

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE EVA
MICRONIZADO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO POLIPROPILENO
RECICLADO PÓS CONSUMO (PP-PCR)**

Por

Lorena Loureiro Ladeira

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenharia Mecânica.

Porto Alegre, fevereiro de 2024.

Ladeira, Lorena Loureiro

Estudo sobre a Influência da Incorporação de Resíduo de EVA Micronizado nas Propriedades Mecânicas do Polipropileno Reciclado Pós Consumo (PP-PCR) / Lorena Loureiro Ladeira. -- 2024.

25 f.

Orientador: Patric Daniel Neis.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, BR-RS, 2024.

1. Reciclagem. 2. Polipropileno. 3. Resíduo de EVA.
I. Neis, Patric Daniel, orient. II. Título.

Lorena Loureiro Ladeira

**ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE EVA
MICRONIZADO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO POLIPROPILENO
RECICLADO PÓS CONSUMO (PP-PCR)**

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Ignacio Iturrioz
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Processos de Fabricação**

Orientador(a): Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Patric Daniel Neis (Presidente)

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzales

Prof. Dr. Liu Yesukai de Barros

Me. Tadeu Mezacasa Forest

Porto Alegre, fevereiro de 2024

AGRADECIMENTOS

À Braskem S.A pela disponibilização dos recursos para realização dos ensaios, aos profissionais da empresa, em especial a todos os colegas do Centro de Tecnologia & Inovação de Triunfo e ao meu líder educador, Tadeu Mezacasa Forest, por todo conhecimento compartilhado, apoio e orientação durante o meu período de estágio.

Ao Professor Dr. Patric Daniel Neis pela orientação, disponibilidade e ensinamentos.

Aos meus amigos e familiares que contribuíram de algum modo para a realização deste trabalho e conclusão do curso. Em especial ao meu companheiro Renato por todo apoio para superar os desafios durante este percurso de graduação.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo ensino gratuito e de qualidade.

LADEIRA, Lorena L. **Estudo sobre a Influência da Incorporação de Resíduo de EVA Micronizado nas Propriedades Mecânicas do Polipropileno Reciclado Pós Consumo (PP-PCR)**. 2024. 27. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

RESUMO

Durante a reciclagem mecânica do Polipropileno Pós Consumo (PP-PCR) é comum a contaminação com outros resíduos plásticos. Cada produto polimérico destinado para reciclagem apresenta diferentes componentes e podem apresentar níveis de degradação. O resultando é um produto final com propriedades mecânicas que dependem da fonte utilizada na reciclagem e com aplicação restrita pela tenacidade e rigidez, limitando o uso do PP-PCR como polímero de engenharia. Para melhorar o desempenho do PP-PCR podem ser adicionados aditivos, como os agentes modificadores de tenacidade (impacto) no processamento do material. Estudos com compostos de PP virgem e Copolímero Etileno Acetato de Vinila (EVA) virgem mostraram que o EVA atua como um modificador de tenacidade no polipropileno. O EVA é um material de ampla aplicação na indústria calçadista que em função de sua produção gera resíduos de aparas de corte que não podem ser totalmente reaproveitados e são descartadas e direcionadas para aterros sanitários. O objetivo deste estudo é avaliar qual efeito da incorporação como carga do resíduo pós-industrial de EVA micronizado (moído) nas propriedades mecânicas do PP-PCR. Foram avaliados compostos com PP-PCR e resíduo de EVA. Os compostos foram extrudados em extrusora dupla-rosca e posteriormente analisados através de ensaios de Resistência ao Impacto Izod, Módulo de Flexão, Resistência à Tração e Índice de Fluidez. Os resultados mostram que o resíduo de EVA atua como tenacificante em percentuais de 30% nas amostras com PP-PCR, porém, impacta negativamente nas propriedades mecânicas de módulo de flexão e módulo elástico. Verifica-se que é possível produzir compostos com polipropileno reciclado e resíduo de EVA sem a utilização de agentes compatibilizantes de forma que o resíduo, apesar de reduzir propriedades mecânicas de rigidez, pode ser direcionado para atuar como carga, evitando seu direcionamento para aterros sanitários.

