

Ewerton de Castro Teixeira

Gustavo Luiz Alves

***ESTUDO DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO
COMO PIGMENTO DE RESINAS DE POLIPROPILENO***

Ewerton de Castro Teixeira

Gustavo Luiz Alves

***ESTUDO DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO
COMO PIGMENTO DE RESINAS DE POLIPROPILENO***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil,
da Universidade Federal de São João del-Rei, *Campus* Alto
Paraopeba, como requisito parcial para a obtenção do grau
de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Anderson Ravik dos Santos

Ouro Branco – Minas Gerais
Julho de 2023

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB)
e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

T266e	Teixeira, Ewerton de Castro. Estudo da viabilidade da utilização de rejeito de minério de ferro como pigmento de resinas de polipropileno./ Ewerton de Castro Teixeira; Gustavo Luiz Alves; orientador Anderson Ravik dos Santos. -- Ouro Branco, MG, 2023. 10 f. il. Trabalho de Conclusão (Graduação - Engenharia Civil) - Universidade Federal de São João del-Rei, 2023. 1. Rejeito de barragem de minério de ferro 2. Pigmentação 3. Engenharia Civil 4. Matriz polimérica I. Alves, Gustavo Luiz. II. Santos, Anderson Ravik dos, orient. III. Título.
-------	---

Ewerton de Castro Teixeira

Gustavo Luiz Alves

ESTUDO DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO COMO PIGMENTO DE RESINAS DE POLIPROPILENO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de São João del-Rei, Campus Alto Paraopeba, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 04 de julho de 2023

COMISSÃO EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 ANDERSON RAVIK DOS SANTOS
Data: 12/07/2023 12:59:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Anderson Ravik dos Santos
(Professor Orientador)

Documento assinado digitalmente
 CLIVIA DIAS COELHO
Data: 12/07/2023 12:34:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Clivia Dias Coelho
(Professora da Engenharia Civil da UFSJ)

Documento assinado digitalmente
 ANDREIA DA CONCEICAO DE FARIA
Data: 11/07/2023 21:02:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng. Civil Me. Andreia da Conceição de Faria
(Avaliadora convidada)

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer à Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), a todos os docentes e colaboradores desta instituição, pelo apoio, carinho e troca de experiências que contribuíram para uma educação pública de qualidade. Especialmente ao nosso professor, mestre, orientador e amigo Anderson Ravik dos Santos, por sua paciência, conselhos e excelente orientação no trabalho de conclusão de curso. Também gostaríamos de expressar a nossa gratidão ao Laboratório de Geotecnia e Estradas, vinculado à UFSJ no Campus Alto Paraopeba, e ao técnico responsável, Marcus Fillipe Marinho Reis, agradecemos pela orientação e assistência nos experimentos. Ao laboratório de Materiais de Construção, vinculado à UFSJ no Campus Alto Paraopeba, e à técnica responsável, Andreia da Conceição de Faria, pela valiosa ajuda e orientação. Não podemos deixar de mencionar o Laboratório Intechlab, vinculado ao Programa de Pós-graduação e Departamento de Química (DEQUI) do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), representado pela Professora Patrícia Santiago de Oliveira Patrício, pela infraestrutura concedida, sem a qual este trabalho não teria sido possível.

ESTUDO DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO COMO PIGMENTO DE RESINAS DE POLIPROPILENO

Ewerton de Castro Teixeira¹; Gustavo Luiz Alves¹

1: Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), Brasil
Campus Alto Paraopeba (CAP)
Rod. MG 443, KM 7, Fazenda do Cadete, Ouro Branco - MG 36495-000
<https://www.ufsj.edu.br/cap/>

Resumo A indústria mineradora brasileira desempenha um papel significativo na economia do país, no entanto, ela também gera grandes volumes de rejeitos durante o processo de beneficiamento dos minérios, resultando em impactos ambientais severos. Pesquisas recentes têm explorado o potencial do rejeito de minério de ferro como matéria-prima na fabricação de materiais de construção, com o objetivo de promover a redução do impacto ambiental. A coloração característica adquirida pelos materiais produzidos pode contribuir na sua aplicação em alguns segmentos, onde o fator estético é relevante. Neste estudo, buscou-se avaliar a aplicabilidade do rejeito de minério de ferro, proveniente do rompimento de barragem ocorrido em Mariana-MG, como pigmento do polipropileno, amplamente utilizado como matriz polimérica de compósitos, em especial de madeiras plásticas. Foram desenvolvidas amostras com diferentes teores de polipropileno e rejeito de minério de ferro, este variando de 1 a 10 % em massa, a partir dos processos de mistura termocinética, moagem, extrusão, peletização e compressão a quente. Os corpos de prova produzidos foram analisados quanto à sua aparência, e avaliados quanto ao seu desempenho mecânico. Os resultados obtidos demonstram que o rejeito possui alto poder de pigmentação quando incorporado ao polipropileno, além de não comprometer sua performance quanto às propriedades mecânicas, proporcionando inclusive ganho de resistência à flexão. Entretanto, o volume de material residual utilizado é muito baixo em relação ao volume de compósitos produzido, indicando pouco potencial em relação ao reaproveitamento do material.

Palavras-chave: Rejeito de barragem de minério de ferro, Pigmentação, Engenharia Civil, Matriz polimérica.

Abstract The Brazilian mining industry plays a significant role in the country's economy; however, it also generates large volumes of tailings during the ore beneficiation process, resulting in severe environmental impacts. Recent research has explored the potential of iron ore tailings as a raw material in the manufacture of construction materials, with the aim of promoting environmental impact reduction. The characteristic coloring acquired by the materials produced can contribute to their application in some segments, where the aesthetic factor is relevant. In this study, we sought to evaluate the applicability of iron ore tailings, from the dam-breaking disaster that occurred in Mariana-MG, as a pigment for polypropylene, widely used as a polymeric matrix for composites, especially plastic wood. Samples were developed with different contents of polypropylene and iron ore tailings, the latter varying from 1 to 10% in mass, from the processes of thermokinetic mixing, milling, extrusion, pelletization and hot compression. The produced specimens were analyzed as to their appearance, and evaluated as to their mechanical performance. The results obtained show that the tailings have a high pigmentation power when incorporated into the polypropylene, besides not compromising its performance in terms of mechanical properties, even providing flexural strength gains. However, the volume of waste material used is very low in relation to the volume of composites produced, indicating little potential in relation to the reuse of the material.

