



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



GABRIELA DE CASTRO ROLIM

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM COMPÓSITO DE
POLIPROPILENO (PP) COM ADIÇÃO DE POLIESTIRENO DE ALTO
IMPACTO (HIPS) E REFORÇO DE PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA**

VOLTA REDONDA

2020

GABRIELA DE CASTRO ROLIM

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM COMPÓSITO DE POLIPROPILENO (PP) COM ADIÇÃO DE POLIESTIRENO DE ALTO IMPACTO (HIPS) E REFORÇO DE PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA

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 concentração de processamento e caracterização de materiais reciclados, compósitos, nanomateriais e biomateriais, linha de pesquisa em materiais compósitos.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Chaboli Gambarato

VOLTA REDONDA

2020

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tacão Wagner - CRB 7/RJ 4316

R748d Rolim, Gabriela de Castro.

Desenvolvimento e caracterização de um compósito de polipropileno com adição de poliestireno de alto impacto e reforço de pó de aciaria elétrica. / Gabriela de Castro Rolim. - Volta Redonda: UniFOA, 2020. 73 p.: Il

Orientador (a): Prof. Dr. Bruno Chaboli Gambarato

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em Materiais, 2020



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



GABRIELA DE CASTRO ROLIM

Desenvolvimento e Caracterização de um Compósito de Polipropileno (PP)
com Adição de Poliestireno de Alto Impacto (HIPS) e Reforço de Pó de Aciaria
Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Bruno Chaboli Gambarato

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE
"MESTRE EM MATERIAIS"

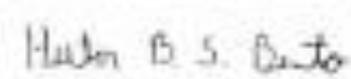
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE MESTRADO
PROFISSIONAL EM MATERIAIS


Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Bruno Chaboli Gambarato
Presidente / UniFOA


Profa. Dra. Cirlene Fourquet Bandeira
Examinador interno / UniFOA


Prof. Dr. Heitor Buzetti Simões Bento
Examinador externo / USP

Outubro de 2020.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me suportar durante os anos do mestrado, me acompanhando e me protegendo sempre.

Aos meus pais por me proporcionarem a possibilidade de concluir esse curso e obter o título de mestre.

À minha irmã por dividir comigo toda essa caminhada.

Ao meu marido por estar sempre ao meu lado e me suportar durante a gravidez no final do curso, me dando o melhor presente, nossa filha Luísa.

Ao meu orientador Prof. Dr. Bruno Chaboli Gambarato por não só me orientar, mas também dividir todas as aflições para a conclusão do curso.

Aos técnicos Dirceu Hartung Camargo Coutinho e Luciano por todo o auxílio durante as atividades laboratoriais para execução da dissertação.

Ao coordenador Dr. Roberto de Oliveira Magnago por sempre nos apoiar durante o curso.

As funcionárias da secretária por estarem sempre prontas a nos ajudar.

Aos professores doutores Cirlene e Heitor que dedicaram seu tempo para participar da banca na avaliação desta dissertação.

A todos os meus amigos e colegas que, de alguma forma participaram na conclusão desta dissertação e na obtenção do título de mestre.

ROLIM, G. C. **Desenvolvimento e caracterização de um compósito de polipropileno (PP) com adição de poliestireno de alto impacto (HIPS) e reforço de pó de aciaria elétrica.** 2020. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2020.

RESUMO

A sustentabilidade é um assunto muito discutido, principalmente devido ao crescimento populacional que vêm afetando diretamente as atividades industriais. Diante desse cenário a busca por materiais com melhores propriedades está crescendo, dando origem assim aos estudos sobre compósitos. O presente trabalho tem o objetivo de desenvolver um compósito com resíduos, utilizando uma matriz polimérica de polipropileno, com a adição de poliestireno de alto impacto e um reforço da indústria siderúrgica, pó de aciaria elétrica. Para uma melhor análise os compósitos foram processados em diferentes proporções desses materiais, variando o pó de aciaria elétrica em 0, 10 e 20%, o poliestireno de alto impacto nas mesmas proporções e utilizando o polipropileno para completar a composição do material. Os compósitos foram triturados e injetados à 300° C, afim de se obter os corpos de prova necessários para os ensaios a serem realizados. Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de tração, flexão, dureza e uma análise final multivariada (utilizando o software Statistica® e otimizando o modelo através da plataforma WolframAlpha®). Os resultados obtidos mostram que os compósitos desenvolvidos são homogêneos, sem alterações significativas na dureza dos materiais com relação a composição apresentada. Já um aumento da rigidez foi observado no material com composição de 20% de pó de aciaria elétrica e 10% de poliestireno de alto impacto, devido ao Módulo de Young de 325 Mpa e o Módulo de Flexão de 1630 Mpa. Com base nesses resultados pode-se concluir que o reaproveitamento de resíduos siderúrgicos, como o pó de aciaria elétrica, é possível visando o desenvolvimento de materiais com melhores propriedades, além de uma destinação mais adequada aos resíduos industriais e poliméricos.

Palavras-chave: Materiais compósitos; polipropileno; pó de aciaria elétrica; poliestireno de alto impacto; resíduos.

ROLIM, G. C. **Development and characterization of a component with a polypropylene (PP) and addition of a high impact polystyrene (HIPS) reinforced with electric arc furnace dust.** 2020. Dissertation (Professional Master of Material) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2020.

ABSTRACT

Sustainability is a subject that is much discussed, mainly due to the population growth that has been directly affecting industrial activities. Given this scenario, the search for materials with better properties has growing, giving rise to studies on composites. The present work has the objective of developing a composite composed of residues, using a polymeric polypropylene matrix, with the addition of high impact polystyrene and a reinforcement of the steel industry, electric arc furnace dust . For a better analysis, the composites were processed in different proportions of these materials, varying the Electric arc furnace dust by 0, 10 and 20%, the high impact polystyrene in the same proportions and using the polypropylene to complete the material composition. The composites were injected at 300° C, in order to obtain the necessary specimens for the tests to be performed. The test specimens were submitted to the tests of traction, bending tests, hardness and a final multivariate analysis(Using the Statistica® software and optimizing the model through the WolframAlpha® platform). The results obtained show that the composites developed are homogeneous, without significant changes in the hardness of the materials in relation to the presented composition. An increase in stiffness was observed in the material with a composition of 20% of electric arc furnace dust and 10% of high impact polystyrene, due to the Young Module of 325 Mpa and the Flexural Module of 1630 Mpa. Based on these results, it can be concluded that the reuse of steel residues, such as Electric arc furnace dust , is possible aiming at the development of materials with better properties, in addition to a more suitable destination for industrial and polymeric waste.

Keywords: Composite materials; polypropylene; electric arc furnace dust; high impact polystyrene; waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxo do processo de produção de aço.....	14
Figura 2. Setores da economia e sua utilização de aço.....	17
Figura 3. Desempenho ambiental do aço.....	17
Figura 4. Classificação dos materiais compósitos.....	30
Figura 5. Processo para obtenção dos resultados.....	35
Figura 6. Corpo de prova para o ensaio de tração com 10% de PAE e 10% de HIPS.	37
Figura 7. Ensaio de tração curva Tensão x Deformação.....	39
Figura 8. Tensão x Deformação dos compósitos com 0% de HIPS.....	40
Figura 9. Tensão x deformação dos compósitos com 10% de HIPS.....	41
Figura 10. Tensão x deformação dos compósitos com 20% de HIPS.....	41
Figura 11. Ensaio de flexão curva Tensão x Deformação.....	43
Figura 12. Diagrama Tensão x Deformação dos compósitos submetidos ao ensaio de flexão com 0% de HIPS.....	44
Figura 13. Diagrama Tensão x Deformação dos compósitos submetidos ao ensaio de flexão com 10% de HIPS.....	44
Figura 14. Diagrama Tensão x Deformação dos compósitos submetidos ao ensaio de flexão com 20% de HIPS.....	45
Figura 15. Superfície de Resposta - Módulo de Young.....	49
Figura 16. Gráfico de Pareto - Efeitos das variáveis sobre o Módulo de Young.....	51
Figura 17. Ajuste do modelo aos valores observados - Módulo de Young.....	52
Figura 18. Superfície de Resposta - Tensão máxima em Tração.....	53
Figura 19. Gráfico de Pareto - Efeito das variáveis sobre a Tensão máxima em Tração.....	55
Figura 20. Ajuste do modelo aos valores observados - Tensão máxima em Tração.....	56
Figura 21. Superfície de Resposta - Módulo de Flexão.....	57
Figura 22. Gráfico de Pareto - Efeito das variáveis sobre o Módulo de Flexão.....	59
Figura 23. Ajuste do modelo aos valores observados - Módulo de Flexão.....	60
Figura 24. Superfície de Resposta - Tensão máxima em Flexão.....	61
Figura 25. Gráfico de Pareto - Tensão máxima em Flexão.....	62
Figura 26. Ajuste do modelo aos valores observados - Tensão máxima em Flexão.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados estimados da geração de resíduos siderúrgicos.	20
Tabela 2. Composição química do Pó de Aciaria.....	21
Tabela 3. Propriedades do PP.....	26
Tabela 4. Composição dos compósitos.	36
Tabela 5. Dados obtidos do ensaio de tração para o compósito.	42
Tabela 6. Dados obtidos do ensaio de flexão para compósito com 0% de HIPS.	46
Tabela 7. Resultados dureza Shore D por amostra.	47
Tabela 8. Análise de variância - Módulo de Young	50
Tabela 9. Análise de variância - Tensão máxima em Tração.....	54
Tabela 10. Análise de variância - Módulo de Flexão.....	58
Tabela 11. Análise de variância – Tensão máxima em Flexão	62

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Geração de resíduos sólidos na produção do aço	18
Quadro 2. Tipos de Polímeros.....	24

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BSC	British Steel Company
CP	Corpo de Prova
DSC	Ensaio de calorimetria Exploratória Diferencial
HIPS	Poliestireno de Alto Impacto
IABR	Instituto Aço Brasil
kg	Quilograma
NBR	Norma Brasileira
PET	Politereftalato de etileno
PP	Polipropileno
PAE	Pó de aciaria elétrica
t	Tonelada

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
2.	OBJETIVOS	11
3.	JUSTIFICATIVA	12
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
4.1.	Processos Siderúrgicos	13
4.1.1.	Resíduos Siderúrgicos	18
4.1.2.	Pó de aciaria elétrica (PAE)	20
4.2.	Polímeros	23
4.2.1.	Polipropileno	25
4.2.2.	Reciclagem do polipropileno	27
4.2.3.	Poliestireno de Alto Impacto (HIPS).....	28
4.2.4.	Utilização de polímeros na matriz de compósitos	29
4.3.	COMPÓSITOS.....	30
5.	Materiais e métodos	35
5.1.	Materiais	35
5.1.1.	Polímeros.....	35
5.1.2.	Pó de aciaria elétrica	36
5.2.	Métodos	36
5.2.1.	Preparação do compósito.....	36
5.2.2.	Ensaio de tração	37
5.2.3.	Ensaio de flexão.....	38
5.2.4.	Ensaio de Dureza Shore D.....	38
6.	Resultados e discussões	39
6.1.	Ensaio de tração	39
6.2.	Ensaio de Flexão	43
6.3.	Ensaio de Dureza Shore D.....	47
6.4.	Análise Multivariada.....	48
6.4.1.	Módulo de Young	48
6.4.2.	Tensão Máxima em Tração.....	52
6.4.3.	Módulo de Flexão	56
6.4.4.	Tensão máxima em Flexão	60
7.	CONCLUSÕES.....	64
8.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	65
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional afetou diretamente as atividades industriais, levando a uma elevação desse setor, a fim de atender às necessidades de bens de consumo. Esse cenário leva também ao aumento na geração de resíduos pelas indústrias, trazendo à tona um assunto que muito se tem discutido, sustentabilidade (DIAS; SALGADO, 1999).

Diante dessa busca pela sustentabilidade e por materiais com melhores propriedades começaram-se os estudos da junção de materiais já conhecidos, dessa forma obtiveram-se os primeiros compósitos não naturais. Os mesmos são formados com base nas características de dois materiais que são então "misturados" a fim de se obter um novo material, cujas duas fases do composto são chamadas, geralmente, de reforço e matriz.

Um grande setor que entrou nessa busca é o siderúrgico, que é responsável pela geração de vários resíduos durante a produção do aço, com diferentes propriedades e destinos. O pó da aciaria elétrica é um resíduo sólido gerado no processo primário de produção do aço, se tornando um problema de descarte e uma oportunidade de reaproveitamento.

É possível considerar a reciclagem nesse setor um desafio, porém têm-se grandes motivos para supera-lo, dos quais podem-se citar a diretriz ambiental e a necessidade de se atender a legislação ambiental, além do crescimento da produção e dos ganhos obtidos pela empresa.

Na indústria do plástico o problema já é outro, com polímeros de uso corriqueiro, o descarte ocorre em sua grande maioria em aterros. O polipropileno (PP), polímero de uso comum, tem grandes capacidades de reciclagem, mas a maioria do seu descarte ainda continua sendo aterros sanitários, onde permanecem por muitos anos. O mesmo acontece com o poliestireno de alto impacto (HIPS), um polímero termoplástico barato, com excelentes propriedades físicas, químicas e mecânicas e que pode ser reaproveitado.

Dentro deste contexto, este trabalho foca no estudo da união de três materiais importantes: o PP, o HIPS e pó da aciaria elétrica.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver e caracterizar materiais compósitos de matriz polimérica de polipropileno (PP) com adição de poliestireno de alto impacto (HIPS) e reforço de pó de aciaria elétrica (PAE), um resíduo obtido da indústria siderúrgica.

Objetivos Específicos

- Processar compósitos com diferentes teores de PP, PAE e HIPS;
- Caracterizar as propriedades mecânicas dos compósitos obtidos;
- Avaliar a influência da composição dos materiais sobre as propriedades mecânicas.
- Avaliar se a adição de HIPS promove efeito combinado sobre as propriedades mecânicas.

3. JUSTIFICATIVA

O presente trabalho visa o desenvolvimento de compósitos de matriz de polipropileno reforçada com pó de aciaria elétrica (PAE) diante da necessidade de reciclagem de rejeitos gerados em diferentes processos com o objetivo de se obter um produto com melhores propriedades mecânicas a fim de que o mesmo seja adequado a uma aplicação em que se possa obter a rigidez do aço e a leveza do polímero.

O PAE é um resíduo gerado no processo produtivo do aço via arco elétrico, sendo ainda um dos maiores problemas com resíduos dessa indústria. Um dos grandes motivos dessa preocupação é pela composição desse material com elementos químicos como Zn, Pb, Fe, Cr, Cd, entre outros. Por essa composição química, de acordo com os critérios normativos, o PAE é classificado como resíduos classe I – resíduo perigoso (norma NBR 100004:2004).

Em outros países esse resíduo tem a mesma classificação, porém quando se compara o aproveitamento do mesmo, o Brasil se encontra abaixo da média mundial, já que no país a maioria desse resíduo é encaminhada para aterros de resíduos industriais perigosos, devido à difícil solução de reaproveitamento.

Já o polipropileno é um material bastante utilizado e descartado em aterros, deixando clara a necessidade de reutilização do mesmo. Trata-se de um dos polímeros mais utilizados no mundo e pode ser reciclado a partir de coleta doméstica ou industrial.

Um estudo realizado com base no ano de 2017 pela Fundação Instituto de Administração para o atendimento do Plano de Incentivo à Cadeia do Plástico mostrou que a porcentagem de reciclagem desse material no Brasil está em torno de 26% de todo polipropileno consumido na produção de embalagens.

Assim, verifica-se que é indispensável cuidar do descarte desses materiais, justificando assim o desenvolvimento de um estudo que viabilize, em termos de propriedades mecânicas e processamento, a produção de um material compósito.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

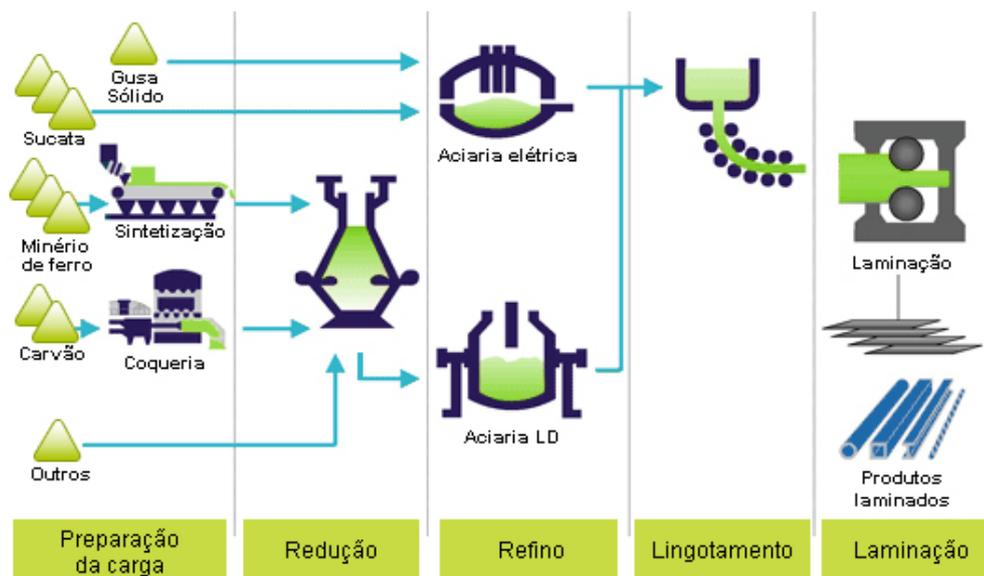
4.1. PROCESSOS SIDERÚRGICOS

Siderurgia é a metalurgia do ferro, sendo a utilização de técnicas e conceitos para a obtenção e tratamento do aço através da extração, purificação e modificação de metais ferrosos. A metalurgia é então o estudo da ciência e tecnologia da extração de metais a partir de minério de ferro para então ocorrer a utilização na indústria (SILVA, 2011).

Segundo o IABR (2018), instituto aço Brasil, aconteceu durante a revolução industrial a invenção de fornos que são capazes de corrigir impurezas presentes no ferro, permitiu alteração das propriedades através da adição de outros elementos. Esse foi o marco do ferro se transformando em aço, melhorando a resistência ao desgaste, ao impacto, à corrosão e ainda diminuindo seu custo, dessa forma o aço chegou a ser em torno de 90% dos metais consumidos pela indústria.

O instituto Aço Brasil explicou que o processo simplificado de produção do aço é dividido em cinco macro etapas, que são elas: Preparação de carga, redução, refino primário e secundário, lingotamento e laminação. Etapas que diferenciam diante do tipo de usina, que podem ser integradas ou semi-integradas. Onde as usinas semi integradas não fazem o processo de redução, já começam o seu processo com o ferro gusa líquido. A figura 1 apresenta um fluxo do processo de siderurgia.

Figura 1. Fluxo do processo de produção de aço



Fonte: IABR (2018).

Levando em consideração que o ferro é encontrado facilmente na crosta terrestre associado ao oxigênio e à sílica, pode-se entender que o minério de ferro nada mais é que um óxido aglomerado com areia fina (IABR, 2018).

Dessa forma Silva (2011) explicou diferentes formas de minerais que o ferro se apresenta e nem todas são fontes de ferro para a utilização industrial, porém alguns minerais formados por óxido de ferro têm esse potencial, a magnetita (Fe_3O_4) e a hematita (Fe_2O_3). Sendo a Magnetita com um alto teor de ferro, em torno de 72%, com um grande potencial de exclusão de resíduos indesejáveis no processo e a hematita, em torno de 70% de ferro, que é o minério mais empregado nos processos siderúrgicos.

Outro elemento de suma importância para a siderurgia é o carvão mineral, ou em alguns casos o carvão vegetal, abundantemente encontrado na natureza sob as várias formas do carbono. O carvão desempenha dois papéis importantes no processo produtivo do aço, como combustível e como redutor. Como combustível permite que o aço alcance as temperaturas necessárias para sua fusão e no processo de redução, ele se associa ao oxigênio para deixar o ferro livre (IABR, 2018).

