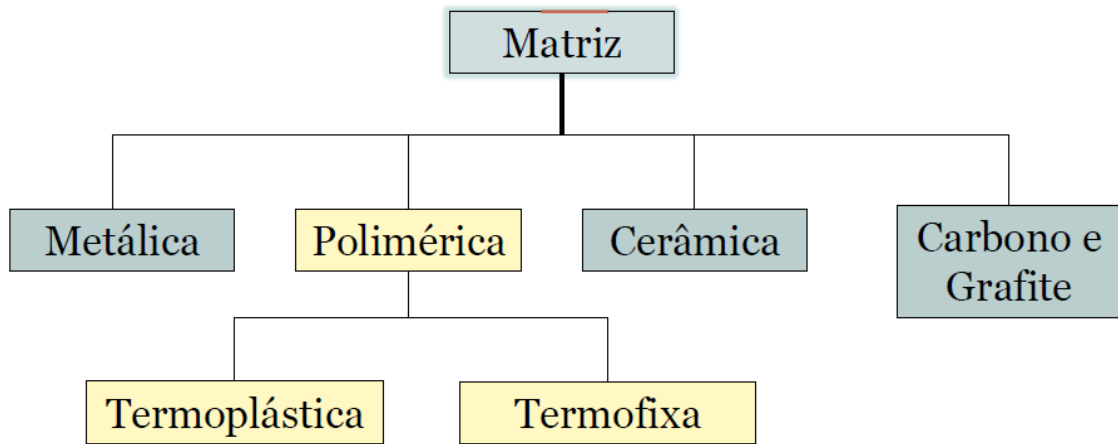


Figura 4: Tipos de matriz dos compósitos.

Fonte: ITA, 2015

Quanto à produção destas matrizes de resina termofixa (figura 5), as mesmas, partem de reações de cura por meio de um mecanismo denominado *crosslinking* que gera intensas ligações covalentes, tão fortes que o processo uma vez realizado é caracterizado como irreversível, que justifica o nome termofixo.

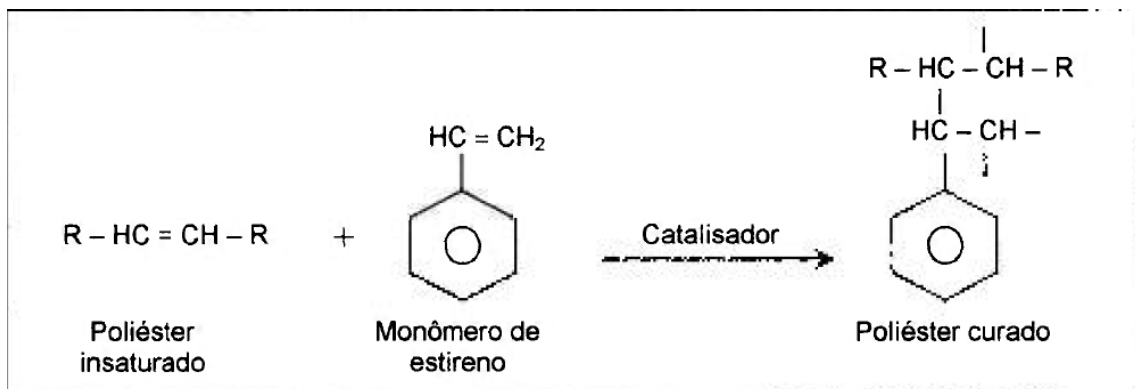


Figura 5: Exemplo de uma reação química que ocorre durante o processo de cura da resina de poliéster insaturado.

Fonte: PINTO, 2002.

Pertinente ao tipo termoplástico, este se particulariza dos termofixos conforme suas características de massa e estruturas moleculares, os termoplásticos possuem cadeias lineares e flexíveis e suas ligações químicas são fracas, podendo ser

reprocessados uma vez que devidamente aquecidos. Sendo desta forma, suscetíveis à temperatura e ao impacto.

Pode-se ainda complementar discorrendo que, as resinas termofixas, possuem viscosidade menor e um processamento mais simples ASTM (2001), que resulta na possibilidade de desenvolver produtos de tamanhos diversos, fato este inverso quando se trata dos materiais termoplásticos, que possuem um nível de viscosidade mais complexo e um índice de resfriamento considerável, interferindo nas propriedades finais do material.

Quanto às vantagens comerciais efetuou-se uma comparação quantitativa entre as propriedades das matrizes do tipo termoplásticas e do tipo termofixas, verificadas no quadro 1, onde o “X” compreende a vantagem comparativa:

Quadro 1: Comparação qualitativa entre as propriedades de matrizes poliméricas de compósitos.

| Propriedade | Matriz | |
|------------------------------------------|-----------|---------------|
| | Termofixa | Termoplástica |
| Custo | X | |
| Resistência à Temperatura | X | |
| Expansão Térmica | X | |
| Retração Volumétrica | X | |
| Rigidez | X | |
| Resistência | X | |
| Vida em fadiga | X | |
| Deformação | X | |
| Resistência química | | X |
| Informações disponíveis sobre o material | X | |
| Vida de prateleira | | X |
| Simplicidade na formulação química | | X |
| Viscosidade | X | |
| Temperatura de processamento | X | |
| Pressão de processamento | X | |
| Duração do Processamento | | X |

Fonte: SCHAEGLER (2015).

Comprova-se desta forma, que os termorrígidos possuem um maior número de características favoráveis, porém a menor duração do processamento, reciclabilidade e maior resistência trazem aos termoplásticos relevância em algumas situações.

2.3 Polipropileno

- A escolha do polímero a ser utilizado é de grande importância, observando suas propriedades e características. Dentre os mais empregados, apontam-se três a serem comparados:

- Poli (cloreto de vinila) (PVC) – Em virtude de sua alta versatilidade de propriedades mecânicas esse polímero é conceituado como um dos mais comuns. O PVC pode ser rígido ou flexível;
- Polietileno (PEBD) – Possui baixa tensão superficial, dificultando o pós tratamento e pintura do produto acabado. Apresenta uma relativa facilidade para incorporação de agentes estabilizantes, tanto virgem quanto reciclado, durante o processo de aplicação final;
- Polipropileno (PP) – Exprime parca resistência à degradação ambiental e pouca resistência a impactos quando contrastado ao polietileno. É mais rígido e possui maior ponto de fusão.

Este material é produzido através do gás propileno, também denominado propeno, advindo do craqueamento do petróleo e das reações de gaseificação do carvão. Desse gás obtêm-se o monômero de mesmo nome. Sua adição a um agente catalisador (em exemplo o trietilalumínio) inicia reações químicas de polimerização que são a mescla de forma contínua de monômeros idênticos entre si. A finalização deste processo resulta em macromoléculas que irão constituir a resina termoplástica (figura 6) do polipropileno.

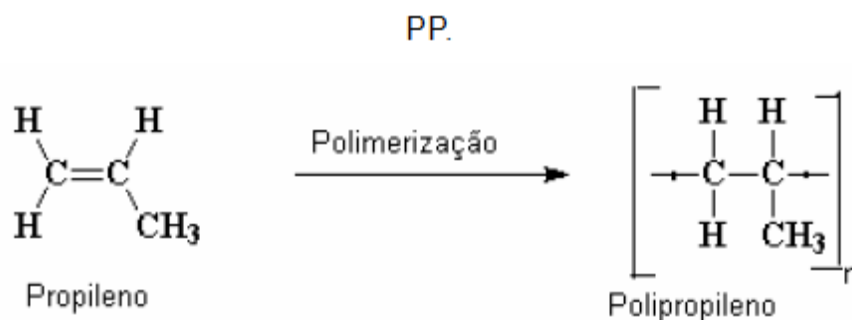


Figura 6: Polimerização do monômero adquirido do gás propileno para obtenção de PP.

Fonte: <http://www.limer-cart.com.br/pt/noticia/como-e-produzido-o-bopp/90/2>, acesso em 11/11/2016 às 12:35.

Segundo LUCAS, (et al. 2001), os plásticos são materiais que comportam como componente fundamental um polímero orgânico sintético e se identificam pela eficácia de se tornarem fluídos e assim são aptos de serem moldados, por influência do calor e pressão. Já as fibras, é um corpo que tem uma razão elevada entre o

comprimento e as dimensões laterais e é constituído principalmente de macromoléculas lineares, orientadas longitudinalmente.

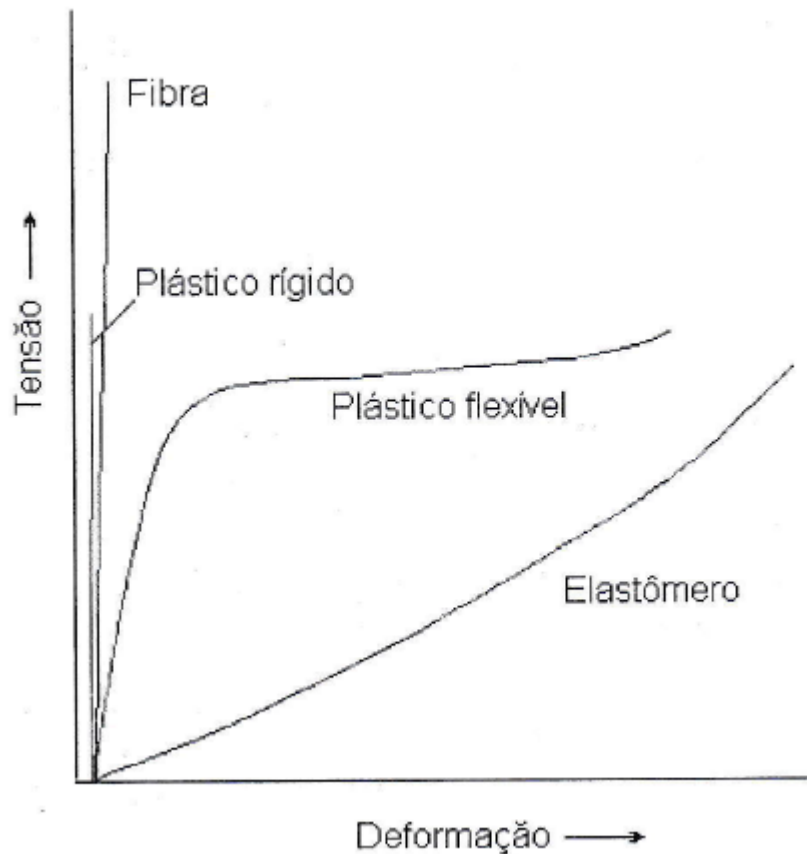


Gráfico 2: Curvas de tensão x deformação características de um plástico rígido, uma fibra, um plástico flexível e um elastômero.

Fonte: LUCAS, et al, 2001

Em razão de suas características, tais como: alta temperatura de fusão; alta resistência química; baixa densidade; boas propriedades físicas e mecânicas; antiaderentes; baixa absorção de umidade; atoxicidade e passível de ser aditivado. O material constituído por polipropileno é um dos tipos de termoplásticos de elevada utilização, sendo uma resina versátil que pode ser combinada com vários reforços que por fim geram materiais compósitos diversificados e com propriedades melhoradas.

Seu uso ainda é ampliado devido à facilidade de processamento e reaproveitamento, que possibilita a diversificação de uso e crescimento industrial.

Devido a tais vantagens e também sua abundância como resíduo industrial e em lixões este material veio a ser escolhido como matriz para os estudos aqui demonstrados.

2.3.1 Reforço

Como uma das etapas que integram os materiais compósitos, este vem com objetivo de incrementar as propriedades mecânicas da matriz, vindo ainda a ser sujeito à boa parte das cargas atribuídas ao material.

Em definição Drzal (2001) expõe: “O reforço é o constituinte que possui propriedades mecânicas superiores, mas o seu formato, em fibra ou pó, por exemplo, dificulta o seu uso. Em vista disso, é disperso em uma matriz”. Tal situação pode ser demonstrada no gráfico 3, no qual é exposto o comparativo da resistência mecânica de materiais individuais e compósitos.

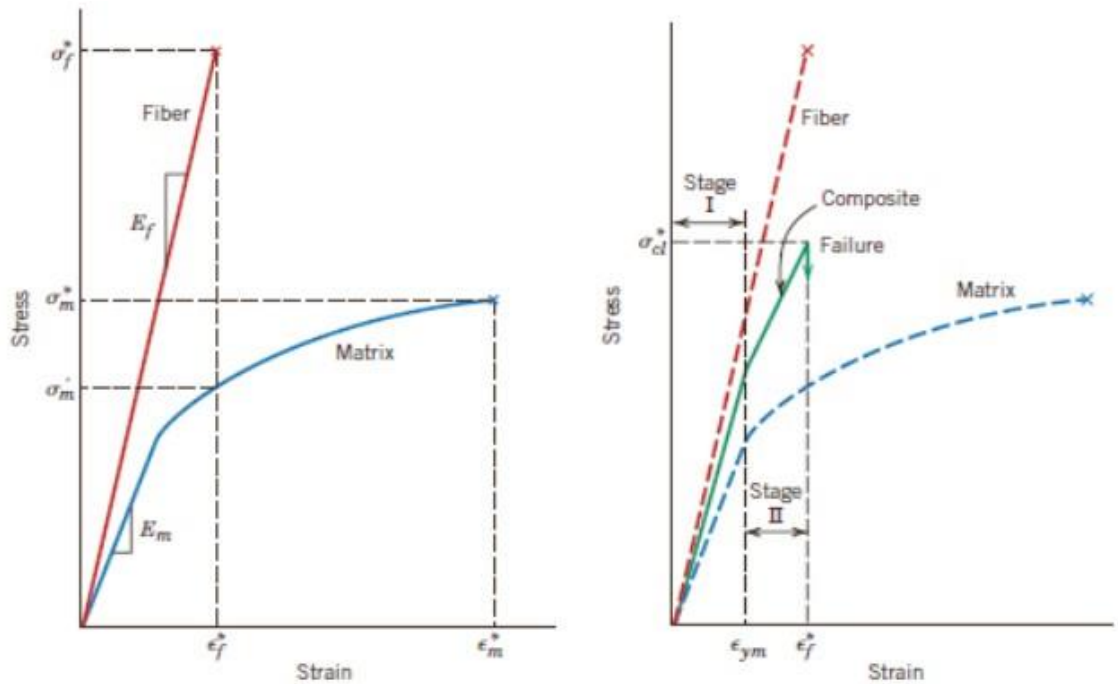


Gráfico 3: Curvas de tensão x deformação da fibra, resina e compósito.
Fonte: RESNAUER, 2011.

Em sua constituição o reforço pode vir de forma ininterrupta, possuindo longas fibras ou de forma descontínua, apresentando flakes, partículas dispersas, whiskers ou fibras curtas. Por sua vez a matriz traz adesão ao reforço o mantendo em seu posicionamento. Desta forma, apesar de possuir fibras com resistência menor do que os da resina/matriz a sua fratura não causa a extinção do produto, devido a ação de contenção destas fibras (figura 7).



Figura 7: Representações da maneira que as trincas são impedidas de se propagar devido às fibras existentes no percurso.

Fonte: MORTENSEN, 2007

Devido à parcela de fibras no reforço, qualquer impacto provocado na estrutura terá seu dano restrito à área de contato, pois as demais fibras continuarão a apresentar sua resistência nominal e sustentando o material.

Chawla (2011), as vantagens dos materiais compósitos com fibras têm como aspecto positivo:

- Um diâmetro reduzido em relação ao tamanho do grão ou a outro micro constituinte: provocando que a resistência teórica à tração seja mais eficiente, desta forma, quanto menor o tamanho, menor a possibilidade do material em possuir imperfeições;
- Grau de flexibilidade relevante, permitindo o uso numa variedade de técnicas de confecção de compósitos com esse tipo de fibra;
- Características que fazem com que a carga aplicada seja transferida da matriz para a fibra mais rígida.

Em continuidade, pode-se ainda expor que a adição das fibras está diretamente ligada à mudança das propriedades mecânicas do compósito, dados estes também apontados por (CHAWLA, 2011):

- A interface fibra/matriz. Neste caso a adesão que sucede possui atribuição de transferência da carga externa da matriz para a fibra. Isso justifica o processo de otimização dos componentes e suas proporções adicionando se necessário compatibilizante, que tem como função a prevenção do procedimento de descolamento da fibra na matriz polimérica;
- Geometria da fibra: o formato da fibra está diretamente ligado ao processamento, desta forma, fibras descontínuas têm grandezas de processamento inferiores do que as contínuas, contudo sua eficiência de reforço é reduzida.