Key-words: Iron ore dam tailings, Pigmentation, Civil Engineering, Polymeric matrix.

1. INTRODUÇÃO

A indústria mineradora desempenha um papel fundamental na economia brasileira, especialmente no que diz respeito à produção de minério de ferro, que corresponde a 1,4 % do Produto Interno Bruto (PIB) do país (IBRAM, 2019). No entanto, essa atividade também ocasiona impactos ambientais significativos, especialmente relacionados à disposição dos grandes volumes de rejeito gerados durante o processo de beneficiamento dos minérios. Devido à crescente demanda global por minério de ferro, rochas com baixos teores de ferro passaram a ser extraídas, resultando em um aumento da geração de resíduos e exigindo a construção de barragens cada vez maiores para o seu armazenamento e disposição (CARNEIRO, 2020). De acordo com a Agência Nacional de Mineração (ANM, 2023), a produção de minério de ferro atingiu cerca de 430 milhões de toneladas em 2022. Segundo o Instituto de Pesquisa Tecnológicas (IPT, 2016) são gerados 0,4 toneladas de rejeito para cada tonelada processada de minério de ferro. Isso significa que, somente no ano de 2022, foram geradas aproximadamente 172 milhões de toneladas de rejeito de minério de ferro (RMF).

Os impactos da mineração e a gestão dos rejeitos ganharam destaque especialmente após o rompimento de uma barragem de RMF na cidade de Mariana-MG, em novembro de 2015. Esta tragédia resultou em perdas significativas de vidas humanas e animais, além de graves impactos ambientais, sociais e econômicos (COURA, 2018). Aproximadamente 40 milhões de metros cúbicos de rejeitos foram despejados no meio ambiente, afetando uma extensão de 663 quilômetros de cursos d'água, além de 1469 hectares de vegetação (CARNEIRO, 2020). Segundo o relatório do grupo Força Tarefa de Mariana (2016), aproximadamente 2 mil pessoas foram diretamente afetadas, resultando em 17 mortos, 256 feridos, 280 enfermos, 644 desabrigados, 716 desalojados e 2 desaparecidos.

Recentemente, pesquisadores têm se dedicado a explorar formas de se utilizar o RMF proveniente do desastre ocorrido em Mariana-MG como matéria-prima na fabricação de materiais de construção civil. Esta abordagem busca transformar o RMF em um recurso reaproveitável, promovendo a redução do impacto ambiental associado. As pesquisas têm demonstrado que o material residual pode ser incorporado em diferentes materiais de construção, como cerâmicas de revestimento (RUY, 2022), misturas asfálticas coloridas (MORAES, 2022) e blocos cerâmicos (MENDES, 2019).

Moraes (2022) avaliou a possibilidade de substituição do pó de pedra por RMF em misturas asfálticas, com o objetivo de utilizá-lo como corante. Os resultados demonstraram a viabilidade técnica da incorporação de 12,5 % de RMF, resultando em um aumento de 40,25 % na refletância e uma redução de 2,38 °C na temperatura externa, o que pode contribuir para a diminuição do fenômeno conhecido como Ilha de Calor Urbano. Nascimento (2019) avaliou o uso de RMF como pigmento em concretos, bem como sua influência na resistência mecânica e durabilidade. Em relação à pigmentação, o material apresentou influência significativa sobre a cor do concreto com uma adição de 10 e 15 % do rejeito, propiciando um tom avermelhado ao material. Além dos incrementos de até 11 % de resistência à compressão, os concretos com RMF apresentaram menor absorção de água, indicando uma contribuição para sua vida útil.

O RMF proveniente do desastre em Mariana-MG também tem sido incorporado na produção de madeira plástica, um compósito polimérico formado por pelo menos duas fases ou componentes diferentes, geralmente uma matriz polimérica e outra fase de reforço orgânica ou inorgânica (BRASKEM, 2016). Bressiani *et al.* (2021) produziram madeiras plásticas utilizando 30 e 40 % em massa de RMF em matrizes poliméricas de Poliestireno (PS), sendo que as amostras produzidas apresentaram aspectos de superfície e cor como os de madeira natural. Coura (2018) produziu madeiras plásticas baseadas em Polietileno de alta densidade (PEAD) e 20 % de RMF em massa, com o intuito de avaliar as modificações promovidas por diferentes metodologias de processamento.

Algumas vantagens da madeira plástica são: impermeabilidade, durabilidade, resistência a microrganismos, trabalhabilidade, reciclabilidade e a possibilidade de ser utilizada para diversos fins, similar a madeira comum (NAZÁRIO, 2016). Segundo Guimaraes (2013), a madeira plástica pode facilmente substituir a madeira natural e, em alguns casos, o cimento e até o aço. Dentre sua vasta aplicação, pode ser utilizada para a fabricação de decks, perfis variados, dormentes para via férrea, estacas e pallets. De acordo com Santos *et al.* (2022) o aspecto visual da madeira plástica, advindo da mistura entre os componentes do compósito, deve remeter à madeira natural para valorizar o material e facilitar sua aceitação no mercado como substituto das espécies arbóreas. Desta forma, o RMF pode funcionar não só como carga de madeira plástica como também como pigmento. Os pigmentos inorgânicos possuem diversas vantagens quando aplicados para colorir matrizes poliméricas, principalmente de cores claras. Como muitos polímeros possuem temperatura de moldagem acima de 200 °C, os pigmentos inorgânicos como é o caso do RMF são muito úteis para colorir este tipo de plástico, já que possuem excelente resistência térmica (JAFELICCI, 2019).