No processo, o minério e o carvão precisam ser adicionados ao alto forno, porém antes disso passam por uma preparação visando que o processo tenha um maior rendimento e economia. Para isso o carvão passa por uma fase de destilação afim de se obter coque e alguns subprodutos e o minério de ferro passa por um processo de pelotização (IABR, 2018).

O processo de redução ocorre no alto-forno em temperaturas superiores a 1200°C, que consiste em uma combustão do carbono contido no coque. Dessa combustão obtém-se o calor necessário para a redução do minério quando exposto ao gás carbônico, quando este se associa ao oxigênio o ferro fica livre se transformando em gusa líquido. Nesta etapa se adiciona um fundente, que atua como agente de fluidificação das impurezas na carga do alto-forno e assim forma-se a escória. As impurezas geradas separam-se do ferro gusa líquido devido a diferença de densidade (COLPAERT, 1974; GERDAU, 2005; IABR, 2018).

Segundo Belgo (2002) no processo, o ferro gusa é carregado pelo carro torpedo para a próxima etapa, que é uma estação de dessulfuração, onde adiciona-se o carbetto de cálcio (CaC_2) para que os teores de enxofre sejam reduzidos aos níveis necessários. Após a dessulfuração o ferro gusa é encaminhado para a etapa de refino.

A etapa de refino do ferro gusa dessulfurado ocorre na aciaria, mais precisamente no conversor e tem a finalidade de obter as propriedades necessárias para o aço. As aciarias podem ser elétricas ou LD (a oxigênio) e tem como principal objetivo remover parte do carbono presente no gusa junto com as impurezas restando assim a sucata de ferro e o aço líquido, além dos ajustes dos elementos de liga para a obtenção das propriedades necessárias. A eliminação dos componentes ocorrem de formas diferenciadas, o oxigênio da oxidação do carbono é eliminado em forma de gás pela ocorrência de CO e CO_2 já o silício, fósforo e enxofre são eliminados na escória. Após esse processo é necessário adequar a temperatura do aço para a etapa de lingotamento.

Dependendo das especificações do cliente, o aço pode passar pela etapa de refino secundário, após o refino primário, no forno panela onde ocorre os ajustes das propriedades do aço através de sua composição química, bem como as temperaturas especificadas pelo cliente ou pela norma em questão. Após o refino secundário o aço segue para o lingotamento.

Segundo Belgo (2002) é no lingotamento que o aço se solidifica, através de uma matriz refrigerada por água obtendo assim a forma desejada. Como o lingotamento é contínuo o aço é cortado em formas de tarugo e tamanhos adequados para a laminação.

Na etapa de laminação, o aço é reaquecido e deformado mecanicamente atingindo assim a espessura necessária para a venda, esse processo é chamado de laminação a quente. Quando a chapa necessita de espessuras ainda menores ela é encaminhada a seção de laminação a frio, onde o aço se deforma atingindo espessuras ainda menores. Através desses processos se obtém chapas, bobinas, arames, perfilados, barras entre outros produtos finais (BELGO, 2002; CAMPOS FILHO, 1981; IBS, 2005).

As etapas que vem após as descritas são etapas de acabamento e dependem das especificações do cliente ou normas. Sendo essas as que fazem parte dos processos de fabricação de aços através de indústrias integradas e semi-integradas.

Após a produção, o produto é encontrado em diversos setores, segundo o IABR (2018) é possível encontrar o aço presente em nosso dia-a-dia, em construção civil, utilidades domésticas, transportes, embalagens, energia e agricultura. Por meio da figura 2, verificam-se os setores da economia que mais utilizam o aço.

Baseado nesses dados, o IABR expôs que em 2016 foram produzidos 31,3 milhões de toneladas de aço bruto no Brasil, um número consideravelmente alto já que o aço é produzido também com o viés de exportação. O que leva ao setor pensar na sustentabilidade negócio, o aço é um produto com grande capacidade de reciclagem.

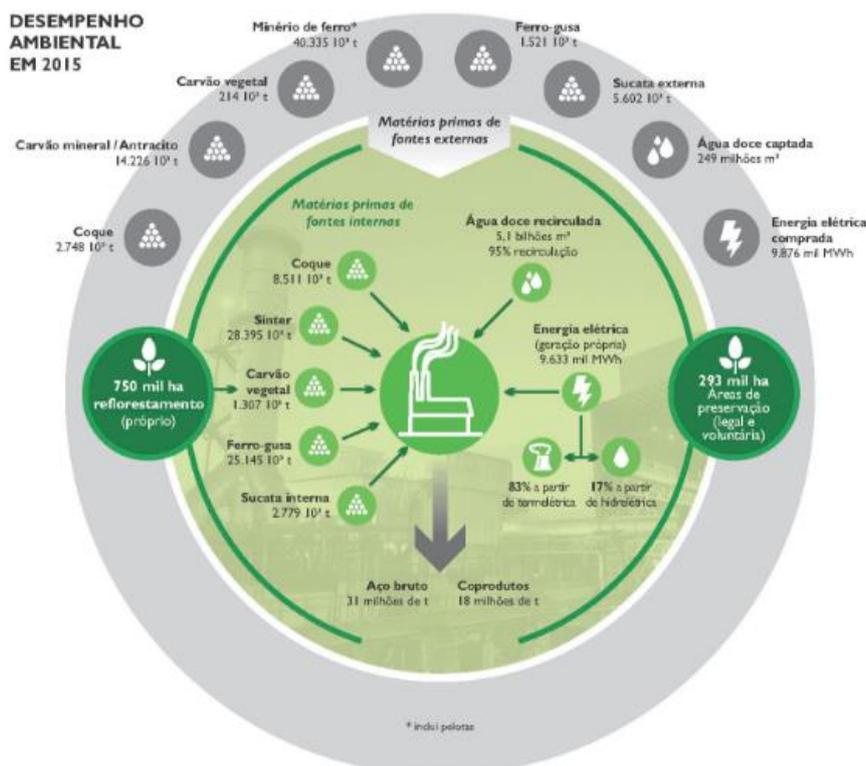
Figura 2. Setores da economia e sua utilização de aço no Brasil



Fonte: IABR (2018).

Na maioria dos processos de reciclagem do aço, o mesmo volta para o processo de produção adequando as composições e mantendo a qualidade necessária ao processo. Na figura 3 pode-se analisar todas as entradas dos coprodutos no processo de produção de aço no Brasil, verifica-se ainda a possibilidade de diferentes aplicações.

Figura 3. Desempenho ambiental do aço



Fonte: IABR (2016).

4.1.1. Resíduos Siderúrgicos

Os resíduos são gerados em todo o processo de produção do aço, independentemente da indústria e do seu tipo de atuação. A composição química do resíduo está diretamente ligada às composições químicas das matérias primas utilizadas no processo (ALVES, A. L. S et. al., 2004).

O problema dos resíduos passa a ser um problema ambiental, criando a necessidade de um cuidado com os mesmos. Na indústria siderúrgica, os resíduos são classificados como subprodutos ou coprodutos na produção do aço, podendo ter três destinos comuns: o descarte, o reaproveitamento dentro da própria empresa ou, ainda, o reaproveitamento externo.

No quadro 1, é possível verificar os principais resíduos gerados durante a produção do aço.

Quadro 1. Geração de resíduos sólidos na produção do aço

Preparação de Carga	Redução	Refino	Lingotamento	Laminação
Finos de minério de ferro	Escória	Escória	Sucata	Sucata
Finos de Carvão	Finos de minério de ferro	Pó	Carepa	Carepa
Pó	Finos de Carvão	Lama		
Lama	Pó	Refratários		
	Lama			
	Refratários			

Fonte: Adaptado de IBS (2006).

Considerando que a geração de resíduos sólidos é em torno de 43,5% da produção total do aço bruto, pode-se levar em conta que em 2016 no Brasil gerou cerca de 13,61 milhões de toneladas de resíduos sólidos na indústria siderúrgica (IABR, 2018).

Nos processos de redução e refino pode-se observar a geração de escória, formada por impurezas contidas no minério de ferro, ferro gusa, sucatas, reações e adições ocorridas no banho. Segundo Lobato (2014) é o resíduo gerado de maior volume, cerca de 70%.

O processo de redução que ocorre no alto forno, também leva à produção de escória, essa pode ser utilizada na produção do cimento em substituição de parte do clínquer, visando a redução da emissão de CO_2 e recursos naturais. Já as escórias geradas na aciaria apresentam maior dureza e densidade devido a altos teores de óxidos de ferro, são utilizadas como subproduto para asfaltos, pavimentos rodoviários nivelamento de terreno, contenção de encostas, corretivos e fertilizante fosfatado para solos (BOSI FILHO, 1991).

Lobato (2014) afirmou que as lamas são 5% dos resíduos gerados, vindo do tratamento de gases, contendo óxidos de ferro e alguns componentes, como: cálcio, silício, manganês e alumínio. Normalmente são, então, levadas para o sistema responsável pela filtragem e após esse processo enviadas para a sinterização.

Outro resíduo com quantidades significativas são os pós de alto forno e coqueria, são componentes com altas taxas de carbono e uma grande quantidade de metais (JACOMINO et al, 2002). Segundo Nolasco Sobrinho et al. (2000) os pós e lamas não utilizados no processo podem ser injetados nas ventaneiras dos alto-fornos como fonte de carbono e minério de ferro.

Os refratários são materiais utilizados como revestimento para equipamentos com o objetivo de suportar altas temperaturas, contendo o metal líquido e isolando-o termicamente. O processo produtivo gera sucatas metálicas como pontas de lingotes, tarugos, placas e chapas que retornam ao processo como matéria prima na aciaria elétrica, por exemplo.

As carepas são óxidos de ferro obtida no lingotamento, na laminação a quente, no processo de forjamento, em tratamentos térmicos, entre outros, apresentando cerca de 20% dos resíduos com ferro.

Baseado nos dados acima e ainda de acordo com o Centro de Coprodutos Aço Brasil (2014), os resíduos, ou coprodutos, que são obtidos a partir dos resíduos sólidos geram benefícios ambientais, como:

- Diminuição do uso de recursos naturais obtidos na mineração e;
- Redução da deposição dos mesmos em lugares irregulares.

Na tabela 1 pode-se verificar a quantidade estimada da geração de alguns resíduos obtidos com relação na produção de ferro gusa no Brasil e no mundo em todo o processo siderúrgico.

Tabela 1. Dados estimados da geração de resíduos siderúrgicos.

	Mundo		Brasil
	kg.t ⁻¹ gusa ou aço	10 ⁶ t.ano ⁻¹	10 ⁶ t.ano ⁻¹
Recicláveis	43	30	1,2
Poeira de alto-forno	1 a 2 ***	0,5 a 1,0	0,2 a 0,04
Lama de alto-forno	< 1 ***	~ 0,2	~ 0,001
Finos de coque	-	-	-
Lama grossa de conversor	5-6	2,5	0,1
Lama fina de conversor	17	8	0,34
Carepas	10-20	7	0,3
Poeira aciaria elétrica	15	4,6	0,07
Escória de alto-forno	150 a 350 (300)	140	6,0
Escória de conversor	100	47 *	2,0 **
Escória lingotamento contínuo	30-35	17 *	0,7 **
Escória aciaria elétrica	15	5 *	0,075

*60% aço por conversor e 40% por aciaria elétrica

**80 e 20% respectivamente

***Pós e lamas para produção de gusa = 16,9 kg.t⁻¹ e para aciaria = 16 kg.t⁻¹

Fonte: Adaptado de TAKANO et al. (2000).

4.1.2. Pó de aciaria elétrica (PAE)

Diante dos resíduos apresentados, o pó de aciaria segundo a ABNT NBR 10004/04, é classificado como resíduo perigoso de fonte específica (K061), o que justifica estudos de possíveis usos para esse material. Diante da alta quantidade gerada e de elevados custos para o descarte em aterros industriais

classe I, o pó de aciaria ganhou seu espaço no estudo de métodos de reciclagem ou de reuso (HAVLIK et al., 2005; SOFILIC et al., 2004).

É possível coletar o pó de aciaria elétrica através de filtros de mangas ou precipitadores eletrostáticos, conhecidos como sistemas de desempoeiramento, que são instalados afim de diminuir a poluição gerada no processo. Nos filtros são encontrados particulados e emissões gasosas que foram liberadas pelo forno elétrico a arco (FEA) (DUTRA; PAIVA; TAVARES, 2006; HAVLIK et al., 2005; SILVA, M.C., 2006; VIGANO et al., 2004).

Para o estudo da composição química do PAE é necessário analisar quais os elementos químicos oriundos do processo, já que de acordo com Silva, M. C. (2006) a constituição desse material irá variar de acordo com as peculiaridades do processo produtivo e principalmente com o material que passou pelo forno. O PAE é basicamente constituído de elementos provenientes da injeção dos finos de coque (C), do escorificante (Ca), do ferro-gusa (Fe e C), de ferro-ligas (Fe-Cr, Fe-Si), do refratário (Al, Mg) e principalmente da sucata (Na, S, Cl, K, Mn, Zn, Ni, Mo, Sn e O) (BREHM, 2004; SILVA et al., 2008; SILVA; OGASAWARA; ANDRADE, 2002; VIGANO et al., 2004).

Nos fornos elétricos a arco (FEA) ocorrem a fusão de sucata ferrosa e é durante esse processo que ocorre a geração do pó de aciaria e a emissão de gases. Assim, pode-se considerar a composição química básica mostrada na tabela 2 para esse resíduo:

Tabela 2. Composição química do Pó de Aciaria

Componente químico	Porcentagem na composição (%)
Óxidos de Ferro	49
Óxidos de Zinco	16
Óxidos de Cálcio	12
Óxidos de Silício	5
Óxidos de Manganês	3
Óxidos de Magnésio	2
Óxidos de Chumbo	2
Alumina	1,5

Fonte: Brehm (2004).

Segundo Brehm (2004) o processo produtivo no Brasil utiliza muita sucata galvanizada, visto que a reciclagem desse material ainda é pequena, sendo assim os pós gerados possuem baixo teor de zinco o que prejudica a viabilidade econômica dos processos de reciclagem para a recuperação deste elemento. Dessa forma uma classificação usual para o pó de aciaria é de acordo com o teor de zinco presente em sua composição química: pós com alto teor de zinco (acima de 15%), e pós com baixo teor de zinco (abaixo de 15%).

O PAE pode apresentar diferentes fases minerais, estudos mostram que as principais fases encontradas são: Magnetita (Fe_3O_4), Franklinita ($ZnFe_2O_4$) e Zincita (ZnO). De acordo com Takano et al., (2000) a quantidade de zincita presente no material aumenta conforme o teor de zinco no material aumenta, porém, estudos mostram que um material que contem 28% de zinco ainda apresenta uma relevante quantidade de ferrita em sua estrutura.

Segundo Mantovani (1998), para analisar as características físicas do pó de aciaria, utiliza-se análises granulométricas, morfológicas, de densidade e área específica. Onde é possível observar que 90% das partículas possuem tamanho menor que 10 μm e apresentam formatos esféricos. Devido ao alto teor de zinco algumas siderúrgicas têm utilizado o processo de recuperação do zinco e do chumbo, além da inertização e do descarte em aterros industriais. Em termos de Brasil, o país não possui plantas para reciclar o pó de aciaria consequentemente todo o pó gerado no processo produtivo é destinado aos aterros ou a empresas que reprocessam o material (sinterização).

O envio do material para aterros industriais gera elevados custos para a empresa, visto que o valor para a disposição do PAE está em torno de R\$ 300,00 por tonelada, segundo estudo realizado pela FIESP em 2003. Estima-se que a geração do PAE é em torno de 1,5% do aço produzido, com isso pode-se considerar que no Brasil a geração desse resíduo é em torno de 81,4 mil toneladas. Como solução para a reciclagem desse material tem-se estudado processos pirometalúrgicos e/ou hidrometalúrgicos. Os processos apresentam vantagens e desvantagens o que ocasiona ainda muitos estudos na área.

O tratamento pirometalúrgico é um processo antigo que consiste na recuperação do zinco, porém no Brasil quase não é utilizado devido aos altos custos de operação e alta geração de poluição do ar e sonora. (DUTRA; PAIVA; TAVARES, 2006; SILVA; OGASAWARA; ANDRADE, 2002; SILVA, M.C., 2006; SILVA et al., 2008).

Em relação ao tratamento hidrometalúrgico, o custo operacional é mais baixo e as plantas são mais flexíveis, porém como consequência, cada processo precisa ser alterado de acordo com cada resíduo (MAKKONEN et al., 2002). Nesse tratamento o maior campo de estudo é em relação a remoção da franklinita, visto que é um resíduo insolúvel de difícil remoção.

De acordo com Silva, Ogasawara e Andrade (2002) algumas técnicas vêm sendo utilizadas para o reaproveitamento de poeiras com elevados teores de ferrita de zinco na própria aciaria. Essa técnica já é utilizada com lamas de aciaria LD através de etapas pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas, formando uma rota híbrida. Assim, a solubilização do óxido de zinco para o reaproveitamento é feita por meio de duas etapas, uma de redução em altas temperaturas e outra de lixiviação alcalina.

4.2. POLÍMEROS

Polímeros são macromoléculas formadas pela repetição de muitos meros, que são unidades químicas iguais, desse conceito vem o significado da palavra polímero que vem do grego poli (muitos) e meros (iguais). Devido à grande gama de aplicação de polímeros em alguns casos utiliza-se da aplicação de aditivos que melhoram ou alteram as propriedades finais do material, propriedades essas que podem ser: modificadores de impacto, plastificantes, antioxidantes, foto-estabilizantes, estabilizantes de processo, lubrificantes, cargas minerais e corantes (PAOLI, 2008).

Diante desse cenário de grande utilização dos polímeros, foram criados polímeros sintéticos (plásticos e borrachas), além dos naturais já existentes como a seda, o couro e a madeira (KOLTZENBURG et al., 2017).

Além dessas considerações, os polímeros são classificados como termoplásticos e termorrígidos. Os polímeros termorrígidos, também conhecidos como termofixos, apresentam melhores propriedades mecânicas e elásticas, melhor estabilidade dimensional e boa resistência química quando comparados aos termoplásticos. É um material de baixos custos de produção, processados na maioria das vezes em estado líquido, se tornando sólido através da adição de agentes de cura ou pelo efeito da temperatura (MARINUCCI, 2011).

Já os polímeros termoplásticos são conhecidos pela facilidade de serem moldados já que amolecem e fluem quando a temperatura e a pressão sofrem um aumento considerável. Após esse quadro, quando a temperatura e pressão voltam a estado inicial, o polímero assume permanente a forma em que foi moldado. Quando exposto a novas alterações de temperatura e pressão esse processo se reinicia (CANEVAROLO, 2010; THIO, Y. S. et al.).

A quadro 2 apresenta tipos e aplicações dos Termoplásticos e Termofixos.

Quadro 2. Tipos de Polímeros

Tipos	Aplicações
TERMOPLÁSTICOS	
PET – Polietileno Tereftalato	Frascos de refrigerantes, produtos farmacêuticos, produtos de limpeza, mantas de impermeabilização e fibras têxteis.
PEAD – Polietileno de Alta Densidade	Embalagens para cosméticos, produtos químicos e de limpeza, tubos para líquidos e gás, tanques de combustível.
PVC – Policloreto de Vinila	Frascos de água mineral, tubos e conexões, calçados, encapamento de cabos elétricos, equipamentos médicos-cirúrgicos, esquadrias e revestimentos.
PEBD – Polietileno de Baixa Densidade	Embalagens de alimentos, sacos industriais, sacos para lixos, lonas agrícolas, filmes flexíveis para embalagens e rótulos.
PP – Polipropileno	Embalagens de massas e biscoitos, potes de margarina e seringas descartáveis, equipamentos médicos-cirúrgicos, fibras e fios têxteis, utilidades domésticas e autopeças.
PS – Poliestireno	Copos descartáveis, placas isolantes, aparelhos de som e TV, embalagem de alimentos e revestimento de geladeira.
HIPS	Peças injetadas, eletroeletrônicos, construção civil, materiais escolares e de escritório, refrigeração, brinquedos e etc.
TERMORRÍGIDOS	
PU – Poliuretano EVA de Vinil – Poliacetato Etileno	Solados de calçados, interruptores, peças industriais elétricas, peças para banheiros, pratos, travessas, cinzeiros, telefones e etc.