PALAVRAS-CHAVE: Polipropileno; Resíduo de EVA; Reciclagem; Caracterização.

LADEIRA, Lorena L. **The Influence of the Incorporation of Micronized EVA Waste on the Mechanical Properties of Post-Consumer Recycled Polypropylene (PP-PCR)**. 2024, 27. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

ABSTRACT

During the mechanical recycling of Post-Consumer Polypropylene (PP-PCR), contamination with other plastic waste is common. Each polymeric product intended for recycling has different components and may present levels of degradation. The result is a final product with mechanical properties that depend on the source used in recycling and with application restricted by tenacity and stiffness, limiting the use of PP-PCR as an engineering polymer. To improve the performance of PP-PCR, additives can be added, such as impact modifier agents, when processing the material. Studies with virgin PP and virgin Ethylene Vinyl Acetate (EVA) copolymer composites have shown that EVA acts as an impact modifier in polypropylene. EVA is a material widely used in the footwear industry and, due to its production, it generates cutting waste that cannot be fully reused and is discarded and sent to landfills. The objective of this study is to evaluate the effect of incorporating micronized (ground) EVA post-industrial waste as a filler on the mechanical properties of PP-PCR. Compounds were evaluated with PP-PCR and EVA residue. The compounds were extruded in a twin-screw extruder and subsequently analyzed using Izod Impact Resistance, Flexural Modulus, Tensile Strength, and Melt Flow Index tests. The results show that EVA residue acts as an impact modifier in percentages of 30% in samples with PP-PCR, however, it negatively impacts the mechanical properties of flexural modulus and elastic modulus. It was found that it is possible to produce compounds with recycled polypropylene and EVA waste without the use of compatibilizing agents so that the waste, despite reducing its mechanical rigidity properties, can be used as a filler, avoiding disposal in landfills.

KEYWORDS: Polypropylene; EVA waste; Recycling; Characterization.

NOMENCLATURA

Símbolos

CP	Corpo de Prova	
EVA	Copolimero de Etileno e Acetato de Vinila	
IF	Índice de Fluidez	[g/min]
PCR	Pós Consumo Reciclado	
PP	Polipropileno	
VA	Acetato de Vinila	

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
2.1 Objetivo Geral.....	2
2.2 Objetivos Específicos	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
3.1 Polipropileno.....	2
3.2 Reciclagem do Polipropileno (PP).....	3
3.3 Aditivos em Polipropileno	4
3.4 Copolímero de Etileno Acetato de Vinila (EVA).....	4
3.5 Aditivos em EVA para produção de placas expandidas	5
3.6 Resíduo de EVA pós-industrial	5
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	6
4.1 Materiais.....	6
4.2 Formulações e Condições de Processamento	7
4.3 Caracterização das amostras.....	8
4.3.1 Análise de Índice de Fluidez (IF)	8
4.3.2 Ensaio de Resistência ao Impacto Izod.....	8
4.3.3 Ensaio de Módulo de Flexão Secante	9
4.3.4 Ensaio de Resistência à Tração.....	9
4.3.5 Microscopia Óptica.....	9
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	10
5.1 Processamento	10
5.2 Caracterização.....	11
5.2.1 Propriedades Mecânicas	11
5.2.2 Índice de Fluidez.....	13
5.2.3 Microscopia Óptica e Análise Visual	14
6. CONCLUSÕES	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16

1. INTRODUÇÃO

O Polipropileno (PP) é um polímero semicristalino versátil e amplamente utilizado em aplicações da indústria de transformação de termoplásticos. O PP é empregado em processos múltiplos, tais quais a injeção de artigos de utilidades domésticas, componentes automotivos e de eletrodomésticos, extrusão de filmes, aplicações médicas, embalagens de alimentos, entre outras, tornando este um material com constante perspectiva de desenvolvimento para novas aplicações. Devido ao amplo uso e grande gama de aplicações, o PP também se torna uma grande fonte de resíduo pós-consumo que pode ser reciclado (SAMPER, 2018).