No que diz respeito à matriz polimérica de madeiras plásticas, o mais comum é que se utilizem polímeros termoplásticos, dentre os quais o Polipropileno (PP) se destaca por apresentar boa resistência mecânica, baixo peso específico, boa transparência, facilidade de reciclagem e elevada processabilidade (MONSORES *et al.*, 2017). Neste sentido, o objetivo principal deste trabalho é avaliar a influência e

aplicabilidade do RMF, proveniente do rompimento da Barragem do Fundão, em Mariana-MG, como agente pigmentante do PP, potencializando a utilização deste polímero como matriz de madeiras plásticas ou outros compósitos em que o apelo estético seja relevante. Ainda, será avaliada a influência do RMF nas propriedades mecânicas do polímero, conforme o teor de material adicionado.

2. METODOLOGIA

2.1. Materiais e Moldagem dos corpos de prova

Os materiais utilizados neste estudo foram RMF e Polipropileno virgem (PPv). O RMF, proveniente do desastre do rompimento da barragem em Mariana-MG, foi coletado e tratado por uma mineradora da cidade de Congonhas-MG. Sendo assim, já estava seco e destorroado. O PPv, fabricado pela Braskem, possuía índice de fluidez igual e 3,5 g/10 minutos e densidade de 0,905 g/cm³ (BRASKEM, 2020).

A mistura PPv com o RMF foi realizada via homogeneização termocinética, utilizando aproximadamente 186 g dos dois materiais em conjunto. O equipamento utilizado trata-se de um Homogeneizador de Laboratório (Drais), modelo MH-100 da marca MH Equipamentos, que facilita a dispersão do RMF na matriz polimérica de PPv. Inicialmente o teor de RMF variou de 1 a 5 %. Optou-se pela proposição de baixos teores para que o RMF sobressaísse como agente pigmentante ao invés de carga de enchimento/reforço. Ainda assim, uma amostra contendo 10 % de RMF também foi produzida visando facilitar a discussão acerca de como o teor de RMF pode influenciar nas propriedades mecânicas do compósito. Foram produzidas também duas amostras utilizando PP reciclado (PPr) industrial de cor preta, e PPr proveniente de máscaras de Tecido Não Tecido (TNT), de cor azul, a fim de verificar se a coloração do RMF consegue se sobrepor a corantes pré-existentes em polímeros reciclados. A Tabela 1 apresenta as composições das amostras utilizadas.

Tabela 1 – Composição das amostras utilizadas.

Amostra	PPv (%m)	RMF (%m)
99PPv1RMF	99	1
98PPv2RMF	98	2
97PPv3RMF	97	3
95PPv5RMF	95	5
90PPv10RMF	90	10
98PPrp2RMF	98	2
98PPra2RMF	98	2

Como o processo envolve um misturador termocinético rotacional, a mistura dos materiais e a fusão do polímero ocorreram devido ao atrito e rotação. O material resultante apresentava aspecto pastoso e sem forma definida, de rápido resfriamento, não sendo comportado pelo molde utilizado na prensa hidráulica. Por isso, foi necessário processar as misturas, depois de resfriadas, em um moinho de facas (Marconi, modelo MA 580) para redução de partículas.

As amostras fragmentadas foram extrudadas utilizando uma extrusora monorosca de laboratório (Thermo Scientific, HAAKE PolyLab), com temperatura de 175 °C nas 3 zonas de aquecimento e velocidade do parafuso de 45 rpm. Após a extrusão, o material em formato de corda, com diâmetro médio de 3,40 mm, foi reduzido em um Peletizador (AX Gran, AXPlástico), resultando em grãos de aproximadamente 3,70 mm de comprimento.

O material, agora com aspecto granular, foi inserido em molde metálico retangular (comprimento 150 mm, largura 100 mm e espessura 1 mm) e prensado entre duas placas utilizando uma prensa hidráulica com aquecimento (marca SOLAB, modelo SL11) a 180 °C, sob uma carga de aproximadamente 25 MPa, durante 5 minutos. Após a prensagem, as placas foram deixadas em repouso por 10 minutos, sob a mesma pressão de moldagem. Depois de resfriadas e desmoldas as placas foram cortadas com o auxílio de uma lâmina metálica em corpos de prova de 100 mm de comprimento, 13 mm de largura e 1 mm de espessura. Os materiais utilizados e processos descritos estão dispostos no fluxograma apresentado na Figura 1.