Fonte: Adaptado de Roda (2013).

4.2.1. Polipropileno

Quando se fala em polímeros termoplásticos o polipropileno, ou como é conhecido PP, é um dos mais importantes, devido a sua versatilidade de processamento, ótimas propriedades mecânicas e baixo custo. É obtido pelo gás propileno (C_3H_6) através de um processo de poliadição, no qual as moléculas insaturadas de monômeros são incorporadas uma a uma formando uma cadeia em que os monômeros se combinam através de uma ligação covalente, mantendo a molécula resultante unida (CALLISTER Jr., 1994).

O polipropileno é um dos principais polímeros utilizados como matriz de compósitos diante das características que apresenta, sendo de fácil processamento, com baixo custo de produção, grande disponibilidade e as próprias propriedades mecânicas (VELDE et al., 2001).

O PP se apresenta com uma coloração branca e opaca, elevada densidade e resistência química a solventes, além de um baixo custo de produção, o que gera um produto final com diferentes aplicações (BONELLI et al., 2001). Pode-se considerar um produto de vasta utilização em embalagens e sacos em geral, alguns tipos de pisos, materiais hospitalares, peças para automóveis (GUERRICA-ECHEVARRIA et al., 1998), eletrodomésticos e brinquedos (MANO, 1985; MANO, 1996).

A temperatura de transição vítrea, T_g , está ligada a estrutura molecular do polímero, sendo essa estrutura mais ou menos rígida apresenta então sua T_g maior ou menor. A T_g pode ser abaixada devido a substituições assimétricas ou plastificantes, porém pode ser elevada devido a fortes interações intramoleculares e intermoleculares e a ocorrência de grandes volumes rígidos de grupos laterais. Quando se considera condições de temperatura acima da T_g é preciso avaliar o tempo, pois este altera significativamente as propriedades dos termoplásticos, isso ocorre devido ao fato que a orientação e movimentação das cadeias ocorrem em busca de um novo estado de equilíbrio já que as macromoléculas se encontram sob tensão e com isso energia térmica adequada para esse movimento (STRAPASSON, 2004).

Concluindo, para se prever o comportamento mecânico de um polímero é necessário considerar essas três variáveis: Estrutura, tempo de solicitação do esforço e temperatura (VAN KREVELEN, 1990).

Alguns polímeros têm suas características determinadas pelo processo de moldagem, através da morfologia cristalina. A cristalinidade do PP, a morfologia, a massa molar e a regularidade da cadeia são influenciadas pela síntese do material, sendo que algumas mudanças podem ser notadas após a fase de pós-cristalização. As regiões amorfas ligam as regiões semi-cristalinas do PP, ligações essas que influem nas propriedades do material, bem como processos de recristalização em altas temperaturas podem afetar a resistência ao impacto e a densidade do PP (FIEBIG et al., 1999).

Entre as propriedades mais comuns do PP, pode-se destacar a coloração transparente, alta taxa de processabilidade, alta rigidez e baixo peso específico, o que leva a possibilidade de diversos processos de reciclagem. São diversos o uso desse polímero em vários setores, porém a ampliação dessa aplicação pode ser dada ao uso de fibras como reforço o que aumenta a faixa de temperatura de uso do PP. Pode-se citar como principais usos: indústria automobilística, utilidades domésticas, carpetes, embalagens e tecidos (THIO et al., 2002).

A produção do polímero PP ocorre de compostos com reforços ou não, através de moldagens, injeção, sopro ou extrusão, porém tem-se também moldagem de espumas essas são reforçadas com fibra de vidro. Essas propriedades são encontradas na tabela 3.

Tabela 3. Propriedades do PP.

Propriedades	Valor
Densidade (g.cm⁻³)	0,89 – 0,93
Índice de fluidez (Viscosidade) (g.10min⁻¹)	0,27 – 50
Tensão de ruptura (MPa)	25 – 40
Alongamento na ruptura (%)	1,5 – 600
Dureza Rockwell (HR)	80 – 110
Resistência ao Impacto: Notch Izod (J.m⁻¹)	5,3 – 100
% absorção de água . 24 h⁻¹	0,01 – 0,03
Resistência a tração no escoamento (MPa)	35
Temperatura de deflexão térmica em °C	98

Fonte: Braskem (2014).

O PP tem facilidade à fotodegradação quando exposto ao tempo (BONELLI et al., 2001). A energia absorvida por influência de calor, luz e tensões mecânicas leva a quebra das ligações entre o carbono e o hidrogênio do carbono terciário, pois o mesmo possui uma ligação mais fraca quando comparado aos demais, o que gera radicais livres que irão reagir com o oxigênio formando peróxidos e hidroperóxidos, estes produzem radicais livres levando a cisão das cadeias (HINSKEN et al., 1991; KELEN, 1983; BILLINGHAM E CALVED, 1983; WHITELEY et al., 1982). As alterações nas propriedades do polímero em decorrência da fotodegradação resultam em um material com baixas propriedades mecânicas, além de alterações nas propriedades físicas, principalmente na coloração, que é alterada para tons amarelos e opacos (BILLINGHAM E CALVED, 1983; KELEN, 1983).

4.2.2. Reciclagem do polipropileno

A reciclagem do polipropileno é realizada seguindo os passos a seguir:

- Separação de material de acordo com sua utilização;
- Moagem e lavagem do material;
- Exposição do material a altas temperaturas (160°C – 170°C) para seu derretimento;
- Possibilidade de uso de corantes no material;
- Injeção do mesmo em moldes.

Por meio desse procedimento básico de reciclagem do polipropileno é possível obter facilmente um novo produto com diferentes aplicações, cores e formatos.

Aurrekoetxea et al. (2001) em seus estudos fez uso do método do reprocessamento (injeção) para avaliar as propriedades mecânicas e características do polipropileno reciclado. Foi possível notar alterações consideráveis nas propriedades, como a redução da viscosidade e o aumento da cristalinidade, além do aumento do módulo elástico, da tensão de escoamento e redução nos valores de alongamento na ruptura e a tenacidade.

Rolim (2000) classificou os processos de reciclagem em quatro categorias, sendo uma delas a reciclagem pré-consumo, que é usualmente chamada de reciclagem primária, é quando ocorre na indústria que gerou o resíduo ou em empresas transformadoras, ocorre quando o material a ser reciclado já está limpo, isto é livre de impurezas. Diante desse processo obtém-se materiais de ótima qualidade, podendo ser comparado aos obtidos quando utiliza-se resina virgem.

No processo de reciclagem secundária, ou reciclagem pós-consumo, objetiva-se converter plásticos descartados, estes são constituídos por diversos materiais e resinas gerando diferentes propriedades e conseqüentemente maiores cuidados durante o processo. A reciclagem terciária, conhecida como reciclagem química, é um processo mais simples por não exigir uma seleção e limpeza do material. Seu objetivo é a decomposição do resíduo através de processos químicos e/ou térmicos, visando a obtenção de produtos notáveis e com uma alta qualidade (ROLIM, 2000).

A reciclagem quaternária é o processo de destruição do resíduo plástico através da combustão e como conseqüência obtém-se energia térmica, por esse motivo o processo também é conhecido como reciclagem energética. Sendo considerado um dos processos mais importantes por reaproveitar a energia gerada, em outros processos que geram energia as mesmas não são aproveitadas e utilizadas, o que torna um diferencial deste processo.

4.2.3. Poliestireno de Alto Impacto (HIPS)

Segundo Grassi (2001) o HIPS é formado por uma matriz rígida e contínua com poliestireno (PS) grafitizado e domínios elastoméricos dispersos e que são comumente compostos por polibutadieno (PB).

Essa estrutura composta por poliestireno e polibutadieno é responsável pelas características específicas desse material, como por exemplo uma alta resistência ao impacto, um aumento do alongamento até a ruptura e alta resistência à fratura quando comparado ao PS puro. O material começa a sua degradação nas ligações duplas de PB que através de reações em cadeia afetam a matriz.

Quando essa degradação se inicia a propriedade mais afetada é o alongamento até a ruptura, o que torna o material menos deformável e mais frágil (NUNES et. Al, 2016; VILAPLANA et al, 2010; VILAPLANA et al., 2011).

Segundo Morales et al. (2006) e Aiamsen et al. (2003), a modificação desse material pode afetar diretamente seu desempenho devido à presença de múltiplos componentes e múltiplas camadas. Alguns parâmetros devem ser analisados durante qualquer modificação, como por exemplo, a massa molecular que influencia a organização das cadeias e a viscosidade do polímero, resultando em características finais distintas. Já a tenacidade do HIPS pode ser afetada por parâmetros ligados à fase borracha: fração volumétrica dessa fase densidade de ligação cruzada, morfologia da partícula, nível de adesão com a matriz, tipo de borracha e, os mais importantes, tamanho e distribuição de partículas de borracha, pois definem algumas características de acabamentos superficiais e transparência destes materiais, além de ser crítico para as propriedades mecânicas.

De acordo com Grassi (2001), pode-se considerar o HIPS um material com diversas aplicações. É possível encontra-lo, por exemplo, em artigos industriais como peças internas e externas de aparelhos eletrônicos, na área de telecomunicações, cabos e armações para guarda-chuvas, gabinetes para geladeiras, televisões, microcomputadores, grades para ar condicionado, além da vasta utilização nas indústrias de calçados em saltos e em embalagens contra choques. O HIPS pode ser encontrado também em utensílios menos complexos, como brinquedos, artigos descartáveis e utilidades domésticas.

4.2.4. Utilização de polímeros na matriz de compósitos

Os termoplásticos *commodities* são os plásticos de uso geral já que esses apresentam os maiores resultados em termos de produção. Entre estes pode-se citar o policloreto de vinila, o PET, o polietileno, o poliestireno e o polipropileno (WIEBECK & HARADA, 2012)

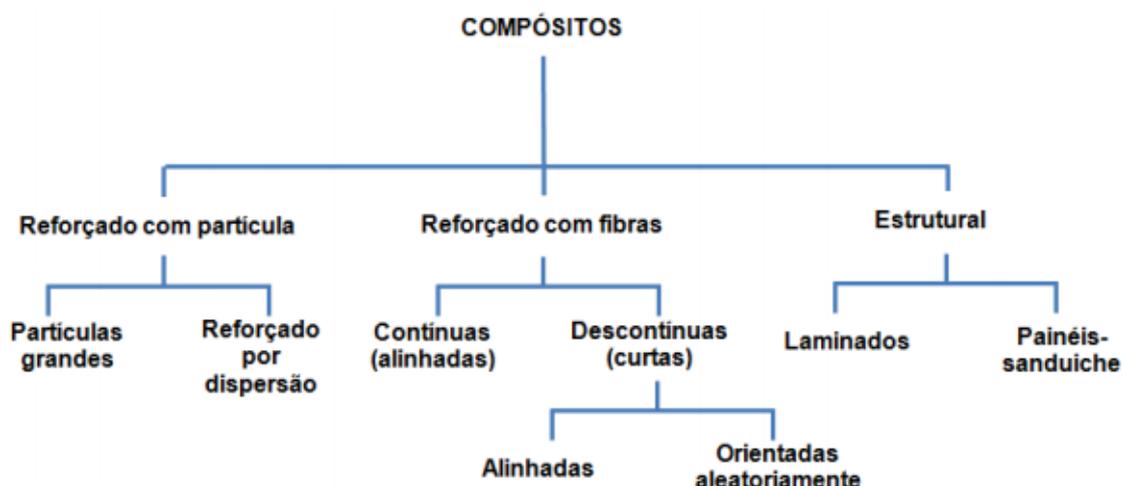
Diversos estudos têm sido apresentados utilizando uma matriz de polipropileno e diferentes fibras naturais para a obtenção do compósito, porém o presente trabalho utilizará reforços oriundos da indústria siderúrgica, de forma que será possível uma comparação do uso da matriz polimérica com outros reforços.

4.3. COMPÓSITOS

Os compósitos são uma combinação de pelo menos dois materiais em fases distintas, facilmente identificadas por apresentarem uma interface entre si: matriz e reforço (NETO; PARDINI, 2006; NOGUEIRA; MARLET; REZENDE, 1999). Em geral, a matriz é uma fase contínua que distribui a carga pelo compósito e o reforço uma fase dispersa responsável por resistir aos esforços aos quais o material é submetido (MARINUCCI, 2011).

A classificação do compósito é feita baseada no reforço já que sua resistência é diretamente influenciada pela sua geometria e orientação. Por este motivo, pode-se citar três diferentes classes, conhecidas como: Compósito de reforço particulado (sendo esses esféricos, cúbicos, tetragonais, de forma regular ou de forma irregular), compósito de fibras descontínuas (sendo essas unidirecionais ou aleatórias) e compósitos reforçados com fibras contínuas, conforme a figura 4 (FINKLER, 2005; MARINUCCI, 2011).

Figura 4. Classificação dos materiais compósitos.



Fonte: Adaptado de LEVY NETO & PARDINI (2006).

Em se tratando de compósitos, inúmeras são as matrizes que podem ser utilizadas. As mais comuns são de natureza polimérica, obtidas a partir de polímeros termoplásticos ou termorrígidos. As diferenças entre esses materiais são facilmente observadas no comportamento térmico e mecânico do compósito (CALLISTER, 2016).

Já os materiais que são utilizados para o reforço devem apresentar resistência, rigidez e maleabilidade, já que são utilizados para suportar as altas cargas e impossibilitar a ocorrência de deformações acima dos limites aceitáveis (THAKUR et al., 2017).

Com o aumento do uso de diversos materiais, as resinas termoplásticas não se comportam de maneira diferente, em 2012 foram consumidas 6,5 milhões de toneladas desse material.

Este consumo implica em uma grande necessidade de reciclagem do polímero, a reciclagem primária (somente uma resina) é o processo mais comum no Brasil. No país em torno de 21,7% do plástico foram reciclados em 2011, implicando em 953 mil toneladas por ano. No mesmo ano, o país que mais reciclou plásticos foi a Suécia com uma reciclagem de 53%, logo após a Alemanha com 33%, a Suécia em terceiro lugar com 33,2%, a Bélgica reciclou 29,2% e Itália 23,5%.

Considerando que os outros 88,3% foram descartados depois de usados, isto é, depositados em lixões, por não serem biodegradáveis podemos considerar que permanecerão ali durante muitos anos (MILAGRES et al., 2006). Atualmente valoriza-se materiais com baixos custos e também com o apelo do meio ambiente. Em relação a situação do meio ambiente leva-se em conta aspectos renováveis, biodegradáveis e a possibilidade de reciclagem que possam ser apresentados pelo material (MONTEIRO et al., 2006).

A possibilidade de se desenvolver um material apropriado a diversas necessidades ocorreu com a criação de materiais compósitos, que apresentam diferentes aplicações em industriais, como aeronáutica, aeroespacial, de transportes, de material bélico, de material esportivo, entre outros (ALVES et al., 2004).

De acordo com Rezende (2007) polímeros tiveram uma grande alta em sua utilização como matriz para materiais compósitos, com uma grande apelação mercadológica, utilizados em aplicações industriais, particularmente na indústria aeronáutica, onde é necessário a busca por alta resistência e baixa massa específica. Neste ramo é necessário um maior estudo do comportamento mecânico do compósito, já que sua aplicação é na fabricação de peças estruturais críticas (estabilizadores horizontais, estabilizadores verticais e revestimento de asas). Baseado nesses estudos as propriedades desses materiais devem ser caracterizadas com cuidado, como acontece com os metais. Desta forma, é necessário o entendimento de correlações entre as análises de falha de materiais metálicos e compósitos.

Para o desenvolvimento do compósito é necessário um processamento do resíduo que será utilizado como reforço, como o PAE é um resíduo sólido que pode apresentar diversos tamanhos e sujeiras, o mesmo deve ser preparado e peneirado para ser processado no misturador.

Da mesma forma o polipropileno deve sofrer uma preparação para receber o PAE e ser processado em um misturador termocinético. Após a obtenção do compósito alguns ensaios são necessários para caracterizar o compósito quanto as propriedades físicas, químicas, morfológicas, térmicas e mecânicas.

Um ensaio muito utilizado quando se necessita determinar propriedades do material no estado cristalino, da unidade celular do cristal e sua simetria é a difração de raio-X. O ensaio é feito através da incidência de um feixe do raio-X em direção ao material, causando assim uma interferência construtiva. Tal procedimento só ocorre se o comprimento de onda da radiação é o mesmo do espalhamento (CULLITY, 1967).

Para a análise das estruturas presentes no material utiliza-se microscópios ópticos e de varredura por sonda, que são muito utilizados em microscopia. Para isso utiliza-se equipamentos fotográficos afim de se obter a foto micrografia (CALLISTER, 2008).

Na microscopia eletrônica de varredura é possível observar as características da superfície do material, esse processo é realizado através de uma varredura da superfície através de um feixe de elétron, que é refletido e coletado, essa coleta dos feixes sobre o tubo de raios catódicos é exibida na tela em forma de resultado.

De acordo com Lopes (2005) a termogravimetria é uma técnica de análise térmica onde durante o processo é possível determinar uma variação de massa em função da temperatura, utilizando um programa controlador de temperatura. Os métodos termogravimétricos podem ser dinâmicos, isotérmicos e quase-isotérmicos, que se diferenciam pela forma de aumento da temperatura em relação a perda de massa da amostra.

Segundo Souza (2011) quando a amostra sofre mudanças de estado físico ou químico é quando ocorre a liberação ou absorção de calor. Dessa forma o ensaio de calorimetria exploratória diferencial (DSC) mede as variações de energia térmica para manter o equilíbrio das temperaturas e do material de referência. Sendo uma técnica onde o material é submetido a uma temperatura programada e controlada, dessa forma é possível medir a diferença de energia fornecida em função da temperatura (IONASHIRO, 2004).

Dos ensaios que avaliam as propriedades mecânicas do material um dos mais utilizados é o de tensão-deformação realizado sobre carga de tração. O mesmo é realizado através de uma carga de tração uniaxial aplicada gradativamente nas extremidades do corpo de prova.

A realização deste ensaio visa medir a variação no comprimento (l) em função da carga (F) aplicada. Obtém-se então um resultado em forma de um gráfico da alteração da carga em relação ao alongamento (SOUZA, 1982).

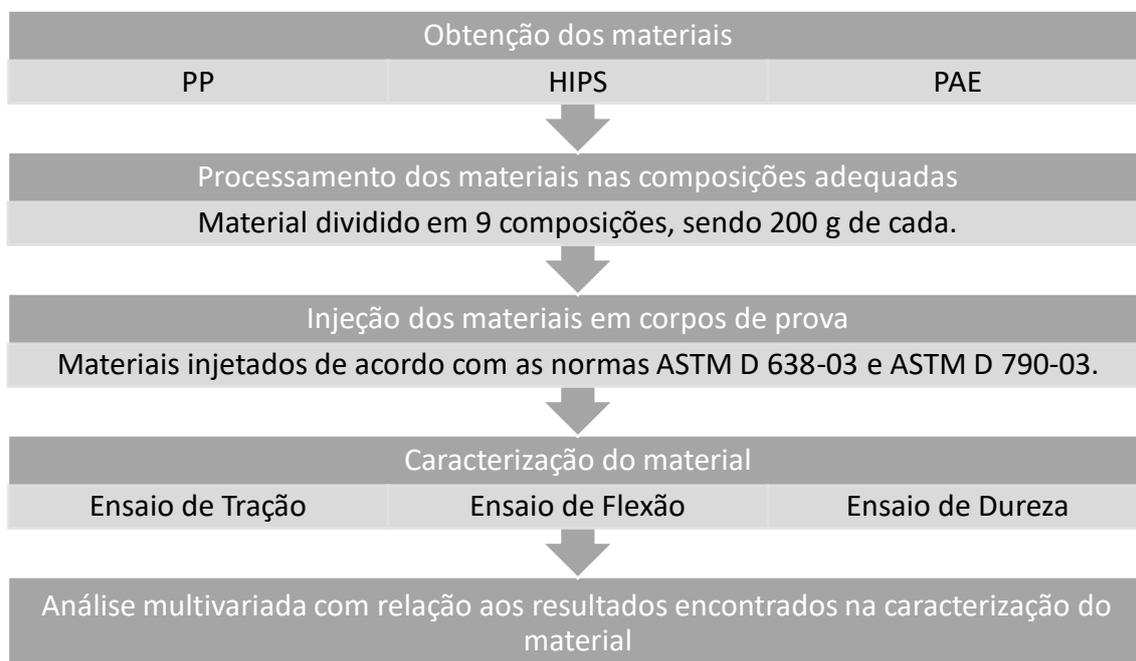
O ensaio de dureza representa a resistência de um material ao risco ou a formação de uma moosa permanente, quando comprimido por outro material ou marcadores específicos para cada tipo de ensaio. O resultado do ensaio é obtido através da marca feita no material, bem como sua profundidade. Essas medidas realizadas são então trabalhadas afim de se obter a medida da dureza em função das características da impressão deixada no material. (GARCIA et al., 2000).