Atrelado à geometria da fibra temos ainda o seu comprimento, vindo as suas propriedades serem alteradas de acordo com tal característica (gráfico 4), assim

quanto maior o comprimento, maior será a área superficial na interface e mais efetiva as transferências das cargas, bem como a ductilidade e a resistência. Confere-se, porém, que as fibras mais longas possuem superior resistência ao processamento em razão da dificuldade em obter um alinhamento apropriado. Sendo assim, nesta situação, vantajoso utilizar fibras mais curtas.

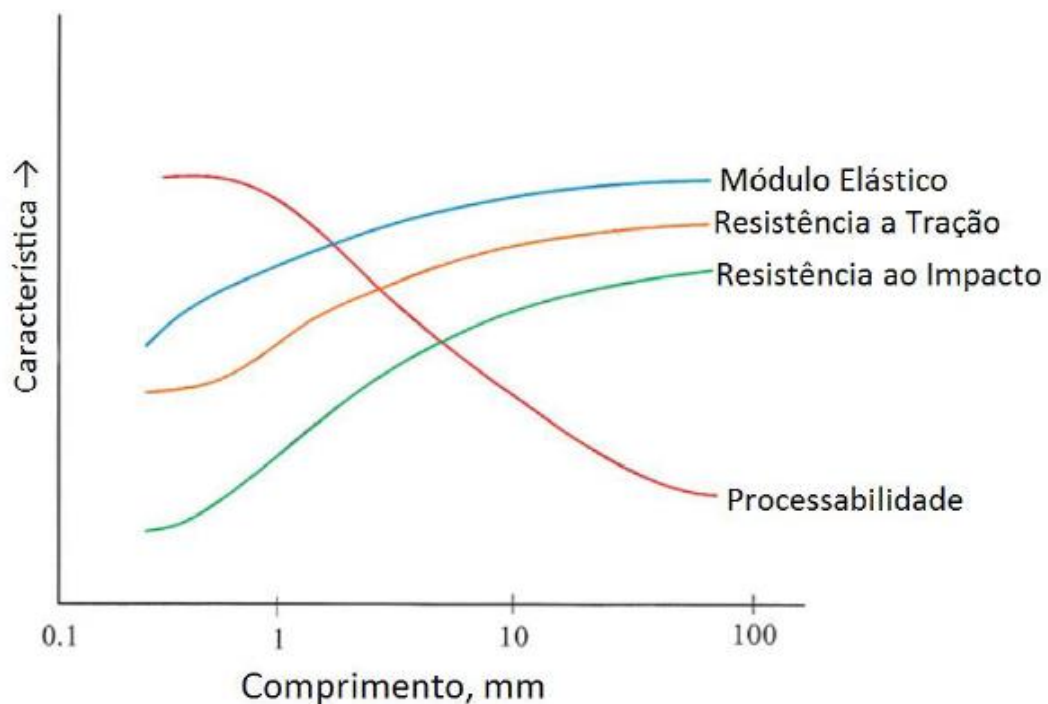


Gráfico 4: Variação de propriedades dos compósitos em razão do comprimento da fibra.

Fonte: SCHAEGLER, 2015.

Tais ocorrências durante a elaboração de um compósito devem ser verificadas, visto que qualquer desalinhamento estrutural ou uma mescla imperfeita entre os materiais é capaz de modificar consideravelmente as propriedades mecânicas do compósito, de modo consequente gerando uma degradação e ruptura mais rápidas. Há, entretanto, opinião contrária, Trombetta (2010), adere a possibilidade de um comportamento anisotrópico, compreendendo desta forma a possibilidade de alocar os materiais de reforço, apenas nos lugares suscetíveis ao recebimento de cargas, desta forma efetuando uma redução de uso e gastos de matéria prima.

Tais aprimoramentos passaram a estar diretamente vinculados ao desenvolvimento econômico e tecnológico, posto que a resistência última do produto composto demonstrou-se ser extremamente superior às demais matérias individuais, como pode-se vislumbrar no gráfico 5.

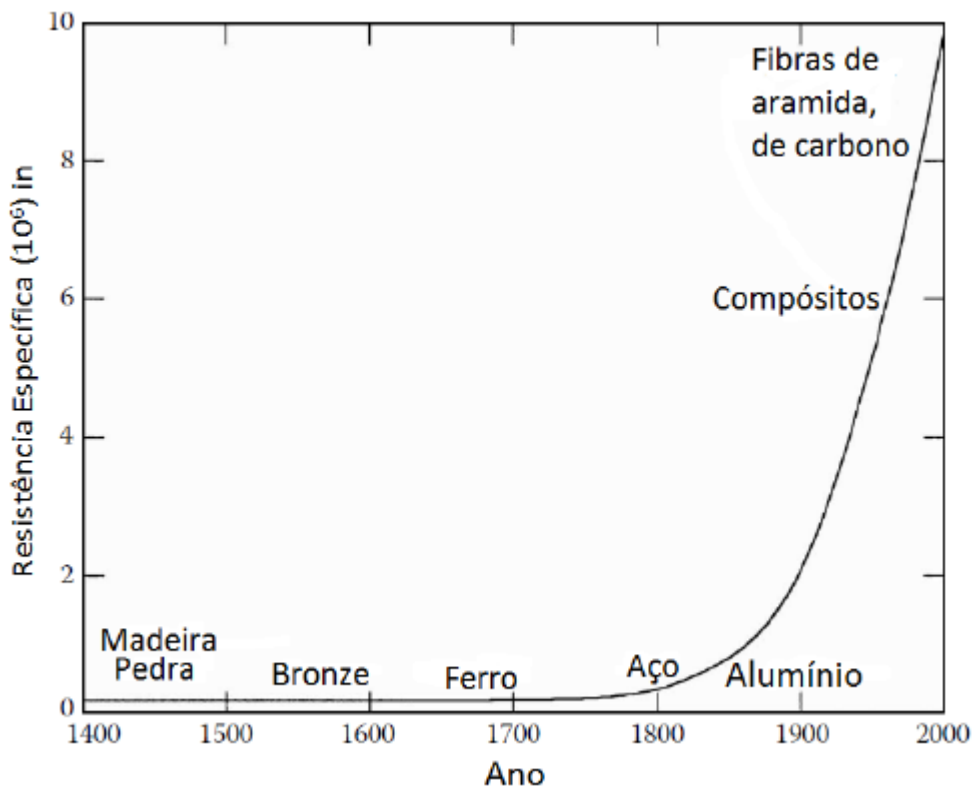


Gráfico 5: Resistência específica adquirida ao longo do tempo para diversos materiais.

Fonte: SCHAEGLER, 2015.

Em razão da ampla existência de tipos de fibras, estas divididas em naturais e sintéticas, como forma de especificação de análise, foi-se escolhido como matéria a ser manipulada, a fibra do tipo natural, esta vegetal advinda da serragem da madeira pinus taeda.

O estudo sobre o comportamento mecânico de compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais é de importância científica e grande relevância tecnológica, pois as características sinérgicas dos materiais dependem das

características iniciais do reforço, adesão fibra/matriz, fração volumétrica, razão de aspecto das fibras e orientação.

A interferência do índice de deformação sobre o comportamento mecânico também é importante. Em geral, uma diminuição na taxa de deformação tem análoga influência sobre as características tensão-deformação que um aumento na temperatura, isto é, o material torna-se mais macio e mais dúctil, conforme tabela 1 (CALLISTER, 2013c).

Tabela 1: Características Mecânicas à Temperatura Ambiente de Alguns dos Polímeros Mais Comuns.

| <i>Material</i> | <i>Gravidade Específica</i> | <i>Módulo em Tração [GPa (ksi)]</i> | <i>Limite de Resistência à Tração [MPa (ksi)]</i> | <i>Limite de escoamento [MPa (ksi)]</i> | <i>Alongamento na Ruptura (%)</i> |
|--------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|
| Poliétileno (baixa massa específica) | 0,917–0,932 | 0,17–0,28 (25–41) | 8,3–31,4 (1,2–4,55) | 9,0–14,5 (1,3–2,1) | 100–650 |
| Poliétileno (alta massa específica) | 0,952–0,965 | 1,06–1,09 (155–158) | 22,1–31,0 (3,2–4,5) | 26,2–33,1 (3,8–4,8) | 10–1200 |
| Cloreto de polivinila | 1,30–1,58 | 2,4–4,1 (350–600) | 40,7–51,7 (5,9–7,5) | 40,7–44,8 (5,9–6,5) | 40–80 |
| Politetrafluoroetileno | 2,14–2,20 | 0,40–0,55 (58–80) | 20,7–34,5 (3,0–5,0) | 13,8–15,2 (2,0–2,2) | 200–400 |
| Polipropileno | 0,90–0,91 | 1,14–1,55 (162–225) | 31–41,4 (4,5–6,0) | 31,0–37,2 (4,5–5,4) | 100–600 |
| Poliestireno | 1,04–1,05 | 2,28–3,28 (330–475) | 35,9–51,7 (5,2–7,5) | 25,0–69,0 (3,63–10,0) | 1,2–2,5 |
| Poli(metil metacrilato) | 1,17–1,20 | 2,24–3,24 (325–470) | 48,3–72,4 (7,0–10,5) | 53,8–73,1 (7,8–10,6) | 2,0–5,5 |
| Fenol-formaldeído | 1,24–1,32 | 2,76–4,83 (400–700) | 34,5–62,1 (5,0–9,0) | – | 1,5–2,0 |
| Náilon 6,6 | 1,13–1,15 | 1,58–3,80 (230–550) | 75,9–94,5 (11,0–13,7) | 44,8–82,8 (6,5–12) | 15–30 |
| Poliéster (PET) | 1,29–1,40 | 2,8–4,1 (400–600) | 48,3–72,4 (7,0–10,5) | 59,3 (8,6) | 30–300 |
| Policarbonato | 1,20 | 2,38 (345) | 62,8–72,4 (9,1–10,5) | 62,1 (9,0) | 110–150 |

Fonte: CALLISTER (2013)

2.3.2 Fibras Naturais

A fibra do tipo natural tem como classificações comuns como vegetais, animais e minerais. Tendo as de origem vegetal como característica comum

possuírem em sua composição química a celulose enquanto as fibras de cunho animal têm como constituição principal as proteínas.

Vê-se como vantajoso o uso das fibras do tipo naturais devido à facilidade em encontrar tal matéria, mesmo que como resíduo em lixões ou em algum processo industrial. Entre outras características relevantes, conforme Finkler et al, 2005, pode-se pontuar:

- Baixo custo;
- Alta tenacidade;
- Boas propriedades mecânicas e térmicas;
- Redução do desgaste de máquina e;
- Facilidade de separação e biodegradabilidade.

2.3.3 Fibras Vegetais

A aplicação das fibras vegetais na indústria e a maneira que a pesquisa vem crescendo nas últimas décadas, devido a sua relevância econômica e por serem advindas de fontes renováveis e devido à economia da energia de uso por conta do reduzido peso dos seus componentes e de reduzido custo para processamento.

Apesar de numerosos benefícios, salienta-se como problemática a facilidade de absorção de umidade, temperatura de processamento máxima de 200°C, baixa resistência biológica e ainda como parâmetros relevantes, a idade da planta, local de plantio e condições climáticas (Schaedler, 2015).

Deve-se ainda atentar-se, conforme menciona Espert et al (2004), durante a formação do compósito a incompatibilidade deste material, com matrizes hidrofóbicas e fibras naturais hidrofílicas, que devido à elevada quantidade de hidroxilas, interagem com a água pela ligação de hidrogênio, comprometendo as propriedades mecânicas do compósito. Há, porém, possibilidade da inserção de

grupos apolares nas fibras e de agentes de acoplamento (substâncias que adulteram as características químicas da matriz), conforme elucidada (TROBETTA, 2010).

Cada fibra vegetal é ligada entre si, praticamente pela presença da lignina, formada por microfibrilas espiraladas ao longo do eixo da fibra. À vista disso, a lignina tem como atribuição cementar e unir as microfibrilas e a hemicelulose, vide figura 8.

De acordo com a origem das fibras estas diferenciam-se em sua composição e portanto, em suas propriedades mecânicas.

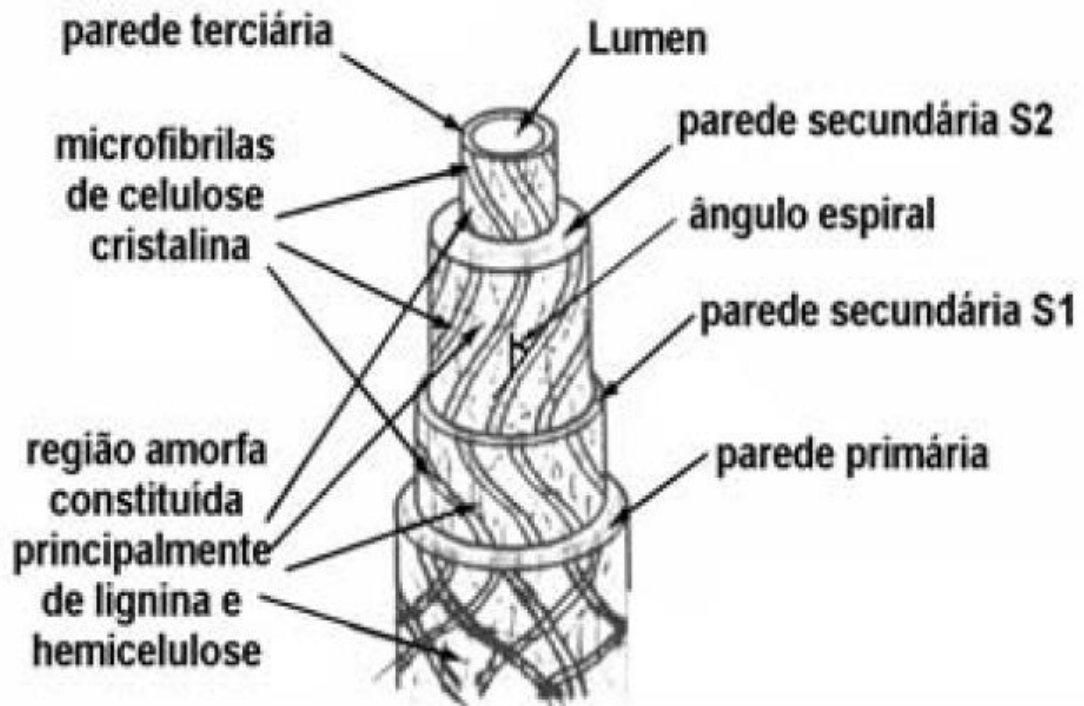


Figura 8: Estrutura da fibra vegetal.

Fonte: BPMCC – DEM/UFRN, 2007.

Destes constituintes, dos solúveis em solventes orgânicos ou em água, ou ambos, são denominados extrativos. Cada constituinte dispõe de um propósito, que trabalha em conjunto colaborando com as propriedades como um todo na fibra.

2.3.4 Escória de Aciaria

O processo de siderurgia tem seu início nas minerações de matérias-primas, como o minério de ferro, de calcário, dolomita e carvão mineral. Estes minérios são transportados até as usinas, onde são beneficiados e então encaminhados aos altos fornos, onde sofrem ações do calor e oxigênio, sendo então o minério de ferro reduzido. Esta redução tem como objetivo reduzir o teor de impurezas, como o Manganês (Mn), Fósforo (P) e Enxofre (S) presentes nos minérios, sendo retirados de forma parcial juntamente com escórias e gás (CO_2), por meio de processos siderúrgicos integrados.

O ferro gusa então é separado da escória de alto forno e encaminhado à aciaria (que o transformará em aço) conforme pode ser visto na figura 9. Uma nova redução é feita, desta vez, buscando diminuir o teor de carbono do gusa para obter o aço. Para tal é realizada a adição da cal (CaO) e de dolomita ($\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$) o qual será responsável pela proteção do refratário do forno. Este processo resulta na escória de aciaria.

