

FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS

JÚLIA DUTRA BRAZ

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE
POLIPROPILENO RECICLADO REFORÇADOS COM SERRAGEM E
RESÍDUOS INDUSTRIAIS**

VOLTA REDONDA

2019

FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE
POLIPROPILENO RECICLADO REFORÇADOS COM SERRAGEM E
RESÍDUOS INDUSTRIAIS**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Materiais, sob a orientação do prof. Dr. Bruno Chaboli Gambarato, na área de Processamento e Caracterização de Materiais reciclados, compósitos, nanomateriais e biomateriais, linha de pesquisa Materiais compósitos.

Aluna:

Júlia Dutra Braz

Orientador:

Prof. Dr. Bruno Chaboli Gambarato

VOLTA REDONDA

2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tacão Wagner - CRB 7/RJ 4316

B794d Braz, Júlia Dutra.

Desenvolvimento e caracterização de compósitos de polipropileno reciclado reforçados com serragem e resíduos industriais. / Júlia Dutra Braz. - Volta Redonda: UniFOA, 2019.

80 p. : Il

Orientador (a): Bruno Chaboli Gambarato

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em Materiais, 2019

1. Materiais - dissertação. 2. Polipropileno reciclado – serragem aciaria. I. Gambarato, Bruno Chaboli. II. Centro Universitário de Volta Redonda. III. Título.

CDD – 620.1

FOLHA DE APROVAÇÃO

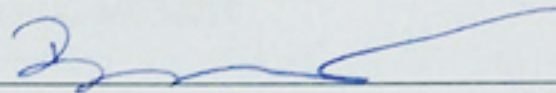
Aluna: Júlia Dutra Braz

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE
POLIPROPILENO RECICLADO REFORÇADOS COM SERRAGEM E
RESÍDUOS INDUSTRIAIS

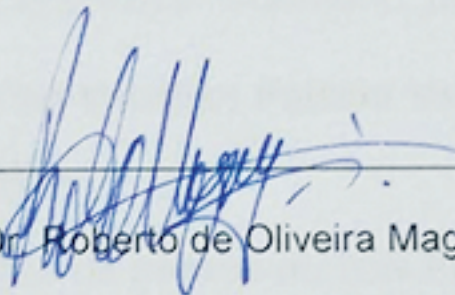
Orientador:

Prof. Dr. Bruno Chaboli Gambarato

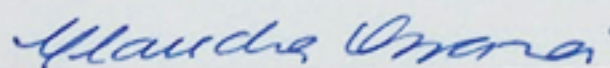
Banca Examinadora



Prof. Dr. Bruno Chaboli Gambarato



Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago



Prof. Dra. Cláudia Ossanai

AGRADECIMENTOS

Ao meu irmão, por tudo. Por ser meu amigo em todas as horas, por me apresentar a UniFOA, por me acolher em sua casa, juntamente com minha cunhada, a me apoiar e me suportar em tudo que necessitei neste período.

A minha mãe, que segurou todas as pontas para que eu pudesse estudar novamente, ficando com a minha filha.

Ao meu pai, que ao lado da minha mãe ajudou a suportar as minhas ausências em casa.

A minha filha, que por ela, fiz o mestrado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Bruno Chaboli Gambarato pelo apoio, amizade, orientação e ensinamento passado.

Ao coordenador do MEMAT, Prof. Dr. Roberto Magnago, por todo apoio, suporte, auxílio e bom humor que alegam qualquer um.

Ao corpo docente do MEMAT.

À secretaria do MEMAT nas pessoas da Ana Maria e da Isabela, por serem sempre solícitas em ajudar no que fosse necessário, mesmo à distância.

A minha assistente no trabalho, Patricia Varela, que me ajudou para que conseguisse viabilizar os estudos.

À Matos & Associados na pessoa do Luis Fernando, que me proporcionou a possibilidade de estudar.

A todos que, de alguma forma participaram para a conclusão do mestrado.

RESUMO

Dentro do contexto da sustentabilidade, a reutilização de materiais poliméricos, bem como o aproveitamento de resíduos industriais são processos de necessidade premente. Os compósitos poliméricos reforçados com resíduos têm se mostrado excelentes alternativas para atender estes preceitos. Assim, neste trabalho foram produzidos compósitos poliméricos utilizando, como matriz, o polipropileno derivado de embalagens domésticas. Como reforço para os compósitos, foram utilizadas a serragem de madeira *Pinus taeda* e a escória de aciaria elétrica. Foram avaliadas composições contendo um planejamento fatorial completo 3^2 de 0, 5 e 10% de cada reforço, além de combinações destes. Os compósitos foram processados por mistura termocinética e injetados a 300 °C. As propriedades dos materiais obtidos foram avaliadas por meio de ensaio de tração e análise térmica. Os resultados mostraram que é possível produzir compósitos com os materiais estudados e que a adição de serragem promove um aumento significativo no Módulo de Young (até 25,4%), além de aumentar a tensão máxima em tração (até 7%). Quanto à escória, foi verificado que este material promove uma redução nas propriedades mecânicas do compósito e que, quando em conjunto com a serragem, os materiais obtidos apresentam boas propriedades mecânicas (Módulo de Young de 194 MPa e Tensão Máxima de 18,5 MPa). Os resultados foram validados por meio de análise de variância e uma superfície de resposta foi obtida para cada variável mecânica. Assim, neste trabalho, foi possível obter materiais com melhores propriedades utilizando reciclagem de polímeros e aproveitamento de resíduos.

Palavras-chave: Reciclagem; Ensaio mecânico; Análise Térmica; Superfície de resposta.

ABSTRACT

The reuse of polymeric materials, as well as the exploitation of industrial waste are essential in the context of sustainability. Polymeric composites reinforced with waste have shown to be excellent alternatives to meet these precepts. Polymeric composites were produced using, as a matrix, polypropilene derived from domestic containers. Wood sawdust from *Pinus taeda* and electrical steel slag were used as a reinforcement for the composites. Compositions were evaluated having a complete factorial planning 3^2 of 0, 5 and 10% of of each reinforcement, further than combination thereof. The composites were processed by thermokinect mixture and injected at 300°C. The properties of the obtained material were evaluated by tensile test and thermal analyzes. The results showed that it is possible to produce composites with the studied materials and that adding sawdust promotes a significant increase on the Young Module (up to 25,4%), in addition to increasing the maximum traction tension (up to 7%). Regarding the steel slag, it was verified that this material promotes a reduction on the mechanical properties of the compound and that, when together with sawdust, the obtained materials presents good mechaical properties (Young Module of 194 MPa and Maximum Tensile of 18,5 MPa). The results were evaluated by variance analyzes and a response surface was obtained for each mechanical variable. Thus, on present work, it was possible to obtain materials with better properties using polymer recycle and waste management.

Keywords: Recycle, mechanical tests, thermal analysis, response surface

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagramas Comparativos entre propriedades de Aço, Alumínio e Compósitos	21
Figura 2. Representações esquemáticas de compósitos reforçados com fibras (a) particuladas, (b) fibras curtas desalinhas aleatoriamente e (c) fibras longas alinhadas.....	21
Figura 3. Aplicação de esforços compressivos (esquerda) e cisalhantes (direita) em fibras vegetais	22
Figura 4. Tipos de Matriz.....	23
Figura 5. Limite de resistência à tração e a temperatura ambiente	24
Figura 6. Reação de polimerização do propileno	28
Figura 7. Comportamento tensão-deformação para polímeros frágeis (curva A), plásticos (curva B) e altamente elásticos (elastoméricos) (curva C)	29
Figura 8. Variação de propriedades dos compósitos em razão do comprimento da fibra	31
Figura 9. Distribuição da lignina e polissacarídeos em nível molecular.	35
Figura 10. Modelo da estrutura da parede celular de traqueídes de madeira mole e de fibras libriformes de madeira dura. LM = lamela média; P = parede primária; S1 e S2 = paredes secundárias, T = parede terciária.....	35
Figura 11. Fluxo da produção siderúrgica	37
Figura 12. Fluxograma do desenvolvimento do estudo.....	39
Figura 13. Embalagens obtidas por coleta doméstica para o desenvolvimento dos compósitos	40
Figura 14. Serragem de madeira.....	41
Figura 15. Escória de aciaria granulada.....	41
Figura 16. Homogeneizador com a mistura dos compósitos, homogeneizador e plástico após homogeneização	43
Figura 17. Moinho de facas	43
Figura 18. Injetora	44
Figura 19. Dimensões e forma de um corpo de prova de seção retangular	45
Figura 20. Medidor de tração	46
Figura 21. Analisador Térmico	46
Figura 22. Comportamento mecânico dos compósitos contendo somente serragem (compostos P₁₀₀ contendo 100% de plásticos, P₉₅S₅E₀ contendo 95% de plásticos e 5% de serragem e P₉₀S₁₀E₀ contendo 90% de plásticos e 10% de serragem)	48
Figura 23. Módulo de Young versus teores de serragem.....	49
Figura 24. Tensão máxima versus teor de serragem	50
Figura 25. Comportamento mecânico dos compósitos contendo somente escória de aciaria (Compostos P₁₀₀ , contendo 100% de plásticos, P₉₅S₀E₅ contendo 95% de plásticos e 5% de escória e P₉₀S₀E₁₀ contendo 90% de plásticos e 10% de escória).	51
Figura 26. Módulo de Young versus teores de escória de aciaria.....	52
Figura 27. Tensão máxima versus teores de escória.....	52

Figura 28. Comportamento mecânico compósitos contendo 5% serragem e diferentes teores de escória de aciaria (P₉₅S₅E₀ contendo 95% plásticos e 5% serragem, P₉₀S₅E₅ contendo 90% plásticos, 5% serragem e 5% escória e P₈₅S₅E₁₀ contendo 85% plásticos, 5% serragem e 10% escória)	53
Figura 29. Módulo de Young versus teores de escória com 5% de serragem	54
Figura 30. Tensão Máxima versus teores de escória de aciaria com 5% de serragem	55
Figura 31. Comportamento mecânico dos compósitos contendo 10% serragem e diferentes teores de escória (P₉₀S₁₀E₀ contendo 90% plásticos e 10% serragem, P₈₅S₁₀E₅ contendo 85% plásticos, 10% serragem e 5% escória e P₈₀S₁₀E₁₀ contendo 80% plásticos, 10% serragem e 10% escória	56
Figura 32. Módulo de Young versus teores de escória para 10% de serragem	57
Figura 33. Tensão Máxima versus Teores de escória para 10% de serragem	57
Figura 34. Comportamento mecânico dos compósitos contendo 5% de escória e diferentes teores de serragem (P₉₅S₀E₅ contendo 95% de plásticos e 5% de escória, P₉₀S₅E₅ contendo 90% de plásticos, 5% de serragem e 5% de escória e P₈₅S₁₀E₅ contendo 85% de plásticos, 10%	58
Figura 35. Módulo de Young versus teores de serragem para 5% de escória de aciaria.....	59
Figura 36. Tensão Máxima versus Teores de Serragem para 5% de Escória de Aciaria	59
Figura 37. Comportamento mecânico dos compósitos contendo 10% de escória e diferentes teores de serragem (P₉₀S₀E₁₀ contendo 90% de plásticos e 10% de escória, P₈₅S₅E₁₀ contendo 85% de plásticos, 5% de serragem e 10% de escória e P₉₀S₁₀E₁₀ contendo 90% de plástico	60
Figura 38. Módulo de Young versus Teores de serragem para 10% de escória de aciaria.....	61
Figura 39. Tensão Máxima versus Teor de Serragem para 10% de escória de aciaria	61
Figura 40. Curva do módulo de Young de acordo com as porcentagens de escória e serragem	62
Figura 41. Valores observados versus Valores previstos.....	63
Figura 42. Gráfico de Pareto para Módulo de Young	64
Figura 43. Curva de Tensão Máxima em tração com diversas porcentagens de Escória e Serragem.....	65
Figura 44. Valores observados versus valores previstos da tração máxima	66
Figura 45. Gráfico de Pareto para Tensão Máxima em Tração.....	67
Figura 46. Curva de Fusão do Compósito P₉₅S₅E₀ contendo 95% de plásticos e 5% de serragem	68
Figura 47. Curva de Fusão do compósito P₈₀S₁₀E₁₀ contendo 90% de plásticos, 10% de serragem e 10% de escória.....	69
Figura 48. Curva de Fusão do compósito P₈₅S₁₀E₅ contendo 85% de plásticos, 10% de serragem e 5% de escória.....	69
Figura 49. Curva de Fusão do compósito P₉₀S₀E₁₀ contendo 90% de plásticos e 10% de escória.....	70

Figura 50. Curva de Fusão do compósito P₉₅S₀E₅ contendo 95% de plásticos e 5% de escória.....	70
Figura 51. Curva de Fusão do compósito P₉₀S₅E₅ contendo 90% de plásticos, 5% de serragem e 5% de escória	71
Figura 52. Curva de Fusão do compósito P₈₅S₅E₁₀ contendo 85% de plásticos, 5% de serragem e 10% de escória.....	71
Figura 53. Curva de Fusão do compósito P₉₀S₁₀E₀ contendo 90% de plásticos e 10% de serragem	72
Figura 54. Curva de Fusão dos plásticos reciclados	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comparação qualitativa entre as propriedades de matrizes poliméricas de compósitos	26
Tabela 2. Características Mecânicas à Temperatura Ambiente de Alguns dos Polímeros Mais Comuns	33
Tabela 3. Proporções usadas.....	42
Tabela 4. Análise de variância (ANOVA) para o Módulo de Young	64
Tabela 5. Análise de variância (ANOVA) para Tensão Máxima em Tração.....	66
Tabela 6. Valores de delta T, Pico, delta H e percentagens de cristalinidade dos compósitos	74

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

% Crist	% de cristalinidade
ΔT	Varição de Temperatura
ANOVA	Análise de Variância
CMC	Composto de matriz cerâmica
CMM	Composto de matriz metálica
CMP	Composto de matriz polimérica
DSC	Calorimetria diferencial exploratória
FEA	Fornos elétricos a arco
g	grama
GPa	GigaPascal
J	Joule
kg	quilograma
ksi	quilo-libra por polegada ao quadrado
LD	Processo de Linz e Donawitz
LM	lamela média
m ³	metro cúbico
min.	minutos
mL	mililitros
mm	milímetros
MPa	Mega Pascal
P	parede primária
PE	Polietileno
PP	<i>Polipropileno</i>

PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
psi	libra força por polegada quadrada
PVC	Policloreto de vinila
S1	parede secundária
S2	parede secundária
T	parede terciária
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	18
2.1. Geral	18
2.2. Específicos	18
2.3. JUSTIFICATIVA	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1. MATERIAIS COMPÓSITOS	19
3.1.1. Matriz	22
3.1.1.1. Matriz polimérica	23
3.2. Polímeros	27
3.2.1. Polipropileno	28
3.3. REFORÇO	30
3.3.1. Fibras Naturais	34
3.3.2. Fibras vegetais	34
3.3.3. Escória de Aciaria	36
4. MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1. MATERIAIS	39
4.1.1. PLÁSTICOS	39
4.1.2. SERRAGEM DE MADEIRA TIPO <i>PINUS TAEDA</i>	40
4.1.3. ESCÓRIA DE ACIARIA	41
4.2. MÉTODOS	42
4.2.1. PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS	42
4.2.2. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	44
4.2.3. ENSAIO DE TRAÇÃO	45
4.2.4. ANÁLISE TÉRMICA	46
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1. ENSAIOS DE TRAÇÃO	48
5.1.1. Compósitos contendo somente serragem	48
5.1.2. Compósitos contendo somente escória de aciaria	50
5.1.3. Compósitos contendo 5% de serragem e diferentes teores de escória de aciaria	53

5.1.4. Compósitos contendo 10% de serragem e diferentes teores de escória de aciaria.....	55
5.1.5. Compósitos contendo 5% de escória de aciaria e diferentes teores de serragem.....	58
5.1.6. Compósitos contendo 10% de escória de aciaria e diferentes teores de serragem.....	60
5.2. ANÁLISE MULTIVARIADA.....	62
5.2.1. Módulo de Young.....	62
5.2.2. Tensão Máxima em Tração.....	65
5.3. ANÁLISE TÉRMICA.....	68
6. CONCLUSÕES.....	76
7. TRABALHOS FUTUROS.....	77
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78

1. INTRODUÇÃO

Na busca de processos mais limpos e ambientalmente amigáveis, o reuso de rejeitos vem aumentando, principalmente em se tratando de processos que utilizam grande quantidade de matéria prima e geram grandes quantidades de resíduos e subprodutos. Com a preocupação de como o descarte destes é feito, foi criado o reciclo de materiais, e cada vez mais a sociedade busca novas formas de minimizar o impacto negativo ao meio ambiente, gerenciando e reduzindo o descarte de quaisquer materiais que possam causar danos (Política Nacional de Resíduos sólidos, Ministério do Meio Ambiente, Lei 12.305/2010).

Hoje em dia, a indústria siderúrgica tem um papel primordial na vida de todas as pessoas. Ela é responsável pela fabricação e tratamento de aços e ferro fundido e isto significa que grande parte do que é usado no dia-a-dia necessita de aço para ser fabricado. As indústrias siderúrgicas hoje, após a produção do aço, geram uma grande quantidade de escória proveniente do processo de aciaria.

Com a ideia de processos ambientalmente amigáveis, em 2010, foi sancionada a Lei 12.305 sobre Política Nacional de Resíduos Sólidos, e esta passou a vigorar em todo território Brasileiro.

Da mesma forma, a indústria de plástico vem cada dia se modificando para se adequar às novas tecnologias e aos novos produtos. Por sua vez, a produção de plástico vêm aumentando gradativamente. De acordo com a Abiplast, a produção de plástico passou de 245 milhões de toneladas em 2006 para 348 milhões de toneladas em 2017, demonstrando um aumento de 3,9% em 2017, contra 4% em 2016 e 3,5% em 2015. Hoje, no Brasil, apenas cerca de 7,8% dos plásticos são reciclados.

Entretanto, os plásticos possuem baixo tempo de uso e elevado tempo de decomposição no meio ambiente, se tornando um risco à poluição ambiental.

A biomassa hoje ainda é pouco reaproveitada. Entretanto, ela pode ser usada na produção de energia térmica, elétrica e na composição de novos produtos, através da mistura com diversos outros materiais.

Neste contexto, a fim de buscar processos mais limpos e ambientalmente amigáveis, reutilizando resíduos e produzindo um material aplicável na indústria de

materiais, o presente estudo foi desenvolvido a partir de escória de aciaria, embalagens de polipropileno obtidas por coleta doméstica e serragem de madeira *Pinus taeda*.

2. OBJETIVOS

2.1. GERAL

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e caracterizar um material compósito a partir da reciclagem de embalagens de polipropileno, serragem de madeira *Pinus taeda* e escória de aciaria.

2.2. ESPECÍFICOS

- i. Obter formulações de compósitos com os três materiais em diferentes proporções;
- ii. Avaliar a influência da composição sobre as propriedades mecânicas em tração dos materiais obtidos;
- iii. Realizar análise térmica e obter informações acerca das propriedades térmicas e da cristalinidade dos compósitos.

2.3. JUSTIFICATIVA

Aciaria é um processo da indústria siderúrgica que gera uma grande quantidade de escória. Com uma produção aproximada de cerca de 34 milhões de toneladas por ano, a escória da aciaria significa cerca de 5,1 milhões de toneladas que não tem um descarte adequado, e que poluem o meio-ambiente (Revista Aço Brasil, 2018)

Desta forma, com o reuso da escória proveniente da aciaria, pode ser formado um novo material útil para a indústria civil e que, além de possuir características específicas, está reduzindo a poluição ambiental causada por este rejeito.

O plástico é um material amplamente usado em diversos setores da indústria e está presente no dia-a-dia de todos. Entretanto, a maioria dos plásticos possui um tempo de degradação alto, e com descarte inadequado, auxilia para um aumento na poluição ambiental. Hoje em dia, apenas cerca de 25% do plástico é reciclado.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. MATERIAIS COMPÓSITOS

A fim de agregar características e propriedades de um determinado material em outro, foram criados os compósitos. Os materiais de natureza diferentes são misturados a fim de que as propriedades de um material sejam úteis junto ao outro material (FERNANDES, 2014).

Os compósitos são formados por duas fases: uma matriz, que pode ser polimérica, cerâmica ou metálica, e uma fase dispersa. (FERNANDES, 2014).

Hoje em dia, com a conscientização ambiental e os impactos do lixo e descartes na natureza, busca-se um modo de reutilizar os rejeitos, de forma que eles não agridam a natureza e degradem o meio ambiente, mas também uma maneira de reduzir o uso do petróleo na produção de novos produtos, e conseqüentemente reduzir o uso de energia. Assim, o desenvolvimento de produtos sustentáveis e renováveis vêm aumentando gradativamente (PINSKY, 2017).

Os materiais compósitos consistem de uma combinação macroscópica de dois ou mais materiais distintos e insolúveis entre si, tal insolubilidade desencadeia a formação de uma interface definida no material. Conseqüentemente, os materiais compósitos possuem boas qualidades estruturais, térmicas, elétricas e ambientais, por agregarem valor de ambos os componentes, que, juntos, alcançam propriedades que individualmente cada componente não alcançaria (SCHAEDLER, 2015).

Todos os setores da economia por sua vez podem ser beneficiados dos compósitos poliméricos. Os compósitos poliméricos hoje ocupam um lugar de destaque uma vez que vêm, cada vez mais, substituindo estruturas que antes eram feitas com metais. O emprego destes materiais têm sido aplicado mais em diversas áreas e materiais, agregando confiabilidade e reafirmando seu potencial, uma vez que reduzem os componentes e a massa sem ocorrer o comprometimento do comportamento mecânico (MARTINS, 2014).