Seguindo a linha de estudo de Garcia (2000) um ensaio mais fácil de se realizar devido a necessidade de corpos de prova mais simples é o ensaio de flexão, o mesmo é realizado tanto em materiais frágeis como em resistentes. É utilizado afim de se obter a resistência a flexão e o módulo de young, porém em materiais frágeis pode-se obter também a resistência ao dobramento.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Os Materiais foram obtidos, processados e analisados conforme diagrama exposto na figura 5:

Figura 5. Processo para obtenção dos resultados.



Fonte: Autora (2020).

5.1. MATERIAIS

5.1.1. Polímeros

Para o presente estudo de um material compósito optou-se por utilizar o polipropileno como matriz e a adição de HIPS ao material final.

A escolha do polipropileno como matriz é justificada diante da grande oferta do produto no mercado, e ainda diante das propriedades mecânicas necessárias bem como a facilidade de processamento desse material. Para o presente trabalho o material foi obtido por meio de uma coleta efetuada através basicamente de utensílios e embalagens domésticas. As mesmas foram higienizadas, trituradas em um moinho de facas e armazenadas para a preparação do compósito.

Já a escolha de acrescentar HIPS ao material se deu devido às propriedades mecânicas do material, acreditando-se afetar positivamente a propriedade final do material compósito, uma vez que o pó de aciaria elétrica pode comprometer algumas propriedades mecânicas importantes devido à sua fraca interação com as matrizes poliméricas. O HIPS utilizado foi comprado em sua forma virgem.

5.1.2. Pó de aciaria elétrica

O pó de aciaria elétrica utilizado no presente estudo foi coletado em um filtro localizado em uma grande indústria siderúrgica na região sul fluminense. O material primeiramente passou por uma seleção granulométrica (60 mesh) para retirar qualquer resíduo, onde utilizou-se somente o PAE obtido do pó coletado.

5.2. MÉTODOS

5.2.1. Preparação do compósito

Os compósitos foram processados com diferentes proporções, descritas na tabela 4, utilizando o pó de aciaria elétrica (PAE), polipropileno (PP) e poliestireno de alto impacto (HIPS).

Tabela 4. Composição dos compósitos.

Amostras	Quantidade (%)		
	PP	PAE	HIPS
PP₉₀PAE₀HIPS₁₀	90	0	10
PP₈₀PAE₀HIPS₂₀	80	0	20
PP₉₀PAE₁₀HIPS₀	90	10	0
PP₈₀PAE₁₀HIPS₁₀	80	10	10
PP₇₀PAE₁₀HIPS₂₀	70	10	20
PP₈₀PAE₂₀HIPS₀	80	20	0
PP₇₀PAE₂₀HIPS₁₀	70	20	10
PP₆₀PAE₂₀HIPS₂₀	60	20	20

Fonte: Autora (2020).

Os materiais foram pesados afim de se obter 200 g de cada mistura descrita na tabela acima. Os materiais pesados foram colocados em um misturador homogeneizador de plásticos “Dryser” da MH Equipamentos, modelo MH-50H, disponível no Laboratório de Processamento de Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda, a mistura entre os materiais ocorreu dentro da cápsula bi-partida com arrefecimento de água até ser possível obter o compósito homogeneizado.

Em seguida, os compósitos foram triturados em moinho de facas da marca Plastimax.

Para a obtenção dos corpos de prova (CP), os compósitos após triturados foram injetados a 300°C em uma injetora da marca RAY RAM, modelo TSMP.

Foram injetados CP's para ensaios de tração e de flexão, que seguem respectivamente as normas ASTM D 638-03 (13 mm de largura, 165 mm de comprimento e 3 mm de espessura) e Norma ASTM D 790-03 (13 mm de largura, 130 mm de comprimento e 6 mm de espessura). Na figura 6 é possível visualizar um dos CP's injetados para o ensaio de tração.

Figura 6. Corpo de prova para o ensaio de tração com 10% de PAE e 10% de HIPS.



Fonte: Autora (2020).

5.2.2. Ensaio de tração

Os corpos de prova injetados foram submetidos ao ensaio de tração utilizando uma Máquina Universal de tração, da marca EMIC DL-10000 no laboratório do centro universitário de Volta Redonda – UniFOA com uma célula de carga 5 kN à uma velocidade de 5 mm.min⁻¹ em temperatura ambiente.

Para o ensaio foram utilizados 5 corpos de prova para cada compósito, com parâmetros baseados na norma ASTM D 638-03. Com os ensaios, foram avaliadas as propriedades mecânicas de resistência à tração e módulo de elasticidade em tração, considerando um comprimento inicial do CP de $L_0 = 60$ mm.

5.2.3. Ensaio de flexão

O ensaio de flexão foi realizado no Laboratório de Ensaio Mecânicos do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA na Máquina EMIC DL-10000. Foram ensaiados 5 corpos de prova para cada compósito, com parâmetros baseados na norma ASTM D 790-03, com células de carga de 100 kN, velocidade de ensaio de $5\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ e uma distância de apoios de 80 mm.

Nesse ensaio foi possível avaliar propriedades mecânicas dos compósitos como resistência a flexão e módulo de elasticidade em flexão.

5.2.4. Ensaio de Dureza Shore D

Para o ensaio de dureza utilizaram-se corpos de prova injetados nos moldes da norma ASTM D-790-03. Foi utilizado o durômetro Portátil Digital – Shore D, disponível no Laboratório de Ensaio Mecânicos do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA. As normas aplicadas para o ensaio são as ISO 7619, ISO 868, STM D 2240-01 e JIS K6253, com uma resolução de 0,1 Shore D e exatidão e torno de 1 Shore D.

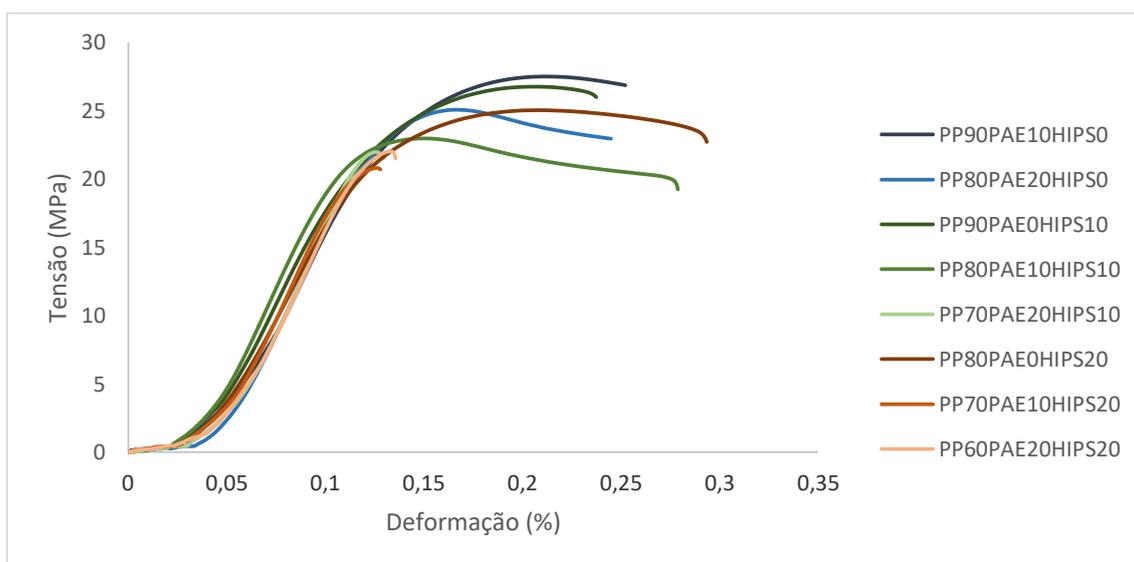
O ensaio foi realizado com a penetração de uma agulha de aço onde foi medida a profundidade de uma retração do material. Foram realizadas 3 medições em cada CP, 5 CPs de cada composição, para utilizar-se a média desses valores como resultado da dureza Shore D para o compósito.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração foi realizado para observar o comportamento mecânico do compósito, bem como a influência dos teores de PAE e de HIPS nas propriedades. Na figura 7 é possível verificar o resultado dos ensaios de tração realizados em todas as composições.

Figura 7. Ensaio de tração curva Tensão x Deformação



Fonte: Autora (2020)

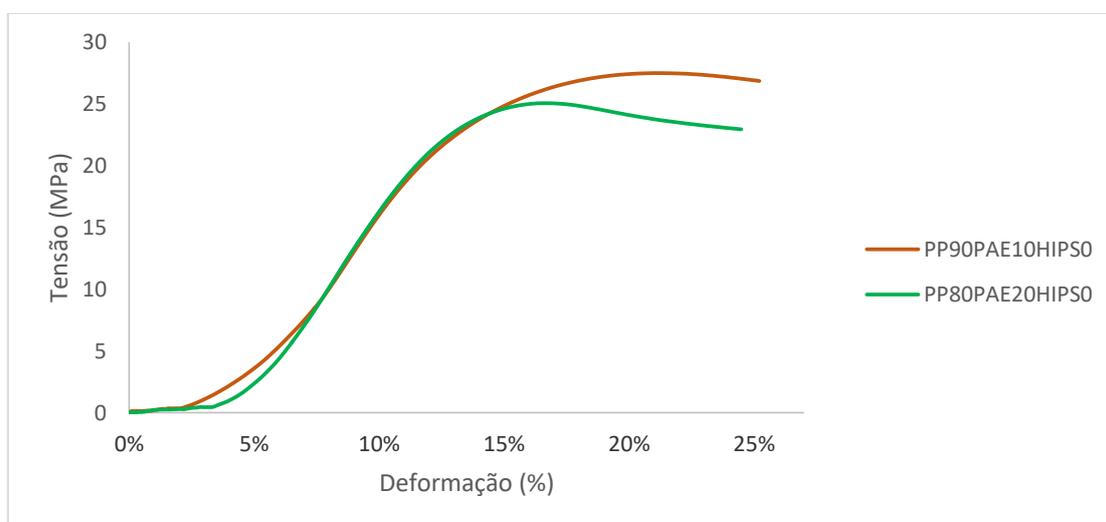
Para uma melhor avaliação, os resultados a partir dos gráficos tensão x deformação estão apresentados separadamente de acordo com o teor de HIPS presente em cada material, para que seja possível verificar o comportamento do material conforme aumenta-se o teor de pó de aciaria elétrica nos compósitos.

As curvas apresentadas nas figuras 7 a 8 revelam um comportamento típico de polímeros, onde se observa uma curva que se inicia com uma deformação elástica, seguida por escoamento e termina com uma região plástica (MARINUCCI, 2011).

Os compósitos apresentados, independentemente de sua composição, mostraram um comportamento similar ao descrito na literatura por Strapasson (2004) para polímeros termoplásticos, sendo assim, é importante a comparação das características mecânicas de cada composição como tensão máxima, limite de escoamento e tenacidade dos materiais.

Na figura 8 pode-se observar o comportamento dos compósitos com 0% de HIPS, podendo comparar as curvas com 10% e 20% de PAE. Sendo possível verificar que o aumento do PAE influenciou a tenacidade do material, visto que a área abaixo da curva diminuiu, sendo assim pode-se inferir que o compósito com 20% de PAE é menos tenaz que material com 10%.

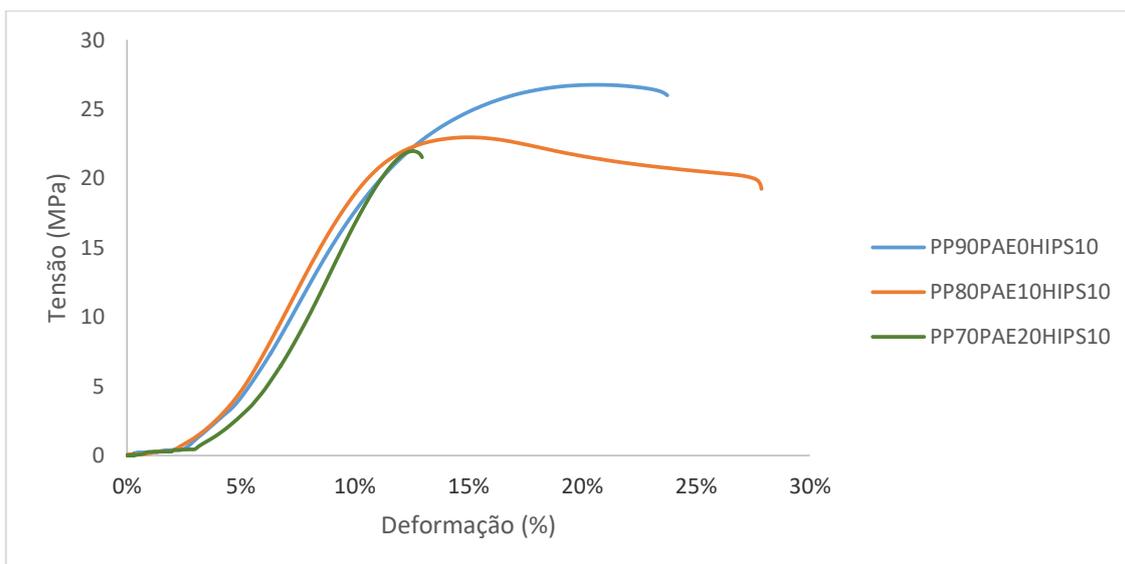
Figura 8. Tensão x Deformação dos compósitos com 0% de HIPS.



Fonte: Autora (2020).

A inclusão do HIPS no compósito aumentou a deformação do material, alongando a zona elástica e influenciando também o módulo de elasticidade. Pela figura 9, pode-se observar que o teor de PAE não alterou a zona elástica dos compósitos, porém continua se observando que o aumento desse teor afeta a tenacidade dos mesmos.

Figura 9. Tensão x deformação dos compósitos com 10% de HIPS.

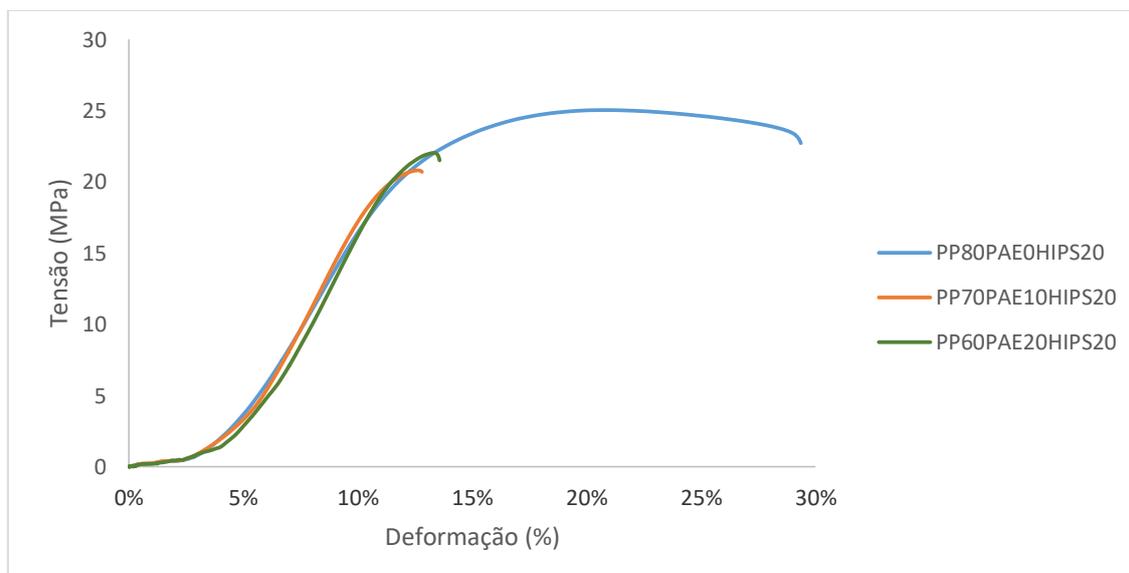


Fonte: Autora (2020).

Na figura 10 pode ser observa-se os compósitos com 20% de HIPS, onde fica clara a influência do PAE na redução da tenacidade do material.

Os materiais com teores de 10% e 20% de PAE apresentam uma diminuição na área abaixo da curva, quando comparados ao material com somente PP e HIPS.

Figura 10. Tensão x deformação dos compósitos com 20% de HIPS.



Fonte: Autora (2020).

Além disso, é possível verificar na tabela 5 um pequeno aumento no módulo de elasticidade com o acréscimo de PAE na composição. Contudo, verifica-se, também, uma redução na tensão máxima suportada em tração, o que indica que o material, apesar de mais rígido, torna-se menos resistente com a adição de PAE. Por conta destes resultados, foi analisada a adição de HIPS à composição, de modo a compatibilizar melhor as fases do compósito e, dessa forma, contribuir para o aumento nas propriedades mecânicas.

Comparando as amostras com 0% e 10% de HIPS observa-se o aumento do módulo de elasticidade causado pela inserção do HIPS, mas também pode-se verificar o aumento do módulo de elasticidade com o aumento do teor de PAE e conseqüentemente a queda da tensão máxima nos compósitos.

Ainda analisando a tabela 5 observa-se um aumento significativo de 11% no módulo de elasticidade após a inserção do PAE no compósito com 20% de HIPS (entre as amostras $PP_{90}PAE_0HIPS_{10}$ e $PP_{80}PAE_{10}HIPS_{10}$). Porém a variação do teor de PAE não afeta esse valor, gerando somente uma queda não significativa na tensão máxima do material. Queda essa que também pode ser explicada pela queda do teor de PP na composição do compósito final.

Tabela 5. Dados obtidos do ensaio de tração para o compósito.