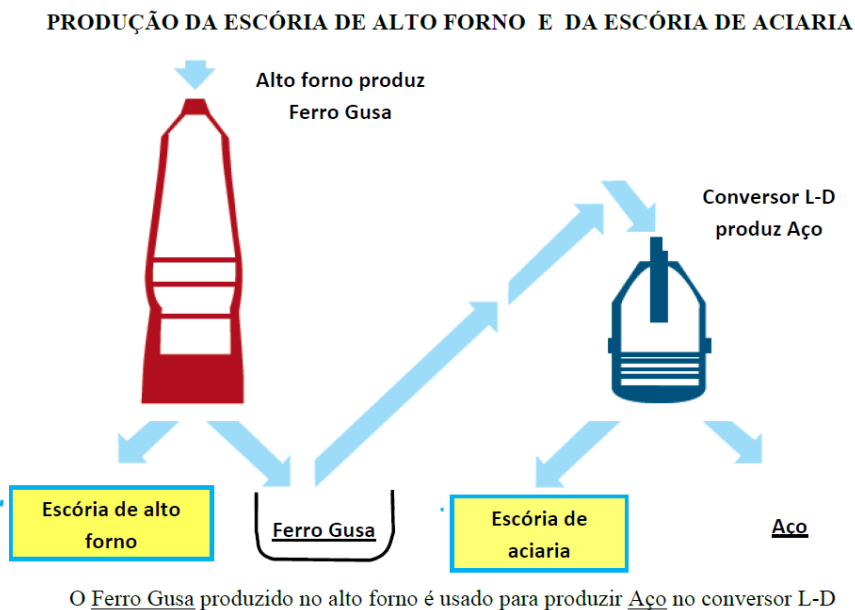


Figura 9: Produção da escória de alto forno e escória de aciaria.

Fonte: TOMAZ, 2010.

Este material então é de forma comum vazada em uma panela ou descarregada em áreas a qual se solidificará em forma cristalina. Seu resfriamento é realizado por meio de bicos de aspersão ou jateamento de água. A seguir, após seu resfriamento, a escória de aciaria é britada e separada conforme sua granulometria. De forma comum a escória de aciaria é reprocessada buscando a recuperação do aço contido neste material que permeia em torno de 30%.

Do processamento da escória de aciaria são realizadas as seguintes operações, conforme podemos acompanhar na figura 10, resfriamento controlado, britagem, separação magnética, classificação granulométrica e estabilização volumétrica. A granulometria de saída pode variar em cada unidade siderúrgica (RIZZO, 2006).

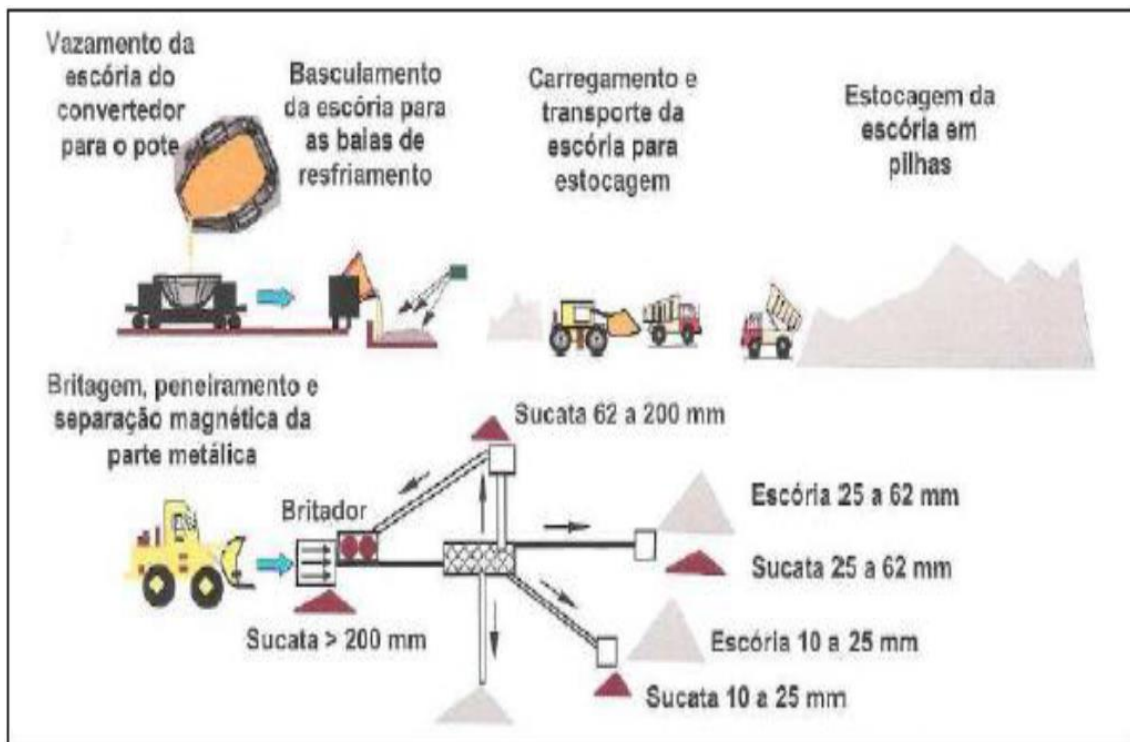


Figura 10: Esboço do basculamento, resfriamento e beneficiamento da escória de aciaria, a granulometria de saída pode variar em cada unidade siderúrgica.

Fonte: RIZZO, 2006

2.4 Ensaio de Tração

As manifestações das propriedades mecânicas dos materiais surgem da aplicação de esforços. Estes também de natureza mecânica nos referidos materiais. Desta forma, pode-se afirmar que as propriedades estão diretamente ligadas a menor ou maior capacidade de resistência aos esforços aplicados sobre este material. Destaca-se ainda que, o conhecimento destas capacidades é necessário, não só durante o seu processo de fabricação, mas também ao fim o qual é destinado.

Destaca-se como propriedade fundamental a resistência mecânica dos materiais a qual está diretamente ligada à capacidade de resistir a certos tipos de esforço, tais como a tração e a compressão. Esta resistência está vinculada as forças internas apresentadas entre as partículas que constituem o material. (SOUZA, 1983).

Como parâmetro de controle e verificação o material é submetido a ensaios que são devidamente padronizados como forma de reproduzirem o mais fiel possível as condições de uso deste material. Uma série de fatores são ponderados, tais como: forma de aplicação da carga, natureza da mesma, tempo de aplicação e inclusive fatores ambientais (como em exemplo a temperatura). O fator carga é analisado de formas distintas levando em conta também a tração, compressão e cisalhamento, sendo estes aplicados de forma constante ou variável num determinado período de tempo. (HEED-HILL, 1982).

Para esta propriedade, como ensaio largamente utilizado, há o ensaio mecânico de tensão-deformação, sendo o material sujeito a esforços de tração. A referida carga é aplicada de forma gradativa no material, de forma uniaxial em ambas as extremidades do corpo de prova destacado. Este processo pode ser visto melhor na figura 11.

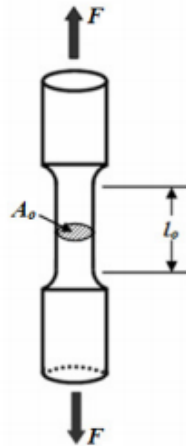


Figura 11: Desenho esquemático de um corpo de prova submetido ao ensaio de tração.

FONTE: HEED-HILL, 1982

O ensaio de tração é realizado conforme os métodos estipulados pela ASTM D 638-05 e consiste num processo no qual a taxa de deformação é controlada por meio de um mecanismo de direcionamento, ao passo que sua tensão de tração que a amostra passa a receber é anotada pela célula de carga, sendo tanto o mecanismo de direcionamento como a célula de carga acoplada a uma travessa fixa que recebe o corpo de prova.

Dessa forma, conforme Santos (2006) aponta, este ensaio compreende em mensurar de forma significativa a resistência do material em análise e sua deformação quando submetido aos esforços, desta forma, gerando uma série de informações e dados relevantes a cerca da deformação diante da tensão então aplicada. Do ensaio de tração gera-se um gráfico o qual demonstra a relação tensão-deformação, que evidencia a força aplica e as deformações que ocorrem durante o procedimento. O gráfico 6 exemplifica o resultado do ensaio de tração.

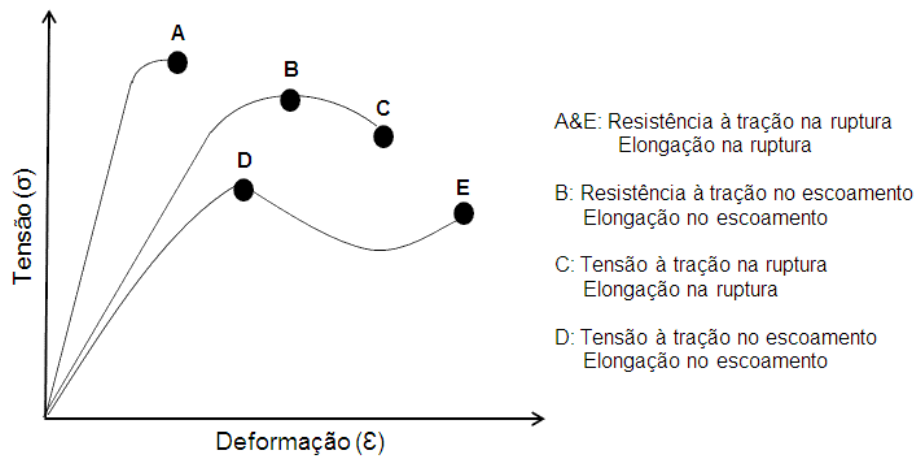


Gráfico 6: Desenho esquemático de um corpo de prova submetido ao ensaio de tração.

Fonte: CANAVEROLO, 2003



Fotografia 1: Máquina Universal para Ensaio de tração (EMIC).

Fonte: DOS AUTORES.

Os corpos de prova ao serem gerados, obedecem em suas dimensões, formas e acabamentos, os ditames das normas técnicas. Conforme os parâmetros

os corpos de prova possuem seção retangular ou seção circular, que varia de acordo com o tamanho e forma que o produto acabado que estes corpos foram extraídos. A figura 12 apresenta as dimensões e formas para corpos de prova, estipulada pela MB-4 da ABNT.

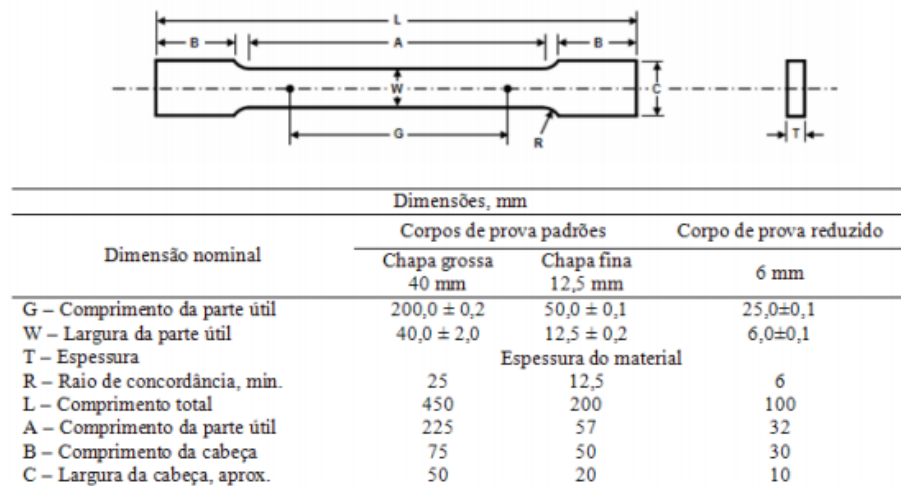


Figura 12: Dimensões e forma de um corpo de prova de seção retangular

Fonte: ASTM, 2011

2.4.1 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A DSC ou Calorimetria Exploratória Diferencial compreende a técnica em que a variação de temperatura de uma substância e um material apresentado como referência, é medida em função da temperatura em que estes itens apresentam numa programação controlada de temperatura, ou seja, o analisador térmico marca no termograma a variação do fluxo de calor o associando a uma alteração térmica da amostra devido à função da temperatura ou do tempo. A figura 13 ilustra um termograma típico de DSC. (FREITAS, 2014)

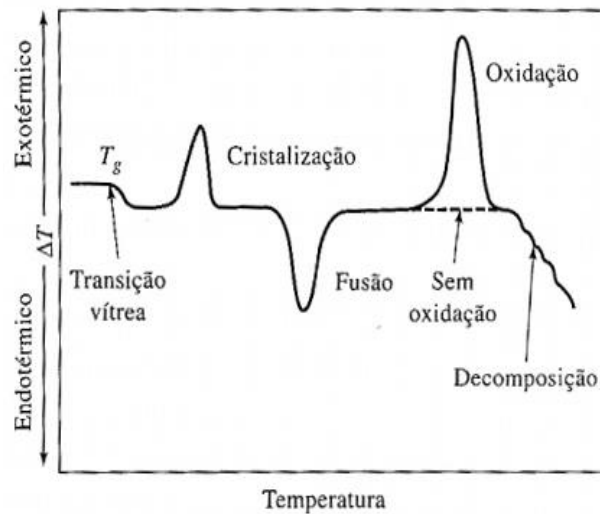


Figura 13: Exemplo de uma curva DSC

Fonte: SCHULKEN; BOY JR.; COX, 1964

Na obtenção da calorimetria, dois métodos podem ser empregados. No tipo DSC de compensação de potenciais tem-se a amostra e o material de referência, os quais são aquecidos por meio de aquecedores separados, do modo que suas temperaturas se mantenham similares, conforme as temperaturas são aumentadas ou reduzidas de forma linear. No DSC de fluxo de calor, há uma diferença no fluxo de calor lançado na amostra e a da referência, sendo também estes dados mensurados conforme a temperatura é aumentada ou reduzida linearmente. Apesar de ambos os métodos fornecerem informações similares, a mecânica de ambos é diferente. (FREITAS, 2014).

2.4.1.1 Cristalinidade

Pode-se explicar a cristalinidade como um arranjo ordenado dos átomos ou moléculas, se manifestando de forma repetitiva e regular no espaço. Nos polímeros isso é variável de acordo com a natureza do material, em exemplo, a existência de grupamentos laterais, as grades podem prejudicar e até inviabilizar a cristalização da massa molecular. Sua mensuração é realizada de forma percentual. (FREITAS, 2014).

Conforme discursa Canevarolo (2002), a grande maioria de propriedades físicas, mecânicas ou termodinâmicas dos polímeros semicristalinos varia de acordo com o seu grau de cristalinidade e morfologia de suas regiões cristalinas. Conforme sua cristalinidade aumenta, maior é sua propriedade de densidade, rigidez, estabilidade dimensional, resistência química, temperatura de fusão (T_m), temperatura de transição vítrea (T_g), temperatura de utilização entre outros. Em consequência, suas propriedades de resistência ao impacto e transparência são reduzidas.

2.5 Temperatura de Fusão (T_m)

Canevarolo (2002) expõe que a temperatura é o valor médio da faixa de temperaturas, que durante o aumento de temperatura, desaparecem as regiões cristalinas, devido à fusão dos cristalitos. A energia gerada atinge o ponto necessário para superação das forças intermoleculares secundárias entre as cadeias da fase cristalina, destruindo desta forma a estrutura regular de empacotamento, alterando seu estado de borrachoso para viscoso (fundido). Tal transição apenas aparece na fase cristalina, se justificando desta forma apenas se aplicada em polímeros semicristalinos. Destaca-se que é uma transição termodinâmica de primeira ordem, afetando diretamente variáveis como volume específico e entalpia.

2.5.1 Temperatura de Cristalização (T_c)

No decorrer do resfriamento de um polímero semicristalino, partindo de uma temperatura acima de T_m , este atingirá uma temperatura reduzida o suficiente para provocar uma organização de cadeias poliméricas de forma regular conforme permite-se a estrutura, permitindo a formação de uma estrutura cristalina naquele ponto. Este fenômeno pode ocorrer em toda a massa polimérica. Sua cristalização pode transcorrer de duas formas: isotérmica, uma vez que sua temperatura é rapidamente reduzida a um dado valor T_c , em seguida estabilizada e mantida de forma constante até que ocorra a cristalização e de forma dinâmica quando a

temperatura é reduzida de forma contínua, vindo a ocorrer a cristalização numa faixa de temperatura. Uma vez que a cristalização aparece numa faixa comum de temperatura é normal definir um valor único, este chamado, Temperatura de Cristalização (TC), a qual conclui-se como a temperatura na qual a taxa de cristalização é máxima. (FREITAS, 2014).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Material

As matérias primas utilizadas no trabalho foram polipropileno (PP) obtido a partir da coleta de embalagens domésticas fotografia 2, serragem da madeira do tipo Pinus taeda e escória de aciaria. No quadro 2, apresentam-se os dados técnicos de um polímero polipropileno comercial utilizado na obtenção de embalagens.