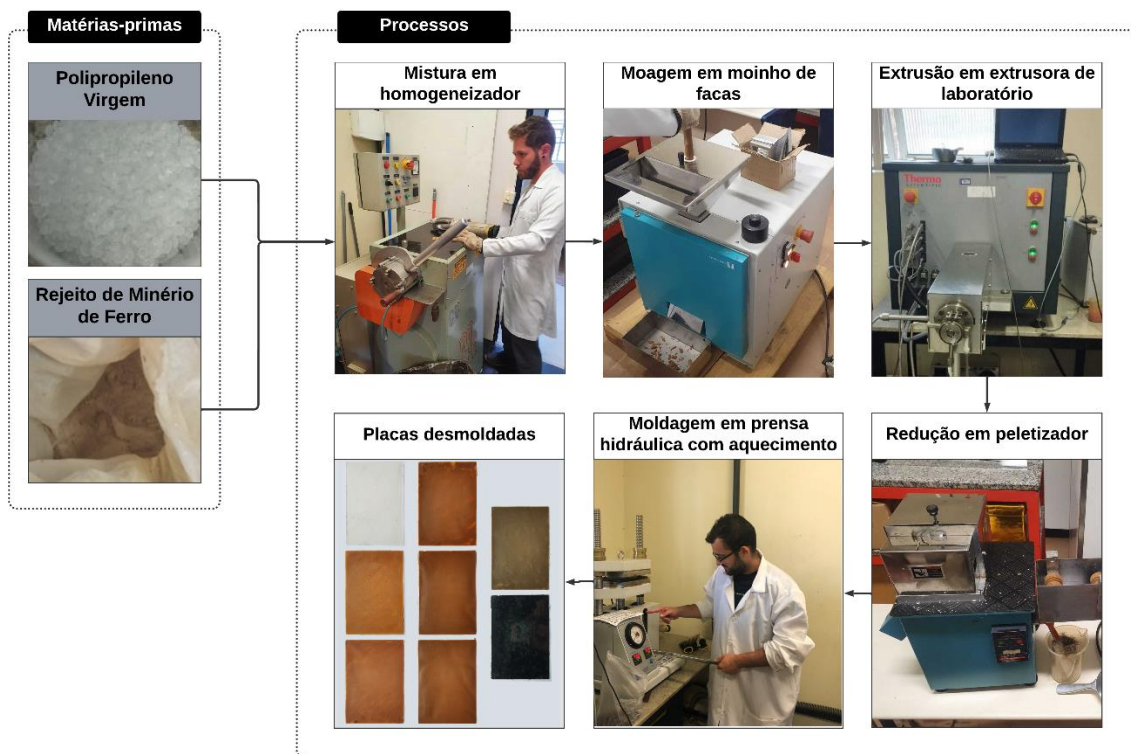


Figura 1 – Materiais e metodologia utilizada para a produção dos corpos de prova.

2.2. Caracterização mecânica dos compósitos

Foram utilizados seis corpos de prova (CP) de cada dosagem, da amostra de controle (100 % PPv) e das misturas de PPr, para a determinação das propriedades de tração. Para tanto, utilizou-se uma máquina universal de ensaios (Instron, modelo EMIC 23-20) acoplada com garras para tração, operando com velocidade de 50 mm por minuto, seguindo as diretrizes da norma D638 (ASTM, 2014). Os resultados foram obtidos calculando-se a média aritmética dos seis CP ensaiados.

Para determinar a resistência a flexão foi utilizada a mesma máquina universal de ensaios (Instron, modelo EMIC 23-20) com uma velocidade de ensaio de 30 mm por minuto. Foram selecionados quatro CP de cada dosagem, da amostra de controle (100 % PPv) e das misturas de PPr e os resultados foram obtidos por meio da média aritmética dos quatro CP ensaiados. O ensaio foi conduzido de acordo com a norma D790 (ASTM, 2007).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Análise dos Corpos de Prova

Na Figura 2 são apresentados os corpos de prova (CP) dos compósitos produzidos, cuja nomeação remete ao tipo de matriz e porcentagens de RMF utilizados. A amostra 99PPv1RMF, por exemplo, é composta por 99 % em massa de PPv e 1 % em massa de RMF. Também foram produzidas amostras de controle a partir da resina pura (100PPv), e amostradas de comparação a partir do PP reciclado industrial de cor preta (98PPrp2RMF) e PP reciclado em laboratório, de cor azul (98PPra2RMF).

Percebe-se, pelo aspecto dos CP, a capacidade do RMF de conferir coloração ao PP, mesmo quando representa apenas 1 % em massa do compósito. Esta coloração é sobressalente nos compósitos produzidos a partir do polímero virgem e adquire tonalidades mais escuras a medida em que se aumenta o teor de RMF. Ainda assim, quando expostas sobre a mesma superfície sólida, como é o caso da Figura 2, as amostras produzidas com 3, 5 e 10 % de RMF não apresentam diferença significativa de coloração, não sendo possível diferenciá-las.

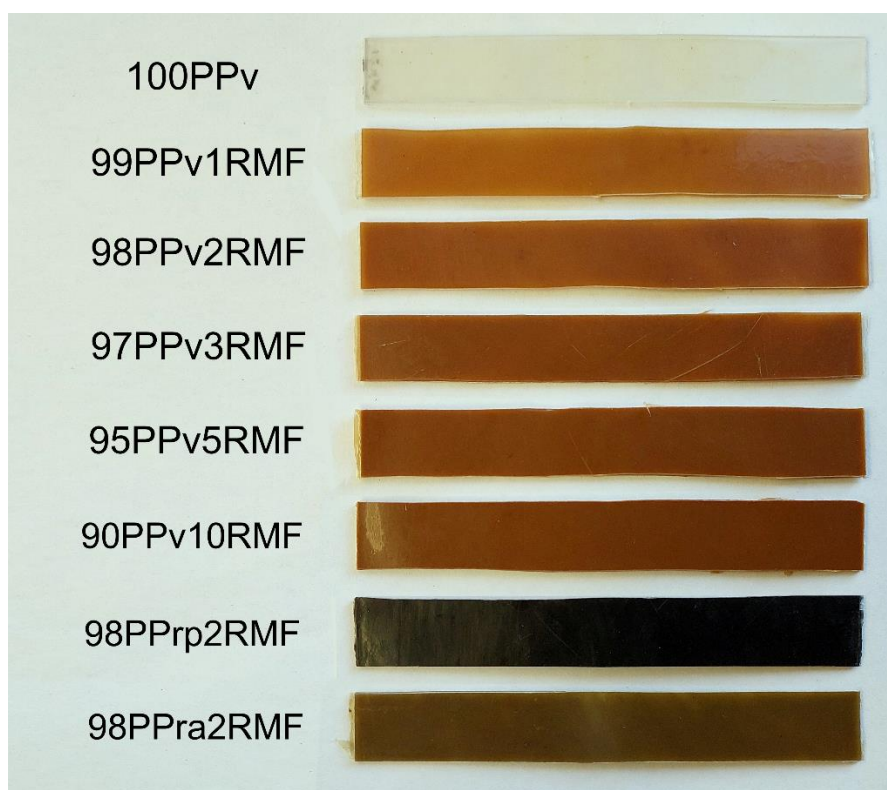


Figura 2 – Corpos de prova das amostras.