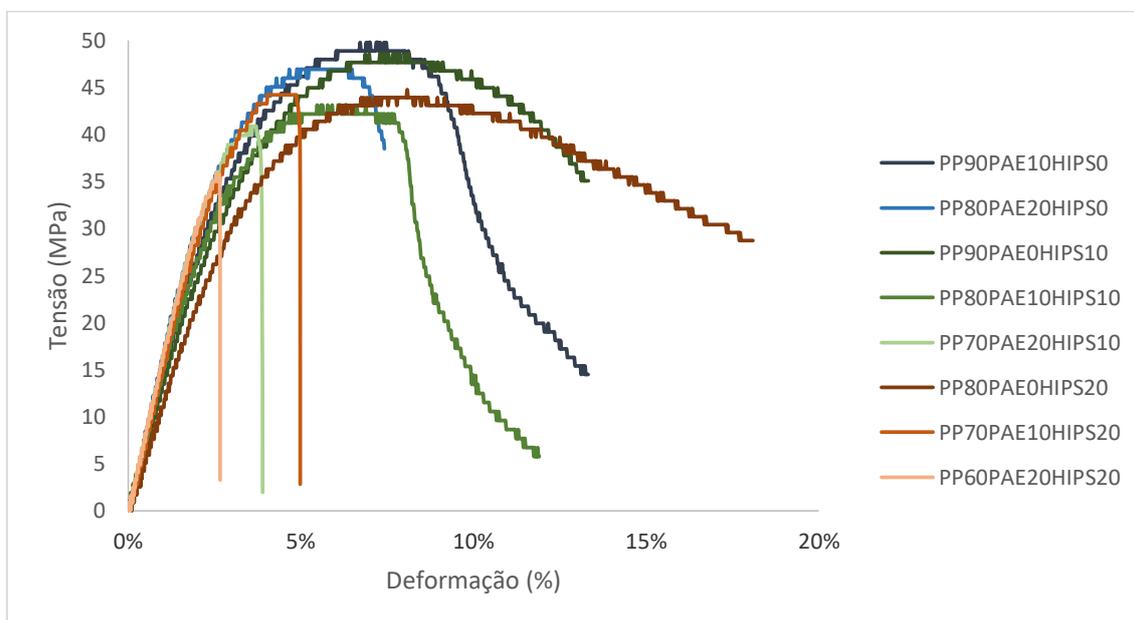
Amostra	% PP	% PAE	% HIPS	Módulo de elasticidade (MPa)	Tensão Máxima (MPa)
PP₉₀PAE₁₀HIPS₀	90	10	0	301 ± 24,78	28 ± 1,25
PP₈₀PAE₂₀HIPS₀	80	20	0	317 ± 12,08	25 ± 0,47
PP₉₀PAE₀HIPS₁₀	90	0	10	293 ± 3,30	27 ± 0,47
PP₈₀PAE₁₀HIPS₁₀	80	10	10	314 ± 8,50	23 ± 0,47
PP₇₀PAE₂₀HIPS₁₀	70	20	10	333 ± 12,28	22 ± 0,47
PP₈₀PAE₀HIPS₂₀	80	0	20	283 ± 4,78	25 ± 0,47
PP₇₀PAE₁₀HIPS₂₀	70	10	20	316 ± 8,22	21 ± 0,82
PP₆₀PAE₂₀HIPS₂₀	60	20	20	316 ± 34,55	22 ± 2,16

Fonte: Autora (2020).

6.2. ENSAIO DE FLEXÃO

Realizou-se o ensaio de flexão com o intuito de obter-se o módulo de flexão e o limite de resistência a flexão, os resultados obtidos são observados na curva tensão x deformação na figura 11.

Figura 11. Ensaio de flexão curva Tensão x Deformação

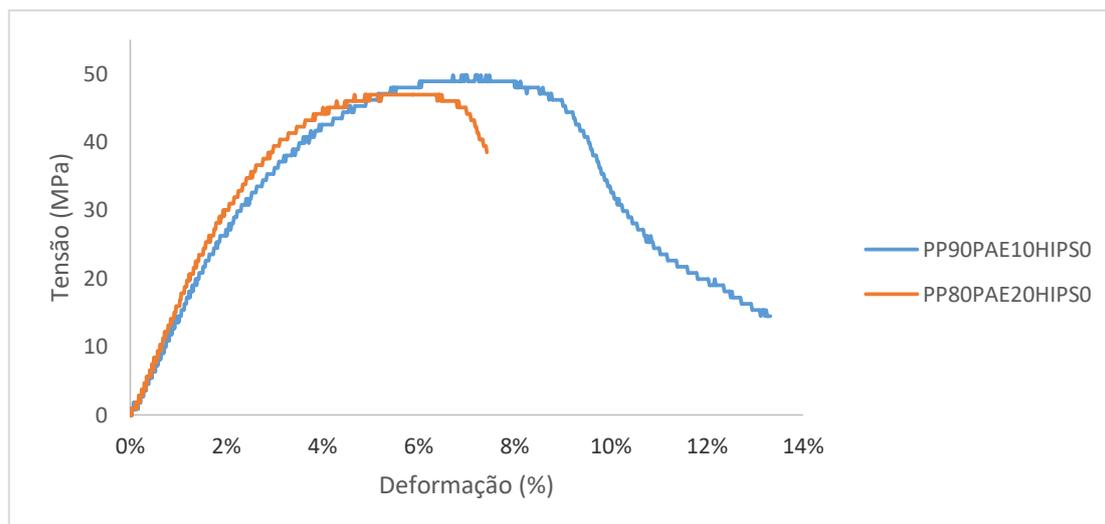


Fonte: Autora (2020).

Da mesma forma que ocorreu para as propriedades em tração, para uma melhor análise dos resultados de flexão, os mesmos estão apresentados pelo teor de HIPS no material sendo assim possível analisar a influência do teor do PAE no material.

Na figura 12, pode-se comparar o compósito com teor variável de Pó de aciarria elétrica e polipropileno, é possível ainda observar a alteração causada por 10% de PAE no compósito.

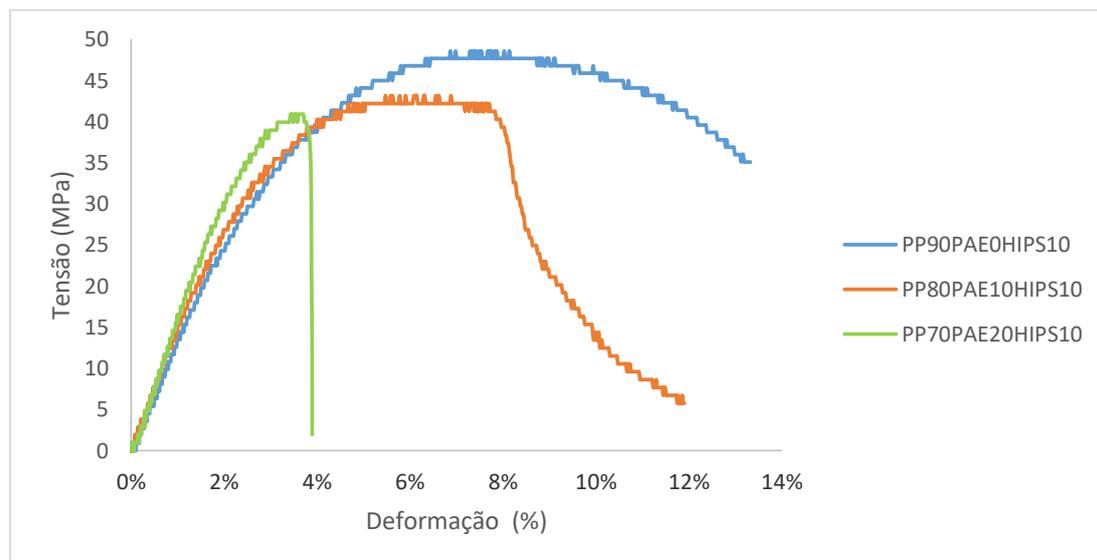
Figura 12. Diagrama Tensão x Deformação dos compósitos submetidos ao ensaio de flexão com 0% de HIPS.



Fonte: Autora (2020).

Na figura 13 é possível observar as amostras com teor de 10% de HIPS e teores variáveis do pó de aciaria elétrica. É possível confirmar a grande influência do PAE no compósito, já que o comportamento das curvas se repete independente do teor de PP e de HIPS.

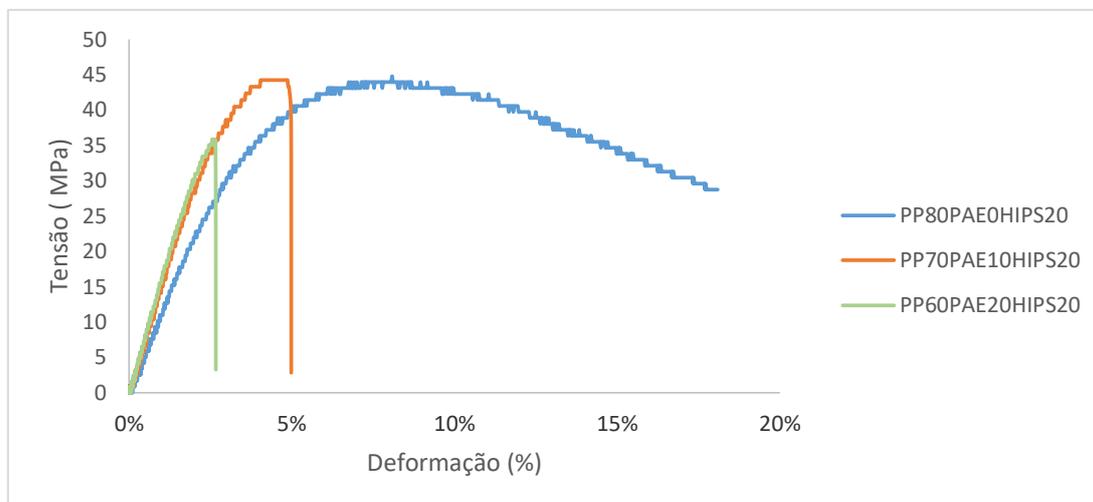
Figura 13. Diagrama Tensão x Deformação dos compósitos submetidos ao ensaio de flexão com 10% de HIPS.



Fonte: Autora (2020).

Na figura 14 e na tabela 6 é possível observar o diagrama tensão x deformação com as amostras de 20% de HIPS, o que se observa é que não aparenta uma alteração significativa para as amostras com 10% de HIPS. Já os teores de PAE mantêm o comportamento de rigidez do material.

Figura 14. Diagrama Tensão x Deformação dos compósitos submetidos ao ensaio de flexão com 20% de HIPS.



Fonte: Autora (2020).

Com os valores presentes na tabela 6 pode-se observar como a tensão máxima de flexão diminuiu 5,7 % com o aumento do teor de PAE. Quanto ao módulo de elasticidade em flexão, houve um aumento significativo, indicando um aumento de 21,9% na rigidez do material com a adição de PAE.

O material se mostra ainda mais rígido com o aumento do teor de HIPS como pode se observar quando se compara o módulo de elasticidade da amostra $PP_{90}PAE_{10}HIPS_0$, 1440 MPa, e a amostra $PP_{80}PAE_{10}HIPS_{10}$, 1541 MPa. A tabela 6 ainda confirma o comportamento de rigidez do compósito de acordo com o aumento do PAE, mantendo o comportamento esperado do material a tensão máxima de flexão decai.

Comparando estes resultados obtidos para os compósitos observou-se uma ótima compatibilização promovida pelos materiais presentes na composição, melhorando o módulo de elasticidade. Este aumento mostra que o material se mostra mais rígido com o aumento do teor do PAE, tornando-o adequado para diversas aplicações.

Tabela 6. Dados obtidos do ensaio de flexão para compósito com 0% de HIPS.

Amostra	% PP	% PAE	% HIPS	Módulo de elasticidade (MPa)	Tensão Máxima de flexão (MPa)
PP₉₀PAE₁₀HIPS₀	90	10	0	1440 ± 72,37	49,79 ± 1,62
PP₈₀PAE₂₀HIPS₀	80	20	0	1755 ± 118,24	46,94 ± 1,69
PP₉₀PAE₀HIPS₁₀	90	0	10	1379 ± 83,20	48,57 ± 0,72
PP₈₀PAE₁₀HIPS₁₀	80	10	10	1541 ± 46,30	43,14 ± 1,52
PP₇₀PAE₂₀HIPS₁₀	70	20	10	1725 ± 81,49	40,88 ± 1,86
PP₈₀PAE₀HIPS₂₀	80	0	20	1372 ± 15,19	48,16 ± 0,32
PP₇₀PAE₁₀HIPS₂₀	70	10	20	1541 ± 95,83	44,22 ± 1,89
PP₆₀PAE₂₀HIPS₂₀	60	20	20	1573 ± 46,74	35,85 ± 2,16

Fonte: Autora (2020).

De acordo com Menchise (2019) o valor encontrado para tensão máxima de PP puro na literatura é em torno de 40 MPa. Sendo assim, verifica-se que a adição dos reforços estudados neste trabalho promove uma melhora nessa propriedade. A amostra que apresentou maior valor de tensão máxima foi a PP₉₀PAE₁₀HIPS₀ (49,79 MPa).

6.3. ENSAIO DE DUREZA SHORE D

Os ensaios foram realizados em diferentes pontos dos corpos de prova, obtendo assim um valor médio para cada material. Estes resultados podem ser observados na tabela 7.

Tabela 7. Resultados dureza Shore D por amostra.

Amostra	%PP	%PAE	%HIPS	Dureza Shore D
PP₉₀PAE₁₀HIPS₀	90	10	0	68,27 ± 1,60
PP₈₀PAE₂₀HIPS₀	80	20	0	67,37 ± 0,80
PP₉₀PAE₀HIPS₁₀	90	0	10	65,97 ± 1,82
PP₈₀PAE₁₀HIPS₁₀	80	10	10	66,83 ± 1,27
PP₇₀PAE₂₀HIPS₁₀	70	20	10	66,70 ± 1,58
PP₈₀PAE₀HIPS₂₀	80	0	20	66,07 ± 1,74
PP₇₀PAE₁₀HIPS₂₀	70	10	20	67,00 ± 2,89
PP₆₀PAE₂₀HIPS₂₀	60	20	20	66,73 ± 0,90

Fonte: Autora (2020).

Segundo Menchise et.al. (2019) a dureza Shore D de um polipropileno puro pode variar entre 63 HSD e 67 HSD. Analisando a tabela 7 com os resultados pode-se observar que as durezas encontradas para as composições se encontram nesse intervalo, o que não caracteriza uma alteração da dureza do compósito em comparação com a matriz polimérica.

Comparando as durezas entre as composições dos materiais também não se observa grande influência, visto que a variação da dureza Shore D não foi estatisticamente significativa.

Loureiro (2017) apresentou estudos sobre polímeros reforçados com resíduos sólidos do processo de soldagem a arco elétrico, em seus estudos ela apresenta uma matriz de PEAD com um resultado para dureza Shore em torno de 56,3 HD de média.

Comparando os resultados do presente estudo com os obtidos por Loureiro (2017), onde se utilizou um compósito de matriz PEAD e reforço de

resíduo de eletrodo revestido pode-se verificar uma alteração diante da matriz polimérica. A dureza encontrada por Loureiro (2017) de 58,46 Shore D se difere da encontrada no presente trabalho pela diferença na matriz polimérica utilizada, resultado já não observado diante da inserção de materiais como reforço.

6.4. ANÁLISE MULTIVARIADA

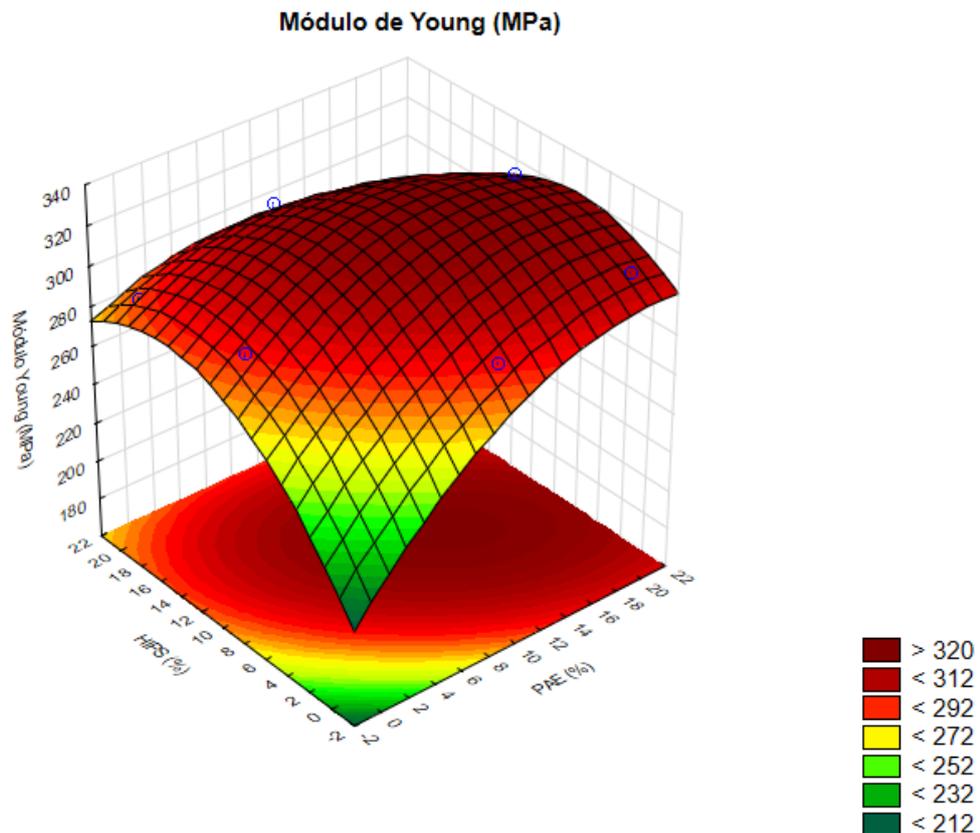
Para melhor avaliar a influência da composição nas propriedades mecânicas dos materiais obtidos neste trabalho, foi realizada uma análise multivariada. Essa ferramenta tem o objetivo de analisar em conjunto a influência das variáveis nos resultados encontrados dos ensaios realizados, através de métodos estatísticos que analisam simultaneamente múltiplas medidas. Atualmente, conta-se com diversos softwares para a obtenção de resultados mais precisos.

As propriedades avaliadas foram o Módulo de Young, a Tensão Máxima em Tração, o Módulo de Flexão e Tensão Máxima em Flexão, essa análise resultou em uma superfície de resposta, uma análise de efeitos e na validação estatística por Análise de Variância.

6.4.1. Módulo de Young

Utilizando o software Statistica®, foi possível obter uma superfície de resposta relacionando a variável de interesse (Módulo de Young) com a composição do material (teores de HIPS e PAE), como mostra a figura 15. Verifica-se que os teores de HIPS e PAE exercem influência positiva sobre o Módulo de Young num comportamento quadrático, ou seja, o ponto ótimo encontra-se em concentrações intermediárias desses materiais.

Figura 15. Superfície de Resposta - Módulo de Young



Fonte: Autora (2020)

Para se obter o ponto ótimo – a composição que fornece o maior valor da propriedade mecânica – foi utilizado o modelo matemático que descreve a superfície de resposta da figura 15, que foi obtido por meio do método dos mínimos quadrados, mostrado na equação 1, onde x representa o teor (%) de PAE e y o teor (%) de HIPS.

$$z = 241,78 + 7,22x - 0,189x^2 + 7,84y - 0,279y^2 - 0,191xy \quad (1)$$

A otimização do modelo se deu por meio da determinação do ponto cuja sua derivada é zero, com auxílio da plataforma WolframAlpha®. O ponto ótimo obtido para o Módulo de Young foi:

- %PAE = 14,51%
- %HIPS = 9,08%
- Módulo de Young = 329,77 MPa

Para a validação desta análise, foram realizados os procedimentos de Análise de Variância, análise gráfica dos valores previstos pelo modelo versus os valores observados, bem como a análise dos efeitos utilizando um gráfico de Pareto, como mostram, respectivamente a tabela 8 e as figuras 15 e 16. As letras L e Q representam qual modelo estatístico utilizado em cada análise de variância, sendo: L, modelo linear e Q, modelo quadrático.