Quadro 2: Dados técnicos do polipropileno utilizado nos compósitos

| Propriedades do PP CP 442 XP | | | |
|---------------------------------------------|--------------------|-------------------|----------------|
| Dados | Método ASTM | Unidades | Valores |
| Densidade | D 792 | g/cm ³ | 0,895 |
| Módulo de Flexão a 1% | D 790 | MPa | 1100 |
| Resistência À Tração no Escoamento | D 638 | MPa | 20 |
| Alongamento no Escoamento | D 638 | % | 7 |
| Dureza Rockwell (escala R) | D 785 | -- | 68 |
| Resistência ao Impacto Izod a 23°C | D 256 | J/m | Non Break |
| Temperatura de Deflexão Térmica a 0,455 Mpa | D 648 | °C | 93 |
| Temperatura de Deflexão Térmica a 1,820Mpa | D 648 | °C | 52 |
| Índice de Fluidez (230 °C/2,16kg) | D 1238 | g/10 min | 6 |

Fonte: Fornecedor Brasken



Fotografia 2: Polipropileno doméstico utilizado.
Fonte: DOS AUTORES

A escória de aciaria (fotografia 3) utilizada neste trabalho foi adquirida em uma Siderúrgica localizada na cidade de Volta Redonda.



Fotografia 3: Escória de aciaria granulada.
Fonte: DOS AUTORES

Quanto à serragem (fotografia 4), esta é proveniente de resíduos coletados na Carpintaria do UniFOA- Três Poços. Material vegetal este com densidade aproximada de 388 kg/m^3 (Xavier 2009).



Fotografia 4: Serragem de madeira
Fonte: DOS AUTORES

3.2 Métodos

3.2.1 Preparação dos Compósitos

Os compósitos foram preparados a partir do polipropileno triturado, da escória de aciaria e da serragem de *Pinus taeda*.

Para a aplicação da serragem e da escória, estes materiais foram submetidos à seleção granulométrica, sendo utilizado às frações com partículas entre 250 e 500 μm . Estes materiais foram secos em estufa com uma temperatura por volta de 100°C por aproximadamente uma hora e trinta minutos e por fim armazenados para sua utilização.

As embalagens plásticas foram trituradas em um moinho de facas da Plastmix. (fotografia 5) e armazenadas para a utilização.

Quadro 3: Percentuais analisados.

| Denominação | Teor do componente (%) | | |
|-------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| | PP | Serragem de Madeira (A) | Escória de Aciaria (B) |
| CP0 | 100 | 0 | 0 |
| CP5A0B | 95 | 5 | 0 |
| CP10A0B | 90 | 10 | 0 |
| CP0A5B | 95 | 0 | 5 |
| CP5A5B | 90 | 5 | 5 |
| CP10A5B | 85 | 10 | 5 |
| CP0A10B | 90 | 0 | 10 |
| CP5A10B | 85 | 5 | 10 |
| CP10A10B | 80 | 10 | 10 |

FONTE: DOS AUTORES

Para o processamento dos compósitos, os materiais foram secos em estufa de modo a garantir a remoção de qualquer umidade que pudesse prejudicar a mistura termocinética.

Os compósitos, cujas composições estão mostradas no quadro 3, foram obtidos em um homogeneizador para plásticos, (Dryser) da MH Equipamentos (modelo MH-50H) conforme a fotografia 6b, disponível no laboratório do Centro Universitário de Volta Redonda (UniFOA). A mistura entre os reforços e o polímero ocorreu dentro de cápsula bi-partida com arrefecimento de água. Após mistura, os compósitos foram triturados em um moinho de facas (fotografia 5) da Plastmix.



(a)



(b)

Fotografia 5: Moinho de facas (a); compósito moído (b).

Fonte: DOS AUTORES



(a)



(b)



(c)

Fotografia 6: Homogeneizador (a); mistura dos compósitos (b); plástico homogeneizado (c)

Fonte: DOS AUTORES

A injeção dos corpos de prova foi realizada a 300°C nos laboratórios do CIT-UniFOA, em uma injetora (fotografia 8), marca injetora RAY RAM - modelo TSMP a 300°C.

Os corpos de prova foram processados de acordo com a norma ASTM D 638 (com 13 mm de largura, 165 mm de comprimento e 3 mm de espessura) conforme a figura 12.

Depois de pronto, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de tração, realizados nos Laboratórios do Centro Universitário de Volta Redonda, utilizando uma carga de 5KN e velocidade de aplicação de 5 mm/min em conformidade com a ASTM D 638-05.

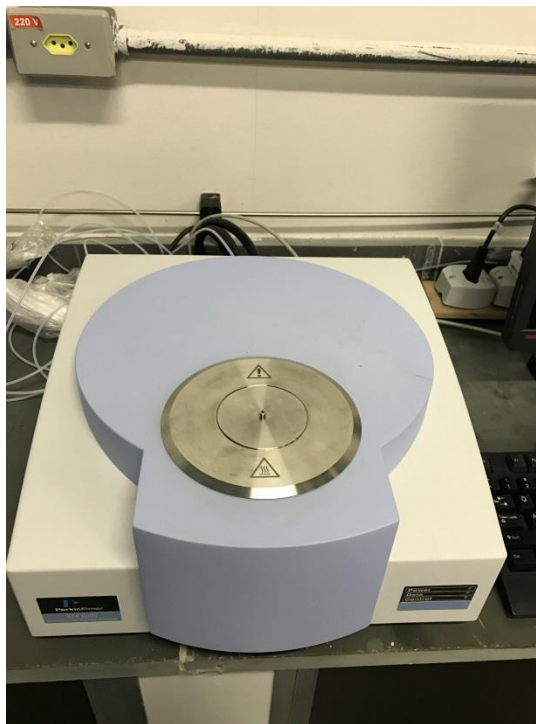


Fotografia 7: Injetora Ray Ram- modelo TSMP
Fonte: DOS AUTORES

3.2.2 Análise Térmica

A análise térmica se processou na forma de calorimetria Diferencial Exploratória (DSC). A DSC do estudo foi por fluxo de calor, e ocorreu em um Analisador Térmico Simultâneo Perkin Elmer STA 6000, disponível no Laboratório de Caracterização de Materiais do UniFOA.(fotografia 9).

Os compósitos foram submetidos a uma atmosfera de nitrogênio, com intervalos de temperatura de 25°C e 250°C, sob taxa de aquecimento de 20°C/min, utilizando amostras com cerca de 10 mg cada.



Fotografia 8: Analisador térmico
Fonte: DOS AUTORES.

O analisador térmico gera gráficos que apresentam resultados de fusão e cristalização dos compósitos, proporcionam-se também valores de pico de Fusão e Cristalização e temperaturas em que ocorrem as respectivas entalpias.

Os gráficos 7 e 8 apresentam respectivamente valores de fusão e cristalização do compósito CP5A0B, que contém 95% de polipropileno e 5% de serragem de madeira Pinus Taeda.

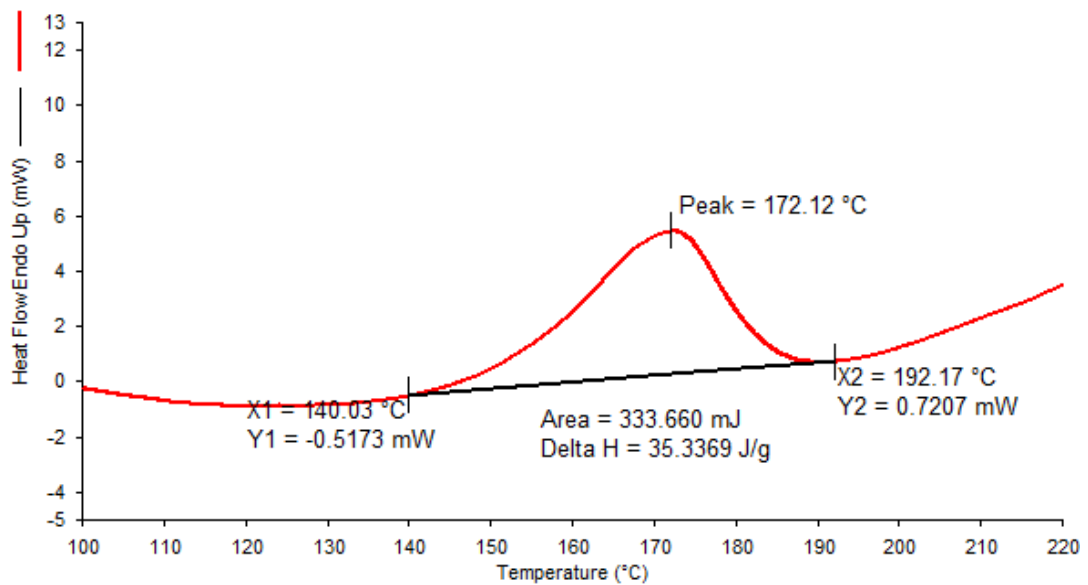


Gráfico 7: Gráfico de fusão do compósito CP5A0B
Fonte: DOS AUTORES

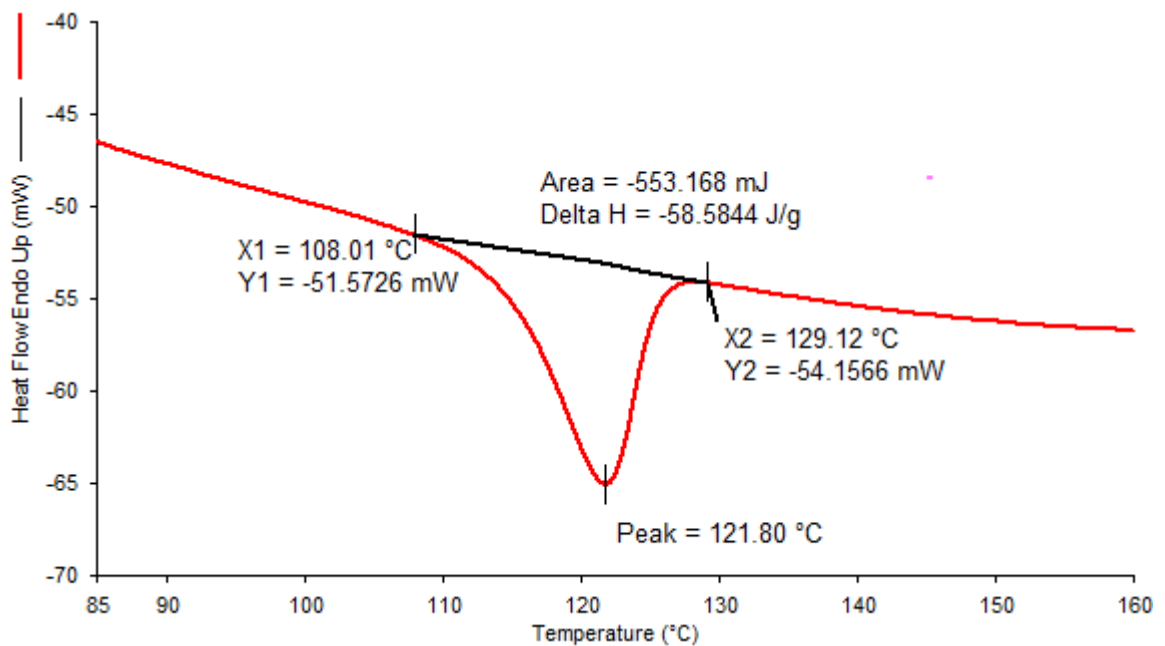


Gráfico 8: Gráfico de cristalização do compósito CP5A0B
Fonte: DOS AUTORES

Os gráficos 9 e 10 ilustra valores de fusão, cristalização e respectivas temperaturas do compósito CP10A10B, que contém 80% PP reciclado, 10% de serragem e 10% de escória de aciaria.

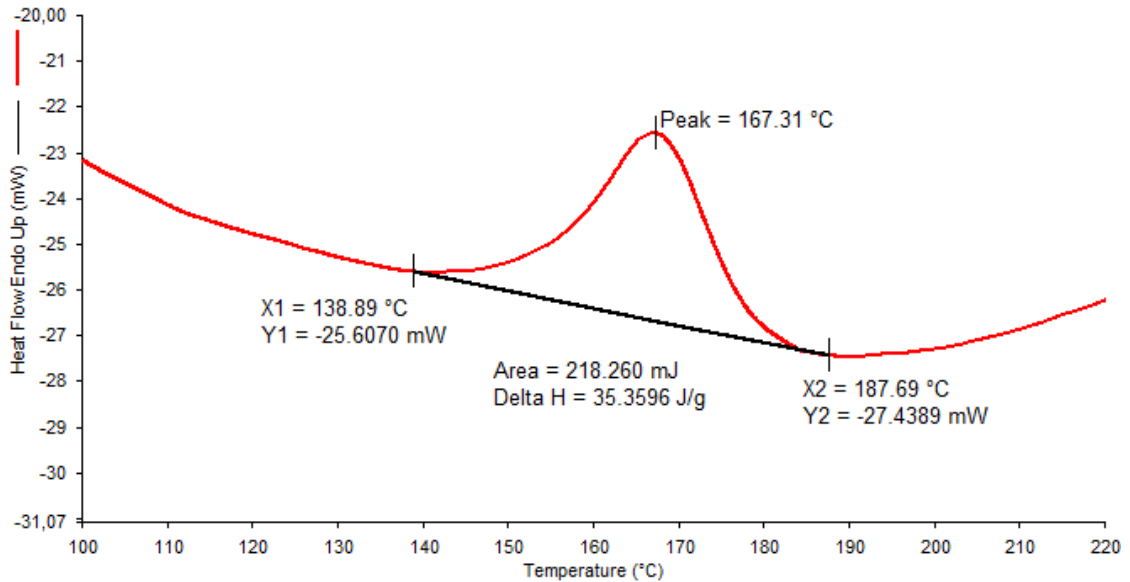


Gráfico 9: Gráfico de fusão do compósito CP10A10B
Fonte: DOS AUTORES

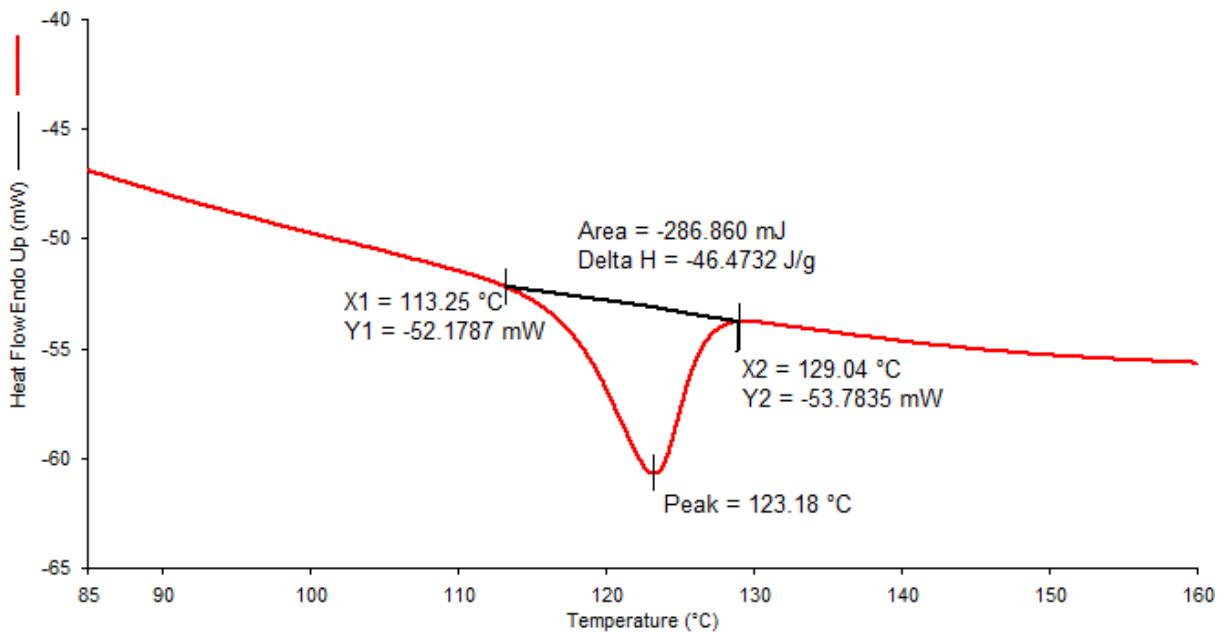


Gráfico 10: Gráfico de cristalização do compósito CP10A10B
Fonte: DOS AUTORES

Os gráficos 11 e 12 assim como os demais gráficos apresenta valores de fusão e cristalização do compósito CP10A5B, composto por 85% de polipropileno, 10% de serragem e 5% de escoria.