Durante a reciclagem mecânica do Polipropileno Pós Consumo (PP-PCR) é comum a contaminação com outros resíduos plásticos. Além disso, cada produto polimérico que vai para reciclagem apresenta diferentes aditivos, cargas, entre outros componentes em sua composição, bem como pode se apresentar em diferentes níveis de degradação. Consequentemente, as diferentes variações de compostos de polipropileno são recicladas em conjunto. O resultando é um produto final com combinação diversa de propriedades mecânicas que dependem da fonte utilizada na reciclagem e com aplicação restrita devido à possibilidade de redução na tenacidade (resistência ao impacto) e rigidez (módulo), limitando o uso do PP-PCR como polímero de engenharia. Para melhorar o desempenho do PP-PCR podem ser adicionados aditivos, como agentes modificadores de tenacidade (impacto) no processamento do material.

Estudos com compostos de PP virgem, combinados com Copolímero de Acetato de Vinila (EVA) mostraram que o EVA atua como um modificador da tenacidade (impacto) no polipropileno (Oliveira et al, 2004), melhorando essa propriedade. Segundo (THOMAS, 1987), a adição de 30% de EVA na composição da formulação de PP pode provocar um aumento considerável na propriedade de impacto do polipropileno virgem. Mas não foram encontrados estudos direcionados às melhorias no PP reciclado.

O EVA é um material de ampla aplicação em embalagens, adesivos e na indústria calçadista. Através da produção de placas expandidas de EVA a indústria calçadista produz, entre outros componentes, palmilhas e entressolas gerando resíduos das aparas de corte desse material. Para produção das placas expandidas é necessária a aplicação de agentes de reticulação e expansão, cargas, e outros aditivos na formulação com EVA para realizar o processamento do material para posterior moldagem do material espumado (ZATTERA, 2005; ALLEN et al., 2005). Entretanto, após os processos de compressão ou injeção ocorre a reticulação do EVA tornando o material um termofixo. Esse processo impossibilita o reuso do material no processo de fabricação das placas expandidas, pois ele não pode ser fundido novamente e consequentemente as aparas pós-industriais são descartadas e direcionadas para aterros sanitários.

A disposição incorreta de resíduos plásticos possui grande impacto nos aspectos ambientais econômicos e sociais. O aumento do custo das resinas plásticas virgens em conjunto com o aumento do preço do petróleo no mercado internacional tem estimulado estudos com relação à reciclagem de polímeros (FERNANDES et al., 2007).

Neste trabalho, foi analisada qual a influência da incorporação como carga do resíduo pós-industrial de EVA micronizado (moído) nas propriedades mecânicas do PP-PCR, foram utilizados os percentuais de 15% e 30% nas formulações. Tal estudo tem como meta expandir as aplicações do PP-PCR, possibilitando aplicações mais exigentes em propriedades mecânicas

e, ao mesmo tempo a ampliação da utilização da fonte de EVA pós-industrial como modificador de tenacidade (impacto) e/ou carga visando à redução do direcionamento de resíduos sólidos plásticos para aterros.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o efeito da incorporação de resíduo pós-industrial de EVA micronizado nas propriedades mecânicas de Polipropileno Reciclado Pós Consumo (PP-PCR).

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar o processamento dos compostos de PP-PCR com percentuais de 15% e 30% de resíduo de EVA micronizado em extrusora dupla-rosca.
- Avaliar as propriedades mecânicas dos compostos produzidos através de ensaios de resistência ao impacto, módulo de flexão e resistência à tração, bem como através de microscopia e análise visual de corpos de prova injetados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão abordados os conceitos técnicos fundamentais para embasamento e justificativa deste estudo.