A facilidade com que o RMF funcionou como agente pigmentante está ligada ao fato de que o PPv originalmente é transparente. Como exposto por Chen *et al.* (2016), pigmentos inorgânicos são ideias para colorir polímeros de tons claros, e mesmo em baixas concentrações continuam com boa resistência térmica. A amostra 98PPrp2RMF, entretanto, não apresenta alteração significativa em sua tonalidade, que originalmente já é escura. E O PP reciclado azul, por sua vez, quando misturado com 2 % em massa de RMF, apresentou uma coloração esverdeada. Desta forma, além do teor de RMF utilizado, a origem da matriz de PP influencia fortemente na coloração final do compósito produzido. Ainda assim, todos os tons alcançados evocam tonalidades familiares, com aparência capaz de despertar memórias afetivas associadas à madeira natural, o que possibilita a utilização de RMF para colorir madeiras plásticas.

A prevalência da tonalidade vermelho-ocre nas amostras indica a presença de hematita (Fe_2O_3) no rejeito (BRANCO, 2015). Esta composição foi comprovada por Coura (2018), que caracterizou uma amostra de RMF de mesma origem por meio de análise de fluorescência de raios-x e constatou uma predominância de 58,1 % de óxido de ferro. A mesma tonalidade foi verificada no estudo conduzido por Galvão *et al.* (2018), no qual o RMF foi empregado como base para pigmentos avermelhados na produção de tintas sustentáveis.

A diferença de coloração das amostradas é mais evidente quando as placas obtidas a partir da moldagem por compressão são observadas contra a luz, como pode ser visto na Figura 3. A incidência direta da luz faz com que as amostras sejam facilmente discriminadas, de forma que a tonalidade do RMF se acentua à medida que o seu teor aumenta no compósito. Também é possível perceber como a adição de RMF aumenta não somente a cor como também a opacidade dos materiais. Isso porque enquanto o PPv é um material translúcido comumente utilizado em garrafas, seringas e recipientes, o RMF, é uma substância inorgânica com elevada opacidade, principalmente se comparado a pigmentos orgânicos (TORRES, 2018).

Embora a imagem dos CP (Figura 2) sugira uma mistura homogênea das amostras, a imagem das placas contra a luz (Figura 3) permite observar pequenas regiões de maior transparência nas amostras com até 5 % de RMF, sendo esta ocorrência menos evidente na amostra com 1 % de rejeito. Essa variação na opacidade e cor ao longo da mesma placa indicam que os grãos peletizados apresentaram pigmentação diferentes entre si, sendo alguns mais transparentes que outros. Acredita-se que a homogeneidade conseguida por meio da mistura termocinética das matérias-primas tenha sido perdida durante o processo de extrusão. Nesta etapa do processamento, a amostra pode ter sido poluída com uma quantidade extra de PPv, utilizado no processo de limpeza da extrusora antes e após a extrusão. Vale ressaltar a diferença significativa no aspecto do compósito com 10 % de RMF, sendo este o mais opaco entre as amostras produzidas a partir do PPv.



Figura 3 – Placas das amostras contra a luz.

Além da tonalidade, outros determinantes nas características apresentadas por um pigmento são o tamanho médio e a distribuição granulométrica das partículas (BUXBAUM e PFAFF, 2005). Neste sentido, o RMF se mostra uma promissora matéria-prima. Isso porque, para aplicação de um resíduo com elevado percentual de óxido de ferro como pigmento, é preferível que a matéria-prima apresente uma distribuição granulométrica estreita com pequenos tamanhos de partículas, o que pode influenciar na cor apresentada pela hematita: vermelho ou violeta forte (TAVARES, 2012; MONTEDO *et al.*, 2004). Coura (2018) analisou o RMF em estudo quanto à sua granulometria, e percebeu que as partículas se encontram em uma faixa granulométrica de 0,01 a 70 μm , sendo, em média, 50 % do material inferior a 8,16 μm . Esta parcela está dentro da faixa aceitável para pigmentos descrita por Buxbaum e Pfaff (2005): entre 0,01 e 10 μm .

3.2. Resistência mecânica

As Figuras 4 e 5 apresentam, respectivamente, as curvas de Tensão/Deformação e os valores médios do módulo de elasticidade, ambos obtidos durante o ensaio de resistência à tração.

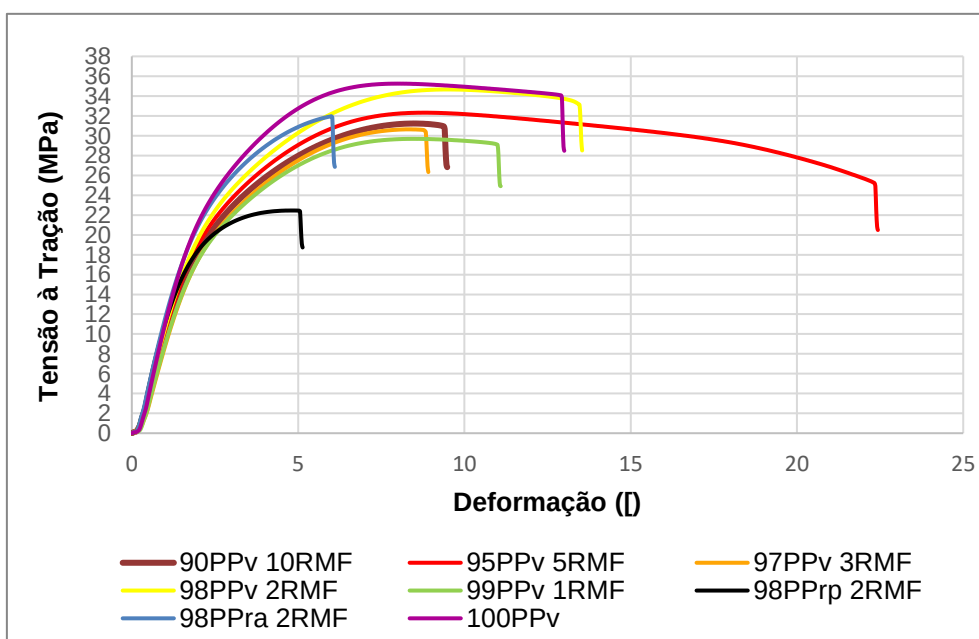


Figura 4 – Resistência à tração e deformação das amostras.