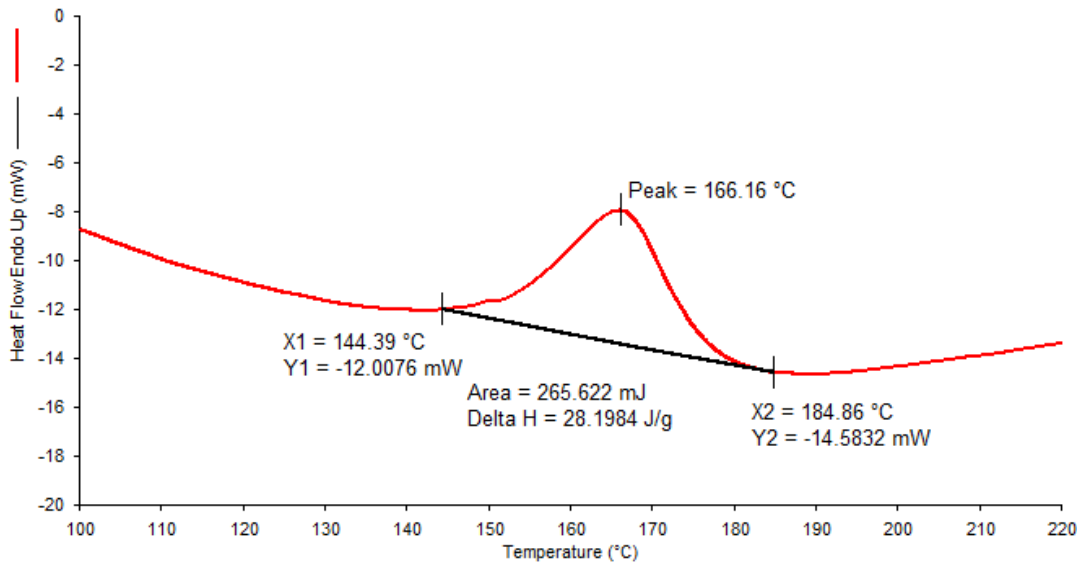


Gráfico 11: Gráfico de fusão do compósito CP10A5B
Fonte: DOS AUTORES

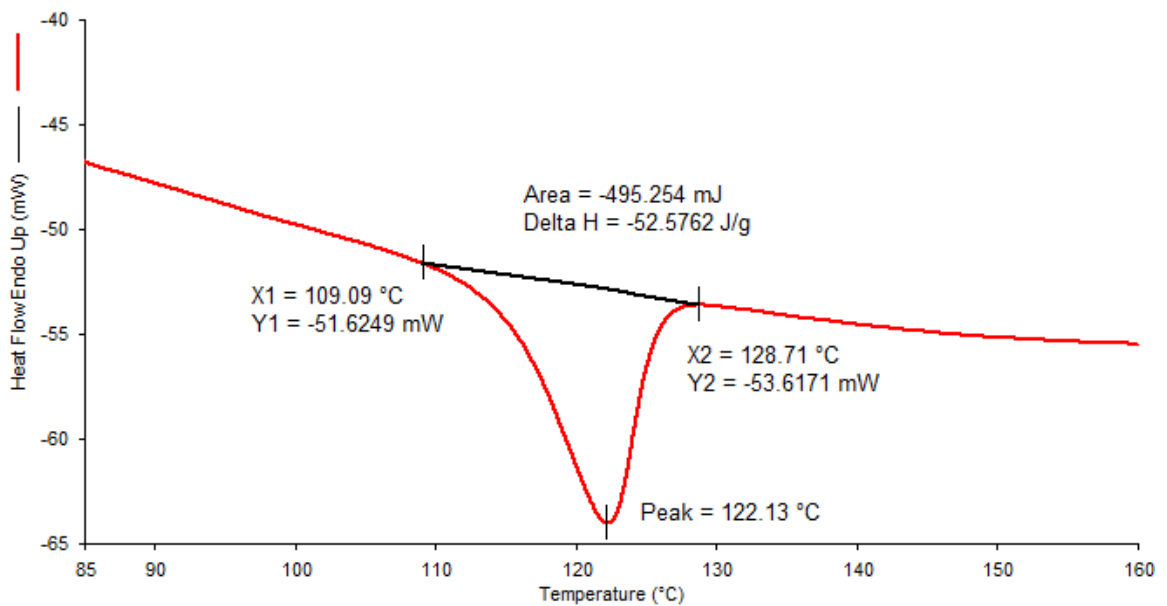


Gráfico 12: Gráfico de cristalização do compósito CP10A5B
Fonte: DOS AUTORES

Os gráficos 13 e 14 é a ilustração dos resultados de fusão e cristalização do compósito CP0A10B, que entra na classe dos compósitos que não possuem serragem de madeira.

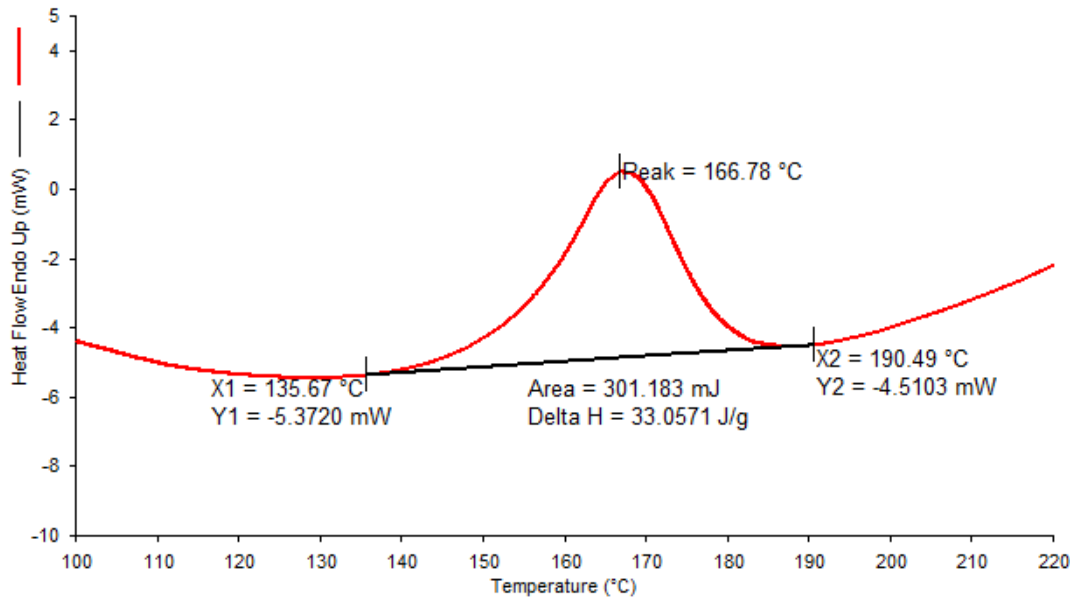


Gráfico 13: Gráfico de fusão do compósito CP0A10B
Fonte: DOS AUTORES

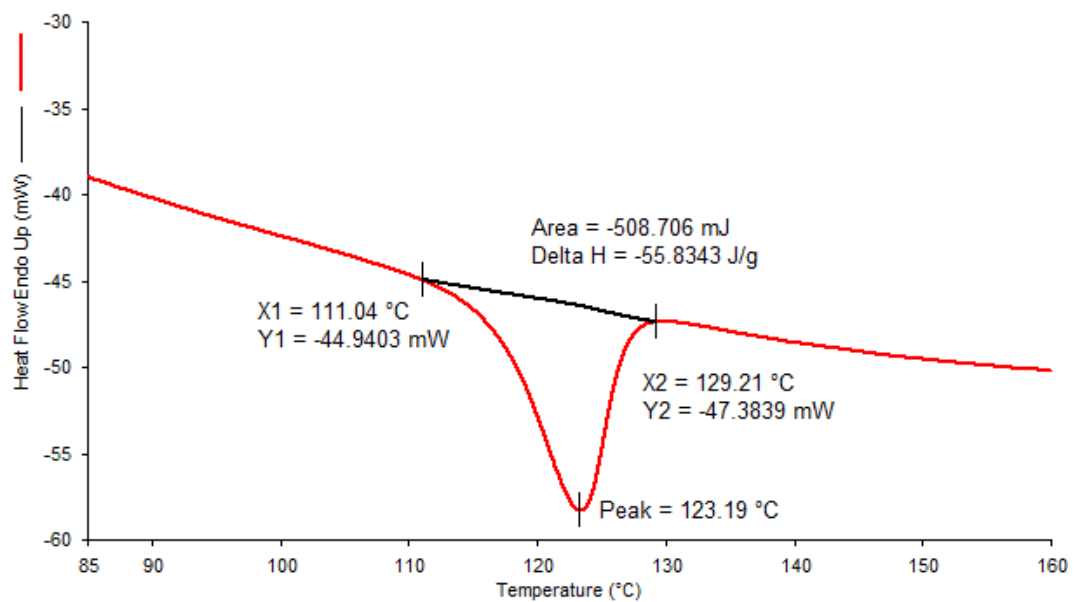


Gráfico 14: Gráfico de cristalização do compósito CP0A10B
Fonte: DOS AUTORES

Os gráficos 15 e 16 representam os resultados de fusão e cristalização do compósito CP0A5B, que possui 95% de polipropileno e 5% de escória.

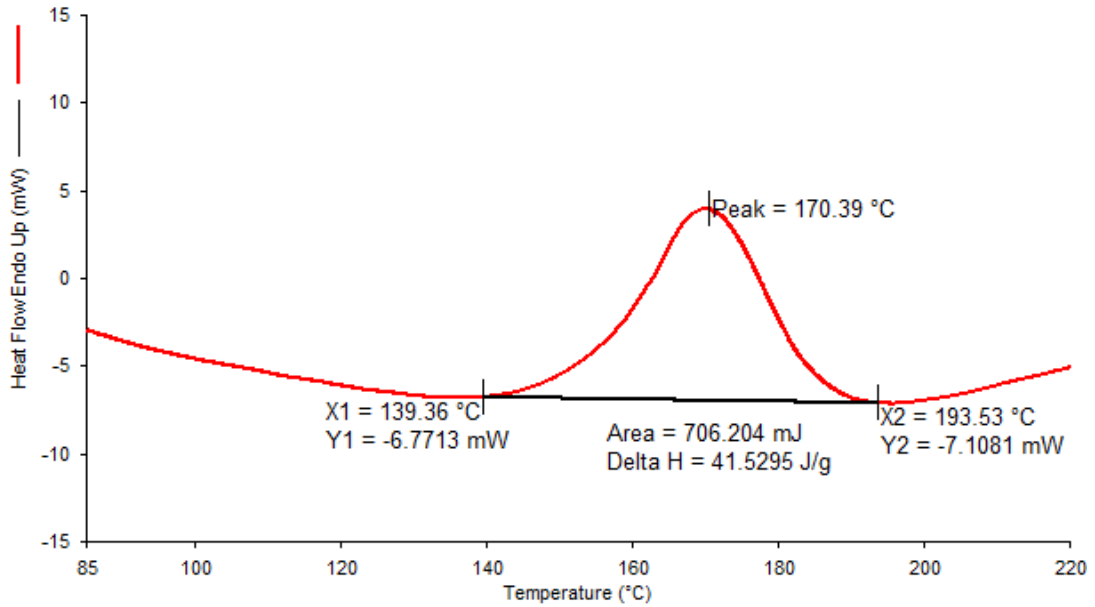


Gráfico 15: Gráfico de fusão do compósito CP0A5B
Fonte: DOS AUTORES

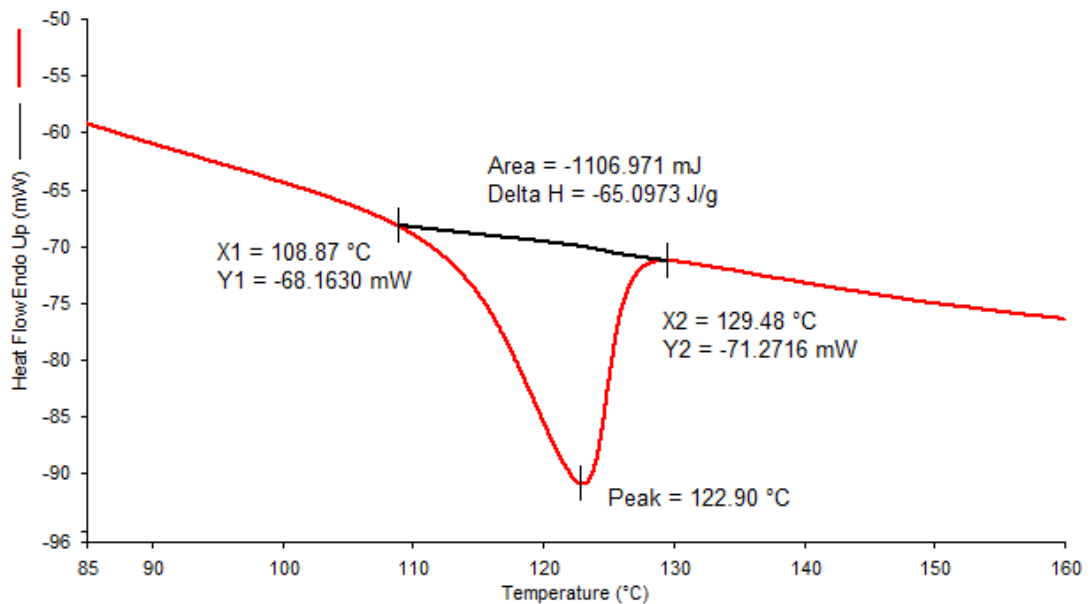


Gráfico 16: Gráfico de cristalização do compósito CP0A5B
Fonte: DOS AUTORES

Os gráficos 17 e 18 revelam os resultados de fusão e cristalização dos compósitos CP5A5B que possuem 90% de PP, 5% de serragem e 5% de escória.

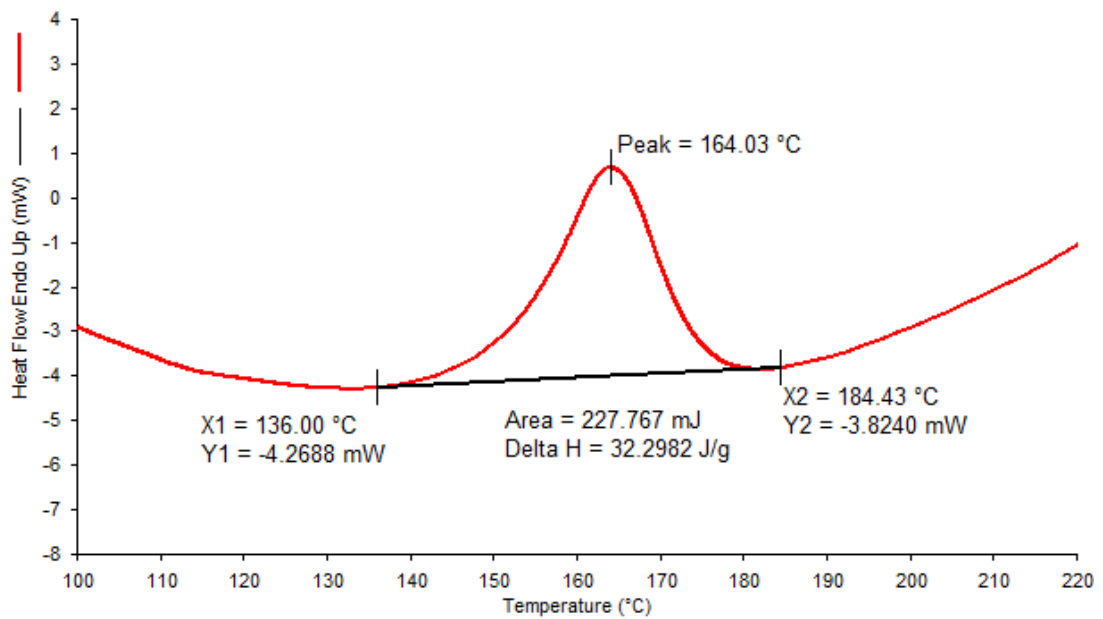


Gráfico 17: Gráfico de fusão do compósito CP5A5B
Fonte: DOS AUTORES

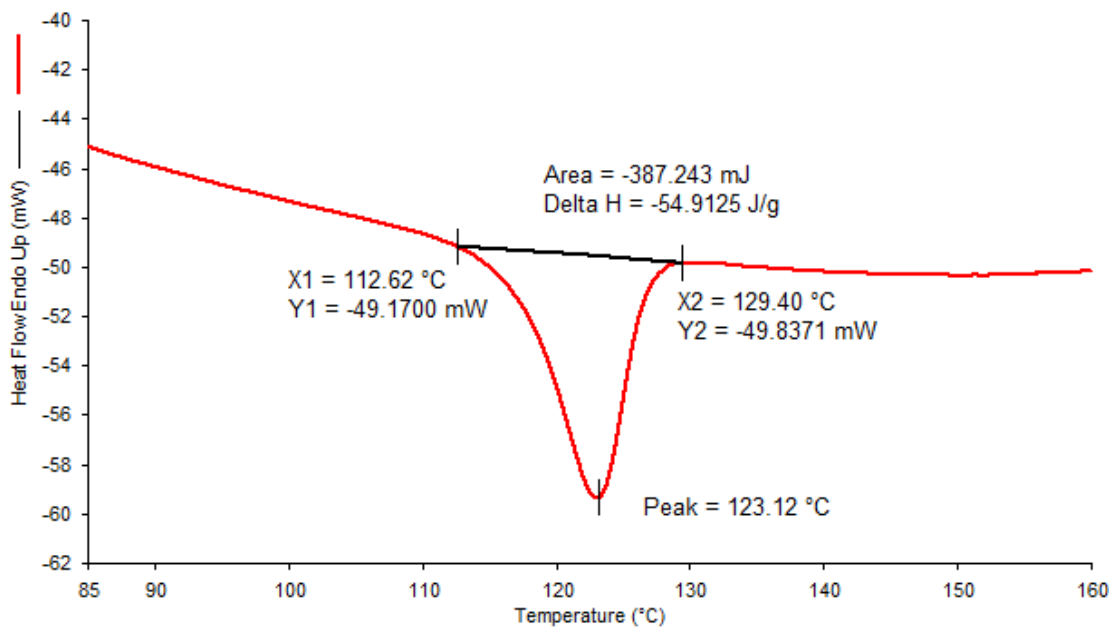


Gráfico 18: Gráfico de cristalização do compósito CP5A5B
Fonte: DOS AUTORES

Os gráficos 19 e 20 ilustra os resultados de fusão e cristalização dos compósitos CP5A10B que possuem 85% de PP, 5% de serragem e 10% de escória.