Tabela 8. Análise de variância - Módulo de Young

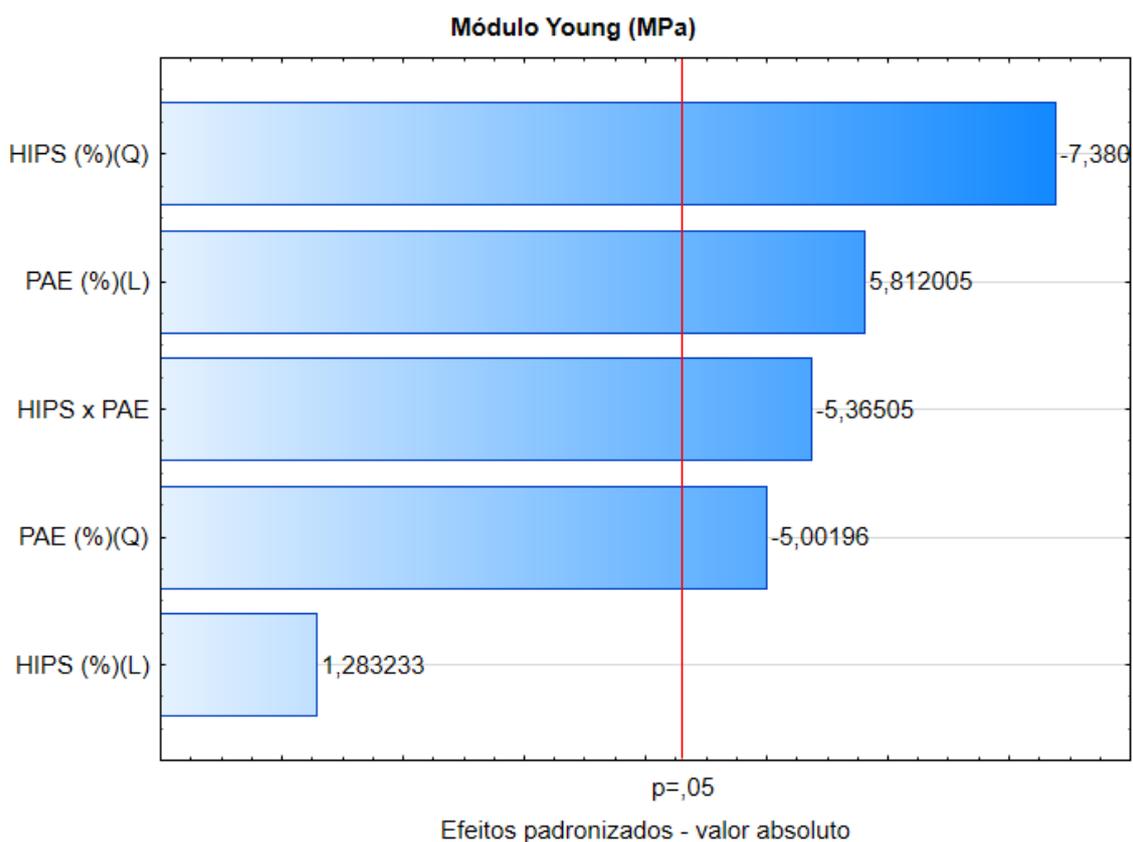
	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	valor-p
PAE (%) - L	752,248	1	752,248	33,77940	0,028351
PAE (%) - Q	557,173	1	557,173	25,01965	0,037722
HIPS (%) - L	36,671	1	36,671	1,64669	0,328020
HIPS (%) - Q	1213,093	1	1213,093	54,47349	0,017867
PAE x HIPS (L ²)	640,999	1	640,999	28,78380	0,033030
Erro	44,539	2	22,269		
Total	2044,809	7			

Fonte: Autora (2020).

A análise de variância mostrou que há influência estatisticamente válida (valor-p < 0,05) do teor de PAE (em modelo linear e quadrático) e do teor de HIPS (em modelo quadrático), além de um efeito combinado dos dois materiais. Tal efeito combinado foi justamente o que se buscava neste trabalho ao adicionar o HIPS à composição do material final.

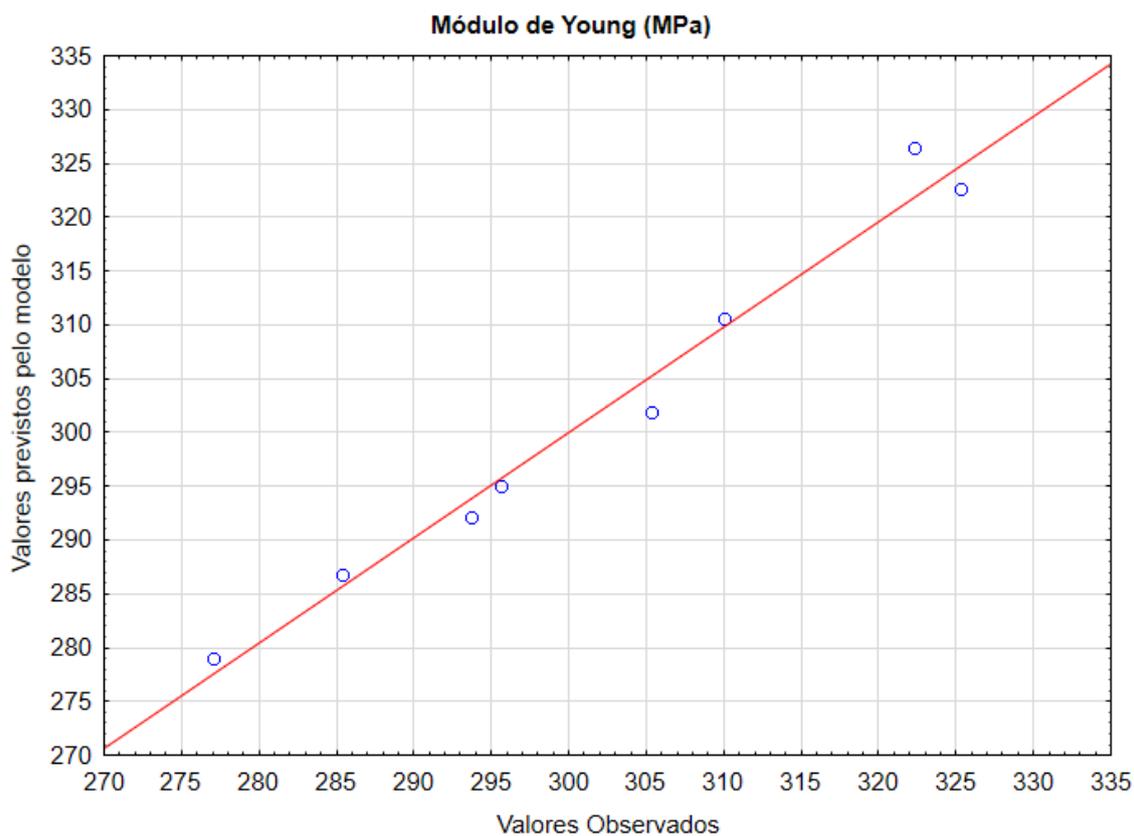
Os efeitos podem ser melhor visualizados no gráfico de Pareto mostrado na figura 16.

Figura 16. Gráfico de Pareto - Efeitos das variáveis sobre o Módulo de Young



Fonte: Autora (2020)

A figura 17 mostra o comportamento do modelo matemático frente aos valores observados experimentalmente. Para esta análise, foi obtido um coeficiente de correlação $R^2 = 0,9782$, que caracteriza um ajuste bastante satisfatório. Assim, uma vez validado por análise de variância, o modelo pode ser utilizado para prever os valores do módulo de Young em função da composição.

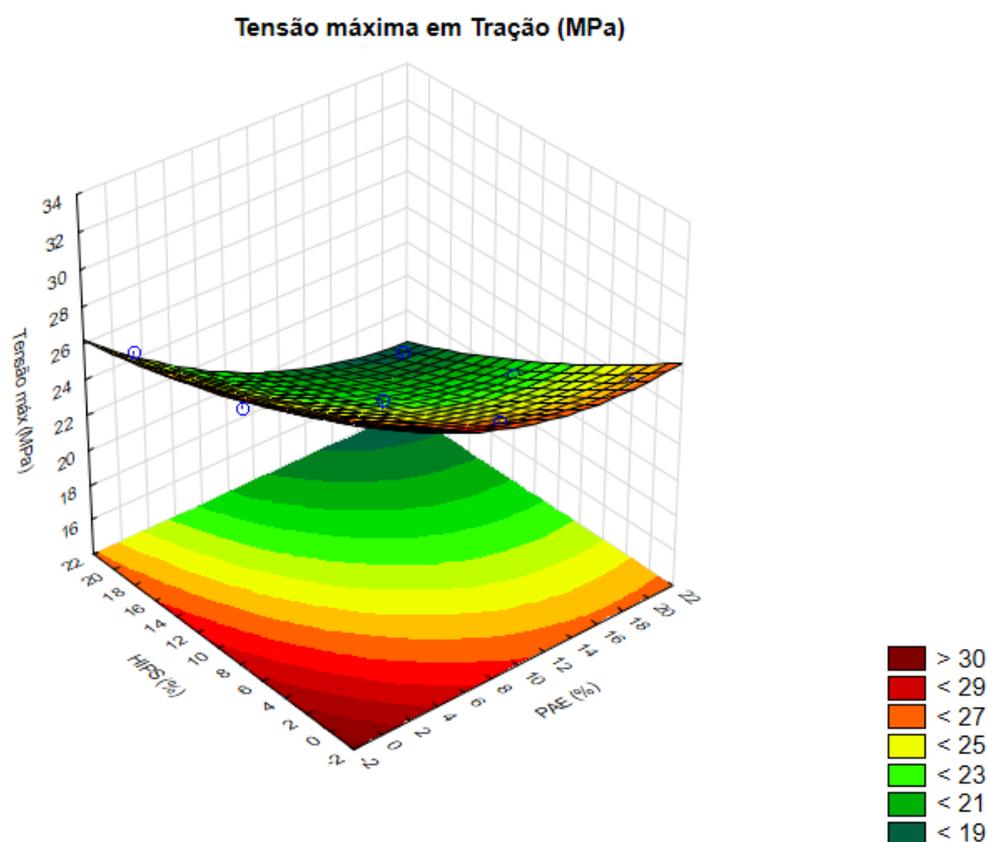
Figura 17. Ajuste do modelo aos valores observados - Módulo de Young

Fonte: Autora (2020).

6.4.2. Tensão Máxima em Tração

A superfície de resposta obtida utilizando o software Statistica® relacionando a variável de interesse (Tensão Máxima em Tração) com a composição do material (teores de HIPS e PAE) pode ser vista na figura 18. Verifica-se que esta propriedade mecânica, também denominada de resistência a tração, tende a diminuir à medida em que o PAE é adicionado à composição. Quanto ao HIPS, as composições contendo somente PP e HIPS parecerem não sofrerem grandes alterações na Tensão Máxima. Contudo, a adição de HIPS às composições contendo PAE parece não impedir a redução na propriedade, o inverso do que aconteceu com o Módulo de Young.

Figura 18. Superfície de Resposta - Tensão máxima em Tração



Fonte: Autora (2020).

Esse comportamento pode ser explicado pela fraca interação que ocorre entre as fases matriz/reforço. O PAE, por ter natureza inorgânica e fortemente polar, não interage quimicamente com a fase polimérica formando ligações fortes, o que compromete o empacotamento das cadeias poliméricas e a energia de ligação associada a ele. Dessa forma, o material final apresenta-se, em tração, mais rígido – com maior módulo de Young – devido ao fato do PAE ser um material naturalmente mais rígido, mas não mais resistente, pois a resistência depende da energia de ligação que mantém as cadeias unidas.

O modelo matemático obtido para descrever este comportamento é apresentado na equação 2, onde x representa o teor (%) de PAE e y o teor (%) de HIPS.

$$z = 29,91 - 0,47x + 0,013x^2 - 0,32y + 0,043y^2 - 0,0052xy \quad (2)$$

Analisando-se o modelo e a superfície de resposta, verifica-se que o maior valor obtido para a tensão máxima se encontra no polímero puro ($x = 0$, $y = 0$), com valor de 29,91 MPa.

A validação do modelo de superfície de resposta e avaliação dos efeitos foi realizada por Análise de Variância, cujo resultado é mostrado na tabela 9.

Tabela 9. Análise de variância - Tensão máxima em Tração

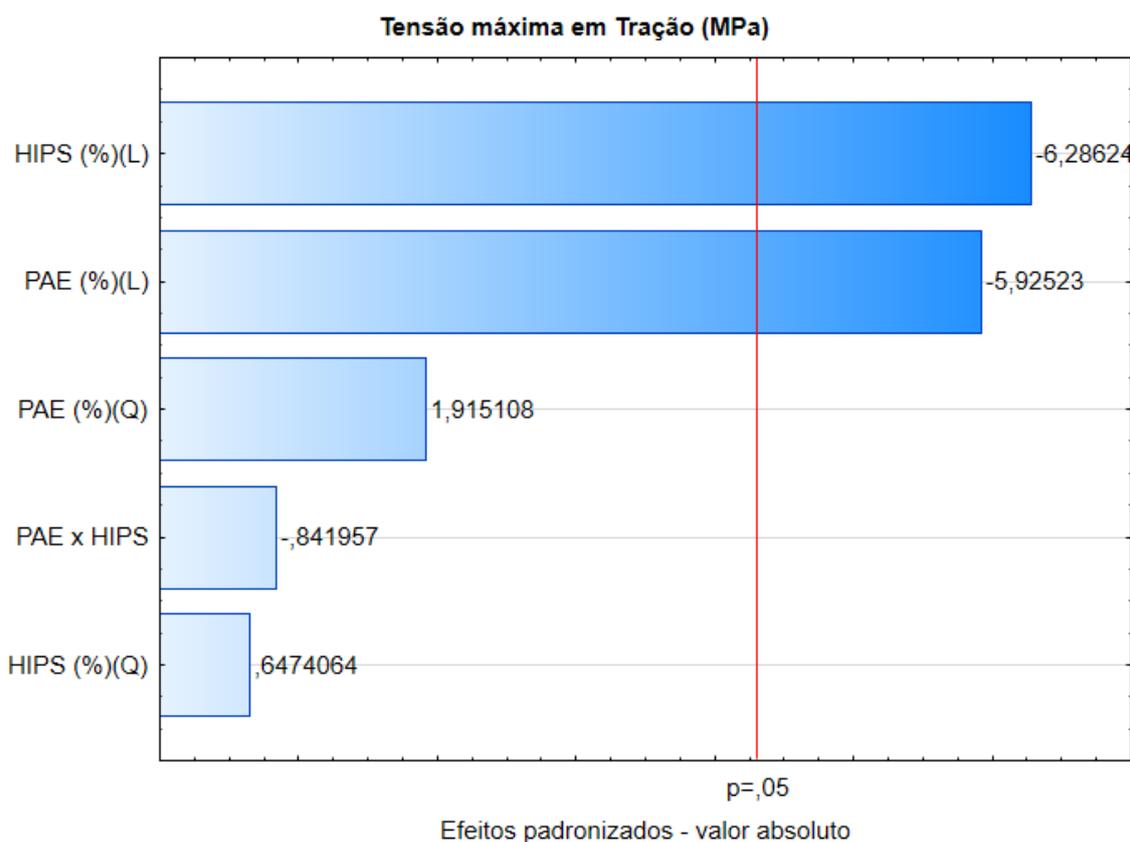
	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	valor-p
PAE (%) - L	23,694	1	23,694	35,108	0,027
PAE (%) - Q	2,475	1	2,475	3,668	0,195
HIPS (%) - L	26,669	1	26,669	39,517	0,024
HIPS (%) - Q	0,28286	1	0,28286	0,419	0,583
PAE x HIPS (L²)	0,478	1	0,478	0,709	0,488
Erro	1,35	2	0,675		
Total	63,976	7			

Fonte: Autora (2020).

Verifica-se que, em caráter linear, tanto o teor de PAE quanto o de HIPS exercem influência sobre o resultado da Tensão máxima em Tração, uma vez que apresentaram valor-p < 0,05. Como visto na superfície de resposta, não há efeito combinado estatisticamente significativo entre o PAE e HIPS, indicando que a adição de HIPS não contribui para impedir a diminuição da resistência à tração.

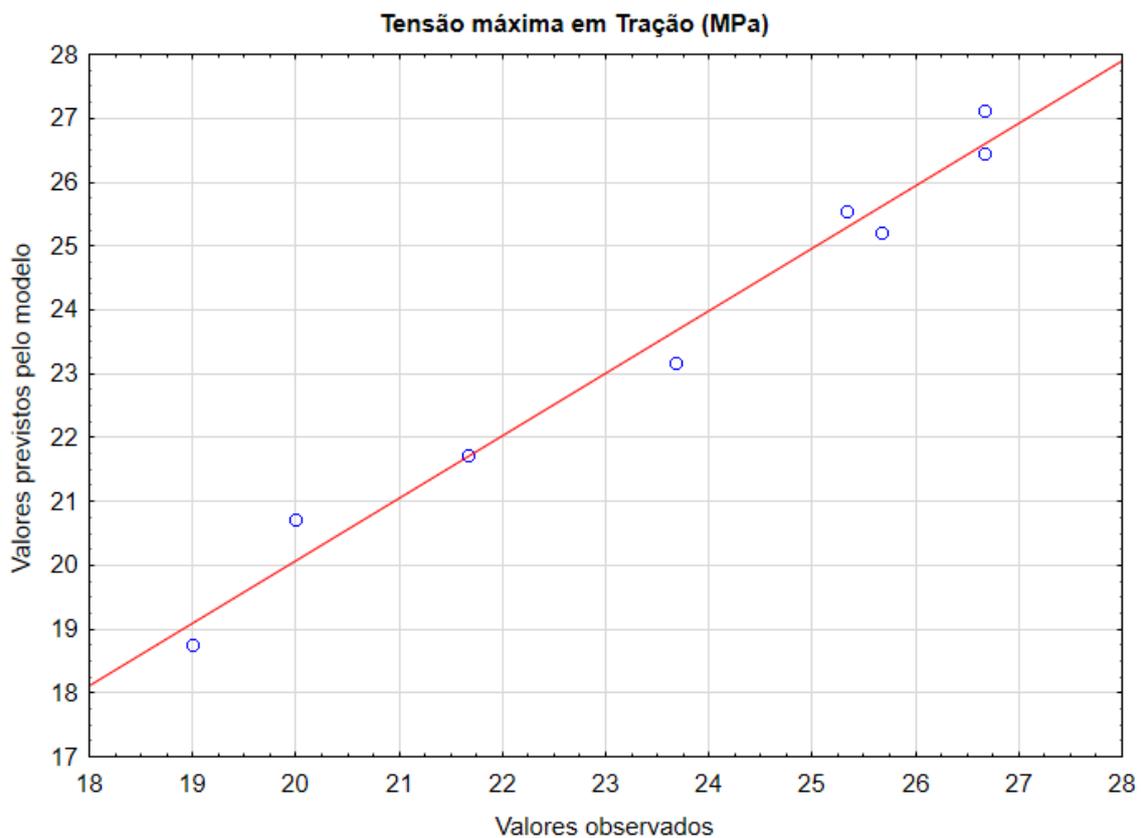
A influência de cada variável sobre a Tensão máxima em Tração pode ser graficamente visualizada na figura 19, que mostra um gráfico de Pareto contendo os efeitos padronizados de cada variável e o limite para a validade estatística ($p < 0,05$).

Figura 19. Gráfico de Pareto - Efeito das variáveis sobre a Tensão máxima em Tração



Fonte: Autora (2020).

Quanto ao ajuste do modelo matemático aos pontos experimentais, é possível avaliar sua qualidade observado a figura 20, que mostra os valores obtidos experimentalmente versus aqueles previstos pelo modelo. O valor calculado para o coeficiente de correlação foi de $R^2 = 0,9789$, representando um ajuste satisfatório e estatisticamente válido para a previsão da Tensão máxima em Tração a partir da composição do material.