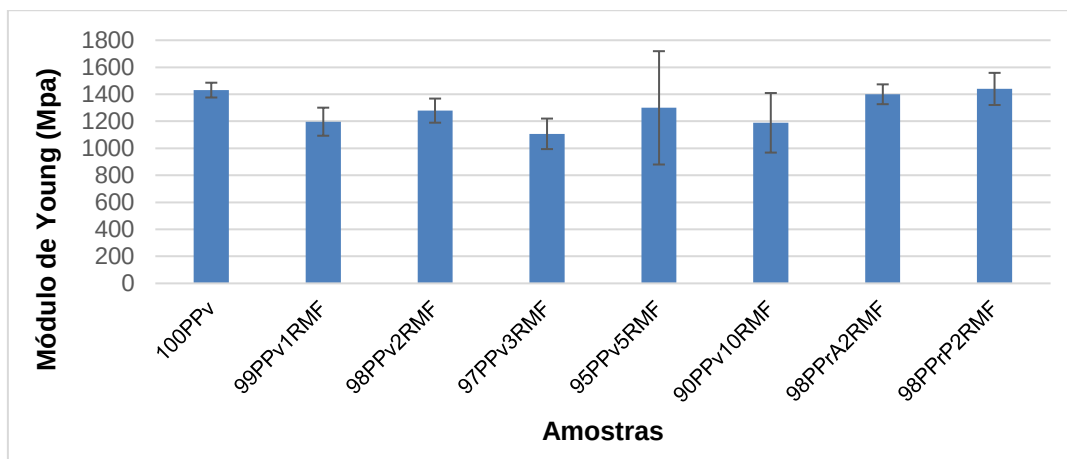


Figura 5 – Módulo de elasticidade na tração das amostras.

Observa-se que, de modo geral, o acréscimo de RMF ocasionou uma diminuição na resistência à tração do PPv. Ainda assim, este comportamento não foi linear, visto que em relação à amostra de controle (100PPv) a adição de 1 % de RMF resultou em uma perda de 15,80 % de resistência, de 35,25 MPa para 29,68 MPa; enquanto a adição de 2 % de RMF resultou em uma redução de 1,67 %, de 35,25 MPa para 34,66 MPa. Como esperado, as amostras de comparação, produzidas com matriz polimérica de PP reciclado também obtiveram desempenho inferior em relação ao polímero virgem, sendo a amostra 98PPv2RMF aquela com menor resistência à tração (22,46 MPa) dentre as ensaiadas. Todas as amostras, com exceção desta última, alcançaram resistência à tração superior ou muito próxima dos valores esperados para o PPv, segundo a literatura: 31 a 41,4 MPa (CALISTER; RETHWISCH, 2012). Isto evidencia que a incorporação de RMF, em baixos teores, não compromete o desempenho do PP quanto à essa propriedade.

Analisando os gráficos de Módulo de elasticidade, é possível observar que a adição de rejeito não resultou em um aumento do módulo de elasticidade das amostras, como ocorrido no trabalho de Coura (2018), onde foi observado um aumento gradual no valor da propriedade, que chegou a 48 %, em relação ao PPv. Vale lembrar que Coura (2018) produziu compósitos com 20 % de RMF para que o resíduo atuasse como carga de reforço do material, diferente do que se pretende com o presente estudo em que o foco é a pigmentação do PP. Com menores teores de RMF, o que pôde-se perceber foi a ocorrência de oscilações no módulo de elasticidade, sendo que somente a amostra de comparação 98PPv2RMF ultrapassou o valor médio alcançado pelo polímero virgem. Ainda assim, com exceção da amostra com 3 % de RMF, todas as amostras produzidas apresentaram valores de rigidez dentro do intervalo esperado para o PP, de acordo com Calister e Rethwisch (2012): 1140 a 1550 MPa. Desta forma a pigmentação do PP com RMF também não apresenta riscos ao desempenho do PP quanto à sua rigidez.

Nas Figuras 6 e 7 são apresentados, respectivamente, as curvas de Tensão/Deformação e os valores médios do módulo de elasticidade, obtidos durante o ensaio de resistência à flexão.

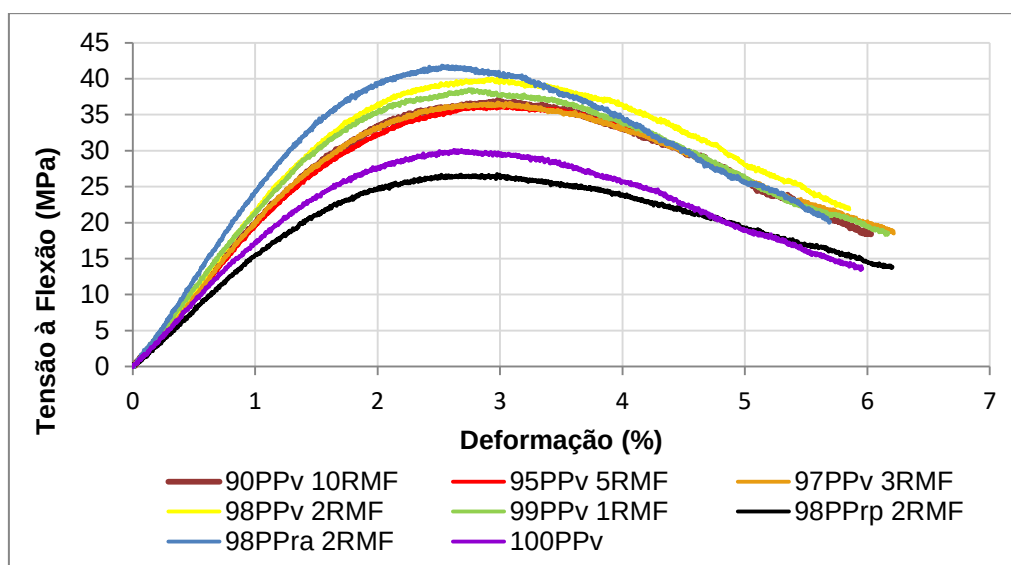


Figura 6 – Resistência à flexão e deformação das amostras.