Os materiais compósitos são vistos na natureza desde sempre, afinal os ossos são um compósito natural formado através de fibras de colágeno com uma matriz

mineral de apatita. Outro compósito natural importante é a madeira, com fibras de celulose, moléculas de amarração de hemiceluloses e uma matriz de lignina. Neste material, as fibras promovem resistência à tração e a lignina é responsável pela flexibilidade, aumentando assim, a resistência do material (FERNANDES, 2014).

Segundo Sciacovelli (2018), a elucidação das relações de composição-processo-propriedade é crucial. Para uma dada composição, apenas por meio de ajuste fino de rendimento do processo de fabricação pode ser possível alcançar o desempenho desejado dos compósitos de materiais de mudança de fase.

Na indústria de materiais, desde a Segunda Guerra Mundial os compósitos vem se desenvolvendo. Na busca de produtos mais rígidos e mais resistentes à tração, os primeiros materiais compósitos foram criados. Eles passaram a ser uma alternativa viável às ligas metálicas e apresentaram resistência suficiente para resistir às adversidades tais como fadiga e corrosão. Na mesma época, os polímeros com reforço de fibra também passaram a ser utilizados na indústria aeroespacial, como na fabricação de motores para foguetes. Em meados de 1950, foram realizados experimentos mais amplos relativos às características como resistência à corrosão (RESENDE, 2000).

Por volta de 1960, os materiais compósitos ganharam maior abrangência, sendo utilizados também em artigos esportivos e aumentando o alcance no uso deste tipo de material. Nesta mesma época, as matrizes metálicas foram criadas. Elas desenvolveram o campo da eficiência estrutural. Inicialmente, foram feitas a partir de monofilamentos apresentando alta resistência à tração, inicialmente de boro e posteriormente de carboneto de silício. Por sua vez, os materiais compósitos cerâmicos foram desenvolvidos para a criação de propriedades estruturais com maior resistência térmica (RESENDE, 2000).

A Figura 1 apresenta o diagrama comparativo entre as propriedades de massa, expansão térmica, rigidez, resistência à tração e resistência à fadiga do aço, alumínio e compósitos (CHAWLA, 2011).

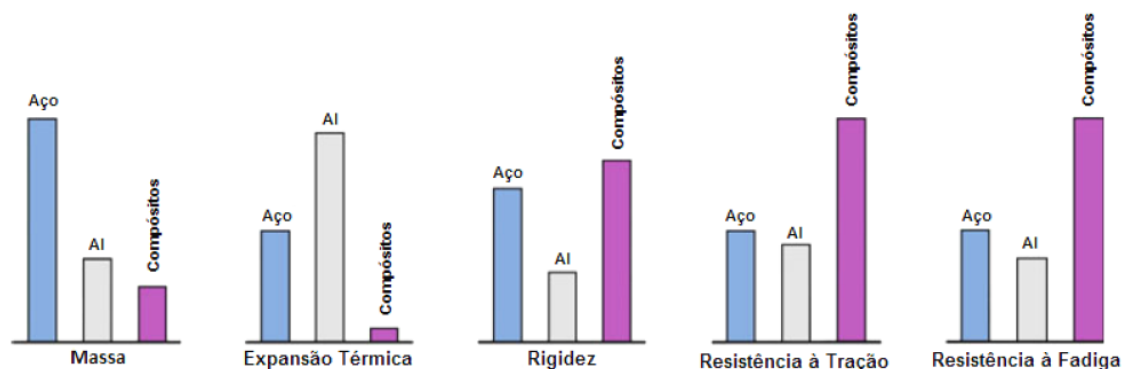


Figura 1. Diagramas Comparativos entre propriedades de Aço, Alumínio e Compósitos

Fonte: CHAWLA (2011).

O reforço da matriz geralmente é uma fase mais enrijecida, de modo que adicione propriedades desejadas, como condutividade térmica, elétrica, coeficiente de expansão térmica à matriz, bem como boa resistência aos desgastes. Obviamente, em determinadas ocasiões, o reforço pode ser mais dúctil que a matriz, formando, desta forma, um compósito final mais tenaz. É sabido que a rigidez e resistência à tração de um material compósito são fornecidos pelo reforço. (CHAWLA, 2011)

A composição química da madeira *Pinus sp.* varia na faixa de cerca de 63,5% de fibras de celulose, 25% de lignina, 10% de óleos e 1,5% de cinzas. (MORAIS, 2005)

Os materiais fibrosos utilizados como reforço em compósitos, especialmente as fibras vegetais, podem se apresentar sob diferentes disposições na matriz, promovendo propriedades mecânicas distintas. A Figura 2 ilustra exemplos dessas disposições, que podem ocorrer de modo particulado, com fibras desalinhadas ou com o material fibroso alinhado (MORAES, 1999)

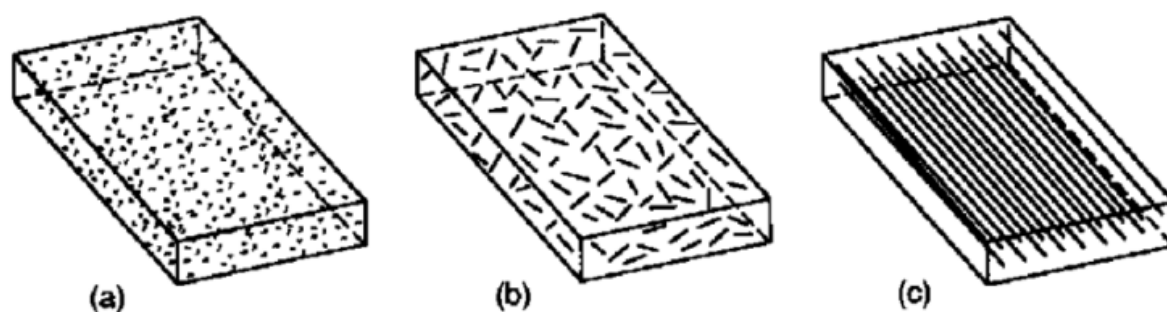


Figura 2. Representações esquemáticas de compósitos reforçados com fibras (a) particuladas, (b) fibras curtas desalinhadas aleatoriamente e (c) fibras longas alinhadas.

Fonte: MORAES, 1999

Segundo Satapathy (2017), o uso de material reciclado, resíduos agrícolas e industriais geralmente aumentam as propriedades do produto final sugerindo seu uso como sendo boa alternativa na produção de compósitos poliméricos.

3.1.1. Matriz

No contexto dos compósitos, a matriz é a fase contínua, responsável pela distribuição de carga do reforço do material. Ela liga o reforço e atua como o meio para a tensão externa aplicada ser transmitida e distribuída. Geralmente, é um material dúctil e apresenta módulo de elasticidade menor que o do reforço (MARTINS, 2014).

A matriz também serve para proteger o reforço contra danos superficiais provenientes de abrasão mecânica ou de reações químicas provindas do contato com o ambiente externo. É também uma barreira contra a propagação de trincas e falhas do material final (NETO, 2015).

De forma geral, a matriz confere propriedades adesivas e de rigidez, sendo responsável por manter as fibras dos demais componentes em posição, mesmo diante de esforços mecânicos da distribuição de cargas. (MARTINS, 2014).

A Figura 3 mostra a aplicação dos esforços compressivos e cisalhantes em fibras vegetais e como elas reagem a estes esforços (RITTER, 1990).

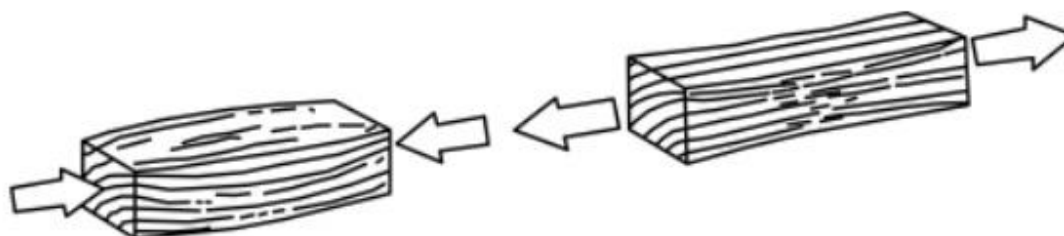


Figura 3. Aplicação de esforços compressivos (esquerda) e cisalhantes (direita) em fibras vegetais

Fonte: RITTER, 1990

Os compósitos são divididos em três classes, de acordo com a matriz que utilizam (CALLISTER, 2015):

- ✓ **CMM:** Compósitos de matriz metálica, reforçada com fibras ou partículas como por exemplo, carbetto de silício – é usado amplamente na indústria automotiva;
- ✓ **CMC:** Compósito de matriz cerâmica, mesclada com um reforço de fibras curtas ou partículas;
- ✓ **CMP:** Compósitos de matriz polimérica, com reforço de fibras como por exemplo, fibras de carbono, fibras de vidro e aramida. fibras vegetais e material particulado.

3.1.1.1. Matriz polimérica

Alguns autores consideram que as matrizes podem ser metálicas, poliméricas, cerâmicas ou ainda de carbono e grafite. Dentre as matrizes poliméricas, existe a termoplástica e a termofixa, que são assim identificadas conforme suas propriedades de fusibilidade (NETO, 2015).

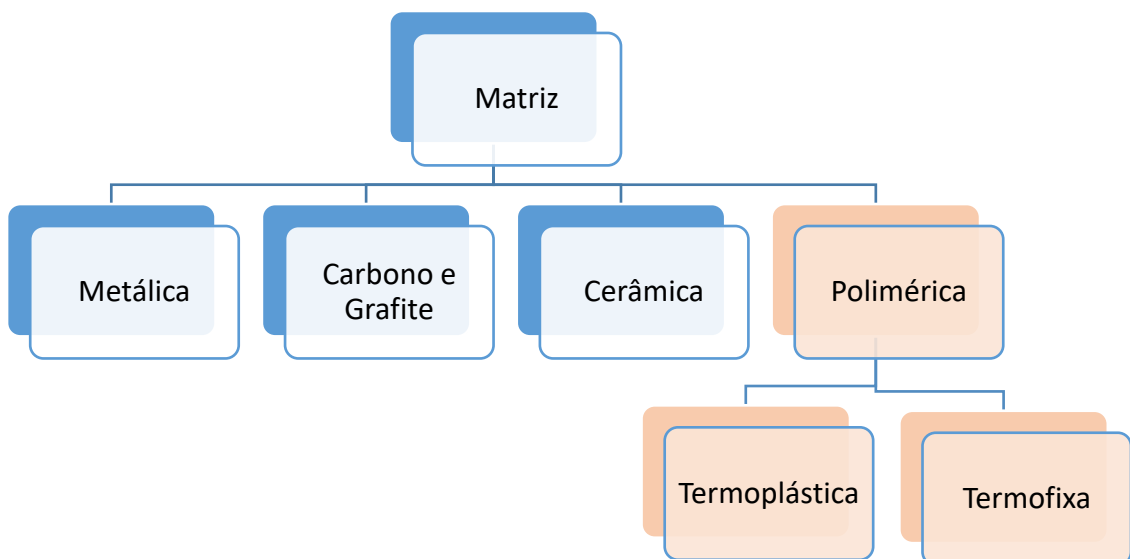


Figura 4. Tipos de Matriz

Fonte: adaptado de MILANI, 2016

As boas propriedades dos compósitos que utilizam matriz polimérica como a facilidade de fabricação e baixo custo à temperatura ambiente, são fatores fundamentais para o desenvolvimento do uso deste tipo de material. (MARTINS, 2014)

Os materiais termoplásticos possuem boa resistência química, boa tenacidade, baixa densidade e relativamente baixo custo de produção, além da reciclagem de material. Eles fundem por temperatura e pressão e endurecem quando frios. Desta forma, eles podem ser moldados conforme a necessidade e conveniência. Possuem propriedades físicas reversíveis, isto é, podem ser remoldados através de aplicação de calor e novo ciclo de fusão e endurecimento. São exemplos deste material o Polietileno, PET, poliestireno (PS), o polipropileno (PP) e o policloreto de vinila (PVC). (COELHO, 2016).

Os polímeros geralmente possuem grande diferença para os metais, cerâmicas e compósitos em termos de propriedades como resistência à tração, e esta diferença pode ser notada a partir da Figura 5.

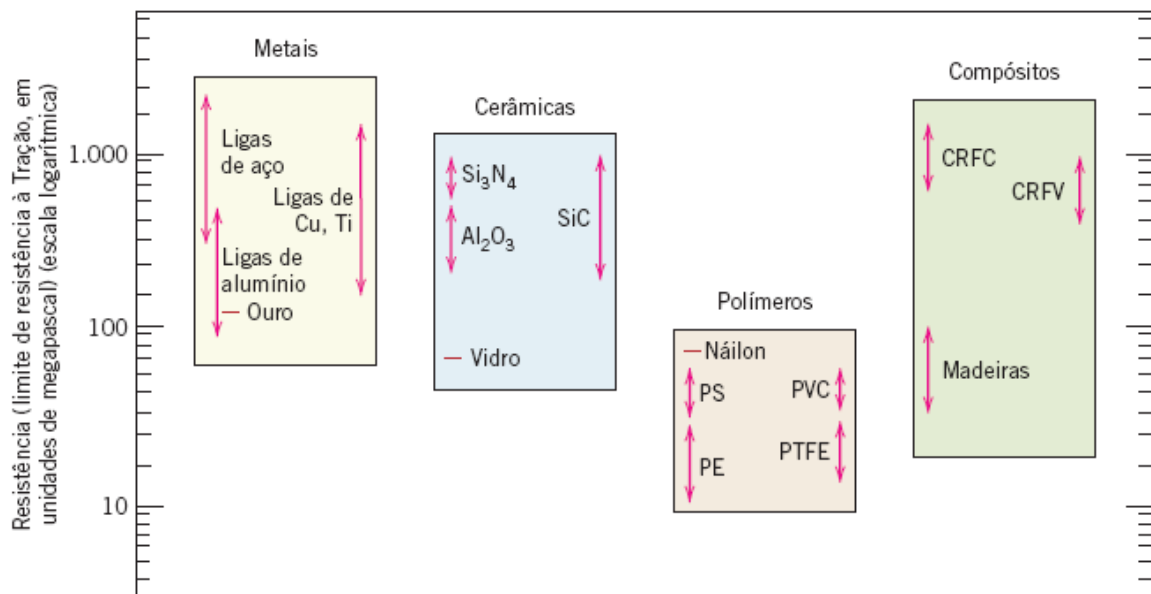


Figura 5. Limite de resistência à tração e a temperatura ambiente

Fonte: CALLISTER, 2015

Fica claro que os polímeros possuem resistência à tração muito menor que os metais. A menor resistência não impede a aplicação em inúmeros produtos e, ainda, facilita seu processamento e reprocessamento. Conseqüentemente, os metais

raramente se alongam plasticamente além de 100% enquanto que os polímeros mais elásticos se alongam a mais de 1000% (CALISTER, 2015).

Referindo agora às matrizes poliméricas termofixas, elas são produzidas a partir de reações de cura através do mecanismo de reticulação (*crosslinking*), que gera ligações covalentes fortes, mas tão fortes que uma vez que o processo é realizado, ele é considerado como irreversível. A partir daí, vem o termo termofixo. (MOTA, 2016)

Já a matriz polimérica termoplástica possui cadeias lineares e flexíveis, e as ligações químicas entre suas cadeias é fraca, fazendo com que a matriz possa ser reprocessada se aquecida devidamente. Então, é uma matriz suscetível à temperatura e ao impacto.(NETO, 2015)

Assim, pode-se comparar as matrizes para fins comerciais, sendo cada uma delas útil para um diverso fim.

A partir da Tabela 1 é verificado que as matrizes termofixas possuem mais características favoráveis, aliadas a uma menor duração de processamento, maior resistência e possibilidade de ser reciclado, conferindo às mesmas maior relevância em algumas situações. As propriedades apresentadas na Tabela não possuem a mesma importância. Os materiais termoplásticos, por exemplo, podem ser reprocessados inúmeras vezes, contribuindo infinitamente para a redução no seu custo (SCHAEDLER, 2015).

Tabela 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
X	compreende vantagem comparativa	

Fonte: SCHAEGLER, 2015.

3.2. POLÍMEROS

O termo polímero foi criado pelo químico J. Berzelius para diferenciar as moléculas orgânicas contendo os mesmos elementos químicos, mas que não possuíam as mesmas propriedades químicas. São formados pela união de pequenas moléculas, chamados monômeros, produzindo outras moléculas bem maiores, as macromoléculas. Todos eles apresentam elevada massa molecular, por conta da repetição dos meros, que são unidades repetidas e por sua vez, por serem muitas, ou poli, formam os polímeros (BUSCH, 2016).

Os polímeros são formados através de reações químicas em que acontece a ligação entre os monômeros. Estas reações são chamadas reações de polimerização ou síntese do polímero (NUNES, 2014).

Eles são materiais plásticos e de borracha, que possuem uma grande estrutura molecular em forma de cadeias. Geralmente as estruturas poliméricas possuem átomos de carbono. A maioria dos polímeros é dúctil e flexível, plástico, e podem ser conformados em diversas formas complexas. São materiais relativamente inertes, porém possuem a tendência a amolecer e/ou se decompor a temperaturas baixas, o que limita o seu uso. Possuem baixa condutividade elétrica e não são magnéticos (BUSCH, 2016).

Os polímeros podem ser de dois grandes grupos (NUNES, 2014):

- **Polímeros naturais:** são aqueles derivados de plantas e animais além de proteínas, enzimas, amido e celulose
- **Polímeros sintéticos:** são aqueles obtidos através da reação de polimerização, tais como polipropileno, polietileno, poliestireno, poliamida, polietilenotereftalato, entre outros.

Os polímeros sintéticos podem ser produzidos a baixo custo, e suas propriedades podem ser moldadas conforme a necessidade de uso. Por este motivo, passaram a ser amplamente utilizados na indústria. Em muitas aplicações, as peças anteriormente feitas de metal ou madeira foram substituídas pelas mesmas peças feitas de polímero. Entretanto, em muitos aspectos, os polímeros são bastante

diferentes dos metais, como por exemplo, em seus módulos elásticos, que para os materiais poliméricos é da faixa de 7 MPa (ou seja, 10^3 psi) até 4 GPa (ou seja, $0,6 \times 10^6$ psi), enquanto o valor do módulo elástico do metal varia entre 48 GPa e 410 GPa (ou seja, 7×10^6 a 60×10^6 psi). Por sua vez, a resistência à tração para os polímeros chega a 100 MPa (15.000 psi) enquanto para algumas ligas metálicas chega a 4.100 MPa (ou seja, 600.000 psi) (CALLISTER, 2015).

Uma importante característica dos polímeros a ser analisada é a curva de tensão-deformação, que indica diversas características que o mesmo pode possuir ou transferir a um novo material (CALLISTER, 2015).

3.2.1. Polipropileno

O polipropileno é um polímero simples, produzido pela polimerização do gás propileno (propeno), que por sua vez é obtido a partir do processo de craqueamento do petróleo e das reações de gaseificação do carvão. Após a adição de um agente catalisador como por exemplo, trietilalumínio, a reação de polimerização ocorre, como pode ser visto através da Figura 6 (Vieira, et. al., 2012).

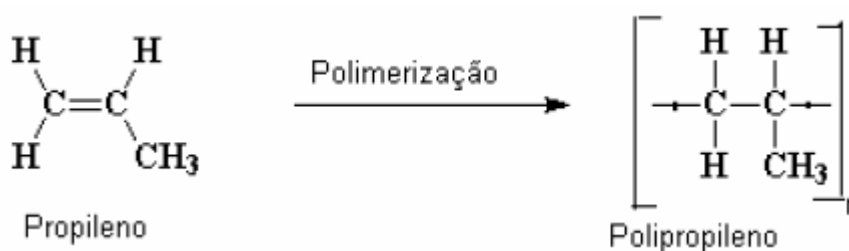


Figura 6. Reação de polimerização do propileno

CALLISTER, 2015

O polipropileno é um polímero sintético termoplástico, cuja fórmula molecular é $(\text{C}_3\text{H}_6)_n$. É um polímero termoplástico semelhante ao polietileno, entretanto possui ponto de amolecimento mais elevado. Ele pode ser processado facilmente por injeção, extrusão de filmes, extrusão de filamentos, termoformagem e sopro (VIEIRA, et. al., 2012).

Polipropileno pode possuir até 60% de cristalinidade, apresentando excelentes propriedades físico-químicas. É um polímero amplamente usado onde é exigida maior

resistência mecânica, ao invés da resistência química. Por possuir baixo custo, facilidade de modagem e coloração, elevada resistência química e mecânica, resistência à fraturas e ao impacto (acima de 15°C), baixa absorção de umidade e ser sensível aos raios UV e agentes oxidantes é um polímero bastante utilizado em diversas finalidades, tais como para fabricação de tanques, tubulações para produtos químicos, brinquedos, embalagens alimentícias, cosméticos, e inúmeros outros fins (NUNES, 2014).

A partir da curva de tensão versus deformação da Figura 7 pode-se observar que os polímeros tais como polipropileno possuem características a saber: alta temperatura de fusão, alta resistência química, baixa densidade, baixa absorção de umidade, boas propriedades físicas e mecânicas, são anti-aderentes e ainda podem ser aditivados. Desta forma, uma matriz de polipropileno é termoplástica, podendo ser combinada com vários reforços e gerar materiais compósitos diversos com propriedades melhoradas (MENDES, 2007).