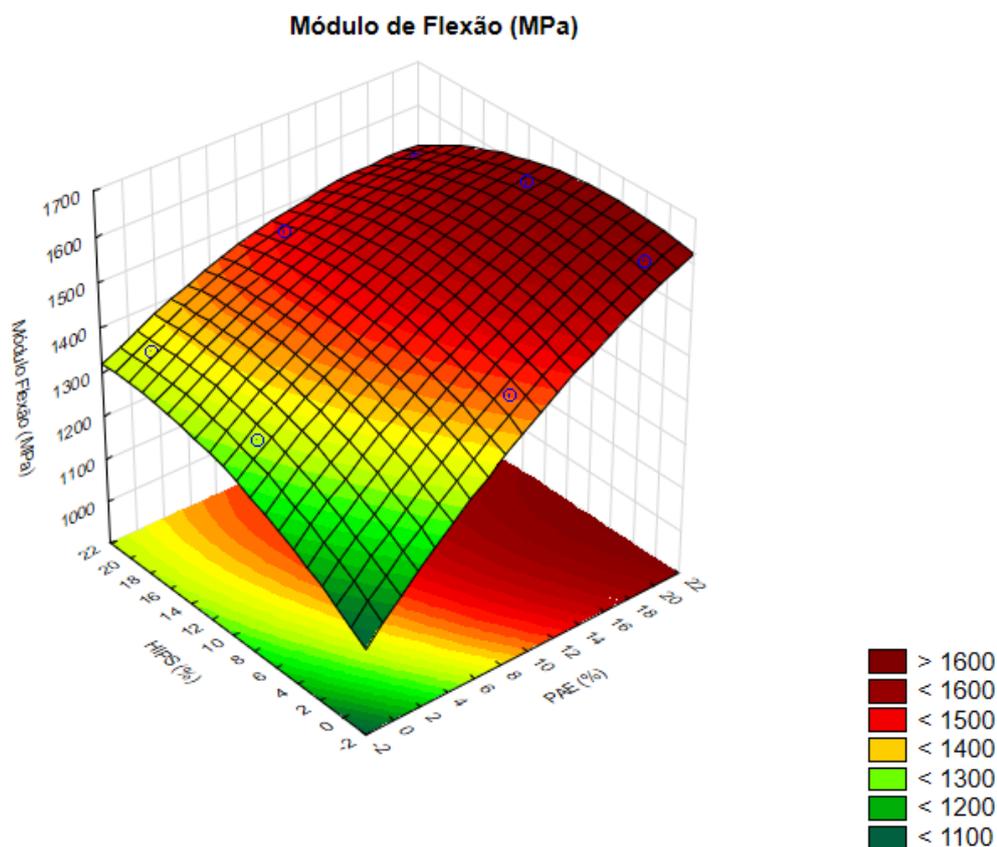
Figura 20. Ajuste do modelo aos valores observados - Tensão máxima em Tração

Fonte: Autora (2020).

6.4.3. Módulo de Flexão

Na figura 21, é possível observar a Superfície de Resposta obtida pelo software Statistica® relacionando a variável de interesse (Módulo de Flexão) com a composição do material (teores de HIPS e PAE). O comportamento verificado indica que tanto a adição de HIPS quanto de PAE contribuem para um aumento na rigidez do material em flexão, que, nos experimentos realizados neste trabalho, apresentou valor máximo de 1630 MPa. Porém é importante destacar que a inserção do PAE no material gerou um aumento mais significativo no módulo de flexão.

Figura 21. Superfície de Resposta - Módulo de Flexão



Fonte: Autora (2020).

O modelo matemático que representa a Superfície de Resposta exibida na figura 21 é mostrado na equação 3, onde x representa o teor (%) de PAE e y o teor (%) de HIPS.

$$z = 1192,06 + 28,98x - 0,41x^2 + 17,08y - 0,45y^2 - 0,579xy \quad (3)$$

Com o modelo, foi possível determinar o ponto máximo da curva, ou seja, a composição que promove o maior valor de Módulo de Flexão. Para tal, foi utilizada a plataforma WolframAlpha® e o ponto ótimo obtido foi:

- %PAE = 40,20%
- %HIPS = 6,89%
- Módulo de Young = 1715 MPa

Apesar do modelo indicar a possibilidade de adicionar 40% de PAE à formulação do compósito para a obtenção de uma maior rigidez em flexão, tal concentração mostra-se inaplicável do ponto de vista do processamento do material. Nos experimentos realizados, com a adição de 20% de PAE, já houve dificuldade na homogeneização do compósito e, portanto, aumentar esta quantidade implicaria em modificar o processo e/ou utilizar um procedimento de mistura distinto.

Na tabela 10, observam-se os resultados obtidos na análise de variância, que mostrou efeitos estatisticamente significante (valor-p < 0,05) para o teor de PAE em modelo linear e para o efeito combinado entre o PAE e HIPS. Vale lembrar que a adição de HIPS à composição do material visou justamente promover este efeito combinado e, dessa forma, contribuir para um aumento nas propriedades mecânicas do compósito.

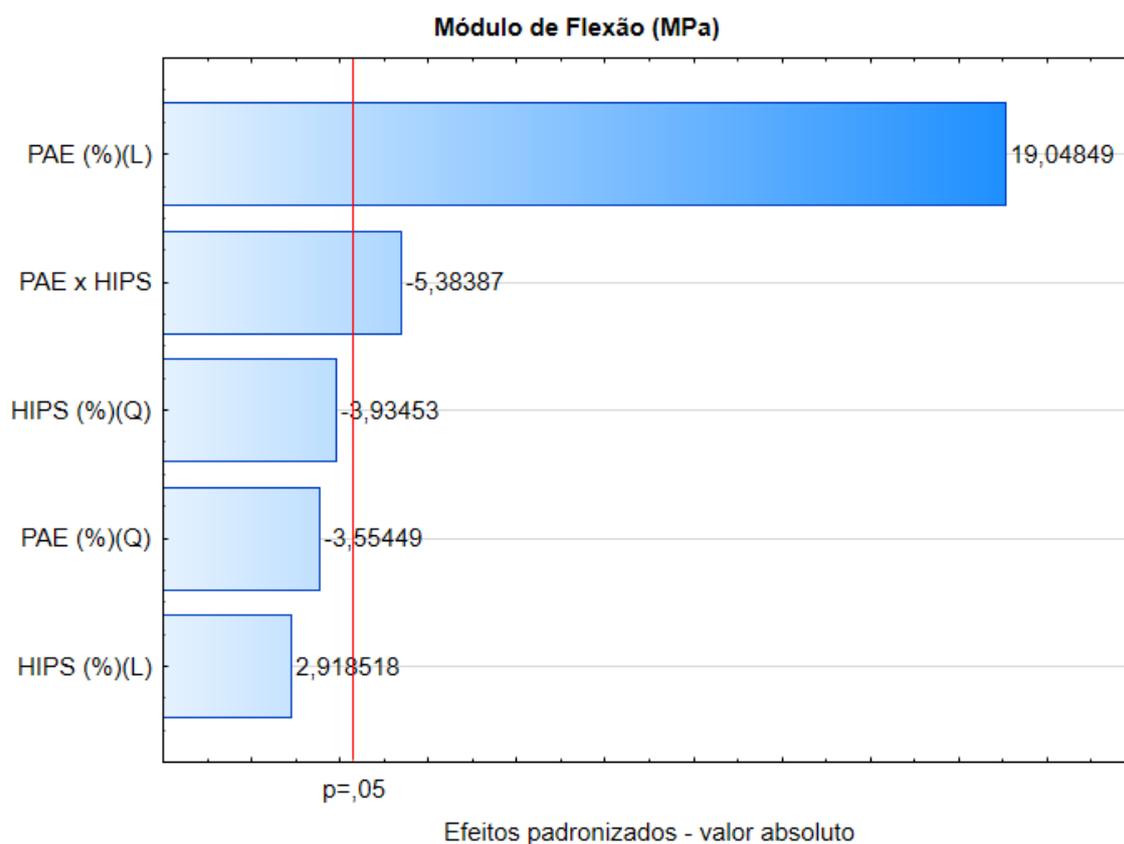
Tabela 10. Análise de variância - Módulo de Flexão.

	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	valor-p
PAE (%) - L	73438,91	1	73438,91	362,8448	0,002745
PAE (%) - Q	2557,17	1	2557,17	12,6344	0,070841
HIPS (%) - L	1723,97	1	1723,97	8,5177	0,100086
HIPS (%) - Q	3133,22	1	3133,22	15,4805	0,058944
PAE x HIPS (L²)	5866,72	1	5866,72	28,9861	0,032811
Erro	404,80	2	202,40		
Total	84526,44	7			

Fonte: Autora (2020).

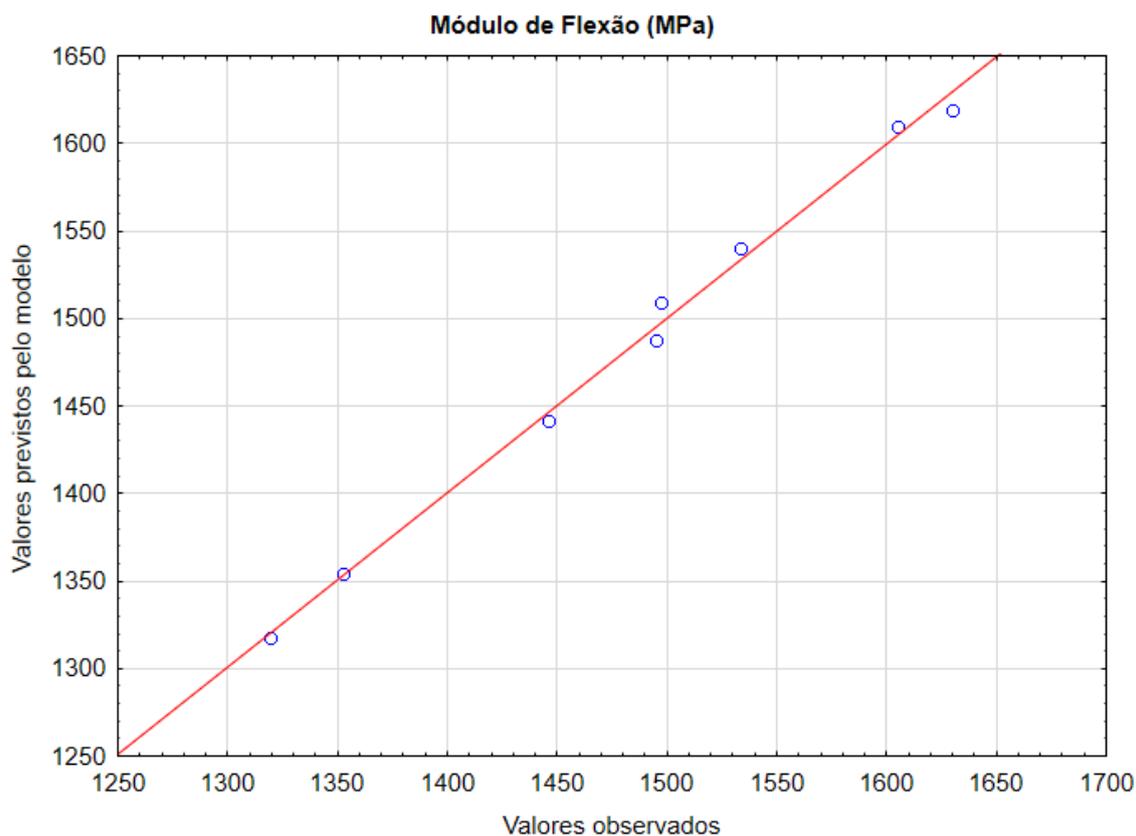
A validade estatística dos efeitos observados por análise de variância pode ser analisada por meio do gráfico de Pareto apresentado na figura 22.

Figura 22. Gráfico de Pareto - Efeito das variáveis sobre o Módulo de Flexão



Fonte: Autora (2020).

Com relação ao ajuste do modelo matemático e, conseqüentemente, a possibilidade de utilizá-lo para prever o comportamento do Módulo de Flexão em função da composição do material, o coeficiente de correlação calculado foi de $R^2 = 0,9952$. Tal valor indica um ajuste excelente, que pode ser melhor visualizado na figura 23, que apresenta os valores observados experimentalmente versus aqueles previstos pelo modelo matemático.

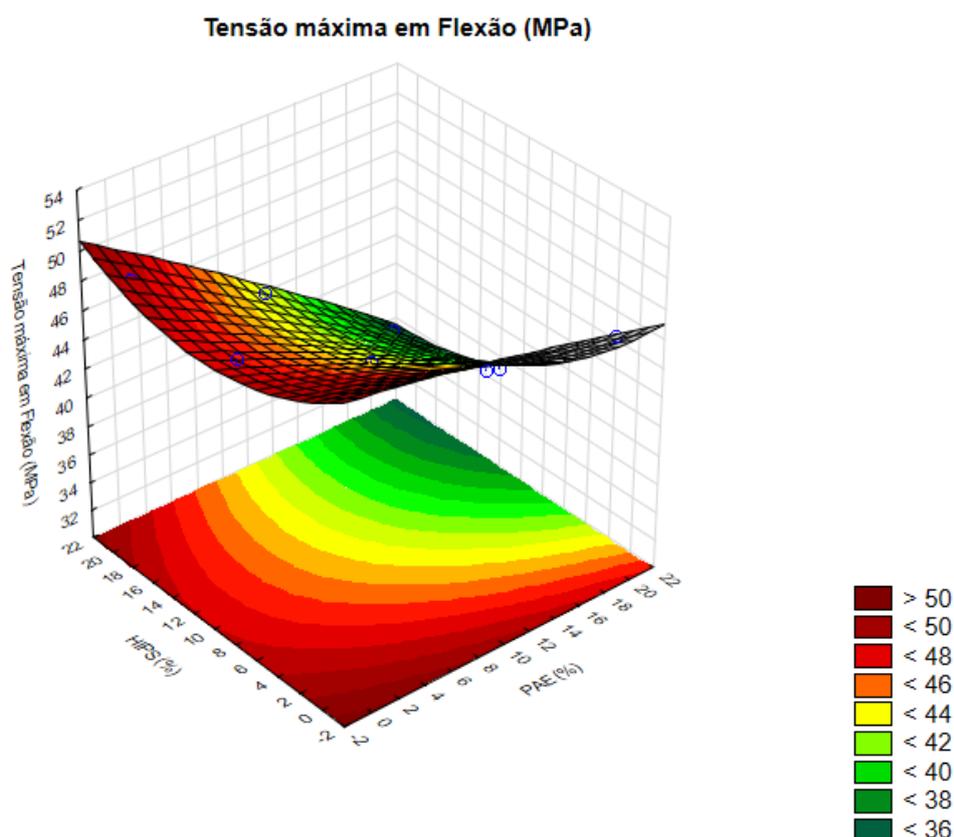
Figura 23. Ajuste do modelo aos valores observados - Módulo de Flexão

Fonte: Autora (2020).

6.4.4. Tensão máxima em Flexão

A superfície de resposta obtida para a variável Tensão máxima em Flexão em função da composição do material encontra-se na figura 24. Pela sua análise, é possível verificar que existe uma influência individual do PAE e do HIPS sobre a propriedade mecânica, que pode ser vista, no gráfico, na área vermelha das curvas de nível. A composição contendo 20% de HIPS sem adição de PAE foi aquela que apresentou maior valor de Tensão máxima em Flexão (48,27 MPa). Contudo, não há efeito combinado dos dois materiais sobre a propriedade mecânica.

Figura 24. Superfície de Resposta - Tensão máxima em Flexão



Fonte: Autora (2020).

O modelo matemático que representa a Tensão máxima em Flexão (z) em função dos teores (%) de PAE (x) e HIPS (y) é mostrado pela equação 4. Esta equação não apresenta ponto de máximo global, porém indica que um aumento no teor de PAE sempre promoverá uma redução na resistência à flexão do compósito.

$$z = 50,21 - 0,18x - 0,022x^2 - 0,49y + 0,021y^2 - 0,018xy \quad (4)$$

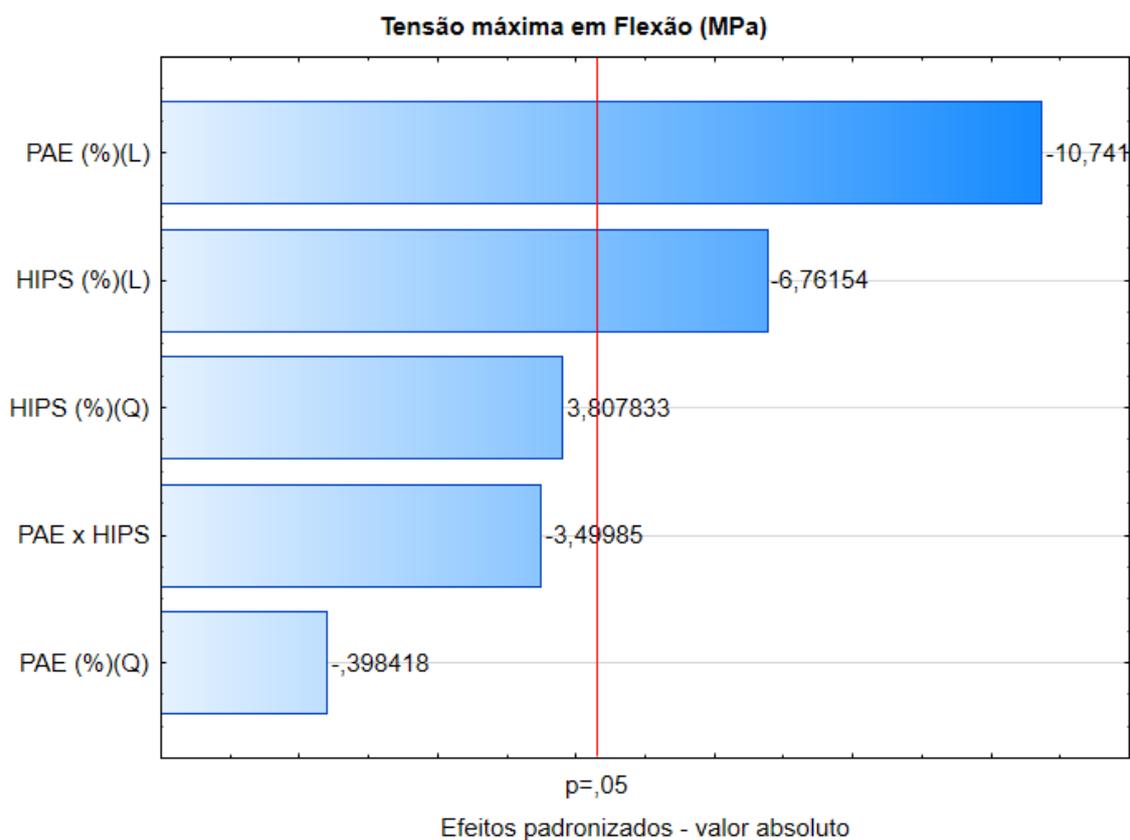
O comportamento verificado na superfície de resposta – influência individual dos teores de PAE e HIPS, sem efeito combinado – foi confirmado pela Análise de Variância. Na tabela 11, observa-se que somente apresentaram efeitos estatisticamente válidos (valor- $p < 0,05$) os teores de PAE (em modelo linear) e de HIPS (em modelo linear).

Tabela 11. Análise de variância – Tensão máxima em Flexão

	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	valor-p
PAE (%) - L	53,6615	1	53,66148	115,3750	0,008556
PAE (%) - Q	0,0738	1	0,07383	0,1587	0,728831
HIPS (%) - L	21,2639	1	21,26385	45,7184	0,021181
HIPS (%) - Q	6,7438	1	6,74383	14,4996	0,062565
PAE x HIPS (L²)	5,6970	1	5,69703	12,2489	0,072833
Erro	0,9302	2	0,46510		
Total	128,3500	7			

Fonte: Autora (2020).