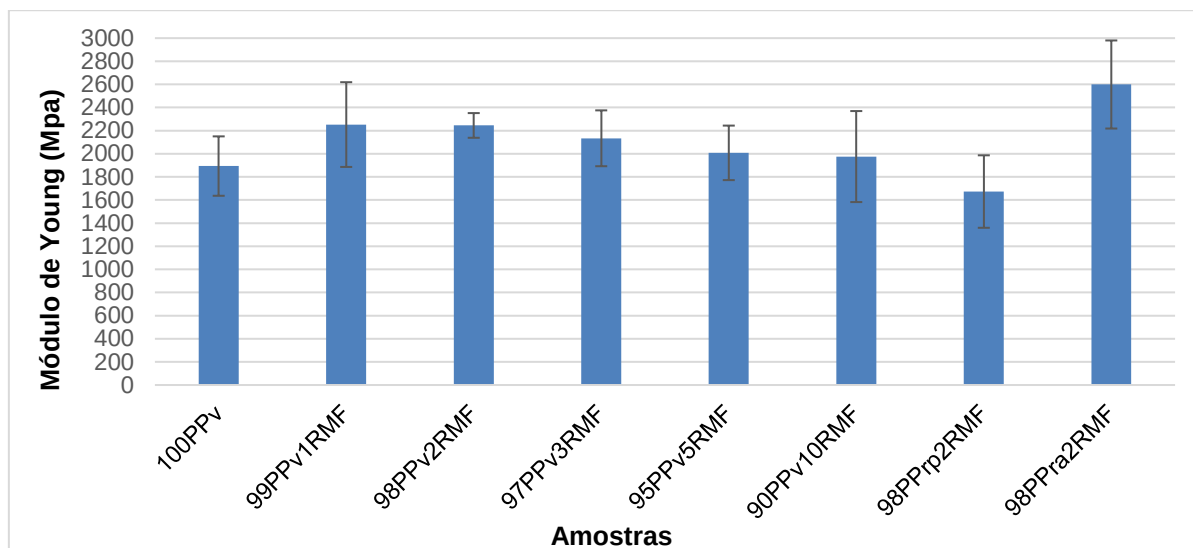


Figura 7 – Módulo de elasticidade na flexão das amostras.

Ao contrário do que foi observado nos ensaios de tração, houve uma melhoria no desempenho do PPv com a adição de RMF, tanto de resistência quanto de rigidez na flexão. O compósito com acréscimo 2 % de RMF chegou a apresentar um ganho de 28 % em relação ao PPv: passou de 30,12 para 40,05 MPa. As duas amostras de comparação exibiram desempenhos extremos: enquanto a 98PPrp2RMF obteve a pior resistência dentre os ensaios (26,77 MPa), a 98PPra2RMF foi a que alcançou maior resistência (41,84 MPa).

Ainda que possa ser observada uma diminuição progressiva da rigidez dos compósitos à medida que se aumenta de 1 para 10 % o teor de RMF, todos os compósitos produzidos a partir do PPv superaram o módulo de elasticidade da resina virgem. Assim como na resistência, o PP reciclado a partir de TNT obteve destaque quanto à rigidez do material, desempenho que pode estar associado à matriz utilizada. Desta forma, o acréscimo de RMF não comprometeu o comportamento do PP quanto à flexão. Pelo contrário, potencializou sua resistência, o que pode ser muito útil no que diz respeito aos esforços aos quais estruturas como decks são submetidas, sendo esta uma das principais aplicações da madeira plástica na construção civil.

4. CONCLUSÃO

Com base nos resultados alcançados e análises realizadas, conclui-se que o RMF utilizado neste trabalho, o qual é proveniente do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG, pode ser utilizado como agente pigmentante na coloração de polímeros. A performance satisfatória do rejeito pode ser atribuída ao aspecto visual alcançado e baixo comprometimento das propriedades mecânicas do material pigmentado. Como visto, a adição mínima de RMF já foi capaz de conferir coloração significativa ao PPv, enquanto esta tonalidade se intensificou à medida em que se aumentou a concentração de rejeito no compósito. Embora o acréscimo de RMF tenha ocasionado pequenas diminuições na resistência à tração do polímero, os valores encontrados nos ensaios permaneceram próximos ao esperado para o PPv, de acordo com a literatura. Em relação à flexão, no entanto, a adição de RMF aumentou em até 28 % sua resistência.

Vale ressaltar que a pigmentação é comumente realizada utilizando baixos teores de material pigmentando. Consequentemente, em termos de reciclagem, o volume de RMF que pode ser reaproveitado é baixo em relação ao resíduo gerado, o que representa uma ineficiência da técnica do ponto de vista ambiental. Ainda assim, os resultados alcançados ressaltam o potencial promissor dos resíduos de mineração como uma opção altamente eficiente e economicamente viável para a indústria de pigmentos, ao mesmo tempo em que contribuem para a valorização de subprodutos industriais e a redução do impacto ambiental.