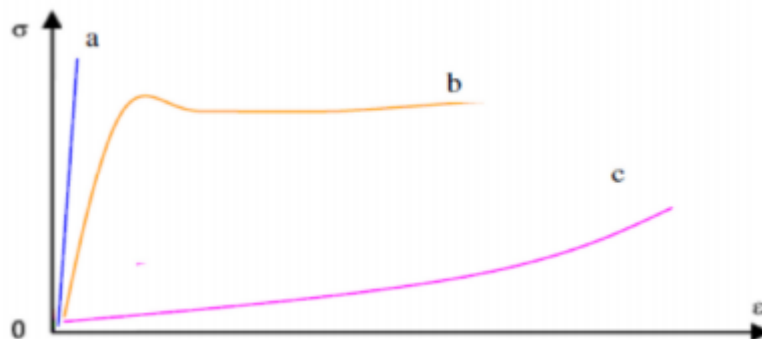


Figura 7. Comportamento tensão-deformação para polímeros frágeis (curva A), plásticos (curva B) e altamente elásticos (elastoméricos) (curva C)

Fonte: MENDES, 2007

O uso de tal matriz polimérica é ainda aplicado pela facilidade de processamento, reaproveitamento e baixo custo (MENDES, 2007).

3.3. REFORÇO

Em um compósito, o reforço serve para incrementar as propriedades mecânicas da matriz, e está sujeito a boa parte das cargas atribuídas ao material. Por ter dificuldade de uso sozinho devido a sua forma em pó ou fibras, é disperso em uma matriz. (MOTA, 2016).

O reforço de um compósito pode se apresentar de forma ininterrupta, através de fibras longas, ou descontínuas, com partículas dispersas ou fibras curtas. A matriz, por sua vez, traz adesão ao reforço, mantendo-o no lugar. (MOTA, 2016)

Assim, qualquer impacto na estrutura terá seu dano reduzido pelo reforço das fibras, contendo-se à área de contato, pois as demais fibras continuarão apresentando sua resistência nominal e sustentando o restante do material. (MOTA, 2016)

Segundo Chawla (2011), os materiais compósitos com fibras longas ou curtas possuem vantagens, tais como:

- ✓ diâmetro reduzido em relação ao tamanho do grão ou outro micro constituinte, o que faz com que a resistência (teórica) à tração seja mais eficiente, permitindo que, quanto menor o tamanho, menor a possibilidade de imperfeições no material
- ✓ grau de flexibilidade relevante, o que permite seu uso em uma variedade de técnicas de fabricação de compósitos com esta fibra; e
- ✓ características que fazem a carga aplicada ser transferida da matriz para a fibra mais rígida.

Ainda de acordo com Chawla (2011), a adição de fibras está ligada diretamente às mudanças das propriedades mecânicas do compósito, da seguinte forma:

- ✓ a interface fibra/matriz atribui transferência de carga externa da matriz para a fibra, justificando o processo de otimização de componentes e suas porções adicionando, caso necessário, compatibilizante, com a função de prevenir o descolamento da fibra na matriz polimérica;

- ✓ a geometria das fibras, que está ligada diretamente ao processamento, fazendo as fibras descontínuas terem grandeza de processamento inferior do que as contínuas, tornando sua eficiência de reforço reduzida.

Então, o comprimento das fibras altera as propriedades das mesmas. Quanto maior o comprimento, maior a área superficial na interface e, conseqüentemente as transferências de carga são mais efêvas, da mesma forma que a ductilidade e a resistência. As fibras mais longas possuem resistência superior ao processamento devido à dificuldade em obter um alinhamento adequado. Desta forma, é mais vantajoso usar fibras mais curtas (MOTA, 2016).

A Figura 8 mostra que, com o aumento do comprimento das fibras, características tais como módulo elástico, resistência à tração e resistência ao impacto tem seus valores melhorados, entretanto, quanto maior a fibra, menor a processabilidade (SCHAEDLER, 2015).

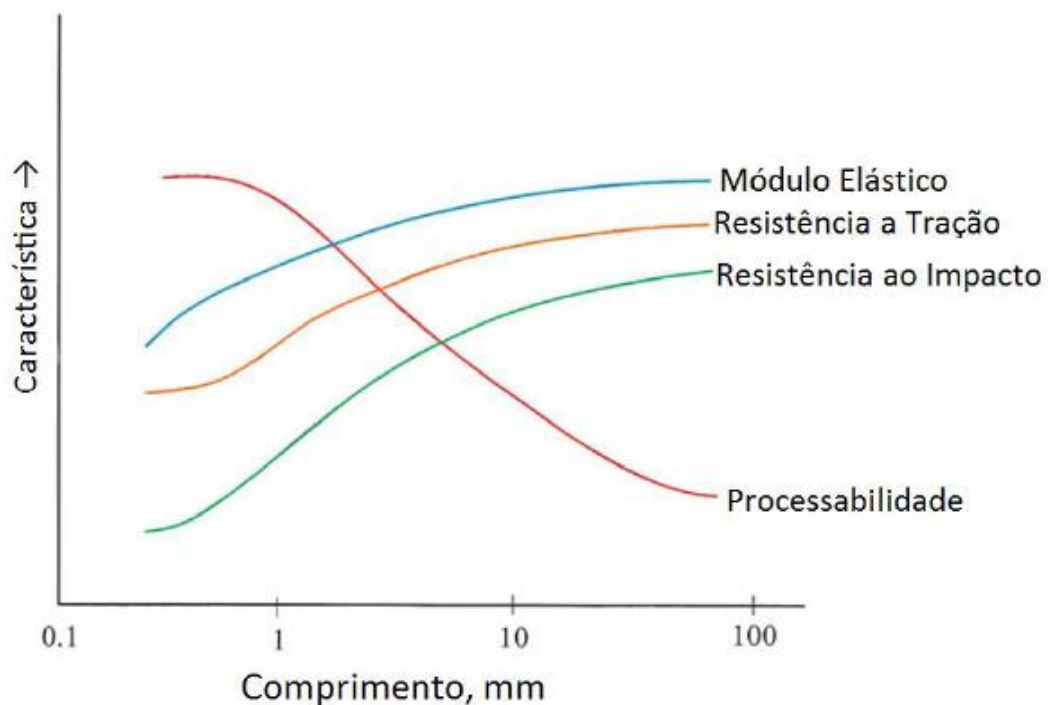


Figura 8. Variação de propriedades dos compósitos em razão do comprimento da fibra

Fonte: SCHAEDLER, 2015

O alinhamento das fibras deve ser verificado uma vez que qualquer mínimo desalinhamento estrutural ou mescla imperfeita entre os materiais pode modificar

consideravelmente as propriedades mecânicas do compósito, o que pode acarretar em degradação e ruptura mais rápida das fibras (SCHAEDLER, 2015).

O comportamento mecânico dos compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais é de suma importância científica e tecnológica uma vez que as características sinérgicas dos materiais dependem das características iniciais do reforço, adesão da fibra/matriz, fração volumétrica, razão de aspecto das fibras e orientação (MOTA, 2016).

O índice de deformação em relação ao comportamento mecânico possui importância uma vez que uma diminuição na taxa de deformação é analogamente influente às características de tensão como um aumento na temperatura. Por exemplo, o material se torna mais dúctil e macio, como pode ser visto na Tabela 2 (CALLISTER, 2015).

A partir da Tabela 2 pode-se perceber que o nylon apresenta maior limite de resistência à tração, o polietileno possui os menores limites.

Tabela 2. Características Mecânicas à Temperatura Ambiente de Alguns dos Polímeros Mais Comuns

Material	Massa específica	Módulo em Tração [GPa (ksi)]	Limite de Resistência à Tração [MPa (ksi)]	Limite de Escoamento [MPa (ksi)]	Alongamento na Ruptura (%)
Poliétileno (baixa densidade)	0,917-0,932	0,17-0,28 (25-41)	8,31-31,4 (1,2-4,55)	9,0 (1,3-2,1)	100-650
Poliétileno (alta densidade)	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
Poli(cloreto de vinila)	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 (165-225)	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(metacrilato de metila)	1,17-1,2-	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	1,58-3,38 (230-550)	75,9-94,5 (11,0-13,7)	44,8-82,8 (6,5-12)	15-300
Poliéster (PET)	1,29-1,40	2,8-4,1 (400-600)	48,3-72,4 (7,0-10,5)	59,3 (8,6)	15-300
Policarbonato	1,20	2,38 (345)	62,8-72,4 (9,1-10,5)	62,1 (9,0)	110-150

Fonte: CALLISTER (2015)

Da mesma forma, o polietileno de baixa densidade possui o menor limite de escoamento enquanto o náilon possui o maior limite de escoamento.

Ainda, pode-se perceber que o polietileno de alta densidade possui o maior alongamento na ruptura enquanto o poliestileno possui o menor alongamento na ruptura.

3.3.1. Fibras Naturais

As fibras naturais são quaisquer fibras provenientes de vegetais, animais ou minerais. As de origem vegetal possuem em sua composição química a celulose, enquanto as fibras animais possuem as proteínas como sua composição principal.

Elas são amplamente usadas devido à facilidade de obtenção, além do baixo custo, alta tenacidade, boas propriedades mecânicas e térmicas, redução do desgaste da máquina, facilidade de separação e biodegradabilidade (MOTA, 2016).

3.3.2. Fibras vegetais

O uso de fibras vegetais vêm aumentando nos últimos anos, pois as pesquisas têm demonstrado que elas podem conferir boas características a materiais compósitos, bem como serem provenientes de fontes renováveis além da redução de peso dos componentes e custo para seu processamento, o que resulta em economia de energia (COELHO, 2016)

Schadler (2015) mostra dificuldade na absorção de umidade, a temperatura de processamento máxima de 200 °C, baixa resistência biológica e ainda parâmetros relacionados a idade de planta, local de plantio e condições climáticas.

As biomassas vegetais são compostas por microfibrilas de celulose altamente lineares e cristalinas que são ligadas entre si por moléculas de amarração de natureza polissacarídica, denominadas hemiceluloses, envoltas em uma matriz polifenólica de lignina. A interação físico-química entre as cadeias permite à parede vegetal apresentar propriedades mecânicas únicas, como a formação de fibras altamente resistentes à ação mecânica, química e de microrganismos, como pode ser visto na Figura 9 (HENRIKSSON, 2009).

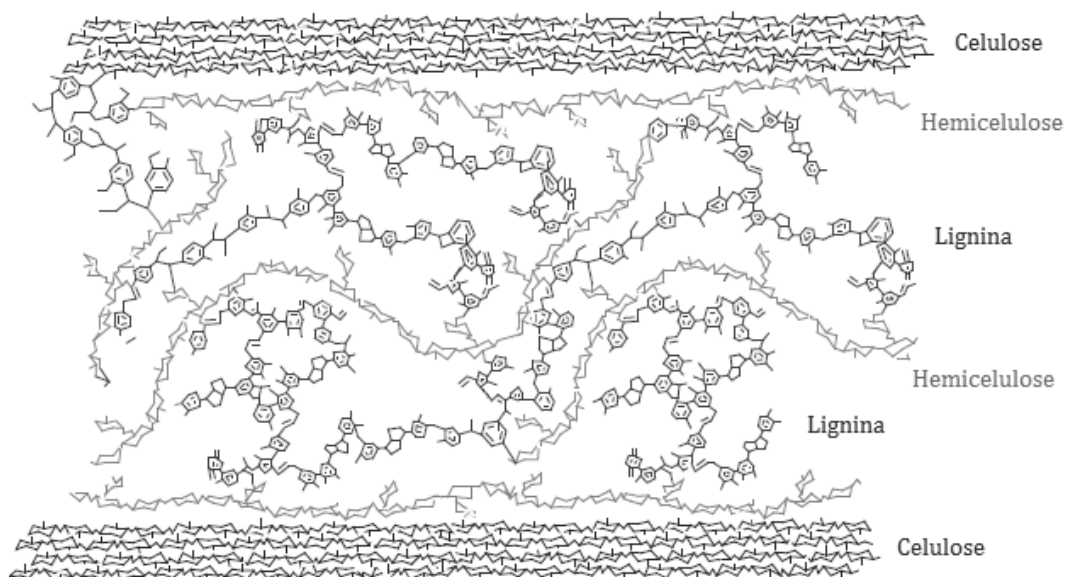


Figura 9. Distribuição da lignina e polissacarídeos em nível molecular.

Fonte: HENRIKSSON, 2009

Várias observações em microscópio eletrônico deram origem ao modelo de construção da parede celular de madeiras, mostrado na Figura 10 (FENGEL E WEGNWE, 1989). A estrutura da parede celular é subdividida em parede primária (P), paredes secundárias (S1 e S2) e parede terciária (T). As células encontram-se separadas pela lamela média (LM), que é uma camada fina, composta por elevada concentração de lignina. A celulose e as hemiceluloses predominam na região da parede celular e a lignina se distribui por toda a estrutura, apresentando máxima concentração na lamela média.

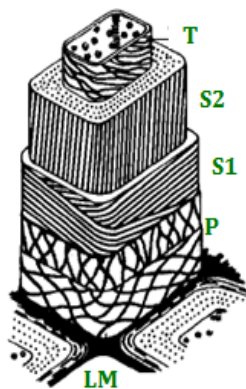


Figura 10. Modelo da estrutura da parede celular de traqueídes de madeira mole e de fibras libríformes de madeira dura. LM = lamela média; P = parede primária; S1 e S2 = paredes secundárias, T = parede terciária

Fonte: FENGEL E WEGNWE, 1989

Cada um dos componentes presentes na fibra serve para transmitir alguma propriedade ao material final, que em conjunto, formam um material com propriedades únicas e de alto desempenho (MOTA, 2016).

3.3.3. Escória de Aciaria

O setor siderúrgico encontra-se em crescimento, como pode ser visto a partir dos indicadores do instituto Aço Brasil. Desta forma, a produção de aço também vêm aumentando e conseqüentemente, maior quantidade também da escória proveniente de seus processos de produção.

O processo de fabricação do aço é composto por 3 estágios, os quais são (BEZERRA, 2007):

- ❖ a produção de ferro gusa no alto-forno;
- ❖ a fabricação do aço através dos processos no conversor de oxigênio (LD) ou o processo nos fornos elétricos a arco (FEA);
- ❖ e a metalurgia secundária em fornos panela.

Na segunda etapa do processo, onde ocorre a fabricação do aço, esta fabricação pode se dar por 2 processos distintos: o processo no conversor de oxigênio ou nos fornos elétricos a arco.

O Processo no conversor de oxigênio, também chamado de Linz e Donawitz (LD) usa o oxigênio gasoso a fim de refinar o ferro gusa líquido, proporcionando a redução de carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre pela oxidação destes elementos (BEZERRA, 2007).

Deste processo, que pode ser visto através da Figura 11, resulta uma escória, que pode ser usada para diversos fins até hoje estudados. Esta escória é formada principalmente por óxido de cálcio, óxido de magnésio, dióxido de silício, óxido de alumínio e ferro (AÇO BRASIL, 2018).

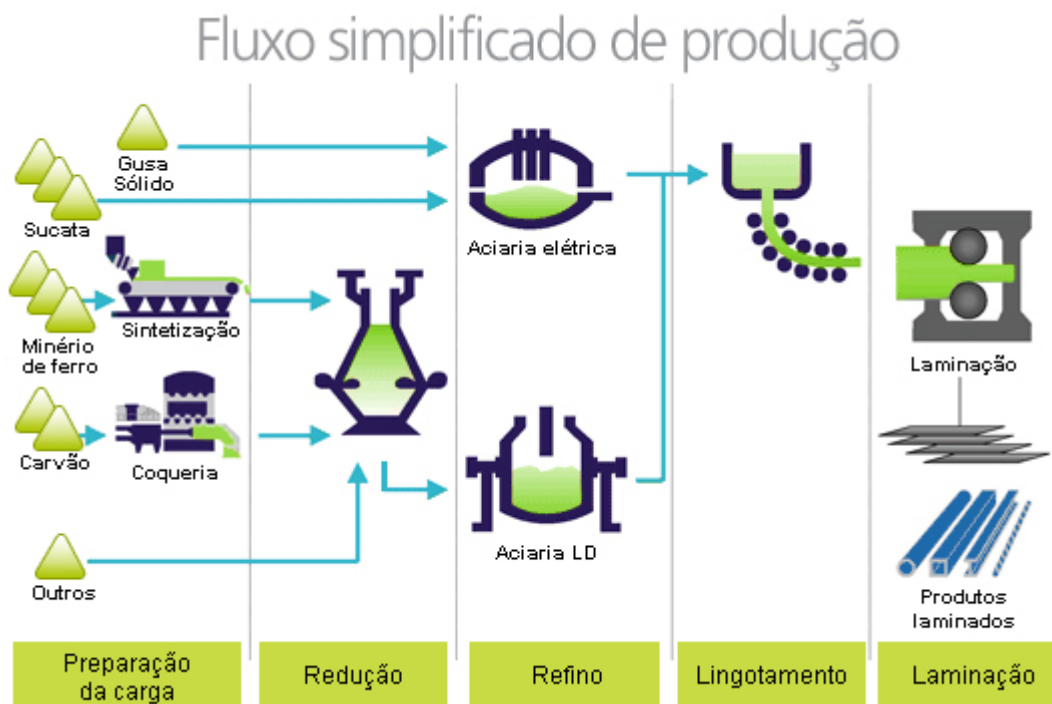


Figura 11. Fluxo da produção siderúrgica

Fonte: AÇO BRASIL, 2018

A cada quilo de aço produzido, é gerado cerca de 15% de escória.

De acordo com os dados do Aço Brasil, a produção brasileira de aço alcançou 23,1 milhões de toneladas, no acumulado do ano. Isto nos permite dizer que cerca de 3,5 milhões de toneladas de escória foram geradas e que precisam, de alguma forma ser descartadas sem afetar ou prejudicar o meio ambiente. (Revista Aço Brasil, 2018)

Para este fim, vários projetos e estudos foram feitos a fim de reutilizar esta escória da aciaria, objetivando não só o descarte apropriado do material como a redução de custo em alguns outros sub-processos e/ou usos.

Hoje a maioria do reuso da escória de aciaria é feito na construção civil, com o seu uso relacionado ao reforço de materiais para pavimentação (BEZERRA, 2007). Além disso, o uso desta escória também é visto para uso agrônômico e para agregar à composição de fertilizantes.

O pedido de patente BR1020160301530 de 21 de dezembro de 2016, se refere a novos processos para uso da escória de aciaria na obtenção de materiais com propriedades adequadas para substituir parcialmente ou totalmente o clínquer e obter novos tipos de cimento.

Já o pedido de patente BR1120170025922 de 08 de fevereiro de 2017 se refere ao tratamento siderúrgico da escória de aciaria para uso como aditivo no processo de fabricação do cimento Portland.

Por sua vez, o pedido de patente BR1020150251785 de 01 de outubro de 2015 se refere a um método para utilizar a escória de aciaria como substituto dos agregados naturais para produção de artefatos cimentícios.

O pedido de patente PI11037237 de 18 de agosto de 2011 descreve processo de reciclagem e transformação da escória de aciaria na produção de granalhas de minérias e granalhas de aço, blocos de vedação, blocos aparentes, blocos estruturais, pisos intertravados, tubulões, guias, argamassas, e rejuntas, através da substituição dos agregados naturais tais como areia e brita por escória de aciaria.

Pode-se perceber que desde pelo menos 1983, quando houve o depósito do primeiro pedido de patente na área, os cientistas vêm buscando formas de processar a escória de aciaria e desenvolver processos e métodos englobando a mesma para finalidades diversas, entretanto mais concentrado nas áreas de construção civil e agrícola (fertilizantes).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Na Figura 12, é apresentado um fluxograma que representa o desenvolvimento do presente trabalho.

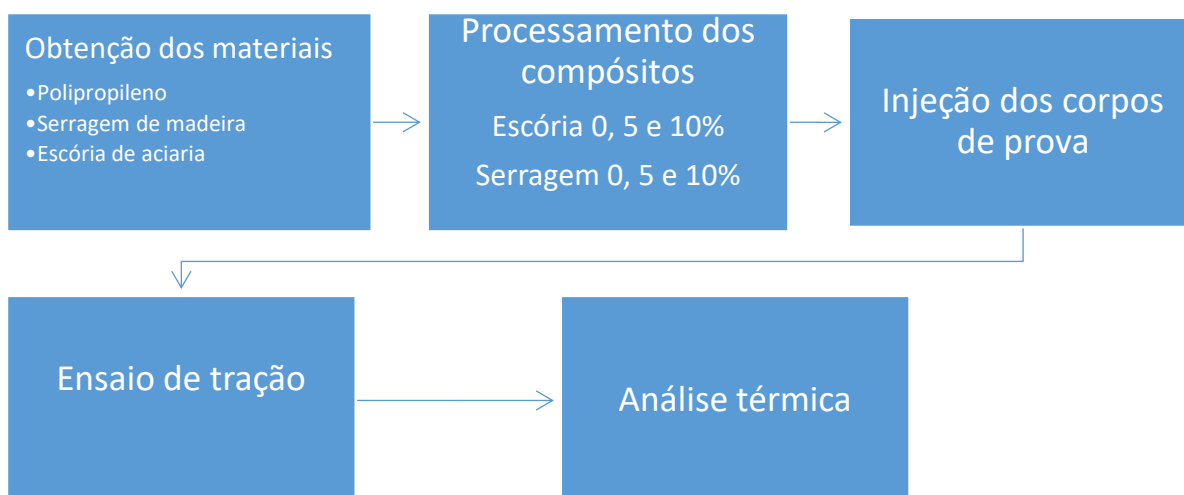


Figura 12. Fluxograma do desenvolvimento do estudo

Fonte: autora

4.1. MATERIAIS

4.1.1. PLÁSTICOS

Para o desenvolvimento deste trabalho, optou-se por utilizar o polipropileno como matriz para os compósitos. A escolha se deu em função de sua versatilidade de aplicações, facilidade de processamento e, principalmente, pelas suas boas propriedades mecânicas. Para tal, foi realizada uma coleta doméstica de utensílios de polipropileno. Na maioria dos utensílios há a informação sobre o material principal do produto, apresentada por meio de um triângulo representando a reprocessabilidade seguido do número 5, que indica o polipropileno. Entretanto, alguns produtos não

apresentam tais informações. Muitas vezes, a falta dessa informação significa que o utensílio foi processado composto por uma mistura, geralmente de polipropileno e polietileno de alta densidade. Visualmente, os dois polímeros são muito parecidos e possuem propriedades semelhantes. Por este motivo, assume-se, aqui, que a matriz polimérica utilizada no trabalho é composta por PP. As embalagens obtidas por coleta doméstica foram higienizadas, trituradas em um moinho de facas, secas e armazenadas (Figura 13).