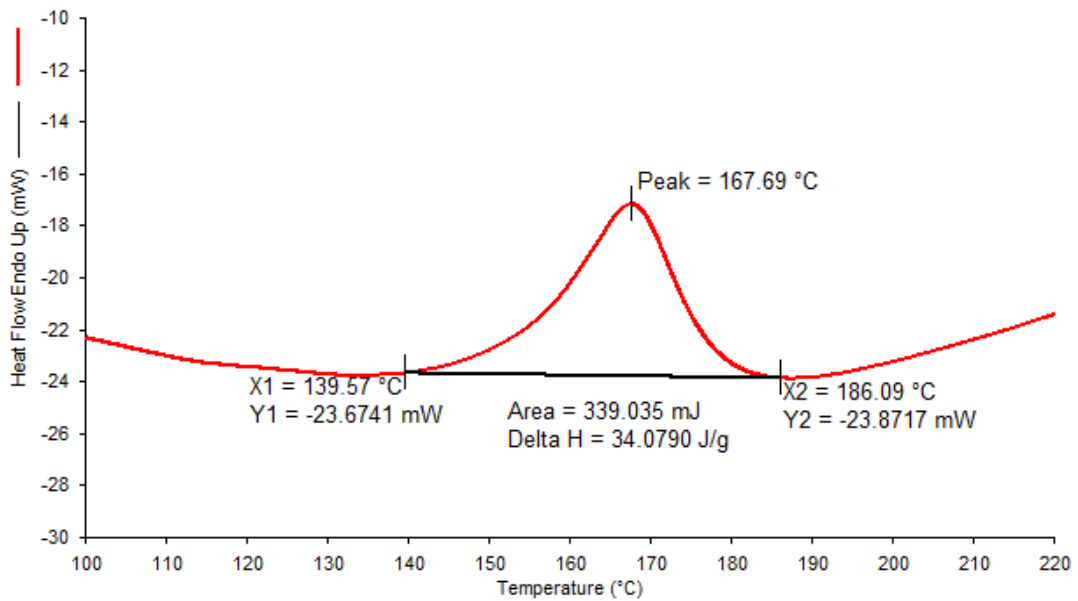


Gráfico 19: Gráfico de fusão do compósito CP5A10B
Fonte: DOS AUTORES

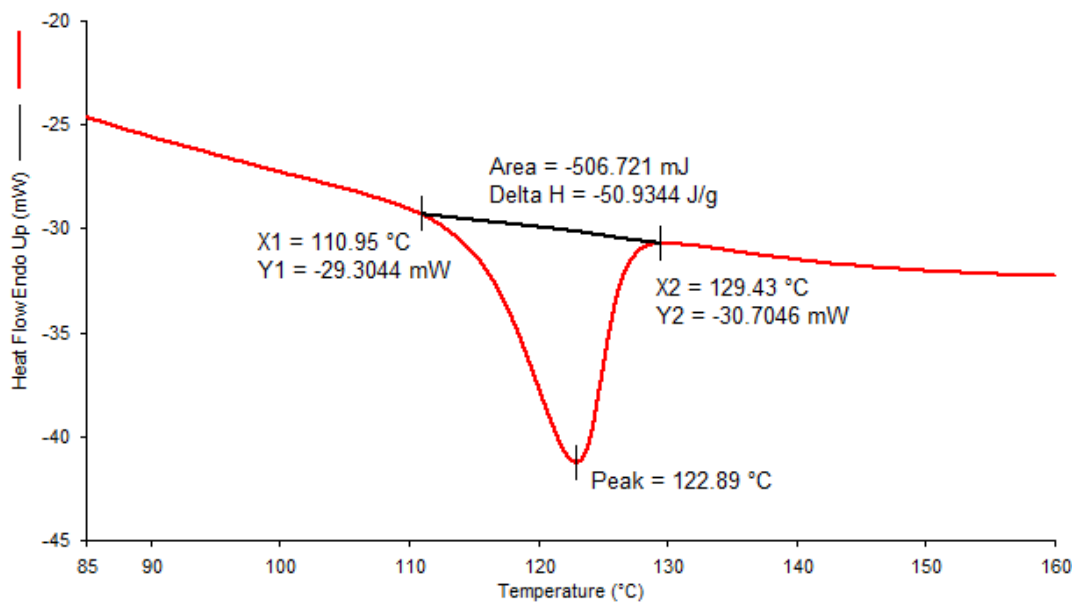


Gráfico 20: Gráfico de cristalização do compósito CP5A10B
Fonte: DOS AUTORES

Os gráficos 21 e 22 revelam os resultados de fusão e cristalização dos compósitos CP10A0B que possuem 90% de PP e 10% de serragem.

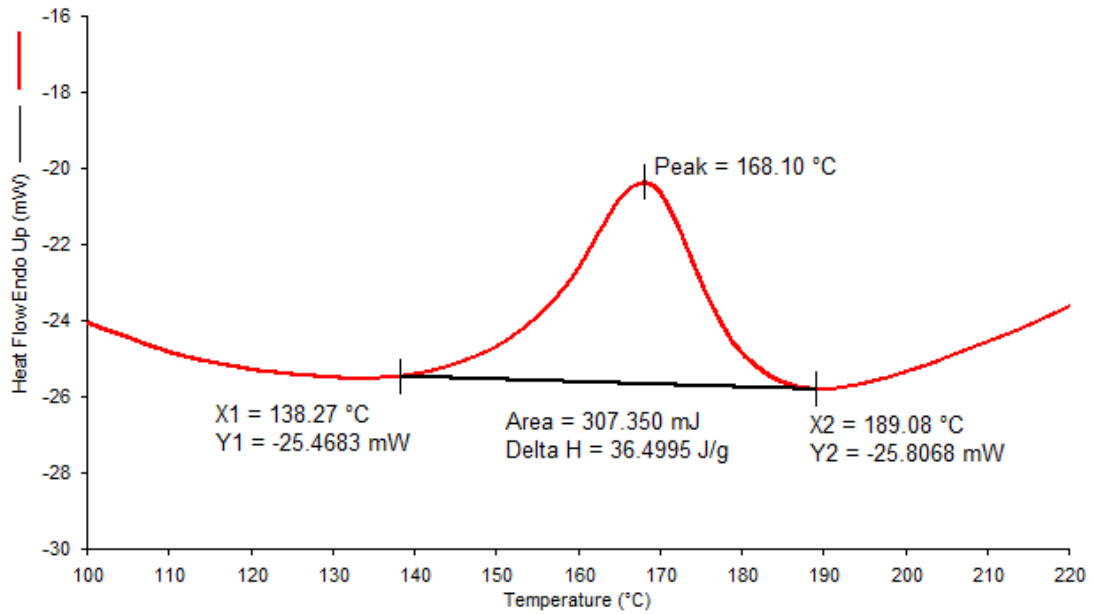


Gráfico 21: Gráfico de fusão do compósito CP10A0B
Fonte: DOS AUTORES

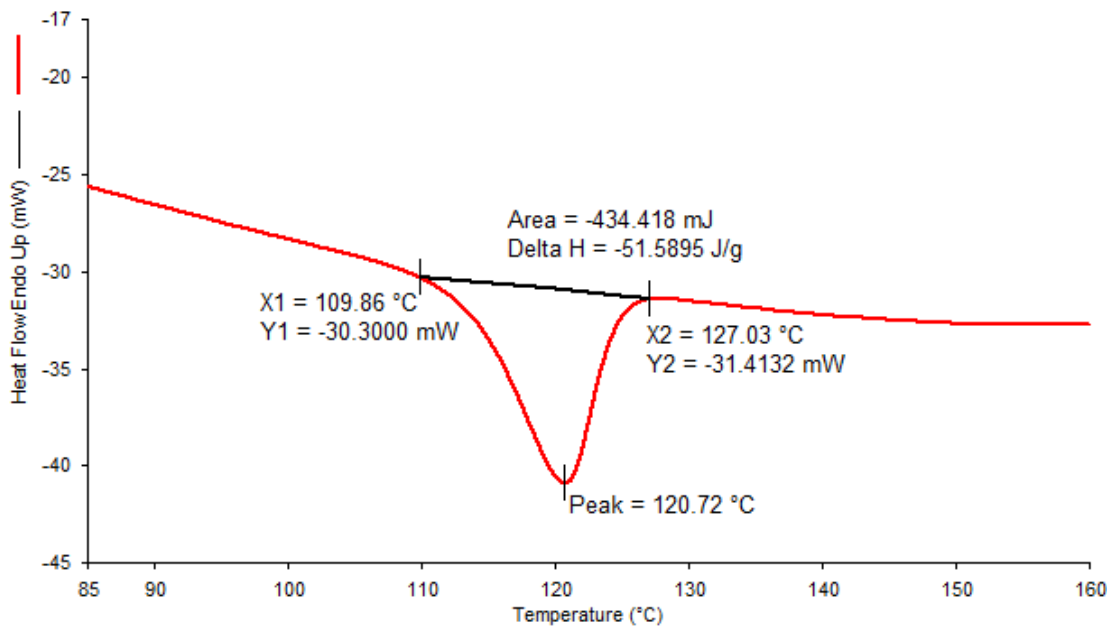


Gráfico 22: Gráfico de fusão do compósito CP10A0B
Fonte: DOS AUTORES

Os gráficos 23 e 24 demonstram os valores de fusão e cristalização do PP reciclado utilizado no trabalho como um referencial comparativo.

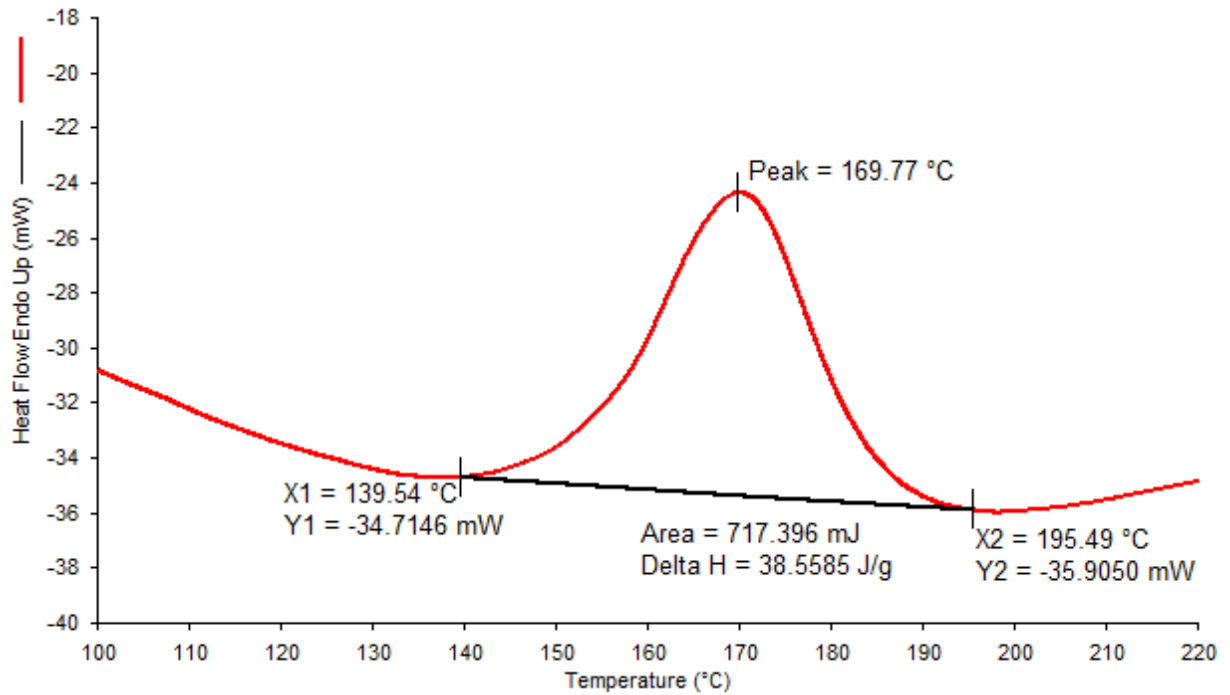


Gráfico 23: Gráfico de fusão do Polipropileno Reciclado
 Fonte: DOS AUTORES

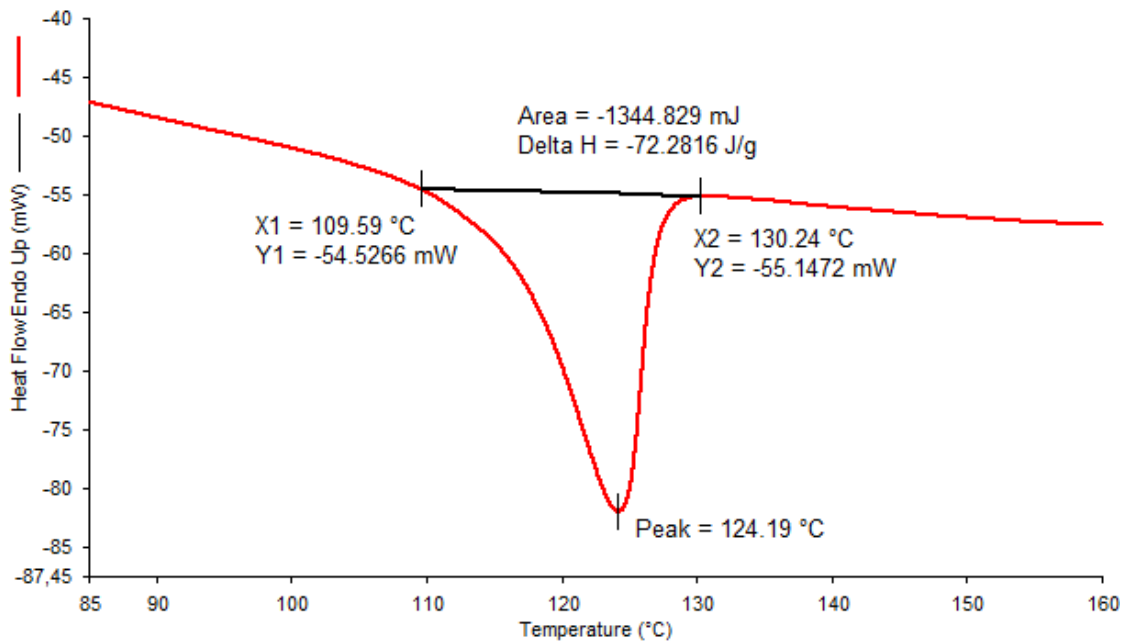


Gráfico 24: Gráfico de cristalização do Polipropileno Reciclado
 Fonte: DOS AUTORES

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ensaio de tração

A seguir, serão apresentados os resultados dos ensaios de tração e as respectivas propriedades mecânicas dos compósitos avaliados. As análises ocorreram para diferentes grupos de amostras:

- Compósitos contendo somente serragem
- Compósitos contendo somente escória de aciaria
- Compósitos contendo 5% de serragem e diferentes teores de escória
- Compósitos contendo 10% de serragem e diferentes teores de escória
- Compósitos contendo 5% de escória e diferentes teores de serragem
- Compósitos contendo 10% de escória e diferentes teores de serragem

4.1.1 Compósitos contendo somente serragem

A análise dos resultados do ensaio de tração foi realizada com base no valor médio apresentado pelas diferentes amostras conforme o quadro 3, e representado pelas curvas de tensão-deformação para o PP e seus compósitos.