Para futuras pesquisas acerca do tema recomenda-se a realização de uma maior diversidade de ensaios, principalmente daqueles que se propunham a avaliar a atuação do RMF como pigmento. São exemplos o Teste de escuridade, que mede a diferença de cores por meio da distância euclidiana entre os componentes vermelho, verde e azul, e reflete de forma mais precisa a percepção de cor pelo ser humano e o teste de Intemperismo Acelerado, que simula os efeitos de degradação na superfície dos materiais causados pela exposição à luz solar, chuva e umidade. A realização desses testes permitirá obter uma compreensão mais aprofundada das características de coloração do pigmento, bem como seu comportamento ao longo do tempo, contribuindo tanto para a obtenção da coloração desejada quanto para sua conservação.

REFERÊNCIAS

- ANM – Agência Nacional de Mineração. Anuário Mineral Brasileiro: Principais substâncias metálicas. Coordenação técnica de Karina Andrade Medeiros. – Brasília, 2023. 23p. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/PreviaAMB2022.pdf>> Acessado em: 05 de maio de 2023
- BRANCO, Pércio de Moraes. Pigmentos Minerais. Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2015. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/SGB-Divulga/Canal-Escola/Pigmentos-Minerais-1263.html>. Acesso em: 20 jun. 2023.
- BRASKEM; Glossário de Termos Aplicados a Polímeros - Boletim Técnico nº 08, 2016. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/cms/Principal/Catalogo/Download?CodigoCatalogo=5>. Acesso em: 20 jun. 2023.
- BRASKEM; Poliolefinas – Tabelas de propriedades, 2020. Disponível em: https://www.braskem.com.br/Portal/Principal/Arquivos/html/boletm_tecnico/Glossario_de_termos_aplicados_a_polimeros.pdf. Acesso em: 20 jun. 2023.
- BRESSIANI, Thaiany SC *et al.* Produção de Madeira Plástica a partir do Rejeito de Mineração e Resíduo Plástico: Uma Atividade Experimental. 2021.
- BUXBAUM, G.; PFAFF, G. Industrial Inorganic Pigments. 3ª. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2005. ISBN 978-3-527-30363-2.
- CARNEIRO, Andressa de Araujo. Comportamento mecânico de um rejeito de minério de ferro estabilizado com polímero e do compósito rejeito-polímero reforçado com fibras de polipropileno. Orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2020. 164p.
- CHEN, X.; QIAO, H.; XU, Y.; YUN, D.; YUAN, J. Main Types and Properties of Inorganic Pigments and Specialty Effect Pigments. In: _____. Coloring of Plastics: fundamental application- masterbatch. Beijing: Chemical Industry Press, 2016. chap. 3, p. 61-131.
- COURA, Ítalo Rocha. Avaliação do processamento de compósitos baseados em polietileno de alta densidade e rejeito de mineração de ferro. Orientadora: Profa. Dra. Patrícia Santiago de Oliveira. 72f. Dissertação (Mestrado) – Ciência e Desenvolvimento de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
- GALVÃO J. L. *et al.* Reuse of Iron Ore Tailings From Tailings dams as pigment for sustainable paints. Journal of cleaner products, 412- 422, 2018.
- GUIMARAES, Luiz Felipe Cerceau. Avaliação dos aspectos técnicos e econômicos na produção de madeira plástica por meio da utilização de materiais reciclados. 2013.
- IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. Relatório Anual de Atividades - Janeiro a dezembro de 2019. [s.l.], 2019. 63p.
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Tratamento de rejeitos é solução alternativa e economicamente viável à barragem de mineradoras, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 16 de fevereiro de 2016. Disponível em: <https://www.ipt.br/noticias_interna.php?id_noticia=1043> Acessado em: 05 de maio de 2023.
- JAFELICCI, Frederico Davolos. Pigmentos inorgânicos para aplicação em plásticos. 2019. 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- MINAS GERAIS. Relatório: avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana (MG). 2016. Disponível em: Agência Minas. Disponível em: <https://www.agenciaminas.mg.gov.br/ckeditor_assets/attachments/770/relatorio_final_ft_03_02_2016_15h5min.pdf>. Acesso em: 05 de maio de 2023.
- MENDES, Beatryz Cardoso. Reaproveitamento do rejeito de minério de ferro, liberado no desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão (MG), na produção de blocos cerâmicos. 2019. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2019.
- MONSORES, Carolyne Gomes Castro *et al.* Materiais Compósitos à base de PP e moscovita. 2017.
- MONTEDO, O. R. K. *et al.* Obtenção de Pigmentos de Óxido de Ferro a partir de Resíduos Siderúrgicos. In: Proceedings of the 48th Annual Meeting of the Brazilian Ceramic Society, Curitiba, Brazil. 2004.
- MORAES, Thalita Maria Ramos Porto de *et al.* Utilização do rejeito de minério de ferro para produção de misturas asfálticas coloridas. Orientador: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena. 156f. Tese (Pós-Graduação) – Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina

Grande, 2022.

NASCIMENTO, D. W. Estudo sobre a influência da adição de resíduo de minério de ferro como pigmento e nas propriedades do concreto de cimento Portland. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

NAZÁRIO, Gabriel Fernando *et al.* Madeira plástica: Uma revisão conceitual. Revista Engenharia em Ação UniToledo, v. 1, n. 01, 2016.

RUY, Valter Antonio. Reaproveitamento do rejeito de enriquecimento do minério de ferro - lodo de Mariana-MG, para a produção de cerâmica ambientalmente correta. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

SANTOS, A. R.; SILVA, T. V. ; BRAGA, G. D. ; PATRICIO, P. S. O. ; FONTES, W. C. . Aplicabilidade de resíduos de papelão ondulado como carga de compósitos madeira-plástico para a construção civil. In: 4º Congresso luso-brasileiro de materiais de construção sustentáveis, 2022, Salvador, Bahia. Anais do evento 4º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 2022. p. 965-977

TAVARES, P. H. C. P. Obtenção de pigmentos de óxido de ferro a partir da lama gerada no beneficiamento de itabirito. 2012. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

TORRES, Sara Alexandra de Oliveira. Caracterização da influência dos corantes nas propriedades físicas das tintas e durabilidade de cor. 2018. Tese de Doutorado.