Figura 13. Embalagens obtidas por coleta doméstica para o desenvolvimento dos compósitos

Fonte: autora

4.1.2. SERRAGEM DE MADEIRA TIPO *PINUS TAEDA*

A serragem utilizada foi proveniente de resíduos coletados na Carpintaria do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA – Três Poços. O material possui densidade de aproximadamente 388 kg/m^3 . (The Wood Database, 2018)

A serragem sofreu seleção granulométrica, a fim de obter partículas entre 50 e 60 mesh e, em seguida, foi seca e armazenada (Figura 14).



Figura 14. Serragem de madeira

Fonte: autora

4.1.3. ESCÓRIA DE ACIARIA

A escória utilizada foi escória de aciaria granulada obtida em uma Indústria Siderúrgica localizada na Cidade de Volta Redonda.

A escória passou por uma seleção granulométrica, selecionando frações com partículas entre 100 e 200 mesh (Figura 15).



Figura 15. Escória de aciaria granulada

Fonte: autora

4.2. MÉTODOS

4.2.1. PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Os compósitos do presente estudo foram preparados a partir do polipropileno triturado, juntamente com a escória de aciaria e a serragem de madeira *Pinus taeda*.

As misturas das proporções mostradas na Tabela 3 foram obtidas a partir de um homogeneizador para plásticos (Dryser), fabricado pela MH Equipamentos, de modelo MH-50H, disponível no laboratório do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA. A mistura se dá na cápsula bi-partida do misturador, que é arrefecido com água (Figura 16).

Tabela 3. Proporções usadas

Denominação	Teor do componente (%)		
	Polipropileno (P)	Serragem de Madeira (S)	Escória de Alto Forno (E)
P₁₀₀	100	00	00
P₉₅S₅E₀	95	05	00
P₉₀S₁₀E₀	90	10	00
P₉₅S₀E₅	95	00	05
P₉₀S₅E₅	90	05	05
P₈₅S₁₀E₅	85	10	05
P₉₀S₀E₁₀	90	00	10
P₈₅S₅E₁₀	85	05	10
P₈₀S₁₀E₁₀	80	10	10

Fonte: autora

Os materiais foram secos em estufa, a fim de garantir a remoção de umidade.



Figura 16. Homogeneizador com a mistura dos compósitos, homogeneizador e plástico após homogeneização

Fonte: autora

Após a mistura, os compósitos foram triturados em um moinho de facas, fabricado pela empresa Plastmix (Figura 17).



Figura 17. Moinho de facas

Fonte: autora

4.2.2. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

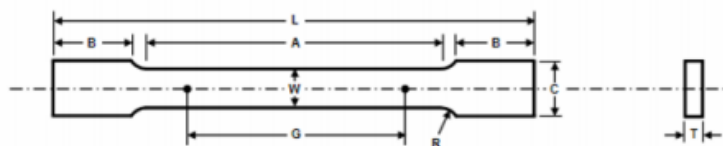
Os corpos de prova foram preparados por injeção a 300°C em uma injetora da marca RAY RAM, modelo TSMP, localizada nos laboratórios do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA (Figura 18).



Figura 18. Injetora

Fonte: autora

Os corpos de prova foram processados conforme a norma ASTM D 638, possuindo 13 mm de largura, 165 mm de comprimento e 3 mm de espessura (Figura 19).



Dimensão nominal	Dimensões, mm		
	Corpos de prova padrões		Corpo de prova reduzido
	Chapa grossa 40 mm	Chapa fina 12,5 mm	6 mm
G – Comprimento da parte útil	200,0 ± 0,2	50,0 ± 0,1	25,0±0,1
W – Largura da parte útil	40,0 ± 2,0	12,5 ± 0,2	6,0±0,1
T – Espessura	Espessura do material		
R – Raio de concordância, min.	25	12,5	6
L – Comprimento total	450	200	100
A – Comprimento da parte útil	225	57	32
B – Comprimento da cabeça	75	50	30
C – Largura da cabeça, aprox.	50	20	10

Figura 19. Dimensões e forma de um corpo de prova de seção retangular

Fonte: ASTM, 2011

4.2.3. ENSAIO DE TRAÇÃO

Os corpos de prova então foram submetidos ao ensaio de tração em uma Máquina Universal para Ensaio de Tração, fabricado por EMIC localizado nos laboratórios do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, utilizando carga de 5 kN e velocidade de aplicação de 5 mm/min, conforme regulamentado pelo padrão ASTM D 638-05 (Figura 20).



Figura 20. Medidor de tração

Fonte: autora

4.2.4. ANÁLISE TÉRMICA

Para a análise térmica, foi utilizado um Analisador Térmico Simultâneo Perkin Elmer STA 6000, de propriedade dos laboratórios do Centro Universitário de Volta Redonda. A análise térmica foi processada sob a forma de Calorimetria Diferencial Exploratória – DSC (Figura 21).



Figura 21. Analisador Térmico

Fonte: autora

As amostras de cerca de 10 mg cada foram submetidas a uma atmosfera de nitrogênio, com fluxo de 20 mL.min⁻¹, com aquecimento de 30°C a 250°C, sob taxa de 10°C.min⁻¹.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. ENSAIOS DE TRAÇÃO

Nas sub-seções da seção 5.1 são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios de tração. Os resultados serão avaliados separadamente, considerando o efeito individual de cada variável da composição nas propriedades finais do material. Em seguida, na seção 5.2, é apresentada uma análise multivariada para verificar a influência, de modo geral, da composição sobre as propriedades mecânicas.

5.1.1. Compósitos contendo somente serragem

Na Figura 22 estão mostradas as curvas de tensão x deformação obtidas para os compósitos contendo somente plástico e serragem, comparadas à curva exibida pelo polímero reciclado. Para cada composição foram analisadas 5 amostras e, na Figura 22, estão representadas as curvas das amostras que mais se aproximaram da média.

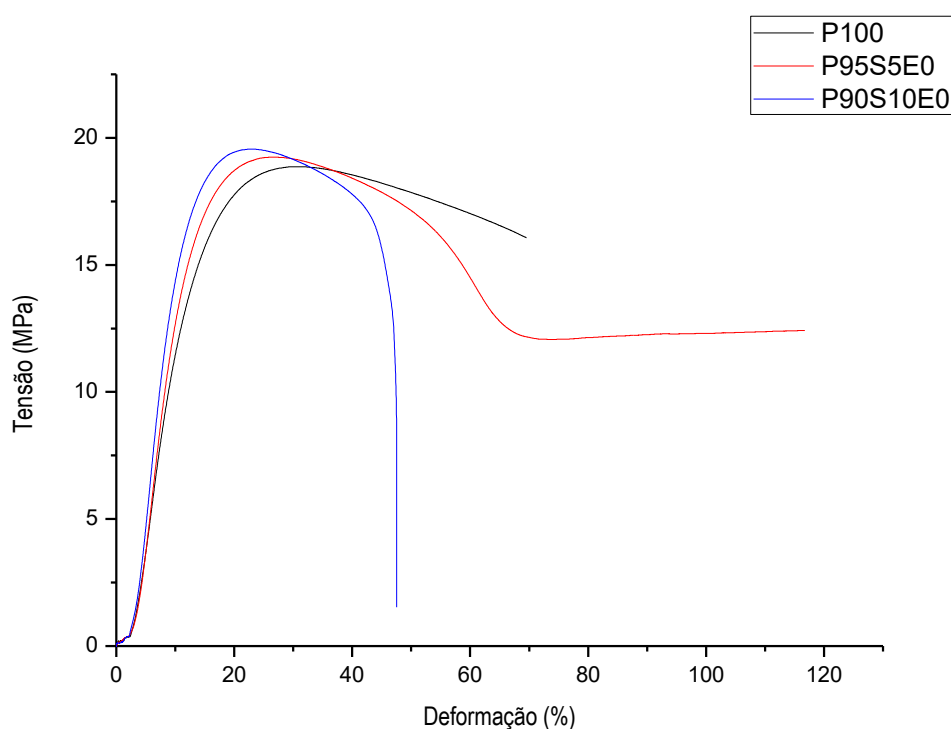


Figura 22. Comportamento mecânico dos compósitos contendo somente serragem (compostos P_{100} contendo 100% de plásticos, $P_{95}S_5E_0$ contendo 95% de plásticos e 5% de serragem e $P_{90}S_{10}E_0$ contendo 90% de plásticos e 10% de serragem)

Fonte: autora

A curva mostra que, inicialmente, ocorreu uma deformação elástica, e, em seguida, um escoamento e uma região de deformação plástica. Tal comportamento é típico de polímeros termoplásticos e, conseqüentemente, de compósitos contendo esses polímeros como maior constituinte em massa.

Pode ser verificado que, conforme o teor de serragem aumenta no material compósito, a curva sofre um aumento na sua inclinação na fase de deformação elástica. Tal aumento indica um maior valor de módulo de Young, que representa a rigidez do material submetido a tração. O compósito com 10% de serragem (**P₉₀S₁₀E₀**) apresentou uma diminuição na deformação, caracterizando redução em sua ductilidade, comportamento esperado por materiais que aumentam sua rigidez.

A Figura 23 apresenta a variação dos valores de Módulo de Young com o aumento do teor de serragem.

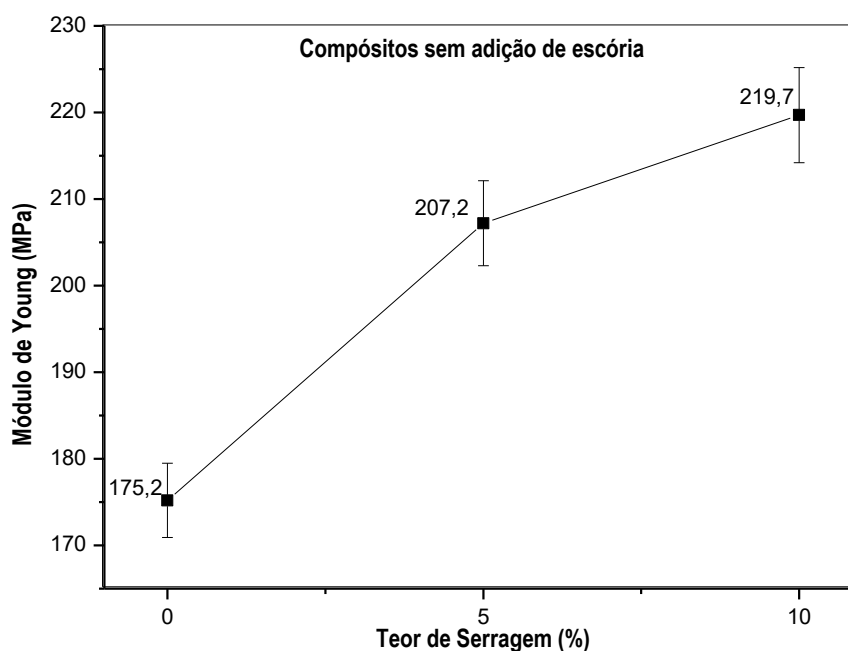


Figura 23. Módulo de Young versus teores de serragem

Fonte: autora

A Figura 24 apresenta a variação dos valores da Tensão Máxima com o aumento do teor de serragem.

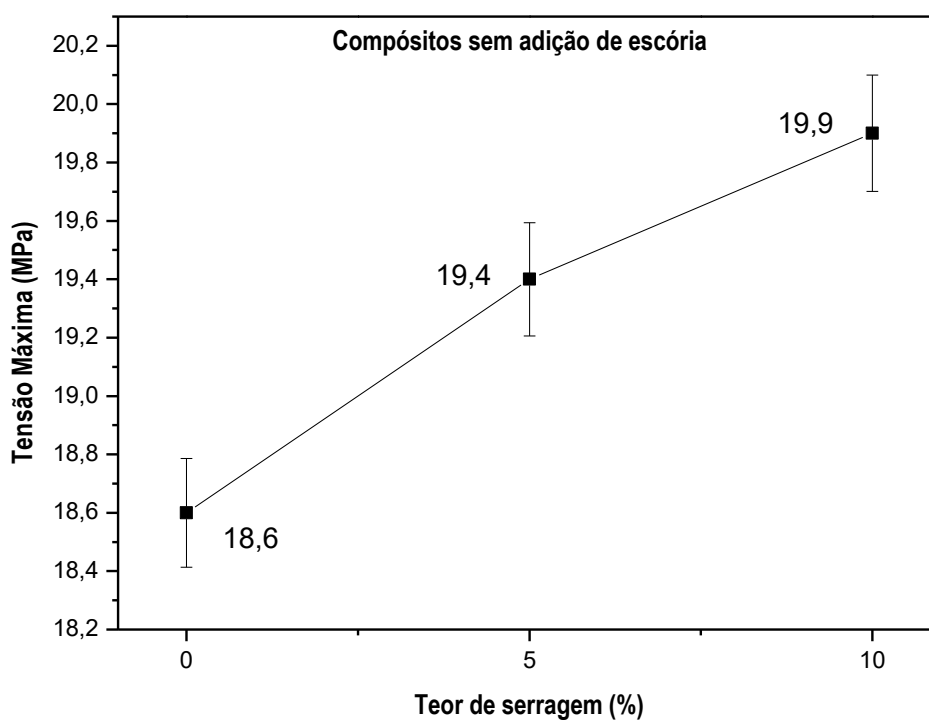


Figura 24. Tensão máxima versus teor de serragem

Fonte: autora

Verifica-se na Figura 23 que, com a adição de serragem à formulação, ocorre um aumento de 25% no módulo de Young considerando a amostra de polímero puro comparada ao compósito com 10% de serragem. Além disso, a Figura 24 mostra que, ocorre, também, um aumento de 7% na tensão máxima suportada pelo material.

5.1.2. Compósitos contendo somente escória de aciaria

Na Figura 25 estão mostradas as curvas de tensão x deformação obtidas para os compósitos contendo somente plástico e escória, comparadas à curva exibida pelo polímero reciclado. Para cada composição foram analisadas 5 amostras e, na Figura 25, estão representadas as curvas das amostras que mais se aproximaram da média.

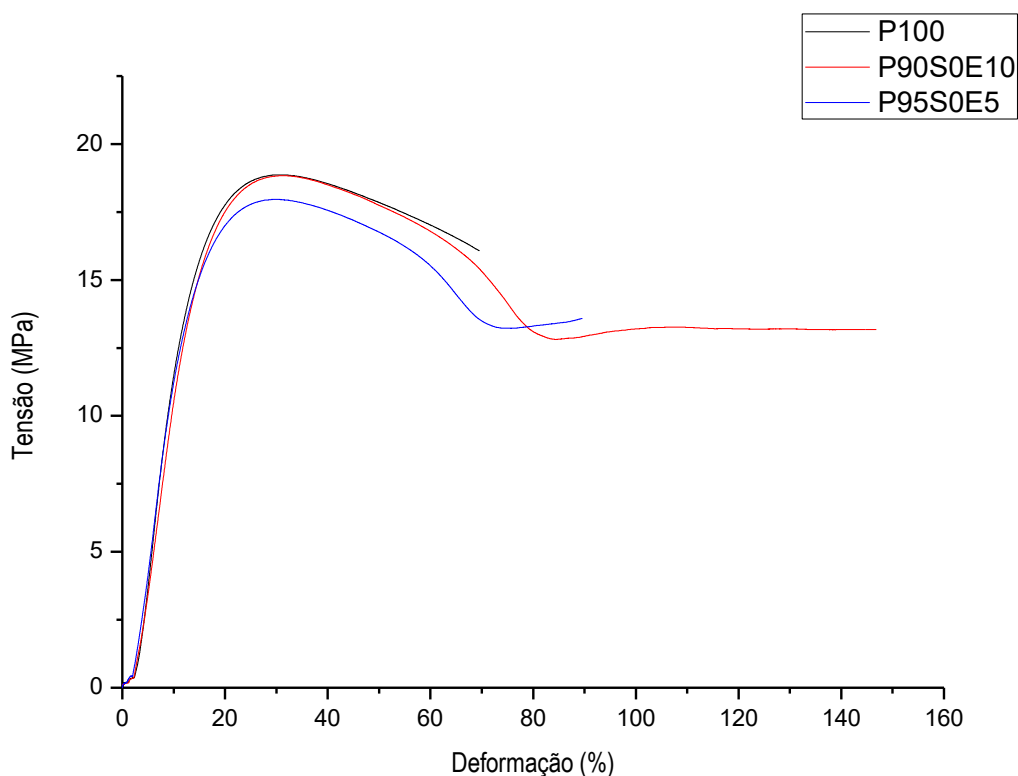


Figura 25. Comportamento mecânico dos compósitos contendo somente escória de aciaria (Compostos P_{100} , contendo 100% de plásticos, $P_{95}S_0E_5$ contendo 95% de plásticos e 5% de escória e $P_{90}S_0E_{10}$ contendo 90% de plásticos e 10% de escória).

Fonte: autora

No caso da adição de escória, parece não haver contribuição para uma melhora na rigidez do material. Por não se tratar de um material fibroso e apresentar uma natureza química bastante distinta das olefinas, a fraca interação entre o reforço e a matriz parece resultar em um material com propriedades mecânicas inferiores. Houve uma redução de 13% no módulo de elasticidade comparando o material com 10% de escória com o plástico puro. Houve, ainda, uma pequena redução na tensão máxima suportada pelo material.

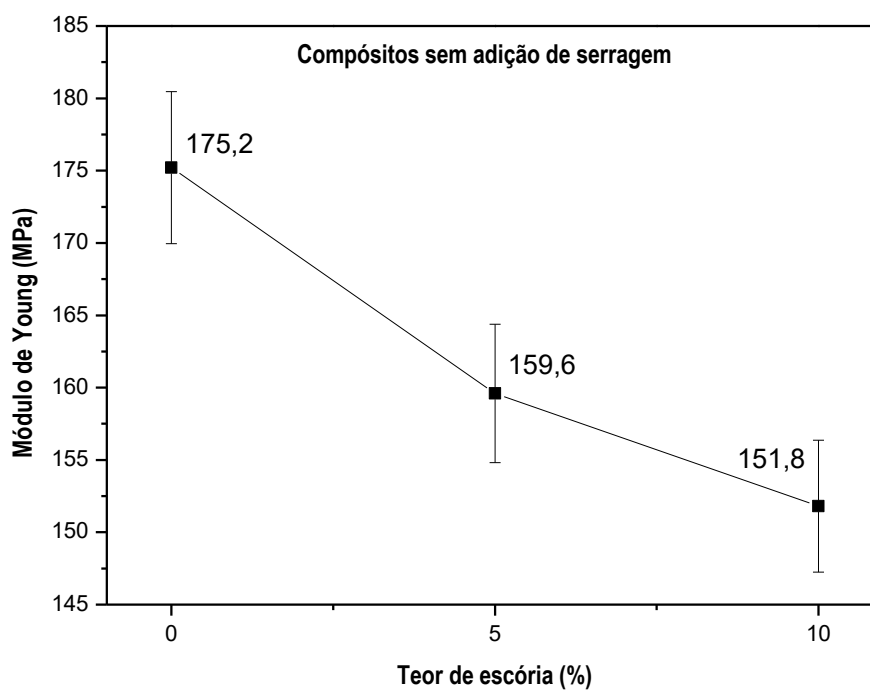


Figura 26. Módulo de Young versus teores de escória de aciaria

Fonte: autora

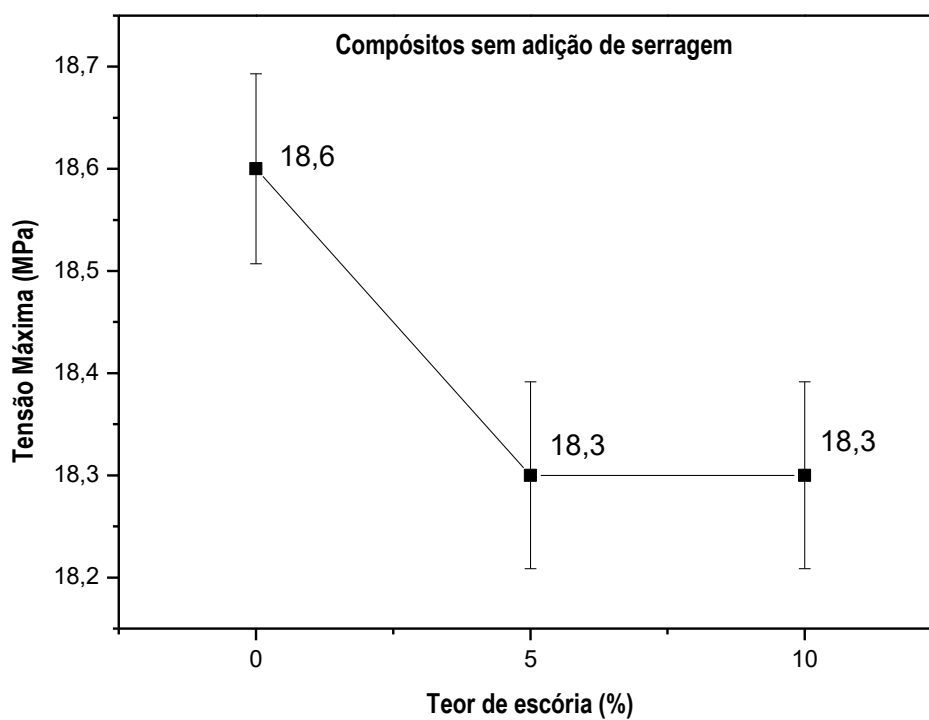


Figura 27. Tensão máxima versus teores de escória

Fonte: autora

Verifica-se na Figura 26 que, com a adição de escória à formulação, ocorre uma diminuição de 13% no módulo de Young considerando a amostra de polímero puro comparada ao compósito com 10% de escória. Além disso, a Figura 27 mostra uma diminuição de 0,2 % na tensão máxima suportada pelo material.