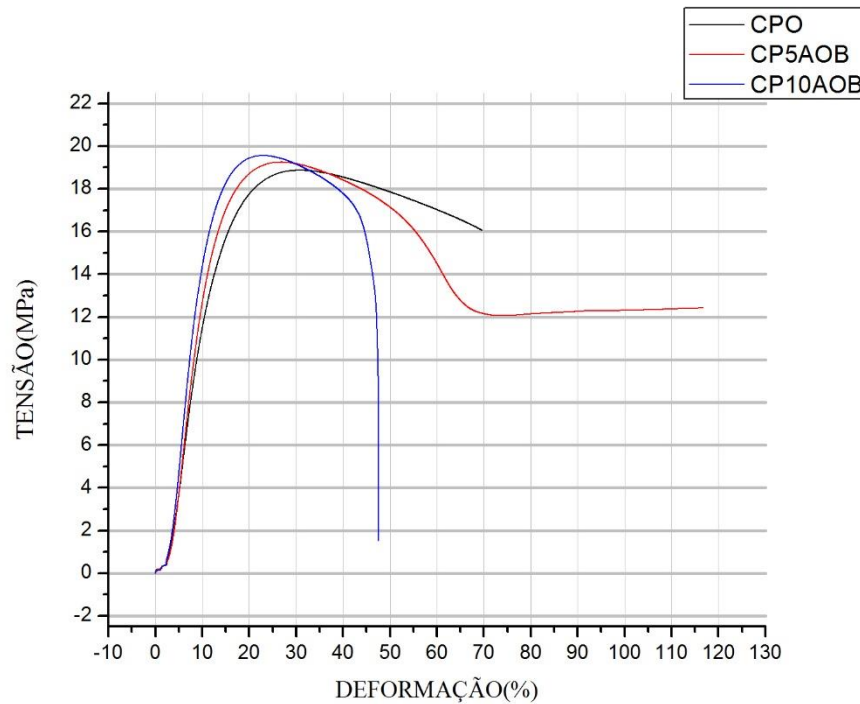


Gráfico 25: Comportamento mecânico dos compósitos contendo somente serragem CP0, CP5A0B e CP10A0B.
Fonte: DOS AUTORES

O comportamento dos materiais mostrado nas curvas revelou inicialmente que ocorreu uma deformação elástica, seguida por escoamento e uma região de deformação plástica, comportamento típico de polímeros e compósitos poliméricos termoplásticos (MARINUCCI, 2011).

Verifica-se ainda que o aumento no teor de serragem provoca um aumento na inclinação da curva. Percebe-se que com 10% de serragem, o material apresenta uma diminuição da deformação, o que caracteriza uma redução na ductilidade, vista pela diminuição na área abaixo da curva.

Apesar da redução na ductilidade, verifica-se na tabela 2, que a adição de serragem torna o material mais rígido, obtendo maiores valores de Módulo de Young e de Tensão máxima.

Tabela 2: Propriedades mecânicas em tração para os compósitos com serragem.

| AMOSTRA | Mód Young (Mpa) | Tensão Máx (Mpa) |
|---------|-----------------|------------------|
| CPO | 180,1 ± 5,6 | 18,8 ± 0,1 |
| CP5A0B | 209,3 ± 7,1 | 19,3 ± 0,2 |
| CP10A0B | 216,5 ± 6,3 | 19,7 ± 0,2 |

Fonte: DOS AUTORES

Desta forma, pode-se verificar que o teor de serragem de madeira adicionada à matriz nos proporciona melhores propriedades mecânicas e influi diretamente na resistência à tração do compósito.

4.1.2 Compósitos contendo somente escória de aciaria

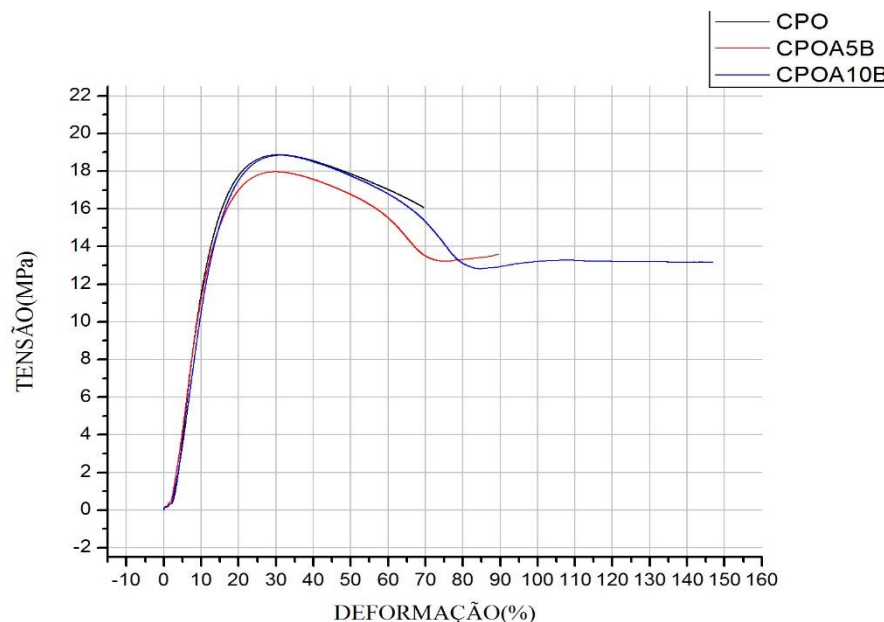


Gráfico 26: Comportamento mecânico dos compósitos contendo somente escória de aciaria CP0, CP0A5B e CP0A10B.

Fonte: DOS AUTORES

Apesar de não estar evidente no gráfico 26, a tabela 3 mostra que ocorreu uma redução no módulo de elasticidade na medida em que se aumenta o teor de escória no compósito. Entretanto, não há, aparentemente, uma redução

considerável na tensão máxima. Este comportamento é esperado, uma vez que a escória é um material inorgânico e a matriz polimérica é um material orgânico e, portanto, não apresentam boa interação.

Tabela 3: Valores de elasticidade e tensão dos compósitos contendo somente escória de aciaria CP0, CP0A5B e CP10A10B.

| AMOSTRA | Mód Young (Mpa) | Tensão Máx (Mpa) |
|---------|-----------------|------------------|
| CPO | 180,1 ± 5,6 | 18,8 ± 0,1 |
| CP0A5B | 153,9 ± 7,2 | 18,0 ± 0,1 |
| CP0A10B | 148,8 ± 6,9 | 18,5 ± 0,2 |

Fonte: Os autores

4.1.3 Compósitos contendo 5% de serragem e diferentes teores de escória

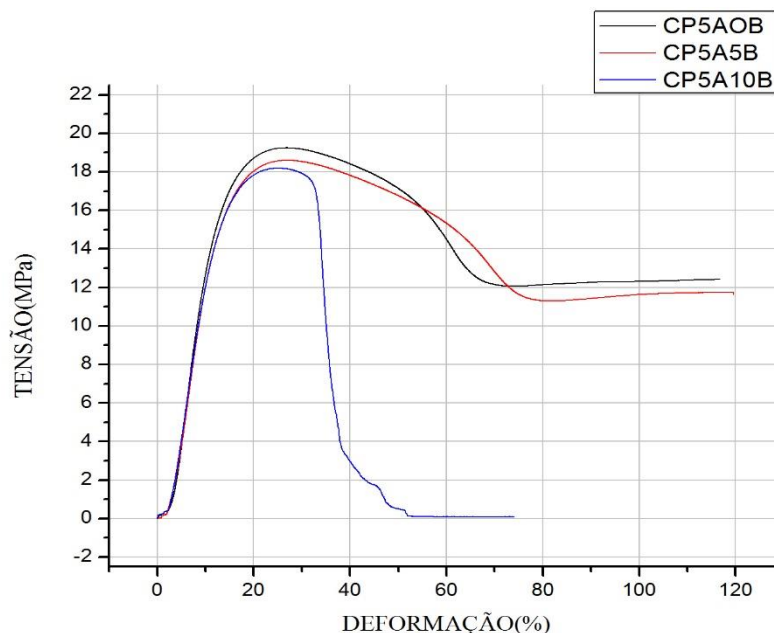


Gráfico 27: Comportamento mecânico dos compósitos contendo 5% de serragem e diferentes teores de escória de aciaria CP5A0B, CP5A5B e CP5A10B.

Fonte: DOS AUTORES

O gráfico 27 de tração expressa que as três curvas das amostras, possuem elevada propriedade de elasticidade, com tensões máximas que variam de 18,3 Mpa à 19,3 Mpa.

Tabela 4: Valores de elasticidade e tensão dos compósitos contendo 5% de serragem e diferentes teores de escória CP5A0B, CP5A5B e CP5A10B

| AMOSTRA | Mód Young (Mpa) | Tensão Máx (Mpa) |
|----------------|----------------------------|-----------------------------|
| CP5A0B | 209,3 ± 7,1 | 19,3 ± 0,2 |
| CP5A5B | 182,4 ± 8,1 | 18,9 ± 0,2 |
| CP5A10B | 173,0 ± 5,5 | 18,3 ± 0,2 |

Fonte: DOS AUTORES

A partir da análise dos dados contidos na tabela 4 e no gráfico 27, é possível perceber que a adição de escória reduz o módulo de elasticidade. Todavia, a redução é menor nos compósitos contendo serragem, em comparação aos compósitos contendo somente escória (gráfico 26 e tabela 3).

4.1.4 Compósitos contendo 10% de escória e diferentes teores de serragem

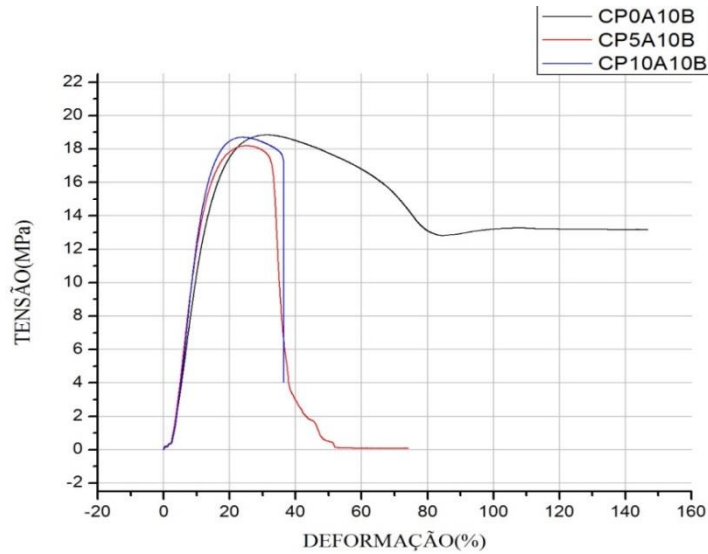


Gráfico 28: Comportamento mecânico dos compósitos contendo 10% de escória e diferentes teores de serragem CP0A10B, CP5A10B e CP10A10B.
Fonte: DOS AUTORES

No gráfico 28, pode-se observar que os compósitos CP5A10B e CP10A10B se mostraram com menor ductilidade quando comparados ao CP0A10B. Esse comportamento foi verificado em todas as amostras analisadas com essas composições. Entretanto, na tabela 5 é possível perceber que as formulações menos dúcteis apresentam um Módulo de Young maior, ou seja, são mais rígidas.

Tabela 5: Valores de elasticidade e tensão dos compósitos contendo 10% de escoria e diferentes valores de serragem CP0A10B, CP5A10B e CP10A10B.

| AMOSTRA | Mód Young (Mpa) | Tensão Máx (Mpa) |
|----------|-----------------|------------------|
| CP0A10B | 148,8 ± 6,9 | 8,5 ± 0,2 |
| CP5A10B | 173,0 ± 5,5 | 18,3 ± 0,2 |
| CP10A10B | 193,8 ± 6,1 | 18,4 ± 0,2 |

Fonte: DOS AUTORES

4.1.5 Compósitos contendo 10% de serragem e diferentes teores de escória

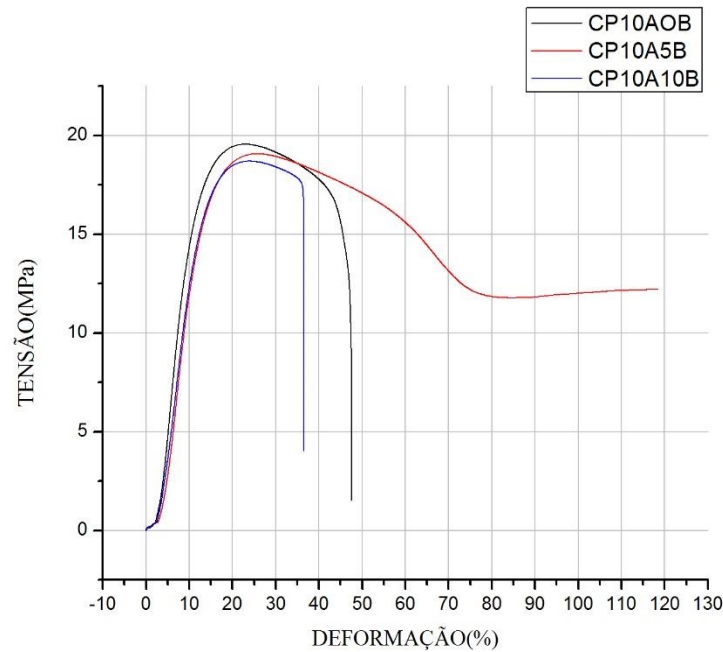


Gráfico 29 Comportamento mecânico dos compósitos contendo 10% de serragem e diferentes teores de escória CP10A0B, CP10A5B e CP10A10B.
Fonte: DOS AUTORES

O gráfico 29 ilustra que os compósitos apresentaram comportamento semelhantes e que a mistura CP10A5B se destaca pois é mais resistente a deformação que os demais compostos.

Pode-se observar que os compósitos CP10A0B e CP10A10B obtêm uma diminuição na deformação do material, que caracterizou uma redução na ductilidade deste compósito em relação aos demais. Na tabela 6, verifica-se que há uma pequena redução no Módulo de Young com a adição de escória. Tal fato sugere que o compósito CP10A10B obteve bons resultados, uma vez que usa 20% menos plástico e apresenta boas propriedades mecânicas.

Tabela 6: Valores de elasticidade e tensão dos compósitos contendo 10% de serragem e diferentes teores de escória CP10A0B, CP10A5B e CP10A10B.

| AMOSTRA | Mód Young (Mpa) | Tensão Máx (Mpa) |
|----------|-----------------|------------------|
| CP10A0B | 216,5 ± 6,3 | 19,7 ± 0,2 |
| CP10A5B | 195,2 ± 7,4 | 19,2 ± 0,1 |
| CP10A10B | 193,8 ± 6,1 | 18,4 ± 0,2 |

Fonte: DOS AUTORES

4.1.6 Compósitos contendo 5% de escoria e diferentes teores de serragem

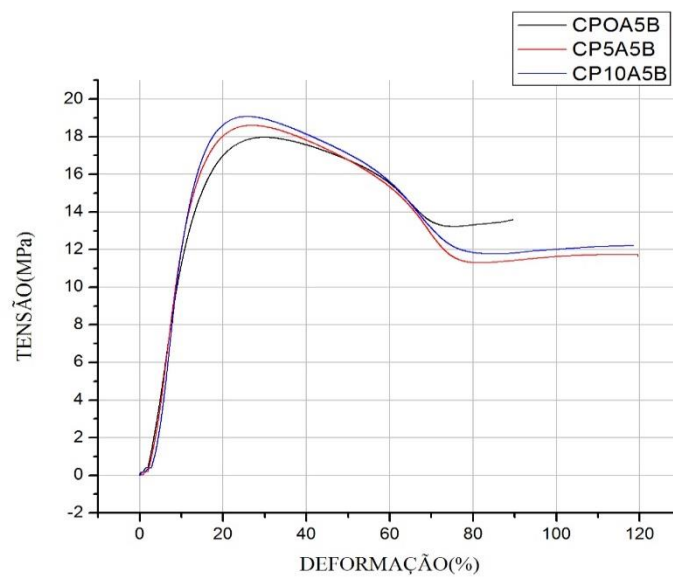


Gráfico 30: Comportamento mecânico dos compósitos contendo 5% de escoria e diferentes teores de serragem CP0A5B, CP5A5B e CP10A5B.