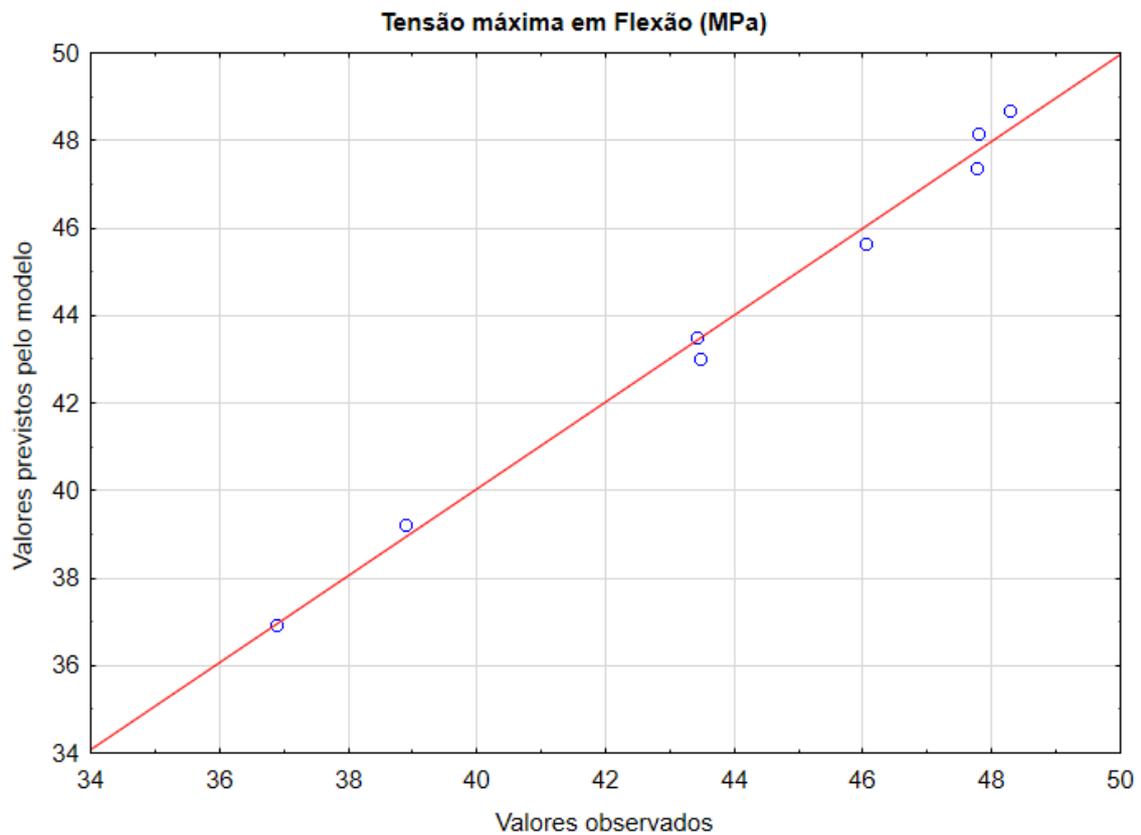
Os efeitos validados pela Análise de Variância são melhor visualizados no gráfico de Pareto mostrado na figura 25.

Figura 25. Gráfico de Pareto - Tensão máxima em Flexão

Fonte: Autora (2020).

O ajuste do modelo matemático aos pontos observados foi avaliado por meio do coeficiente de correlação, que obteve um valor de $R^2 = 0,9928$, que caracteriza um ajuste excelente e permite, uma vez validado por Análise de Variância, utilizar o modelo para prever o comportamento desta propriedade mecânica em função da composição do material. A figura 26 exibe o ajuste.

Figura 26. Ajuste do modelo aos valores observados - Tensão máxima em Flexão



Fonte: Autora (2020).

7. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, é possível concluir que:

- Foi possível obter compósitos homogêneos utilizando PP obtido por coleta doméstica, PAE e HIPS. Entende-se que há homogeneidade nos materiais em função dos baixos valores de desvio-padrão encontrados, bem como pela validade estatística dos resultados analisados;
- Em geral, a adição de PAE e HIPS contribuiu para um aumento na rigidez dos materiais, tanto em tração quanto em flexão;
- A composição que apresentou a maior rigidez foi aquela com 20% de PAE e 10% de HIPS, que atingiu Módulo de Young de 325 MPa e Módulo de Flexão de 1630 MPa;
- Com relação à dureza, os compósitos apresentaram, em média, 66,9 HD e não foi observada nenhuma variação significativa em função da composição;
- Por meio da análise multivariada, foi possível verificar que a composição exerce influência estatisticamente significativa sobre o módulo e a resistência tanto em tração quanto em flexão;
- A análise permitiu observar que há, ainda, efeito combinado dos teores de PAE e HIPS sobre os módulos de Young e de Flexão. Assim, entende-se que a utilização do HIPS na composição permitiu reduzir a influência negativa promovida pelo PAE devido à fraca interação matriz-reforço.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar a interação da matriz e reforço dos compósitos através de imagens microscópicas.
- Realizar um estudo econômico-financeiro para a produção do compósito.
- Estudar a possibilidade de processamento desse compósito com uma porcentagem de 40% de PAE.
- Verificar o uso de outros resíduos siderúrgicos como reforço para analisar a influencia do teor do resíduo e do HIPS no material.
- Investigar as propriedades magnéticas do material obtido em diferentes composições.

Explorar as densidades do PAE puro, comparando com as obtidas nos compósitos.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIAMSEN, P.; PAIPHANSIRI, U.; SANGRIBSUB, S.; POLPANICH, D. & TANGBORIBOONRAT, P. - **Polym. Int.**, 52, p.1198 (2003).

ALMEIDA, E. **Potencial de utilização do resíduo “carepa de aço” na fabricação de blocos de concreto**. Centro Universitário Univates; p. 83 (2009).

ALVES, A. L. S.; NASCIMENTO, L. F. C.; SUAREZ, J. C. M. **Comportamento Balístico de Compósito de Polietileno de Altíssimo Peso Molecular: Efeito da Radiação Gama**. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.14, n.2, p.105-111, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT: NBR 10.004, Resíduos Sólidos: Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ASTM. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 2240: Standard test method for rubber property – durometer hardness**. United States, 2010.

ASTM. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 638: Standard test method for tensile properties of plastics**. United States, 2008.

ASTM. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 790: Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials**. United States, 2010.

AURREKOETXEA J, SARRIONANDIA MA, URRUTIBEASCOA I, MASPOCH ML. **Effects of recycling on the microstructure and the mechanical properties of isotactic polypropylene**. *Journal of Materials Science*, 36 (11): 2607-2613, 2001.

AUMÔNIER, J.; JUCKES, L.M.; TRAICE, F. B. **British Steel Public Limited Company**. In: Seminário Sobre Processamento, Utilização E Descarte De Resíduos Na Indústria Siderúrgica, 1996, Balatonszéplak, Hungria. [s.n.t.].

BAGATINI, M.C; ZYMLA, V; OSÓRIO, E.; VILELA, A.C.F; **Characterization and reduction behavior of mill scale**. *ISIJ Int.* 2011;51 (7):1072–9.

BELGO, **Manual de Pisos Industriais Armados com Telas Soldadas Nervuradas**, Arcelor Mittal, São Paulo, 2002.

BILLINGHAM NC, CALVED PD. **An Introduction - Degradation and Stabilization of Polyolefins**, Applied Science Publishers, London, 1983.

BONELLI CMC, MARTINS AF, MANO EB, BEATTY CL. **Effect of recycled polypropylene on polypropylene/high-density polyethylene blends.** Journal of Applied Polymer Science, 80 (8): 1305-1311, 2001.

BRASKEM, **Relatórios anuais** <www.braskem.com.br/relatoriosanuais> Acessado em: 30 de mai. 2018.

BREHM, F. A: **Adição de óxido de zinco (ZnO) em pastas de cimento portland visando viabilizar a reciclagem de pós de aciaria elétrica (PAE) na construção civil.** 2004, 90p., Tese (Pós-Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2004, p. 28-35.

CALLISTER JUNIOR, WILLIAM D.. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução.** 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CALLISTER JUNIOR, WILLIAM D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução,** Editora LTC, Rio de Janeiro, 9ª Ed. 2016.

CANEVAROLO Jr., S. V. **Ciência dos Polímeros.** 3. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2010, 280 p.

COLPAERT, HUBERTUS. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns.** 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008.

CAMPOS FILHO, M. P. **Introdução à Metalurgia Extrativa e Siderurgia.** Livros técnicos e científicos, Campinas, Fundação de Desenvolvimento da UNICAMP, Rio de Janeiro, 1981.

CULLITY, B. D. **Elements of X-ray Diffraction,** Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1967. 514p

DIAS, J.A.; SALGADO, M.G. **Manual do Procurador Público. Programa Lixo e Cidadania: criança no lixo nunca mais.** Procuradoria geral da República. Brasília, 1999.

DUTRA, A.J.B.; PAIVA, P.R.P.; TAVARES L.M. **Alkaline leaching of zinc from electric arc furnace steel dust.** *Minerals Engineering*, v. 19, p. 478-485, 2006.

ECHTE, A. - **"Rubber-Toughened Plastics"**, C. K. Riew, ACS, Washington, D. C. (1989).

FIEBIG J, GAHLEITNER M, PAULIK C, WOLFSCHWENGER J. **Ageing of polypropylene: processes and consequences.** *Polymer Testing*, 18 (4): 257-266, 1999.

FINKLER, M.; SCAPINI, P.; FREIRE, E.; ZATTERA, A. J.; ZENI, M. **Compósitos de HDPE com Resíduos de Fibras Têxteis. Parte I:**

Caracterização Mecânica. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v.15, n.3, p.171-175, 2005.

GARCIA, A.; SPIM, J.A.; SANTOS, C. A. dos. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro, LTC, 2000.

GARCIA, L. Ricardo. **Apostila de coleta seletiva – FIESP**. São Paulo, 2003.

GRASSI, V. G.; FORTE, M. M. C.; PIZZOL, M. F. D. **Aspectos Morfológicos e Relação Estrutura-Propriedades de Poliestireno de Alto Impacto**. Polímeros, v. 11, n. 3, p. 158–168, set. 2001.

GUDENAU, H.W.; et al. **Research in the reduction of iron ore agglomerates including coal and C-containing dust**. In: ISIJ INTERNACIONAL. Vol.45.2005. p. 603-608.

GUERRICA-ECHEVARRIA, G, EGUIZÁBAL, JI AND NAZÁBAL, J. **Effects of reprocessing conditions on the properties of unfilled and talc-filled polypropylene**, Polymer Degradation and Stability, 53: 1-8, 1996.

GERDAU. **Assuntos Institucionais e Comunicação Corporativa**. São Paulo, 2011. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=vrgQaq3Y0IU>>. Acesso em: 27 abril 2020.

HAVLIK, Tomas; TURZAKOVA, Martina; STOPIC, Srecko; FRIEDRICH, Bernd. **Atmospheric leaching of EAF dust with diluted sulphuric acid**. Hydrometallurgy, v. 77, p. 41–50, 2005.

HINSKEN H, MOSS S, PAUQUET JR, ZWEIFEL H. **Degradation of polyolefins during melt processing**. Polymer degradation and stability, 34 (1-3): 279-293, 1991.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IABR). **Relatório de sustentabilidade 2016**. Rio de Janeiro, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA (IBS). **Siderurgia Brasileira: princípios e políticas. 2007**. Disponível em: . Acesso em: 11 fevereiro 2020 INSTITUTO AÇO BRASIL (IAB). Relatório de sustentabilidade 2014. Rio de Janeiro, 2014.

IONASHIRO, M. GIOLITO. **Fundamentos da termogravimetria, análise térmica diferencial e calorimetria exploratória diferencial**. São Paulo: Giz editorial, 2004.

JACOMINO, Vanusa Maria Feliciano; et al. **Controle ambiental das indústrias de ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal**. Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente, 2002

KELEN, T. **Polymer Degration**, Van nostrand Reinhold, New York, United States, 1983.

KOLTZENBURG, S., MASKOS, M., & NUYKEN, O. **Polymer Chemistry**. Berlin: Springer - Verlag Berlin Heidelberg, 2017.

LEGODI, M; DEWAAL, D. **The preparation of magnetite, goethite, hematite and maghemite of pigment quality from mill scale iron waste**. Dye Pigment. 2007;74(1):161–8.

LEITE, W. F. **Dissolução de óxidos formados a altas temperaturas nos aços elétricos variando-se a temperatura e concentração da solução ácida na decapagem**. Universidade Federal de Minas Gerais; 2008.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. 1. ed. [s.l.] Blucher, 2006.

LOBATO, NATÁLIA CRISTINA CANDIAN. **Gerenciamento de resíduos sólidos da indústria siderúrgica**. Belo Horizonte: Dissertação de mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas a Universidade Federal de Minas Gerais, 2014. Disponível em: . Acesso em: 17 abril 2020

LOPES, MARCELINO VIEIRA. **Caracterização de sínter de minério de ferro para uso em alto-fornos a carvão vegetal**. Itajubá: Dissertação de mestrado em Engenharia de Materiais a Universidade Federal de Itajubá, 2012. Disponível em: . Acesso em: 17 abril 2020

LOUREIRO, A.T., **Desenvolvimento e caracterização de compósitos de PEAD reforçados com resíduos de eletrodos revestidos**. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha – Campus Três Poços, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda/RJ, 2017.

MAKKONEN, Hannu Tapani; HEINO, Jyrki; LAITILA, Leena; HILTUNEN, Aimo; PÖYLIÖ, Esko; HÄRKKI, Jouko. **Optimisation of steel plant recycling in Finland: dusts, scales and sludge**. Resources, Conservation and Recycling, v. 35, p. 77-84. 2002.

MANTOVANI, M. C. **Caracterização de poeiras geradas em forno elétrico a arco e seu estudo quando aglomeradas na forma de pelotas auto-redutoras**. 165p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998. P. 4-9, 11-15.

MANO EB. **Introdução a Polímeros**, Edgard Blucher Ltda., São Paulo, 1985.

MANO EB. **Polímeros como Materiais de Engenharia**, Edgard Blucher Ltda., São Paulo, 1996.

MARINUCCI, G. **Materiais compósitos poliméricos: Fundamentos e tecnologia**, 1ed. São Paulo, Editora Artliber, 2011.

MARTÍN, M.I; LÓPEZ, F.A; TORRALBA, J.M. **Production of sponge iron powder by reduction of rolling mill scale**. Ironmak Steelmak. 2012;39 (3):155–62.

MENCHISE, C. A; CAMPBELL, A. H; LOVATO, A. C. C; OLIVEIRA; P. H. S; FARIA, P. T. de; FILHO, S. D. G; GUEDES, V. F; CABRAL, R. F. **Avaliação mecânica e microestrutural do polipropileno**. Revista Valore, Volta Redonda, 4 (1): pag.798-809, 2019.

MILAGRES, E. G.; VITAL, B. R.; LÚCIA, R. M. D.; PIMENTA, A. S. **Compósitos de partículas de madeira de eucalyptus grandis, polipropileno e polietileno de alta e baixa densidades**. Revista Árvore, v.30, n.3, p.463-470, 2006.

MONTEIRO, S. N.; TERRONES, L. A. H.; CAMERINI, A. L.; PETRUCCI, L. J. T.; D'ALMEIDA, J. R. M. **Propriedades de Compósitos de Tecido de Juta Descartado Reforçando Matriz de Polietileno Reciclado**. Revista Matéria, v.11, n.4, p.403–411, 2006

MORALES, G.; Leon, R. D.; ACUÑA, P.; FLORES, R. F. & ROBLES, ANTONIO M. - **Polym. Eng. Sci.**, 46, p.1333 (2006).

NOGUEIRA, C. L., MARLET, J. M. F., REZENDE, M. C.; **Processo de Obtenção de Pré- impregnados Polimérico Termoplásticos Via Moldagem por compressão a Quente**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 9, nº3, p.18-27, 1999.

NUNES, M. A. B. S.; GALVÃO, L. S.; FERREIRA, T. P. M.; LUIZ, E. J. F. T.; BASTOS, Y. L. M.; SANTOS, A. S. F. **Reprocessability of high impact polystyrene/clay nanocomposites in extrusion**. *Polymer Degradation and Stability*, v. 125, p. 87–96, mar. 2016.

OLIVEIRA, L.C.P. **Panorama da gestão de re-síduos: evoluções e tendências**. In: WORKSHOP - GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO SETOR MINERO-METALÚRGICO, 2004, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Siderurgia, 2004.

PAOLI, M A. **Degradação e estabilização de polímeros**. São Paulo: Artliber, 2008.

PENIDO, J. N.; HARANO, E. L.; SILVA, M. C. **Consumo de rejeitos industriais em uma sinterização**. Revista Metalurgia & Materiais, São Paulo, v. 50, n. 429, p. 512-521, maio 1994.

RODA, Daniel Tietz. **Tudo sobre Plásticos**. 2013. Disponível em: . Acesso em: 12 abr. 2020.

ROLIM AM. **A reciclagem de resíduos plásticos pós-consumo em oito empresas.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

REZENDE, M. C. **Fractografia de compósitos estruturais. Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.17, n.3, 2007.

RUDY, S.F. **"Pickling and Acid Dipping. Metal Finishing."** Vol 100, Jan 2002.

SILVA, F.T.; OGASAWARA, T.; ANDRADE, M.C. **Avaliação da viabilidade termodinâmica da lixiviação de ferritas de zinco em poeiras de fornos elétricos a arco.** In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 2002, Recife-PE. Anais do XIX ENTME. São Paulo SP: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, v. 1. p. 146-151, 2002.

SILVA, M.C.; BERNARDES, A.M.; BERGMANN, C.P.; TENÓRIO, J.A.S.; ESPINOSA, D.C.R. **Characterisation of electric arc furnace dust generated during plain carbon steel production.** Ironmaking & Steelmaking, v. 35, p. 315-320, 2008.

SILVA, MIRIAM COOPER DA. **Reciclagem de pó de aciaria elétrica como matériaprima na fabricação de materiais cerâmicos argilosos: controle das emissões atmosféricas de zinco.** 126f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2006.

SILVA, JOSÉ NAZARENO SANTOS. **Siderurgia.** Belém do Pará: e-TEC Brasil - Escola Técnica Aberta do Brasil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 2011. Disponível em: . Acesso em: 30 abril. 2020.

SOFILIC, Tahir; RASTOVCAN-MIOC, Alenka; CERJAN-STEFANOVIC, Štefica; NOVOSEL-RADOVIC, Vjera; JENKO, Monika. **Characterization of steel mill electric-arc furnace dust.** *Journal of Hazardous Materials*, v. B109, p. 59–70, 2004.

SOUZA, Sérgio A. de. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos.** 5.ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1982.

SOUZA, S. P. M. C. de. **Determinação do teor de cálcio através de termogravimetria em medicamentos utilizados no tratamento da osteoporose: um estudo comparativo.** Dissertação mestrado em química – centro de ciencias exatas e da terra, programa de pós graduação em química, universidade federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

STRAPASSON, R. **Valorização do polipropileno através de sua mistura e reciclagem.** Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mecânica, setor de tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

TAKANO, C.; DEODORO, J. T. C.; NASCIMENTO, R. C.; MOURÃO, M. B.; LENZ, G.; MARTINS, D. S. **A reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos.** In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE REUSO/RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS, 2000, São Paulo. São Paulo: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

THAKUR, U. et al. **Corrigendum: Investigation into the Advantages of Pure Perovskite Film without Pbl2 for High Performance Solar Cell.** Scientific Reports, v. 7, p. 43979, 2017.

THIO, Y. S.; ARGON, A. S.; COHEN, R. E. & WEINBERG, M. - **Polymer**, 43, p.3661 (2002).

UMADEVI, T; BRAHMACHARYULU, A; KARTHIK, P; MAHAPATRA, P.C; PRABHU, M; RANJAN, M. **Recycling of steel plant mill scale via iron ore sintering plant.** Ironmak Steelmak. 2012 Apr;39(3):222–7.

VAN KREVELEN DW. **Properties of Polymers**, Elsevier Publishing Company, New York, 1990.

VELDE, K. V.; KIEKENS, P. - **Composite Structures**, 54, p. 355 (2001).

VIGANO, Jocelaine B.; WILBERG, Katua Q.; KAUTZMANN Rubens M.; LENZ, Denise M. **Recuperação de zinco do pó de exaustão de indústria siderúrgica em meio alcalino.** Revista Matéria (UFRJ), Rio de Janeiro, v. 9, n.4, p. 437-444, 2004.

VILAPLANA, F.; KARLSSON, S.; RIBES-GREUS, A.; SCHADE, C.; NESTLE, N. **NMR relaxation reveals modifications in rubber phase dynamics during long-term degradation of high-impact polystyrene (HIPS).** Polymer, v. 52, n. 6, p. 1410–1416, 10 mar. 2011.

VILAPLANA, F.; RIBES-GREUS, A.; KARLSSON, S. **Chromatographic pattern in recycled high-impact polystyrene (HIPS) – Occurrence of low molecular weight compounds during the life cycle.** Polymer Degradation and Stability, v. 95, n. 2, p. 172–186, fev. 2010.

WHITELEY KS, HEGGS TG, KOCH H, MAWER RL. POLYOLEFINS, ULLMANN'S. **Encyclopedia of Industrial Chemistry**, Ed. B. Elvers et al, VCH, New York, United States, 487, 1982.

WIEBECK, H; HARADA, J. **Plásticos de Engenharia: Tecnologia e Aplicações.** São Paulo: Artliber, 2012, 350 p.