5.1.3. Compósitos contendo 5% de serragem e diferentes teores de escória de aciaria

Na Figura 28 estão mostradas as curvas de tensão x deformação obtidas para os compósitos contendo plástico, 5% de serragem e diferentes teores de escória de aciaria. Para cada composição foram analisadas 5 amostras e, na Figura 28, estão representadas as curvas das amostras que mais se aproximaram da média.

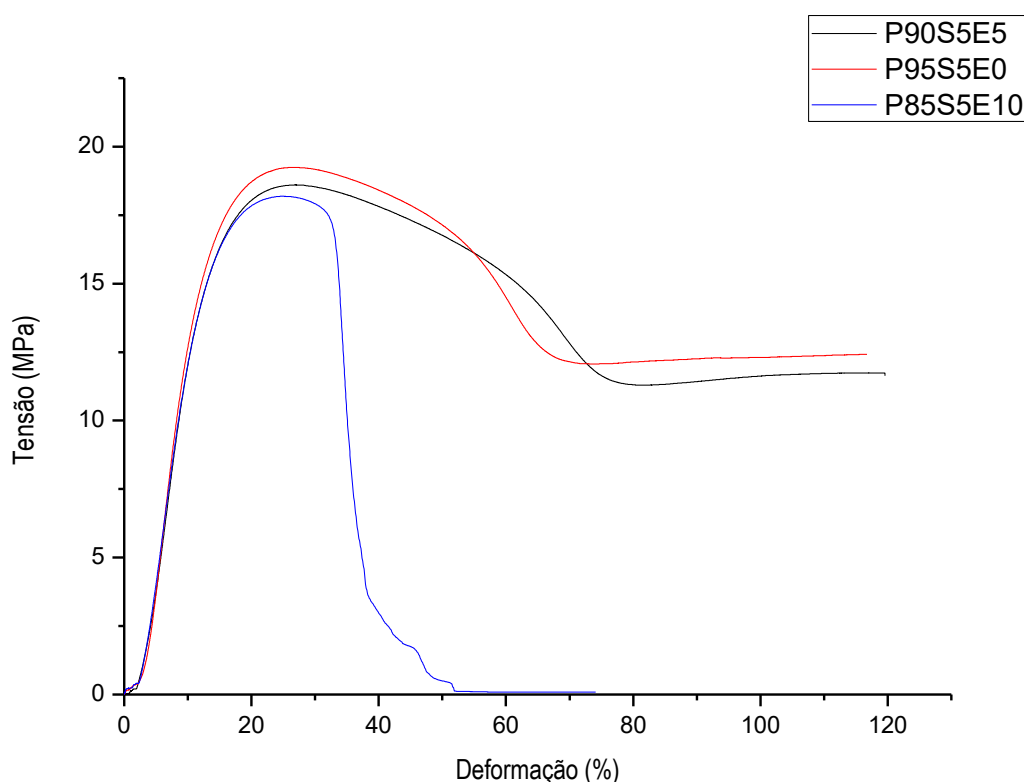


Figura 28. Comportamento mecânico compósitos contendo 5% serragem e diferentes teores de escória de aciaria ($P_{95}S_5E_0$ contendo 95% plásticos e 5% serragem, $P_{90}S_5E_5$ contendo 90% plásticos, 5% serragem e 5% escória e $P_{85}S_5E_{10}$ contendo 85% plásticos, 5% serragem e 10% escória)

Fonte: autora

A comparação das curvas mostra claramente que, aumentando o teor de escória de aciaria, diminui o Módulo de Young e conseqüentemente a tensão máxima. Isto demonstra que o material perde rigidez com a adição da escória de aciaria.

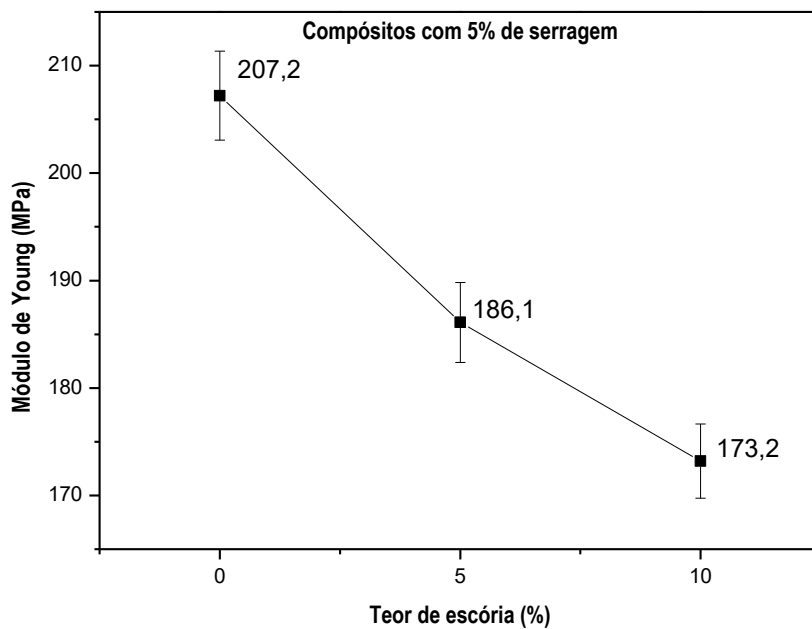


Figura 29. Módulo de Young versus teores de escória com 5% de serragem

Fonte: autora

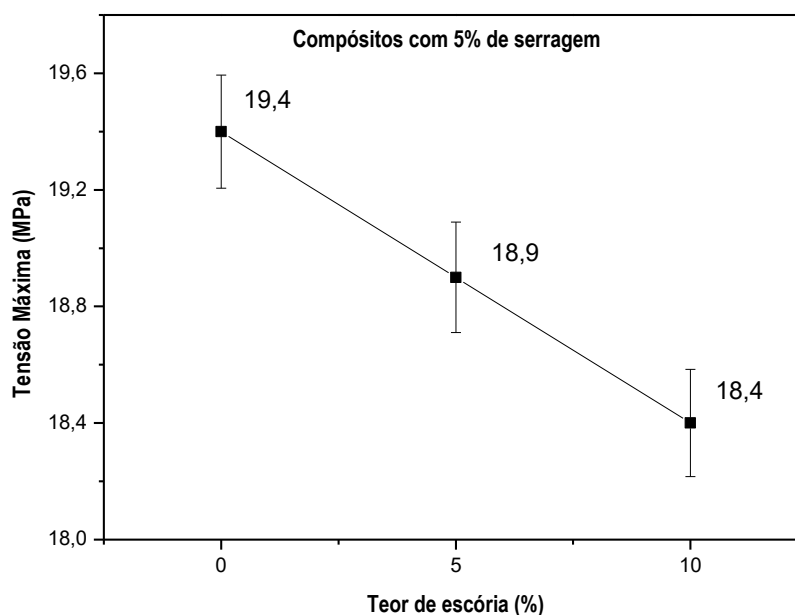


Figura 30. Tensão Máxima versus teores de escória de aciaria com 5% de serragem

Fonte: autora

A comparação entre os resultados mostrados na Figura 29 e na Figura 30 demonstra que a adição de escória na formulação mista contendo 5% de serragem também contribui para uma redução na rigidez e na tensão máxima do material. Foi verificado que, comparado ao resultado apresentado pela amostra sem escória, a adição de 5% de escória promove uma redução de 10% e 2,5%, respectivamente, no Módulo de Young e na Tensão Máxima. Para as composições com 10%, a redução foi de 16% e 5%, respectivamente.

5.1.4. Compostos contendo 10% de serragem e diferentes teores de escória de aciaria

Na Figura 31 estão mostradas as curvas de tensão x deformação obtidas para os compostos contendo plástico, 10% de serragem e diferentes teores de escória de aciaria. Para cada composição foram analisadas 5 amostras e, na Figura 31, estão representadas as curvas das amostras que mais se aproximaram da média.

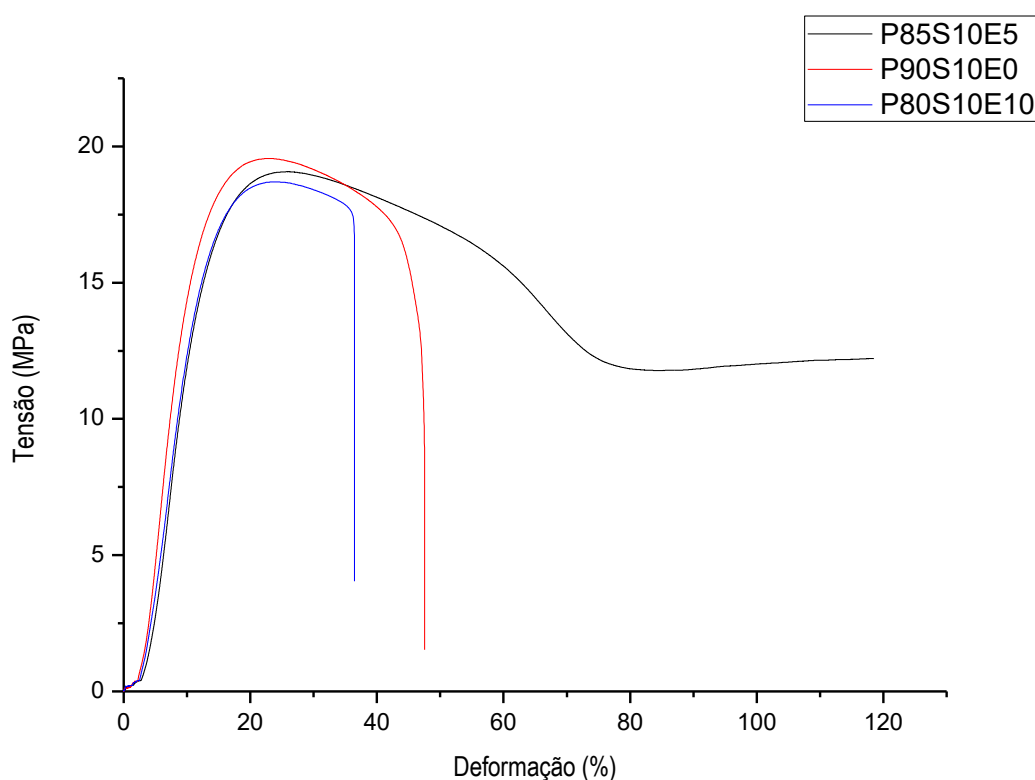


Figura 31. Comportamento mecânico dos compósitos contendo 10% serragem e diferentes teores de escória ($P_{90}S_{10}E_0$ contendo 90% plásticos e 10% serragem, $P_{85}S_{10}E_5$ contendo 85% plásticos, 10% serragem e 5% escória e $P_{80}S_{10}E_{10}$ contendo 80% plásticos, 10% serragem e 10% escória
Fonte: autora

Pode-se notar que, aumentando o teor de escória no material compósito contendo 10% de serragem, a inclinação da curva diminui, caracterizando uma redução no Módulo de Young. Essa redução, conforme consta na Figura 32, é de 11,1% para a adição de 5% de escória e de 11,7% para a adição 10%, comparando-se com a amostra $P_{90}S_{10}E_0$. Verifica-se, ainda uma diminuição gradativa na tensão máxima suportada pelo material em tração.

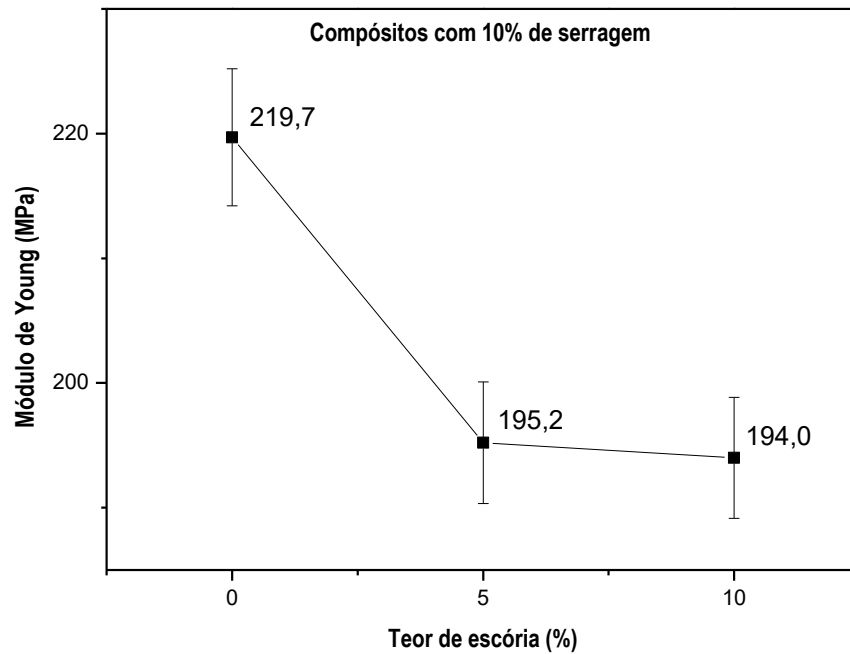


Figura 32. Modulo de Young versus teores de escoria para 10% de serragem

Fonte: autora

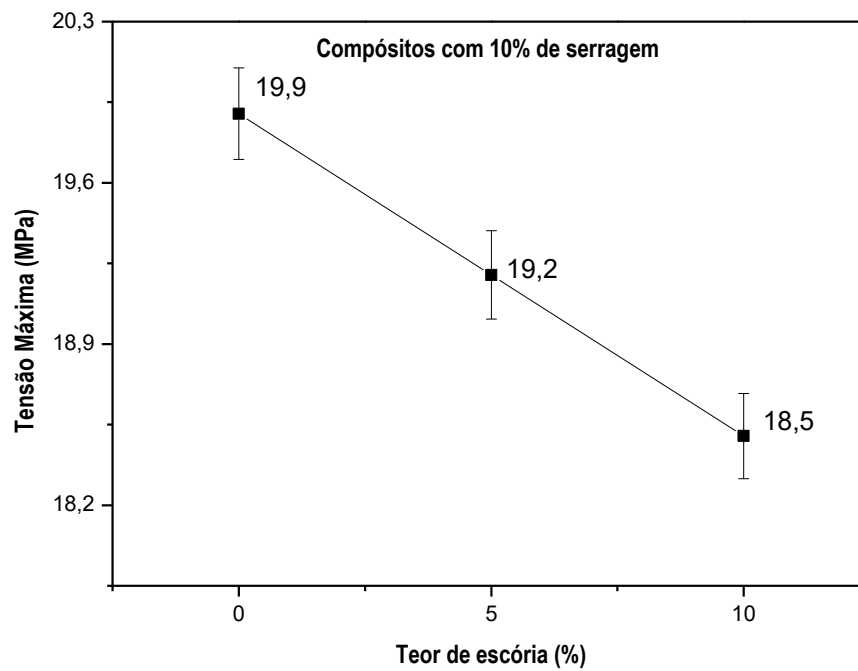


Figura 33. Tensão Máxima versus Teores de escoria para 10% de serragem

Fonte: autora

5.1.5. Compósitos contendo 5% de escória de aciaria e diferentes teores de serragem

Na Figura 34 estão mostradas as curvas de tensão x deformação obtidas para os compósitos contendo plástico, 5% de escória de aciaria e diferentes teores de serragem. Para cada composição foram analisadas 5 amostras e, na Figura 34, estão representadas as curvas das amostras que mais se aproximaram da média.

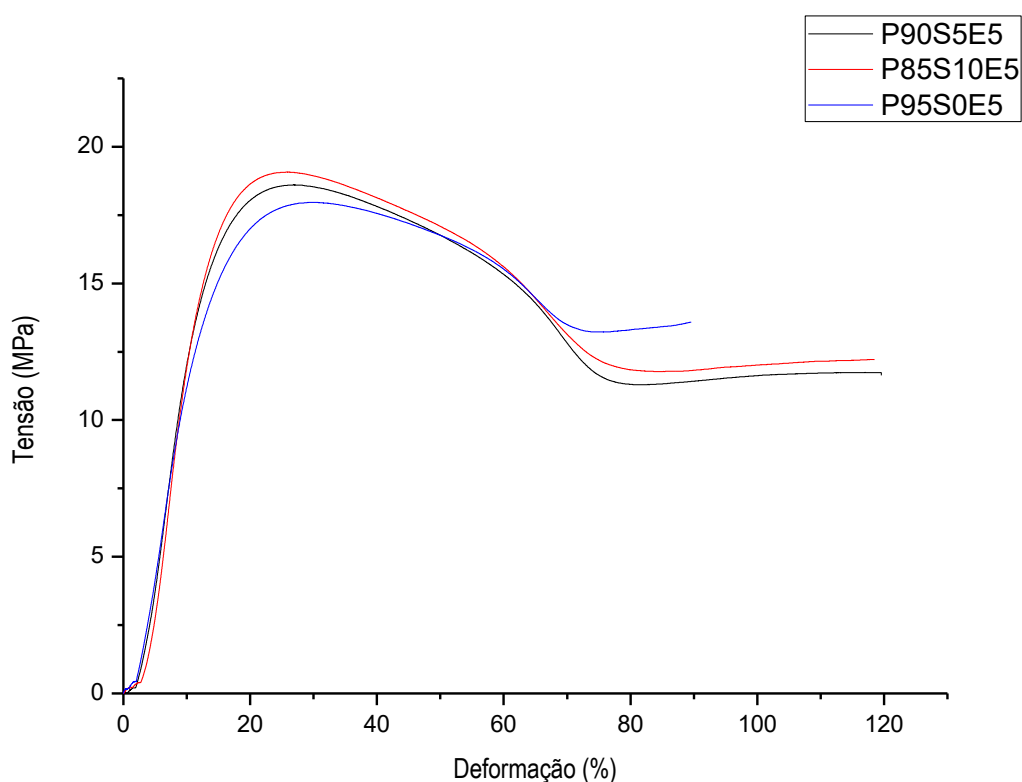


Figura 34. Comportamento mecânico dos compósitos contendo 5% de escoria e diferentes teores de serragem ($P_{95}S_0E_5$ contendo 95% de plásticos e 5% de escória, $P_{90}S_5E_5$ contendo 90% de plásticos, 5% de serragem e 5% de escória e $P_{85}S_{10}E_5$ contendo 85% de plásticos, 10%

Fonte: autora

Pode-se perceber que, no caso dos compósitos com 5% de escória, houve um aumento tanto no módulo de Young como na tensão máxima, conforme mostra a Figura 35, a medida que a serragem vai sendo adicionada à composição. Os aumentos foram de 14% para adição de 5% de serragem e 18% para adição de 10%

de serragem. Além disso, a Figura 36 mostra um aumento na Tensão máxima de 3% para adição de 5% de serragem, e de 4,7% para adição de 10% de serragem.