3.1 Polipropileno

O Polipropileno (PP) é um polímero termoplástico produzido a partir da polimerização do propeno e foi sintetizado pela primeira vez por Giulio Natta em 1954 através do emprego de catalizadores estereoespecíficos, ou seja, catalizadores capazes de controlar a posição das unidades monoméricas da cadeia a conforme seu crescimento. Existem três principais variedades de polipropileno disponíveis no mercado: polipropileno homopolímero, copolímero randômico e copolímero heterofásico, também chamado de copolímero de impacto (MOORE, 1996). Segundo (ROMANO, 2017), o PP é um material que permite a produção de blendas e compósitos com alto percentual de cargas, agentes de reforço e outros materiais poliméricos.

O PP é empregado em processos múltiplos, tais quais a injeção de artigos de utilidades domésticas, componentes automotivos e de eletrodomésticos, extrusão de filmes, aplicações médicas, entre outras (SAMPER et al., 2018). Por apresentar um bom desempenho e boa processabilidade, ele é um dos polímeros mais utilizados mundialmente. Na Figura 1 são mostrados os percentuais das principais resinas termoplásticas consumidas no Brasil em 2022. É possível verificar que o PP representa cerca de 20,3% do total. Devido à ampla gama de aplicações, o PP também se torna uma grande fonte de resíduo pós-consumo.

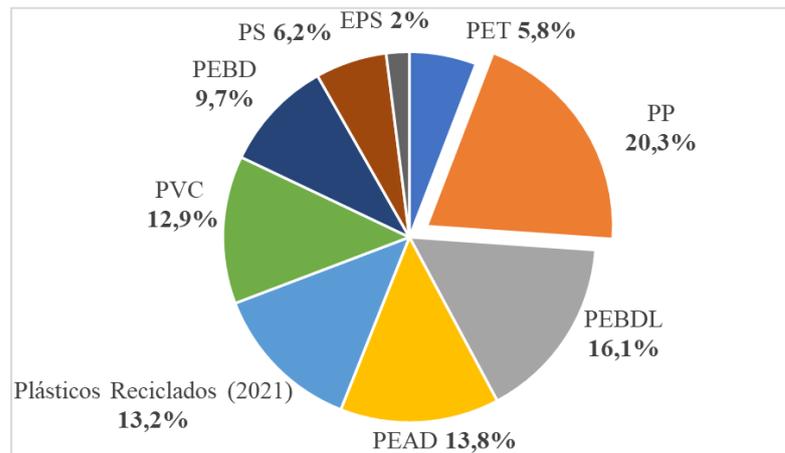


Figura 1 - Resinas termoplásticas consumidas no Brasil em 2022. Adaptado de (ABIPLAST, 2022).

3.2 Reciclagem do Polipropileno (PP)

Segundo dados da Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST, 2022), o PP é um dos polímeros mais consumidos nas indústrias de transformação e reciclagem de plásticos. Em 2021, da parcela total de 13,2% de resinas produzidas no Brasil oriundas de plásticos reciclados, o PP representa cerca de 16,9% (ABIPLAST, 2022).

A reciclagem do polipropileno pode ser realizada através da reciclagem química, energética e mecânica, sendo a última considerada a menos danosa ao meio ambiente (GALVE et al., 2019). Na Figura 2, é possível verificar um fluxo comum da reciclagem mecânica de resíduos plásticos.



Figura 2 - Fluxo da reciclagem mecânica de resíduos plásticos. Adaptado de (ABIPLAST, 2022).

Durante a reciclagem mecânica do polipropileno é comum a contaminação com outros resíduos plásticos. Além disso, o próprio processo de reciclagem mecânica pode contribuir com a degradação e conseqüente alterações nas propriedades mecânicas e reológicas do plástico, necessitando de aplicação de aditivos no processo. Outro ponto relevante é que a qualidade do material reciclado também é definida pela fonte do resíduo. Cada produto polimérico destinado para reciclagem apresenta diferentes aditivos, cargas, entre outros componentes em sua composição. Ademais, os resíduos de PP também podem apresentar diferentes níveis de degradação devido ao estágio em que se encontra em seu ciclo de vida, podendo ainda apresentar níveis de degradação devido à exposição ao calor ou por estresse mecânico, por exemplo (LAGO, 2022).