Fonte: DOS AUTORES

O gráfico 30 mostra que as três amostras analisadas apresentam comportamento bastante semelhante em tração. Verifica-se que a adição de serragem (tabela 7) promove um aumento no módulo de elasticidade e na tensão máxima.

Tabela 7: Valores de elasticidade e tensão dos compósitos contendo 5% de escória e diferentes teores de serragem CP0A5B, CP5A5B e CP10A5B.

| AMOSTRA | Mód Young (Mpa) | Tensão Máx (Mpa) |
|---------|--------------------|---------------------|
| CP0A5B | 153,9 ± 7,2 | 18,0 ± 0,1 |
| CP5A5B | 182,4 ± 8,1 | 18,9 ± 0,2 |
| CP10A5B | 195,2 ± 7,4 | 19,2 ± 0,1 |

Fonte: DOS AUTORES

4.2 Análise Térmica

O PP reciclado e os compósitos foram analisados por Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC) por fluxo de calor, com o intuito de inspecionar se a adição da serragem de madeira e a escória geraram alterações significativas quanto à fusão e a cristalinidade desses materiais.

A tabela 8 apresenta os resultados obtidos a partir da DSC. Nela estão contidas as temperaturas de início e fim da fusão e da cristalização, além da entalpia de cada uma dessas fases. Para a obtenção do grau de cristalinidade, foi utilizado o valor obtido na DSC para a entalpia de fusão (ΔH) comparando ao valor da entalpia de fusão do polipropileno 100% cristalino ($\Delta H = 138 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$) (ISHIZAKI et al, 2006).

Verifica-se na tabela 08 que as amostras apresentam comportamento semelhante nos picos de fusão e cristalização, apresentando, em média, temperatura de fusão de $168 \pm 2,42^\circ\text{C}$ e de cristalização de $122,5 \pm 1,08^\circ\text{C}$.

Uma vez que a precisão do equipamento é de cerca de 3%, pode-se concluir que não há diferença significativa nas temperaturas de fusão e cristalização para as amostras estudadas.

Os graus de cristalinidade mostram que a adição de reforço não modifica fortemente esta propriedade, uma vez que o polímero puro apresentou 27,94% de cristalinidade e os compósitos se mostram entre 20% e 30% cristalinos.

Tabela 8: Valores de ΔT , Pico, ΔH e porcentagens de cristalização dos compósitos.

| Amostra | Fase de Transição | ΔT (°C) | Pico(°C) | ΔH (J/g) | %Crist |
|--------------|-------------------|-----------------|----------|------------------|--------|
| PP Reciclado | Fusão | 55,95 | 169,77 | 385,585 | 27,94 |
| | Cristalização | 20,65 | 124,19 | -722,816 | - |
| CP5A0B | Fusão | 52,44 | 172,12 | 353,369 | 25,61 |
| | Cristalização | 21,11 | 121,8 | -585,844 | - |
| CP10A0B | Fusão | 50,81 | 168,10 | 364,995 | 26,44 |
| | Cristalização | 17,17 | 120,72 | -515,895 | - |
| CP0A5B | Fusão | 54,17 | 170,39 | 415,295 | 30,09 |
| | Cristalização | 47,17 | 122,90 | -650,973 | - |
| CP5A5B | Fusão | 48,43 | 164,03 | 322,982 | 23,40 |
| | Cristalização | 16,78 | 123,12 | -549,125 | - |
| CP10A5B | Fusão | 40,47 | 166,16 | 281,984 | 20,43 |
| | Cristalização | 19,62 | 122,13 | -525,762 | - |
| CP0A10B | Fusão | 54,82 | 166,78 | 330,571 | 23,95 |
| | Cristalização | 18,17 | 123,19 | -558,343 | - |
| CP5A10B | Fusão | 46,52 | 167,69 | 34,079 | 24,70 |
| | Cristalização | 18,48 | 122,89 | -509,344 | - |
| CP10A10B | Fusão | 48,8 | 167,31 | 353,596 | 25,62 |
| | Cristalização | 15,80 | 121,80 | -464,732 | - |

FONTE: DOS AUTORES

4.3 Sugestões de aplicação na Indústria da Construção Civil

O Polipropileno é um material já aplicado na Indústria de Construção Civil. Atualmente, com intuito de diminuir a fissuração plástica em matrizes de concreto, fibras desse material são adicionadas à mistura. Outra aplicação desse material é no sistema *BubbleDeck*, consiste em substituir a porção de concreto não estrutural utilizado em lajes de concreto armado, por esferas (fotografia 11) de polipropileno,

reduzindo dessa maneira até 25% do uso de concreto em uma obra, sem perder a resistência e tornando essa laje até 35% mais esbelta.

Os compósitos estudados neste trabalho que agregam escória de aciaria são inviáveis para esse tipo de sistema, uma vez que esse material é inorgânico, e emite gases, que em contato com o concreto e as armaduras causa pequenas explosões que levam a laje a fraturas. Entretanto, os outros compósitos que não possuem o aditivo de escória de aciaria, pode substituir o Polipropileno Puro utilizado nesse tipo de estrutura.

Contudo, tendo em vista as análises laboratoriais, percebe-se que os compósitos que incorporam escória de aciaria podem ser aplicados de diversas maneiras na Indústria de Construção Civil. Dentre elas, na confecção de tubulações corrugadas para a passagem hídrica (fotografia 10), esgoto e abastecimento de gás.

Todavia, estes compósitos associados à escória de aciaria já não devem ser utilizados na confecção de eletrodutos. Uma vez que há passagem de componentes elétricos, existe a necessidade de isolamento, que não será propiciada por este material metálico. Entretanto não podemos descartar a aplicabilidade dos demais compósitos gerados sem a adição de escória, que podem ser aplicados em diversas áreas da engenharia como na fabricação de telhas ecológicas, como também na confecção de componentes terminais de instalações elétricas; tais quais tomadas, espelhos, caixas e interruptores.

Os compósitos analisados neste trabalho possuem taxa de cristalinidade próxima a do Polipropileno reciclado, uma média de 25,08% contra 27,94% respectivamente, o que lhes conferem flexibilidade, tornando-os favoráveis para a elaboração de telhas. Outro aspecto que propicia essa finalidade é a leveza deste material.

Por fim, conclui-se que, ambos os compósitos, devido as suas características podem ser aplicados como substitutivos de materiais constituídos de polipropileno

na Construção Civil, tendo em vista a substituição de maneira consciente e sustentável.



Fotografia 9: Instalação de tubo corrugado num projeto de drenagem de tempestade no México.

Fonte: Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/High-density_polyethylene



Fotografia 10: *Bubbledeck*

Fonte: <http://www.brasilengenharia.com/portal/noticias/destaque/5680-braskem-e-bubbledeck-trazem-a-construcao-civil-tecnologia-que-utiliza-esferas-de-plastico-em-lajes> Acesso em 20 março 2017.

5 CONCLUSÃO

As análises realizadas neste estudo utilizaram o polipropileno reciclado, bem como outros materiais também advindos da reciclagem, como a escória de aciaria e a serragem de madeira *Pinus taeda*, objetivando o emprego do compósito gerado na indústria da Construção Civil, bem como a conscientização ambiental dos materiais de descarte ainda passíveis de reaproveitamento.

Com base nos estudos, é possível concluir que a adição de serragem à formulação dos compósitos promove melhores propriedades mecânicas ao material. Já a adição de escória, promove uma redução no módulo de elasticidade em tração. Todavia, a utilização combinada dos dois reforços se mostrou como uma boa alternativa.

Comprovou-se que todos os compósitos produzidos neste trabalho podem de alguma forma, ser aplicados, uma vez que apresentam propriedades semelhantes aos plásticos do mercado. Entretanto, os compósitos CP10A10B e CP5A0B apresentaram os melhores resultados. Evidencia-se no compósito CP10A10B, um menor índice de cristalinidade entre os demais compósitos, o que possibilita a constituição de um material final mais resistente do que o de um composto constituído exclusivamente de polipropileno reciclado.

O compósito CP5A0B é constituído por 95% de polipropileno e 5% de serragem da madeira *pinus tandrae*. Este possuindo em suas características mecânicas, resistência a esforços de tração e um baixo índice de cristalinidade, o que proporciona, assim como no CP10A10B, a constituição de um material com boa resistência.

Por fim, entende-se que neste trabalho foram produzidos compósitos com 100% de material reciclado e que obtiveram boas propriedades mecânicas e

térmicas. Ressalta-se que o compósito CP10A10B utiliza, ainda, 20% menos de derivados do petróleo, contribuindo para a redução da emissão de gases.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Num estudo mais específico acerca destas matérias-primas e seu comportamento após a confecção de um material de uso elenca-se:

- Avaliação do comportamento mecânico, levando em consideração temperatura, esforços de tração, compressão e cisalhamento;
- Estabilidade e condução térmica;
- Análise da matéria-prima por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difratometria de raio-x e;
- Análise da reação química do compósito quando em contato com águas agressivas e concreto.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPLAST. **Associação Brasileira da Indústria do Plástico**. Conceitos básicos sobre materiais plásticos, 2014. Disponível em: <http://file.abiplast.org.br/download/links/links%202014/materiais_plasticos_para_site_vf_2.pdf>.

AGNELLI, J.A.M. (2005). **Introdução a materiais poliméricos**. Engenharia de Materiais – DEMa. UFSCar, São Carlos – SP. Notas de aula.

ARRAKHIZ, F. Z. *et al.* Mechanical and thermal properties of natural fibers reinforced polymer composites: Doum/low density polyethylene. *Materials& Design*, v. 43, p. 200-205, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1994). **NBR 13230**: Reciclabilidade e identificação de materiais plásticos. Rio de Janeiro.

BAIMA, Cesar. **Plástico forma ilhas de poluição nos oceanos**. *Jornal O Globo*, 2010. Disponível em: <<http://oglobo.oglobo.com/sociedade/ciencia/plastico-forma-ilhas-de-poluicao-nos-oceanos-2962119>>.

BEIM, Kira Fukushima. **Estudo comparativo das tensões cisalhantes na interface entre camadas de um compósito polimérico de fibra de carbono pelos métodos numérico e experimental**. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais) – IPEN. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo. 2008.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Levantamento do Ministério do Meio Ambiente mapeia emissão de dois poluentes nocivos à saúde**. 2014. Disponível em: <<http://mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/producao-e-consumo-sustentavel/saco-e-um-saco/saiba-mais>>.

BRASKEM. Portal Braskem. **Posicionamento da Braskem sobre reciclagem do Plástico**, 2014. Disponível em: <<http://www.braskem.com.br/site.aspx/posicionamento-reciclagem-plastico>>. Acesso em 10 de abr. 2017.

CALLISTER, JR. D. W; RETHWISCH, G. D. **Ciência e engenharia de materiais**. 8. Ed. Uma Introdução. Rio de Janeiro: Gen, 2013.

CARVALHO, A. J. F.; NOSSA, T. Escola de Engenharia de São Carlos: Universidade de São Paulo. **Ensaio Mecânico em Materiais Poliméricos**: SMM 0194, São Carlos, 2012. Disponível em: <<http://www1.eesc.usp.br/smm/images/materialdidatico/smm194/ROTEIRO%20Ensaio%20Mecanicos%20CMII.pdf>>. Acesso em 10 de Fev de 2017.

CASTRO, D. O. et al. Preparação e Caracterização de Biocompósitos Baseados em Fibra de Curauá, Biopolietileno de Alta Densidade (BPEAD) e Polibutadieno Líquido Hidroxilado (PBHL). **Polímeros**, São Carlos, v. 23, n. 1, p. 65-73, jan. COSTA, D. A.;

COUTINHO, *et al.* **Polietileno**: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 13, n. 1, p. 1-13, 2003.

DE ARAÚJO, J.F. **Estudo de Propriedades Mecânicas do Polipropileno Moldado por Injeção em Insertos de Resina**. 2010. 88p. Pós Graduação em Engenharia Mecânica de Materiais. Universidade Técnica Federal do Paraná, Curitiba.

DE PAOLI, M. A. **Degradação e estabilização de polímeros**. 1 ed. São Paulo: Artliber Editora, 2008, 286 p.

FINKLER, M. *et al.* Compósitos de HPDE com resíduos de fibras têxteis. Parte I: caracterização mecânica. **Polímeros**, São Carlos, v. 15, n. 3, p. 171-175, jul/set. 2005.

FREITAS, R.L.M. **Efeito da Temperatura de Resfriamento sobre as Propriedades de Polímeros Amorfos e Semicristalinos**. 2014. 65f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Materiais da Escola Politécnica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro

HEED-HILL, Robert E. **Princípios de Metalurgia Física**. E.ed. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois. 1982.

IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Núcleo de Educação Ambiental. **Tempo de decomposição de alguns materiais na natureza**. 2014. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/setores-ibama-df/reciclagem>>.

ISHIZAKI, M. H. *et al.* Caracterização mecânica e morfológica de compósitos de polipropileno e fibras de coco verde: influência do teor de fibra e das condições de mistura. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 16, n. 3, p. 182-186, 2006.

ITO, E. N. *et al.* **Nanocompósitos de Polietileno/Argila Bentonita Nacional: Influência da Argila e do Agente Compatibilizante PE-g-MA nas Propriedades Mecânicas e de Inflamabilidade.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, São Carlos, v. 18, n. 2, p. 170-177, 2008. Disponível em: <<http://revistapolimeros.org.br/doi/10.1590/S0104-14282008000200015>>.2013.

LAKATOS, E.M.; MARCONI, M.A. **Metodologia do trabalho científico.** 4. ed. Ciência e Tecnologia. São Paulo: Atlas, 1990.

LOPES, Luciana. **Gestão e gerenciamento integrados dos resíduos sólidos urbanos.** Diss. Universidade de São Paulo, 2006.

LUCAS, F. E; SOARES, G. B; MONTEIRO, E. **Caracterização de polímeros.** Determinação de Peso Molecular e Análise Térmica. Rio de Janeiro : E-papers, 2001.

MAGRINI, Alessandra. **Impactos ambientais causados pelos plásticos: uma discussão abrangente sobre os mitos e os dados científicos.** Editora E-papers, 2012

MANCINELLI, Ketlin. **Introdução à materiais Plásticos;** UDESC, 2013, 82p. Notas de aula, Universidade do Estado de Santa Catarina, Santa Catarina, 2015.

MANO, Biasoto Eloisa. **Polímeros como materiais de engenharia.** São Paulo, Blucher, 2011.

MARINUCCI, G. **Materiais Compósitos Poliméricos.** Fundamentos e tecnologia. São Paulo: Artliber Editora, 2011.

MAZUR, Joyce. **"Resíduos sólidos da construção civil e a logística reversa no canteiro de obras vinculados à saúde e segurança do trabalhador."** (2015).

MONDARDO, H. Fábio. **Compósitos de Polipropileno e Farinha de madeira.** 2006. 238 f. Dissertação (Mestre em Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

NETO, L. F; PARDINI, C.L. **Compósitos Estruturais.** 1. Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2006

OLIVEIRA, Cláudia de M. B. de. **"A produção científica em sustentabilidade e a contribuição da Ciência dos Materiais."** (2012).

Prof. Eduardo C. S. Thomaz, **Escória de Alto Forno**, 2010.51f. Notas de Aula.

REDIGHIERI, K. I. **Compósitos de Polietileno Reciclado e Partículas de Madeira de Reflorestamento Tratados com Polietileno Modificado.** *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, São Carlos, v. 18, n. 1, p. 5-11, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282008000100006>>.

SCHAEDLER, Fernando. **Estudo da utilização de serragem de eucalipto como reforço de Polipropileno:** UFRGS, 2015. 51 p. Trabalho de Diplomação – Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SCHIAVON, Marco A. **Polissiloxanos polissilazanos como precursores de materiais cerâmicos e suas aplicações na obtenção de compositos de matriz cerâmica.** 2002. 135p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Química, Campinas, SP.

SOUZA, Sérgio A. de. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos Teóricos e Práticos.** 5.ed. São Paulo: ED. Edgard Blücher, 1982

8 ANEXO



Fotografia 11: Aterro Sanitário em Cascavel PR

Fonte: <<http://alunosonline.uol.com.br/quimica/polimeros-poluicao-lixo.html>> Acesso em 19 março 2017.



Fotografia 12: Aterro Sanitário em Cascavel PR

Fonte: <http://alunosonline.uol.com.br/quimica/polimeros-poluicao-lixo.ht> Acesso em 19 março 2017.