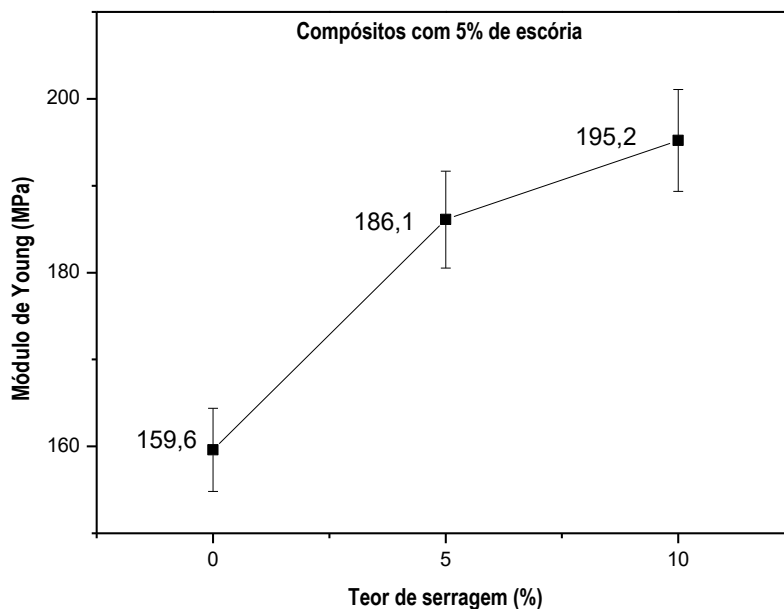


Figura 35. Módulo de Young versus teores de serragem para 5% de escória de aciaria

Fonte: autora

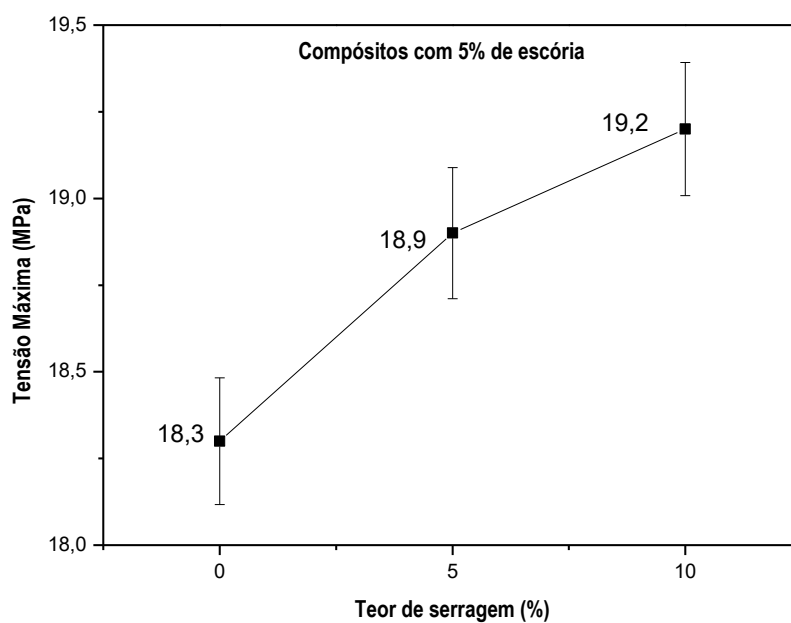


Figura 36. Tensão Máxima versus Teores de Serragem para 5% de Escória de Aciaria

Fonte: autora

5.1.6. Compósitos contendo 10% de escória de aciaria e diferentes teores de serragem

Na Figura 37 estão mostradas as curvas de tensão x deformação obtidas para os compósitos contendo plástico, 10% de escória e diferentes teores de serragem. Para cada composição foram analisadas 5 amostras e, na Figura 37, estão representadas as curvas das amostras que mais se aproximaram da média.

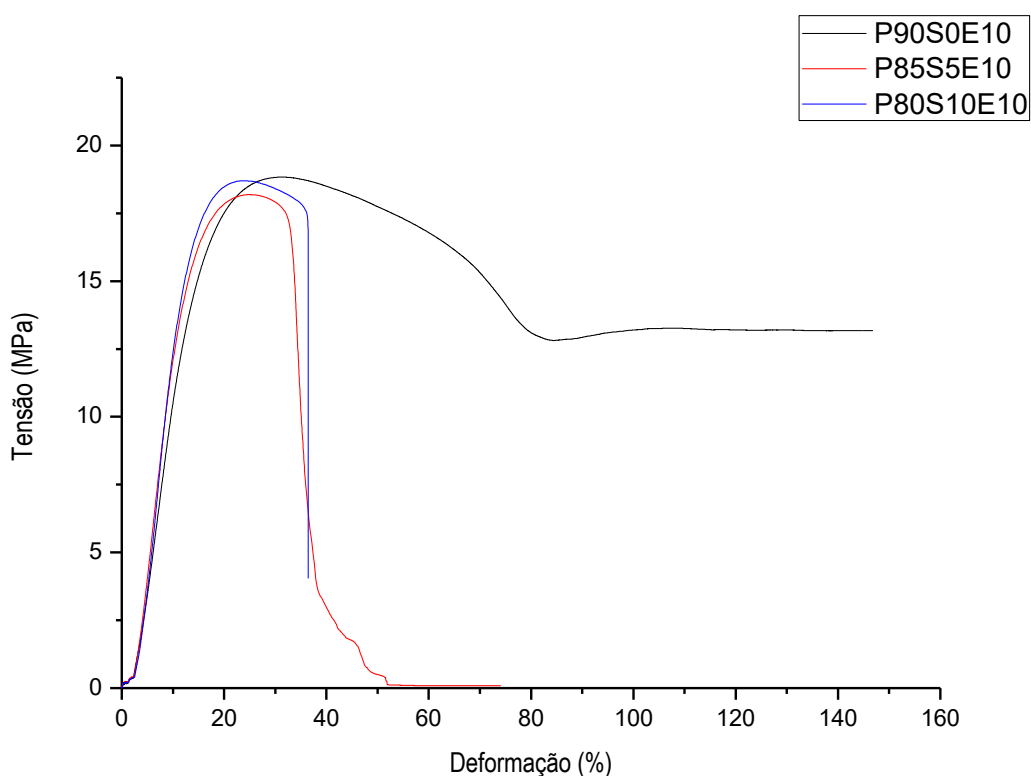


Figura 37. Comportamento mecânico dos compósitos contendo 10% de escória e diferentes teores de serragem ($P_{90}S_0E_{10}$ contendo 90% de plásticos e 10% de escória, $P_{85}S_5E_{10}$ contendo 85% de plásticos, 5% de serragem e 10% de escória e $P_{80}S_{10}E_{10}$ contendo 90% de plástico

Fonte: autora

Pode ser observado que a inclinação da curva se acentuou para um aumento de serragem nos materiais compósitos. Isto significa que a adição de serragem ao material contendo 10% de escória contribui para um aumento na rigidez. Tal fato é interessante, uma vez que significa que reforçar o compósito com serragem, além de

contribuir para uma redução no teor de plásticos, ainda anula os efeitos negativos promovidos pela escória nas propriedades mecânicas.

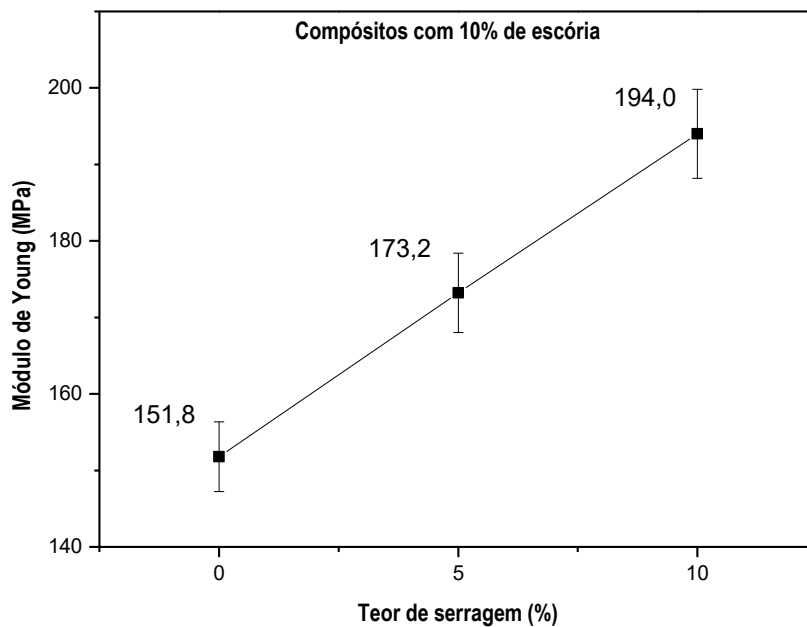


Figura 38. Módulo de Young versus Teores de serragem para 10% de escória de aciaria

Fonte: autora

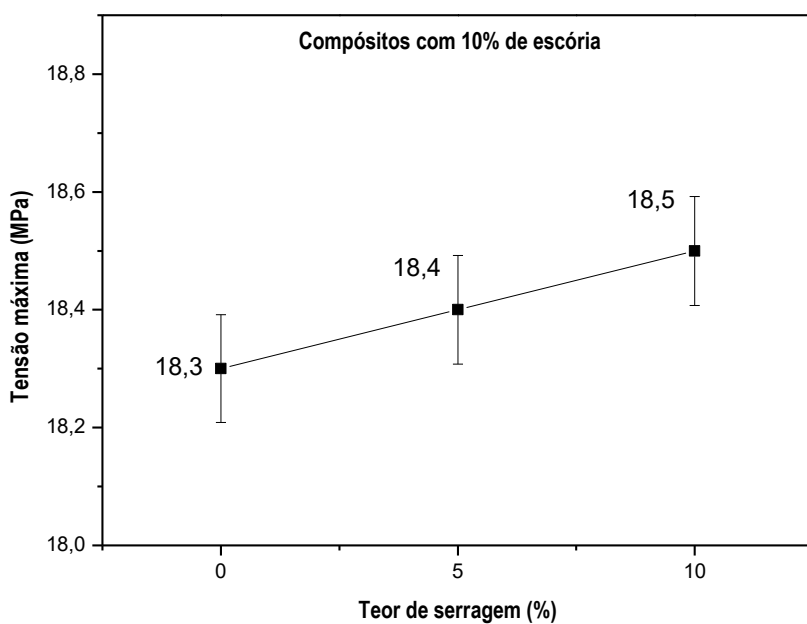


Figura 39. Tensão Máxima versus Teor de Serragem para 10% de escória de aciaria

Fonte: autora

Neste caso, tomando-se a amostra P₉₀S₀E₁₀ como referência, verifica-se um aumento no módulo de Young de 12% para a adição de 5% de serragem e de 21% para 10% de serragem na composição. A tensão máxima, em média, não sofreu alterações significativas. Os resultados estão mostrados na Figura 39.

5.2. ANÁLISE MULTIVARIADA

5.2.1. Módulo de Young

A Figura 40 mostra a superfície de resposta obtida considerando o Módulo de Young como resposta às variações de composição.

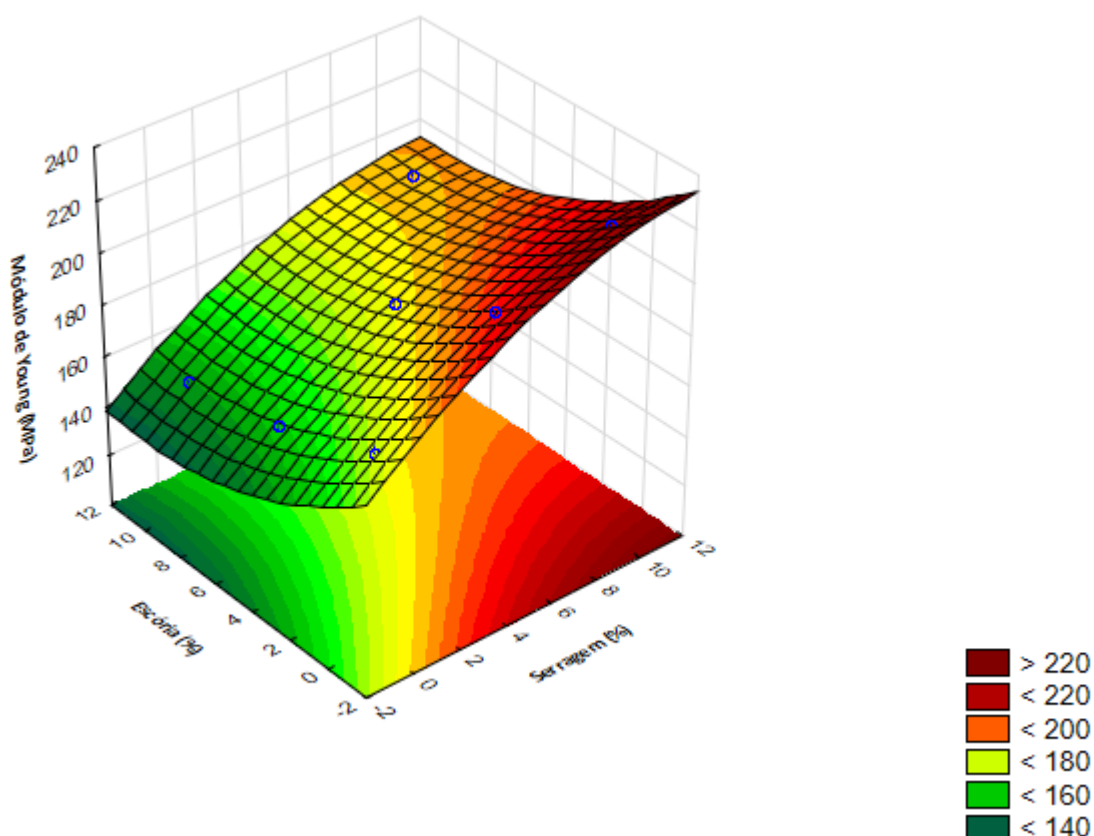


Figura 40. Curva do módulo de Young de acordo com as porcentagens de escória e serragem

Fonte: autora

Verifica-se na Figura 40 que a rigidez do material em tração apresenta os maiores valores à medida que o percentual de serragem aumenta na formulação do compósito. O modelo obtido por regressão não-linear foi:

$$z = 177,66 + 6,69x - 0,25x^2 - 5,275y + 0,262y^2 - 0,023xy \quad (R^2 = 0,9856)$$

Onde x representa o percentual de serragem (0, 5 e 10) e y representa o percentual de escória (0, 5 e 10). A Figura 41 mostra a relação entre os valores observados e os calculados pelo modelo.

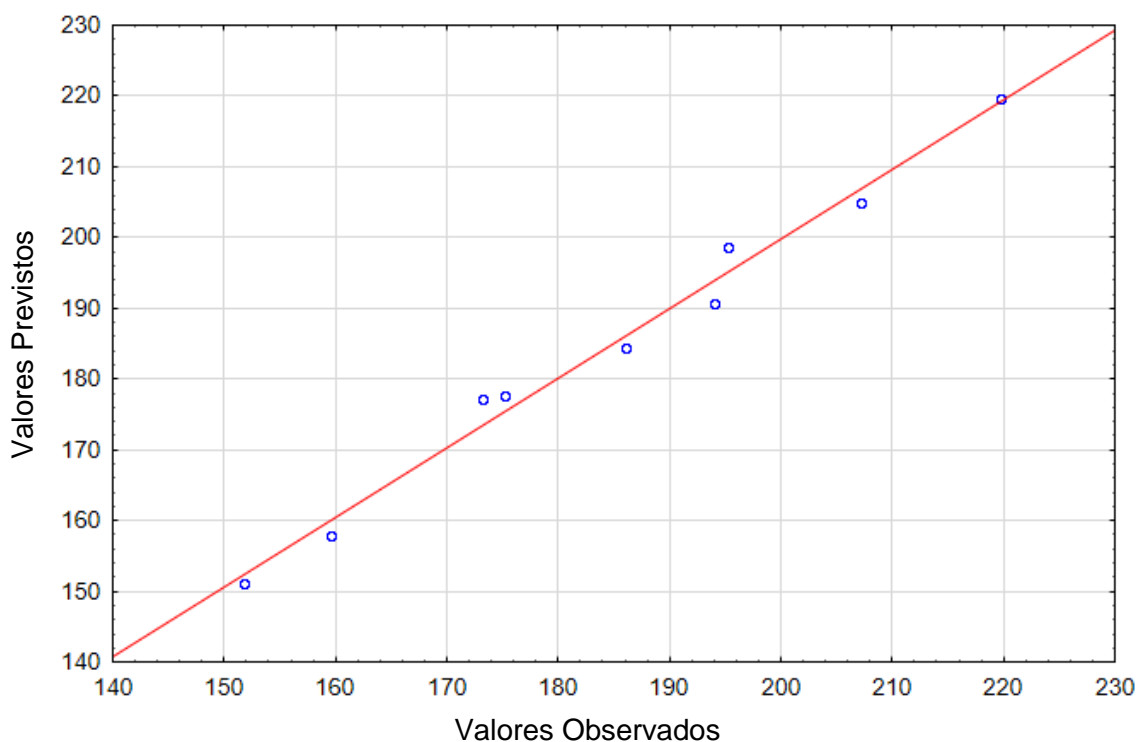


Figura 41. Valores observados versus Valores previstos

Fonte: autora

Para avaliar o efeito de cada fator na propriedade mecânica, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) considerando os efeitos e o ajuste no modelo. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4. Análise de variância (ANOVA) para o Módulo de Young

Fator	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	valor-P
Serragem	2492,882	1	134,0479	134,0479	0,001384
Escória	1150,935	1	61,8884	61,8884	0,004279
Erro	55,791	3	18,597		

Fonte: autora

Verifica-se na análise de variância que os dois fatores avaliados são significantes considerando o módulo de Young como resposta. Tal conclusão é possível devido aos valores do fator F calculado, que são maiores que os valores Tabelados para ($F_{1,3}^{95\%} = 10,13$). Além disso, a significância é confirmada por meio da análise do valor-p, que, para as duas variáveis analisadas, obteve resultado menor que 0,05.

Este comportamento também pode ser visualizado no gráfico de Pareto mostrado na Figura 42.

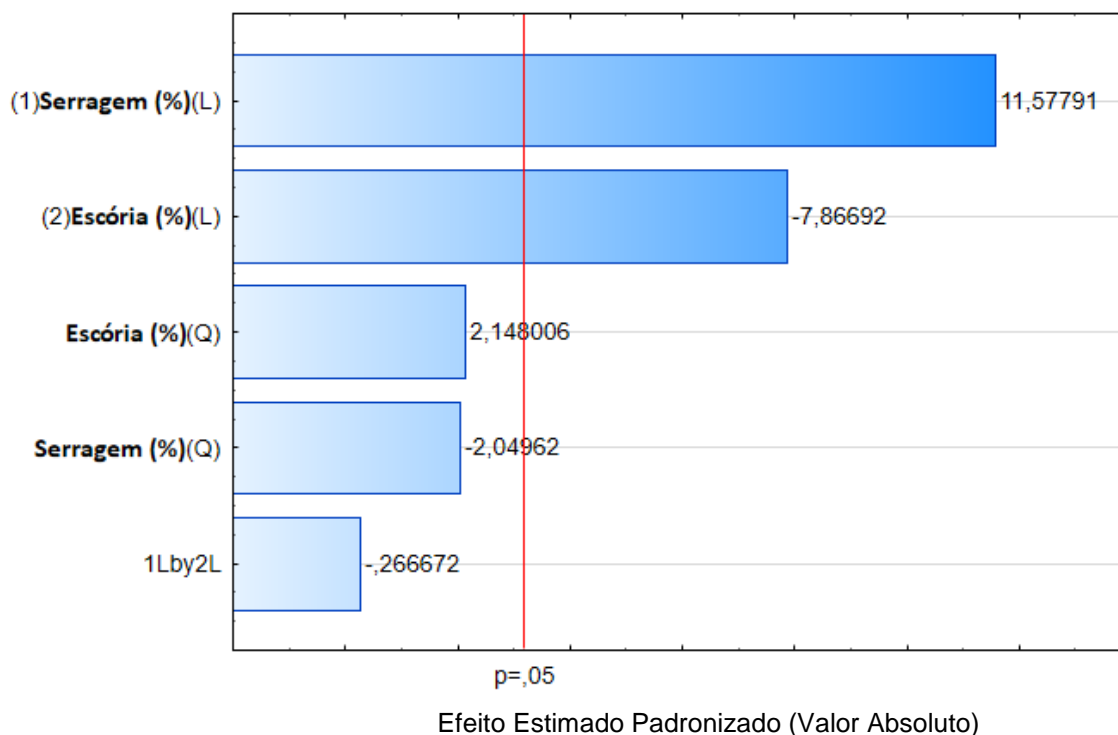


Figura 42. Gráfico de Pareto para Módulo de Young

Fonte: autora

No gráfico de Pareto é possível visualizar a amplitude dos efeitos das variáveis sobre a resposta. Como mostrado na superfície de resposta, a serragem tem efeito positivo e a escória tem efeito negativo sobre o módulo de Young. Os valores absolutos estimados para cada efeito foram 11,58 para o percentual de serragem e - 7,87 para o percentual de escória.

5.2.2. Tensão Máxima em Tração

A Figura 43 apresenta a superfície de resposta obtida para a Tensão Máxima como resposta às variações na composição.