3.3 Aditivos em Polipropileno

Existe uma diversa gama de aditivos adicionados ao polipropileno para proporcionar estabilidade e versatilidade em suas propriedades. Como exemplos, pode-se citar: os auxiliares de polimerização (como os catalisadores), os auxiliares de processamento (como os lubrificantes e auxiliares de fluxo), estabilizantes (como os antioxidantes) e os aditivos modificadores de propriedades mecânicas (cargas, pigmentos e modificadores de tenacidade (impacto), por exemplo). A escolha do tipo e quantidade adequada dos aditivos é um aspecto tecnológico importante. Para atingir as propriedades de interesse, faz-se necessário a realização de diversos experimentos (RABELLO, 2000).

Alguns aditivos como os agentes modificadores de impacto promovem a tenacificação do polipropileno. Existem diversos estudos que apontam a utilização de materiais elastoméricos como agentes tenacificantes na produção do polipropileno, tais quais: SEBS (Estireno-Etileno-Butileno-Estireno), SBS (copolímeros em bloco de Estireno-Butadieno-Estireno), EPDM (Borracha de Etileno-Propileno-Dieno), TPE (Elastômero Termoplástico) e SBR (Borracha de Estireno Butadieno) e EVA (Copolímero de Etileno e Acetato de Vinila) (PEREIRA, 2019). Estudos com compostos de PP virgem e Copolímero de Acetato de Vinila (EVA) mostraram que o EVA atua como um modificador da propriedade de impacto no polipropileno virgem (Oliveira et al, 2004). Segundo (THOMAS, 1987), a adição de 30% de EVA na composição da formulação pode provocar um aumento considerável na resistência ao impacto do polipropileno virgem.

3.4 Copolímero de Etileno Acetato de Vinila (EVA)

O Copolímero Etileno Acetato de Vinila (EVA) é obtido através da copolimerização do monômero etileno com o monômero acetato de vinila (VA), conforme mostrado na Figura 3 que apresenta a unidade química repetida do EVA.

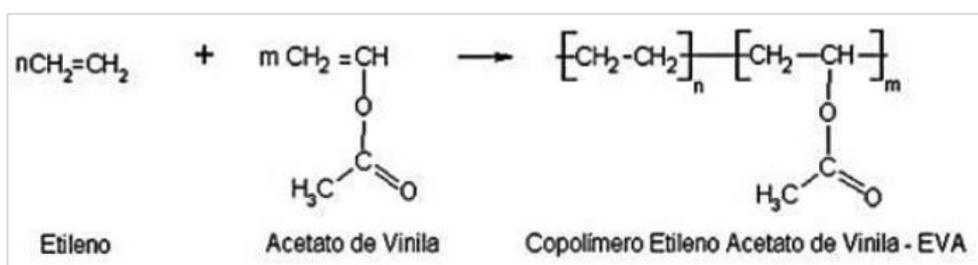


Figura 3 - Estrutura química do Etileno, Acetato de Vinila e do Copolímero de Etileno Acetato de Vinila (EVA). [Fonte: MEDEIROS, 2016]

O teor de VA influencia diretamente nas propriedades mecânicas e térmicas do produto final. Quanto maior o teor de VA, maior serão as propriedades de resistência ao impacto, flexibilidade, transparência, índice de fluidez, densidade e alongamento na ruptura (BHOWMICK, 2001). O EVA é um material de ampla aplicação em embalagens, adesivos e na indústria calçadista.

3.5 Aditivos em EVA para produção de placas expandidas

Para obtenção das placas expandidas de EVA utilizam-se essencialmente a matriz polimérica de EVA e aditivos, tais como: agentes de reticulação, agentes de expansão, cargas, pigmentos e ativador. (CUNHA et al, 2022).