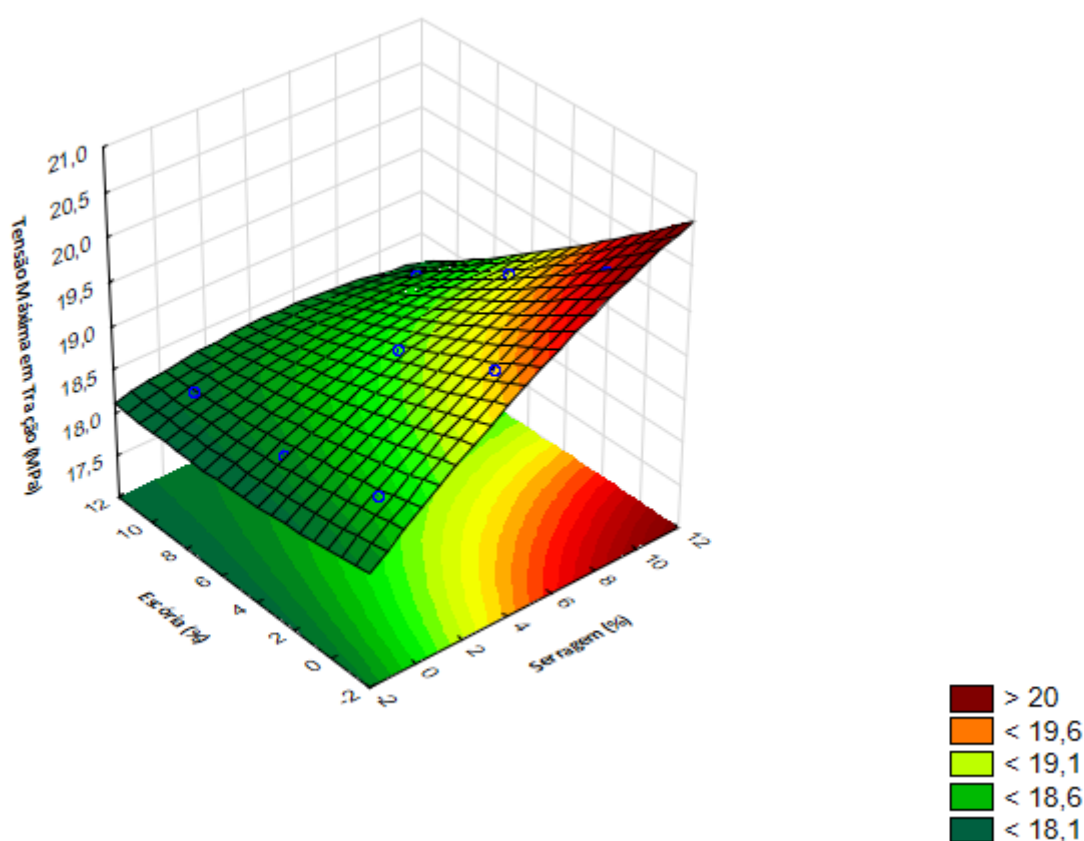


Figura 43. Curva de Tensão Máxima em tração com diversas porcentagens de Escória e Serragem

Fonte: autora

Verifica-se na Figura 43 que a tensão máxima em tração apresenta os maiores valores à medida que o percentual de serragem aumenta na formulação do compósito. O modelo obtido por regressão não-linear foi:

$$z = 1,59 + 0,175x - 0,004x^2 - 0,055y + 0,002y^2 - 0,11xy \quad (R^2 = 0,9931)$$

Onde x representa o percentual de serragem (0, 5 e 10) e y representa o percentual de escória (0, 5 e 10). A Figura 44 mostra a relação entre os valores observados e os calculados pelo modelo.

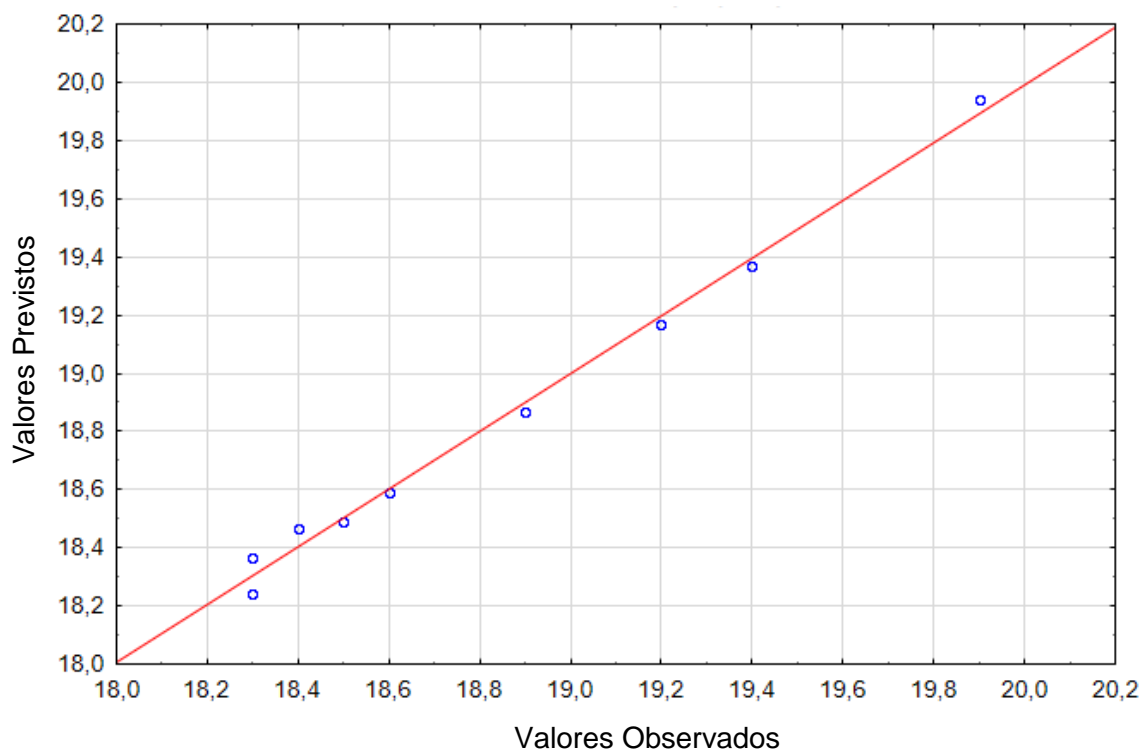


Figura 44. Valores observados versus valores previstos da tração máxima

Fonte: autora

Para avaliar o efeito de cada fator na propriedade mecânica, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) considerando os efeitos e o ajuste no modelo. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5. Análise de variância (ANOVA) para Tensão Máxima em Tração

Fator	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	valor-P
Serragem	0,96	1	0,96	134,0479	0,001384
Escória	1,215	1	1,215	61,8884	0,004279
Erro	0,0175	3	0,005833		

Fonte: autora

Verifica-se na análise de variância que os dois fatores avaliados são significantes considerando a Tensão Máxima em Tração como resposta. Tal conclusão é possível devido aos valores do fator F calculado, que são maiores que os valores Tabelados para ($F_{1,3}^{95\%} = 10,13$). Além disso, a significância é confirmada por meio

da análise do valor-p, que, para as duas variáveis analisadas, obteve resultado menor que 0,05.

Este comportamento também pode ser visualizado no gráfico de Pareto mostrado na Figura 45.

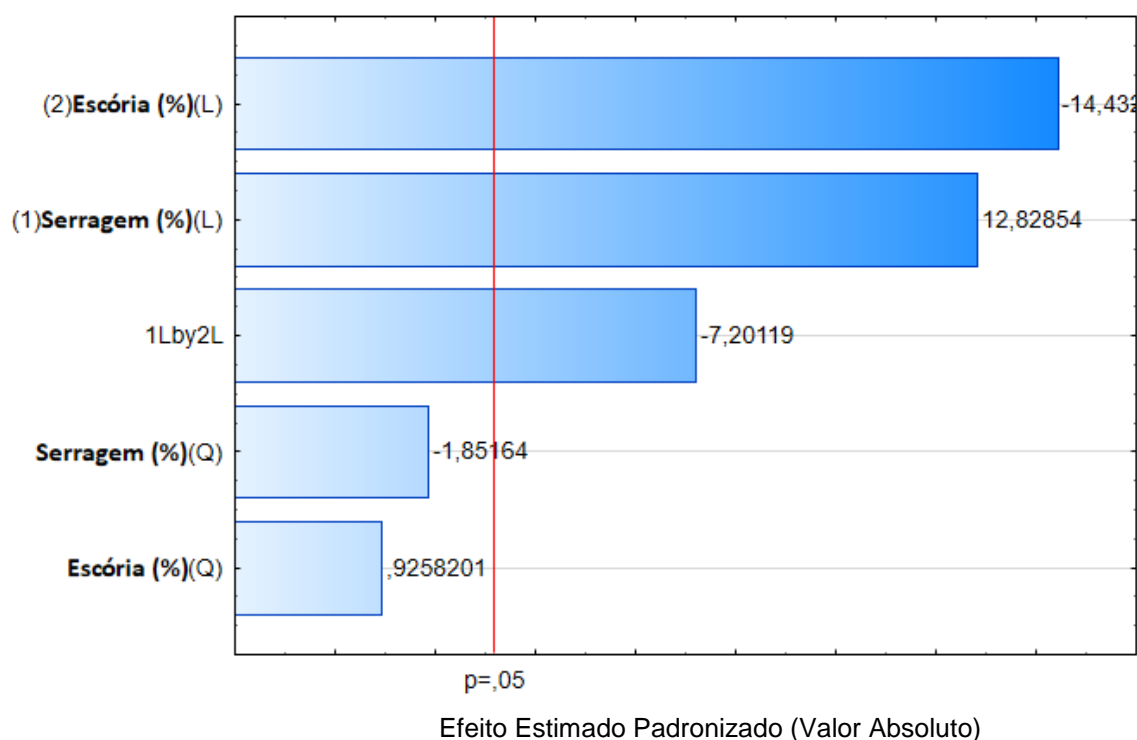


Figura 45. Gráfico de Pareto para Tensão Máxima em Tração

Fonte: autora

Diversos trabalhos na literatura tratam sobre o desenvolvimento de compósitos termoplásticos utilizando fibras e outros materiais como reforço. Em seguida, serão apresentados trabalhos recentes disponíveis nas bases de dados e seus respectivos resultados. Estes trabalhos serviram de base para o presente estudo, pois indicaram bons resultados e boa reprodutibilidade.

No trabalho de Yuan (2008), os autores processaram compósitos de fibras de madeira com propileno ou polietileno, a fim de criar um compósito com alto módulo e força de impacto. Os resultados mostraram um aumento na densidade dos compósitos, devido à diminuição do número de vazios que foram, por sua vez, ocupados pelas fibras de madeira. Os módulos de tensão e flexão do compósito com polietileno de alta densidade mostrou uma melhoria em 360% quando comparado com

o polímero puro. Já o compósito com polipropileno mostrou um aumento de 220% no módulo de tensão e flexão quando comparados ao polímero sozinho.

Já no trabalho de Jofre (2014), uma matriz biopolimérica foi misturada com fibras de madeira. Neste estudo, foi possível verificar que os compósitos com esta matriz e fibras aglomeradas mostraram maior resistência ao impacto do que a matriz sem as fibras. O tamanho e ordenação das fibras também mostrou afetar a força do material compósito final.

O presente estudo mostrou que a matriz de polipropileno com escória de aciaria e serragem mostrou aumento na resistência à tração.

5.3. ANÁLISE TÉRMICA

O analisador térmico gerou figuras de fusão dos compósitos em suas diversas proporções, bem como valores de pico de fusão e as respectivas temperaturas em que ocorrem, com suas entalpias respectivas.

As Figuras 46 a 54 mostram os picos de fusão dos materiais estudados em suas diferentes composições. Nelas, constam, ainda, os valores referentes às temperaturas iniciais e finais da fusão (X1 e X2, nos gráficos), a temperatura do pico de fusão (indicada por Peak no gráfico), além da área e o valor da entalpia de fusão do material (Delta H).

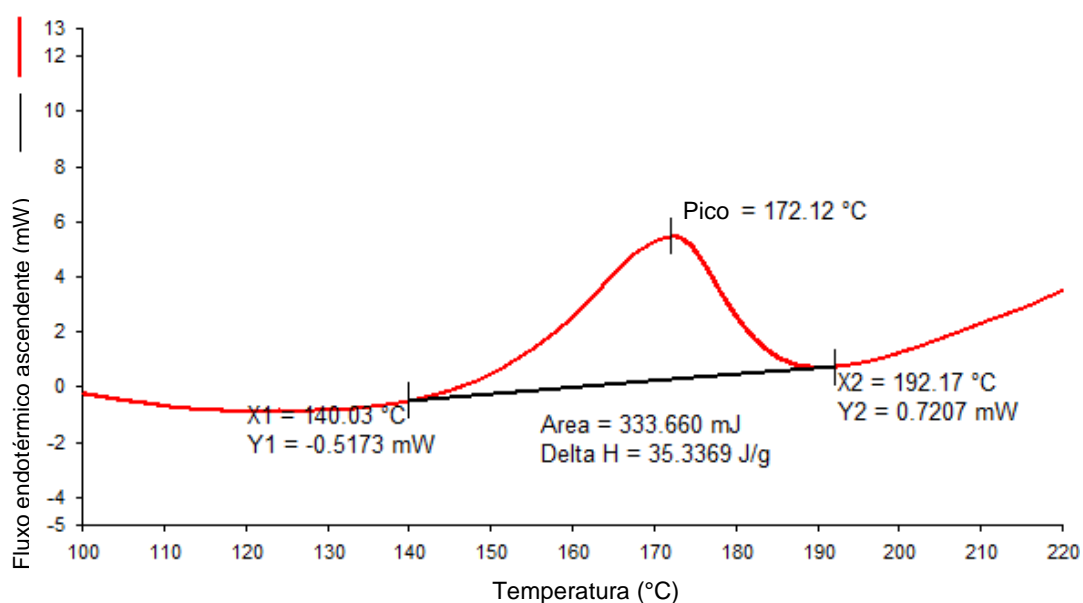


Figura 46. Curva de Fusão do Compósito **P₉₅S₅E₀** contendo 95% de plásticos e 5% de serragem

Fonte: autora

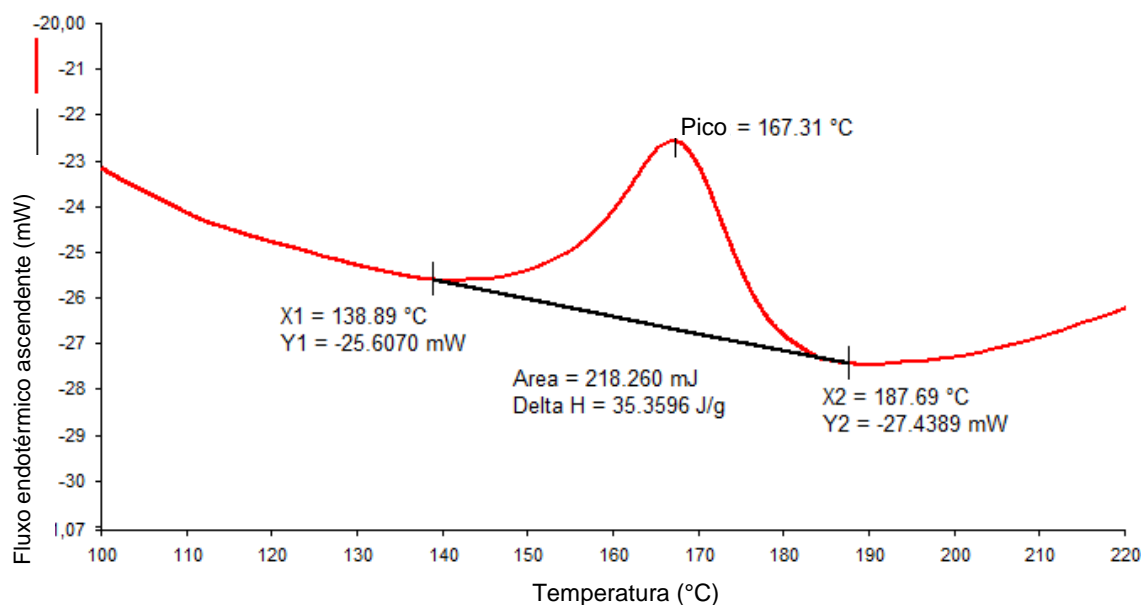


Figura 47. Curva de Fusão do compósito **P₈₀S₁₀E₁₀** contendo 90% de plásticos, 10% de serragem e 10% de escória

Fonte: autora

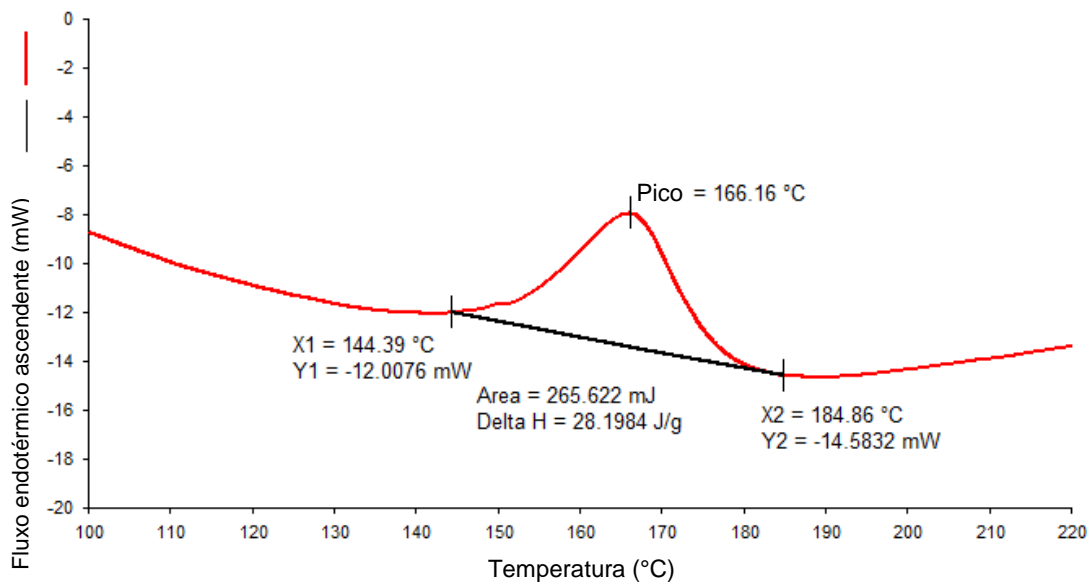


Figura 48. Curva de Fusão do compósito **P₈₅S₁₀E₅** contendo 85% de plásticos, 10% de serragem e 5% de escória

Fonte: autora

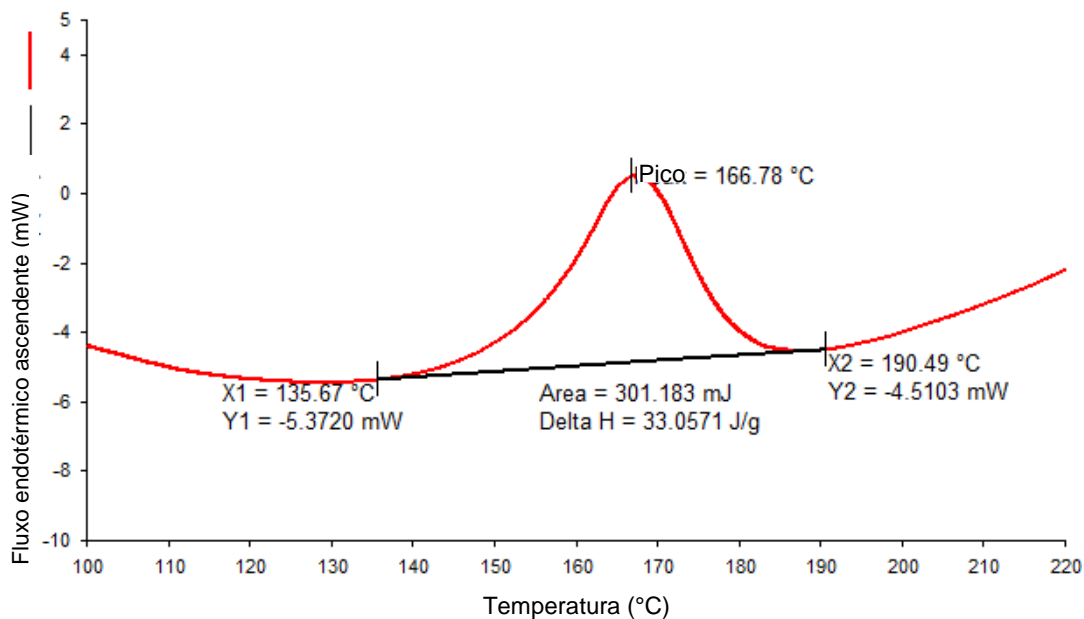


Figura 49. Curva de Fusão do compósito $P_{90}S_0E_{10}$ contendo 90% de plásticos e 10% de escória

Fonte: autora

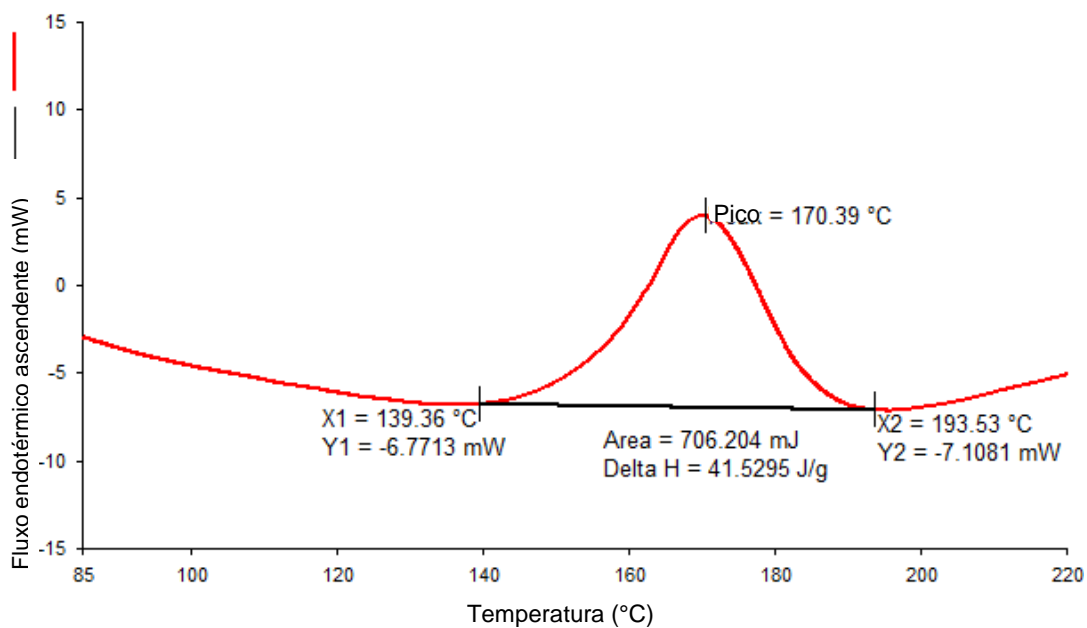


Figura 50. Curva de Fusão do compósito $P_{95}S_0E_5$ contendo 95% de plásticos e 5% de escória

Fonte: autora

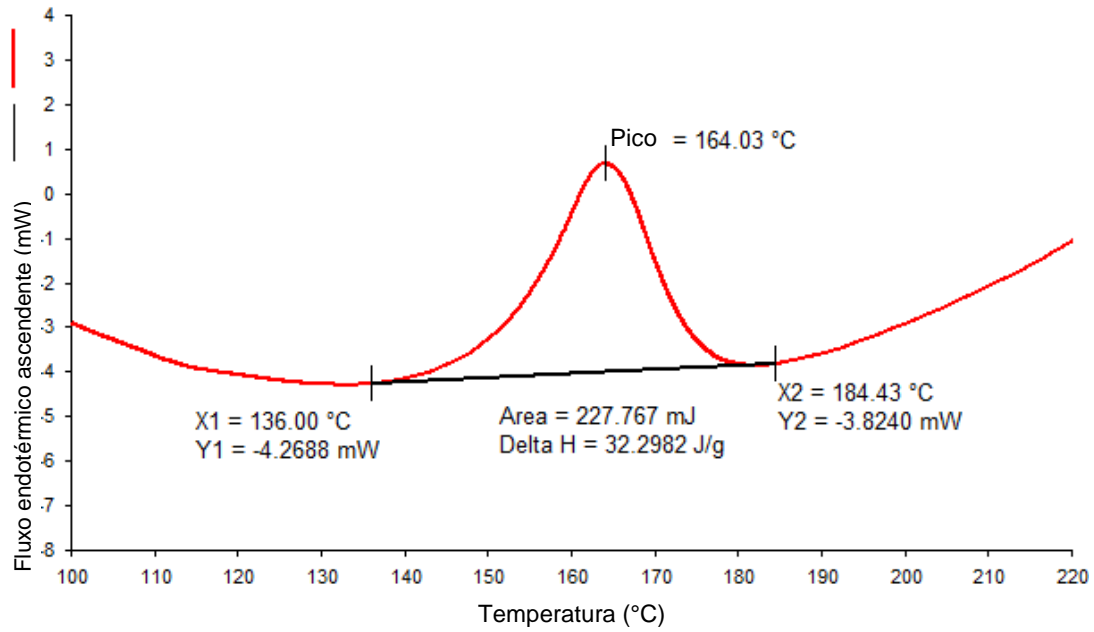


Figura 51. Curva de Fusão do compósito **P₉₀S₅E₅** contendo 90% de plásticos, 5% de serragem e 5% de escória

Fonte: autora

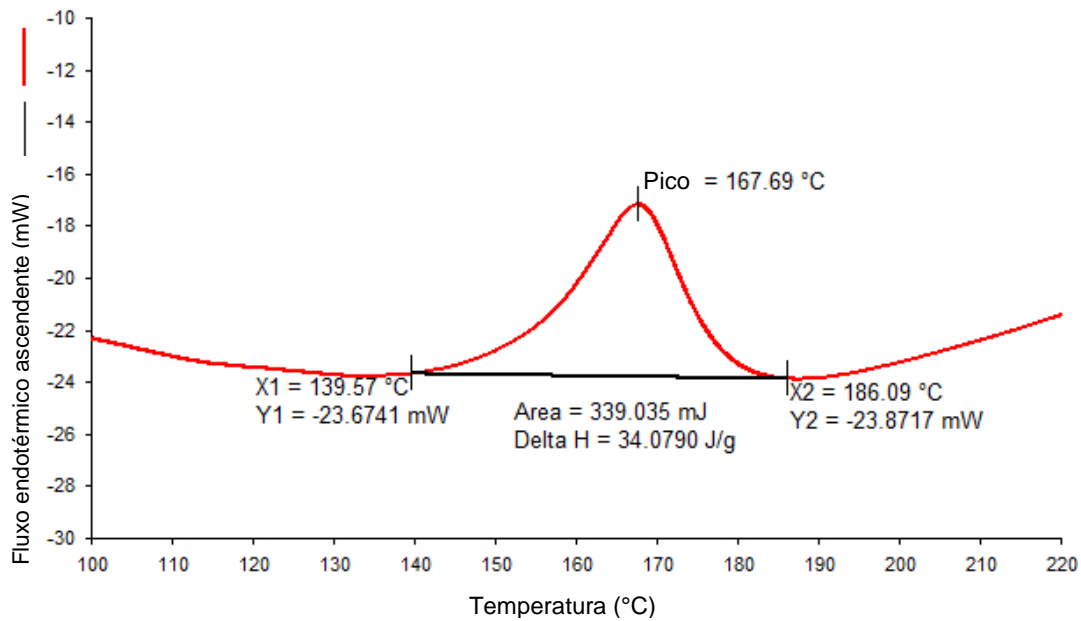


Figura 52. Curva de Fusão do compósito **P₈₅S₅E₁₀** contendo 85% de plásticos, 5% de serragem e 10% de escória

Fonte: autora

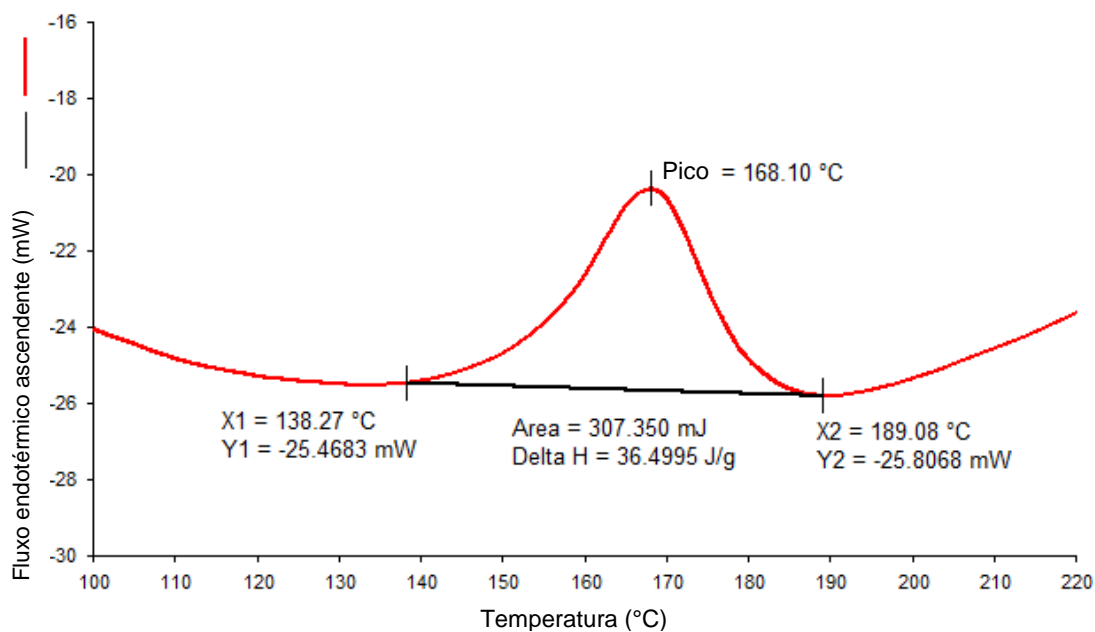


Figura 53. Curva de Fusão do compósito **P₉₀S₁₀E₀** contendo 90% de plásticos e 10% de serragem

Fonte: autora

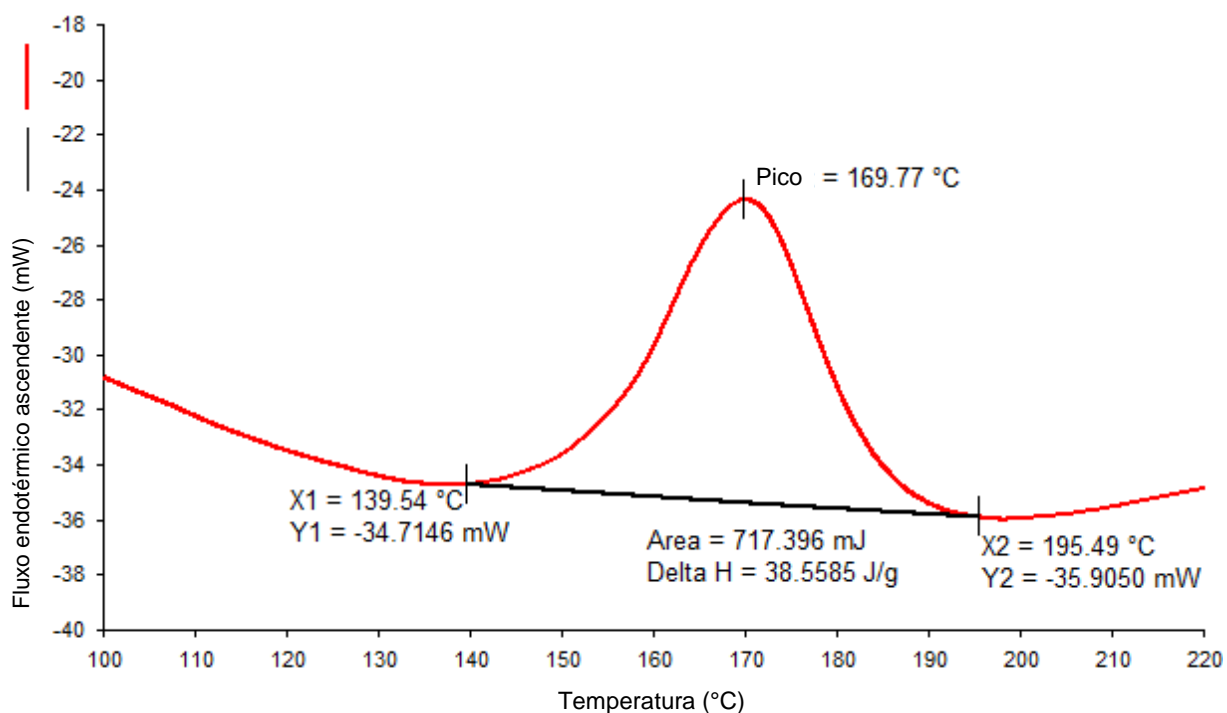


Figura 54. Curva de Fusão dos plásticos reciclados

Fonte: autora

Pode-se observar que a temperatura de fusão tem o seu maior ponto na combinação com 95% de polipropileno e 5% de serragem de madeira, chegando a 172,12 °C, enquanto que a menor temperatura de fusão se deu na mistura de 90% de

polipropileno, 5% de escória de aciaria e 5% de serragem de madeira, e chegou a 164,03°C, conforme a Tabela 6 consolidada.

Desta forma, fica claro que, dependendo da finalidade a ser usado, o compósito deve ser ajustado para as características que forem necessárias.

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos a partir da Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC), contendo as temperaturas de início e fim da fusão e da cristalinidade, além da entalpia de fusão de cada material. O grau de cristalinidade foi obtido usando o valor da DSC para a entalpia de fusão (ΔH) comparando ao valor da entalpia de fusão do polipropileno 100% cristalino ($\Delta H = 138 \text{ J.g}^{-1}$). Vale ressaltar que, no cálculo do valor da cristalinidade, foi considerado somente o teor de polipropileno contido em cada composição.

Tabela 6. Valores de delta T, Pico, delta H e percentagens de cristalinidade dos compósitos

Amostra	Fase de Transição	ΔT (°C)	Pico(°C)	ΔH(J/g)	%Crist
P₁₀₀	Fusão	55,95	169,77	38,5585	27,94
P₉₅S₅E₀	Fusão	52,44	172,12	35,3369	26,96
P₉₀S₁₀E₀	Fusão	50,81	168,10	36,4995	29,37
P₉₅S₀E₅	Fusão	54,17	170,39	41,5295	31,67
P₉₀S₅E₅	Fusão	48,43	164,03	32,2982	26,00
P₈₅S₁₀E₅	Fusão	40,47	166,16	28,1984	24,03
P₉₀S₀E₁₀	Fusão	54,82	166,78	33,0571	26,61
P₈₅S₅E₁₀	Fusão	46,52	167,69	34,079	29,05
P₈₀S₁₀E₁₀	Fusão	48,8	167,31	35,3596	32,03

Fonte: autora

Ambas amostras apresentaram comportamento semelhante nos picos de fusão e cristalização, onde a temperatura média de fusão foi de $168 \pm 2,42$ °C. Partindo do princípio de que a precisão do equipamento é aproximadamente 3%, não existe diferença significativa entre as temperaturas de fusão para as amostras estudadas.

Quanto ao teor de cristalinidade, os valores variaram de 24,03 a 32,03%, com média de $28,18 \pm 2,62\%$.

Os valores de ΔH encontrados, medidos em J/g diminuíram com o acréscimo de reforço, com excessão de 5% de escória, em que o valor de ΔH foi o maior dentre todos os materiais analisados.

Santos (2012) mostra que, em um compósito de polipropileno reciclado com pó de coco, uma diminuição do ΔH indicou uma diminuição no grau de cristalinidade com o aumento do teor de pó de coco.

Já o polipropileno reciclado com serragem e escória de aciaria mostrou uma redução no valor de ΔH para adição de serragem, quando comparado ao polímero puro, bem como a adição de escória.

Em relação à cristalinidade, o maior valor medido foi o material compósito contendo 10% de serragem, 10% de escória e 80% de polipropileno.

6. CONCLUSÕES

No presente estudo, foi possível produzir compósitos com diversas concentrações de escória de aciaria e de serragem.

Os ensaios mecânicos mostraram que a adição de serragem melhora propriedades de Tensão Máxima e Módulo de Young. No compósito com 10% de serragem, foi obtido um aumento de 25,4% no Módulo de Young e de 7% na Tensão Máxima. A escória de aciaria parece diminuir as propriedades de Tensão Máxima e Módulo de Young. Essa redução torna-se menos evidente com a adição de serragem, além da escória, à composição. Nas amostras contendo 10% de escória e 10% de serragem, o Módulo de Young sofreu um aumento de 10,7% e a Tensão Máxima foi apenas 0,5% menor em comparação ao polímero puro.

Na análise térmica, foi verificado não haver diferenças nas temperaturas de fusão dos materiais nas composições estudadas. O valor médio encontrado para esta propriedade foi de $168 \pm 2,42$ °C. Quanto ao teor de cristalinidade, as amostras estudadas apresentaram resultados de $28,18 \pm 2,62\%$.

Mesmo a escória reduzindo as propriedades do material compósito quando comparado com o compósito apenas com a serragem de madeira, o seu uso seria uma forma de retirar este material do meio-ambiente e reduzir a poluição por este tipo de resíduo.

Dessa forma, no presente trabalho, foram produzidos materiais compósitos a partir da reciclagem de polímeros utilizados em embalagens domésticas com adição de resíduos da agroindústria e da siderurgia. Os resultados mostraram que a adição dos resíduos, além de contribuir a redução do uso de derivados de petróleo, promove melhores propriedades mecânicas.

7. TRABALHOS FUTUROS

Um estudo mais aprofundado das peças que este material compósito poderia fabricar, além das propriedades deste novo material utilizando o material compósito aqui apresentado.

Além de outras aplicações, o próprio material compósito poderia ser mais amplamente analisado, considerando-se temperatura, esforços de tração e compressão e cisalhamento, além de estabilidade e condução térmica, sua análise por microscopia de varredura (MEV) e difratometria de raio-x, além da análise da reação química do material compósito em contato com produtos químicos, águas agressivas e com o concreto.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEZERRA DE OLIVEIRA E SOUZA, E.; **Escórias de aciaria e resíduos de concretos refratários em componentes de pavimentação**. Tese de mestrado, 2007

Busch, Matheus Gutman. **Análise experimental do comportamento mecânico de juntas híbridas metal-compósito**. Rio de Janeiro, 2016.

CALLISTER JR. , RETWISCH, D.G. **Ciência e engenharia dos Materiais - Uma Introdução**. 9^o Edição, 2016.

CHANG, Raymond; GOLDSBY, Kenneth A. **Química**. 11^a Edição. McGraw Hill, 2013.

CHAWLA, Krishan. **Composite Materials: Science and Engineering**. 2011.

COELHO, J. D. C. **Produção de um novo conceito de painéis modulares para habitações baseado em sistemas compósitos reciclados**. Porto, Portugal. 2016.

FERNANDES, R.F., **Compósito**, Rev. Ciência Elem., V2(4):285, 2014.

Henriksson, G. Lignin. In EK, M.; GELLERSTEDT, G.; HENRIKSSON, G. **Wood chemistry and wood biotechnology**. Berlin: Walter de Gruyter, v.1, p. 121-146, 2009.

HUNG, et al., **Characterization of Wood-Plastic Composites Made with Different Lignocellulosic Materials that Vary in Their Morphology, Chemical Composition and Thermal Stability**. 17 de Dezembro de 2017.

JOFFRE, T. **Structure and Mechanical Behaviour of Wood-Fibre Composites**. Uppsala Universitet, Suécia. 2014.

KNUTH, F.A.; **Feixes de fibras lignocelulósicas refinadas mecanicamente em compósitos cimentícios na avaliação da resistência à tração**. Universidade Federal de Pelotas. Tese de Mestrado em Ciência e Engenharia dos materiais. 2016.

MARTINS, Francisco Romeo. **Caracterização do Fresamento de Chapas de Compósito Polímero Reforçado com Fibras de Carbono (PRFC)**. Campinas, 2014.

MENDES, A. M; ROSSINI, G. H.; SIMON, H. J. B. D; LAHR. M. e PACIONI, T. R. **Resistência dos Materiais Trabalho: Relatório de ensaio de tração com materiais poliméricos**. Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP, Campinas, 2007, p. 19.

MILANI, Charles. **Influência da incorporação de resíduos de policarbonato em compósitos fibra de vidro/poliéster**. Porto Alegre/RS, 2015.

Ministério do Meio Ambiente. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. site: <http://www.mma.gov.br/pol%C3%ADtica-de-res%C3%ADduos-s%C3%B3lidos.html>. Acesso em 16 de outubro de 2018.

MORAIS, Sérgio Antônio Lemos de, et. al; **Análise da Madeira de Pinus oocarpa Parte I – Estudo dos Constituintes macromoleculares e extrativos voláteis**. Uberlândia, MG. 2005

MORAIS, Willy Ank. **ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA A IMPACTOS DE BAIXAS ENERGIAS DE MATERIAIS COMPÓSITOS**. Universidade Santa Cecília. Tese de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais. 1999.

MOTA, M. K. F. **Obtenção e caracterização de um compósito de matriz polimérica com carga de bucha vegetal (LUFFA CYLINDRICA)**. Natal/RJ, 2016.

NETO, J. L. B. **Estudo do Comportamento mecânico de compósitos de matriz polimérica com fibra de vidro contendo descontinuidades geométricas**. Campina Grande, 2015.

NUNES, Edilene de Cássia Dutra; LOPES, Fábio Renato Silva. **Polímeros - Conceito, Estrutura Molecular, Classificação e Propriedades**. 1ª Edição. São Paulo, 2014

PINSKY, V.; Kruglianskas, I. **Inovação tecnológica para a sustentabilidade: aprendizados de sucessos e fracassos**. Estudos Avançados vol.31 no.90. São Paulo. Maio/Agosto 2017.

RESENDE, M.C. **O Uso de Compósitos Estruturais na Indústria Aeroespacial.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol 10, nº 2, 2000.

REVISTA AÇO BRASIL, Revista N. 41 de Setembro de 2018 do Instituto Aço Brasil, até Agosto de 2018.

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.

SANTOS, B.B. **Compósitos de Polipropileno reciclado e pó de coco.** Rio de Janeiro, 2012.

SCIACOVELLI, A. et al. **High Density polyethylene (HDPE) – Graphite composite manufactured by extrusion: A novel way to fabricate phase change materials for thermal energy storage.** 27 de Abril de 2018.

STAPATHY, S., Kothapalli, R.V.S. **Mechanical, Dynamic Mechanical and Thermal Properties of Banana Fiber/Recycled High Density Polyethylene Biocomposites Filled with Flyash Cenospheres.** Springer Science + Business Media, New York. 25 de Janeiro de 2017.

QI, Z.; Hu, N.; LI, G.; ZENG, D.; SU, X.. **Constitutive modeling for the elastic-viscoplastic behavior of high density polyethylene under cyclic loading.** International Journal Of Plasticity. 26 de Setembro de 2018.

The Wood Database. www.wood-database.com/loblollypine. Acessado em 09 de novembro de 2018.

VIEIRA, F.S.V.; REBOUÇAS, M.V.; ANDRADE, J.B. **Determinação de compostos carbonilados e carboxilados em derivados de petróleo.** Revista Química Nova, Vol. 35, Nº 8, 1644-1656, 2012.

YUAN, Q.; Wu, D.; GOTAMA J.; BATEMAN, S. **Wood Fiber Reinforced Polyethylene and Polypropylene Composites with High Modulus and Impact Strength.** Journal of Thermoplastic Composite Materials 21(3):195-208. May, 2008.