Os agentes de expansão são componentes que desempenham um papel importante na produção de espumas poliméricas, como aplicações com EVA. São definidos como substâncias capazes de produzir uma estrutura celular em uma matriz polimérica. Podem ser físicos, químicos ou líquidos. Os agentes de expansão físicos referem-se a gases que se expandem quando a pressão é liberada. Os líquidos são os que formam células na transição para fase gasosa e os químicos se decompõem ou reagem sob a influência de catalisadores ou a presença de calor. Os agentes de expansão afetam a densidade, a microestrutura morfológica e celular da espuma. Por isso, são determinantes para o controle das propriedades finais do-EVA (EAVES, 2004).

Os agentes de reticulação são aditivos capazes de promover a formação de ligações intermoleculares na cadeia polimérica, formando redes tridimensionais. A reticulação polimérica pode promover melhorias em propriedades do polímero, tais quais: maior estabilidade térmica, maior resistência química, resistência à tração, resistência a solventes, entre outras. Os polímeros reticulados são geralmente moldados antes do processo de reticulação. Após, o processo o polímero é transformado em um termofixo. Os agentes de reticulação melhoram e permitem as características de espumas, garantindo suas aplicações industriais (LABARTA et al, 2006).

3.6 Resíduo de EVA pós-industrial

Através da produção de placas expandidas de EVA a indústria calçadista produz, entre outros componentes, palmilhas e entressolas gerando resíduos das aparas de corte desse material (GARLET, 1998). A Figura 4 apresenta um exemplo de resíduo de rebarbas de placas expandidas proveniente da indústria de calçados.

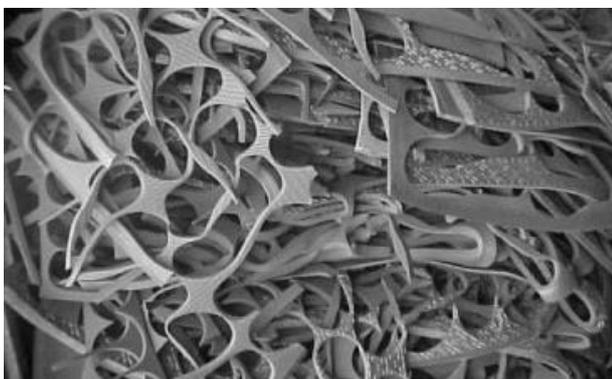


Figura 4 - Resíduos da indústria calçadista proveniente de corte de placas expandidas de EVA. Fonte: ZATTERA, 2005).

Para produção das placas expandidas é necessária a aplicação de agentes de reticulação e expansão, cargas, e outros aditivos na formulação com EVA para realizar o processamento do material para posterior moldagem do material espumado. Esse processo impossibilita o reuso do material no processo das placas expandidas pois ele não pode ser fundido novamente. (ZATTERA, 2005; ALLEN et al., 2005).

Dessa forma, são de extrema importância iniciativas de desenvolvimento de produtos que visem utilizar o resíduo de EVA pós-industrial. A expansão de aplicações com o uso desse resíduo possibilita a diminuição de impactos ambientais, evitando que ele seja descartado incorretamente e seja acumulado em aterros. Além disso, esses materiais podem ser utilizados como carga e com possibilidade de melhorias em propriedades mecânicas de poliolefinas virgens e recicladas, diminuindo a demanda e o preço de materiais termoplásticos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Para realização deste estudo foram processadas amostras com PP-PCR e percentuais de 15% e 30% de resíduo de EVA micronizado proveniente de aparas pós-industriais de uma indústria calçadista. Com o intuito de comparação, foram processadas duas amostras com grade de EVA virgem HM-2528 fornecido pela empresa Braskem S/A. O PP-PCR possui duas origens, ambas recicladas: *Flake* pós consumo de PP proveniente de aterros sanitários e grade de PP pós consumo DPR 007A. Ambos os materiais foram fornecidos pela empresa Braskem S/A. Os materiais utilizados são mostrados na Figura 5.

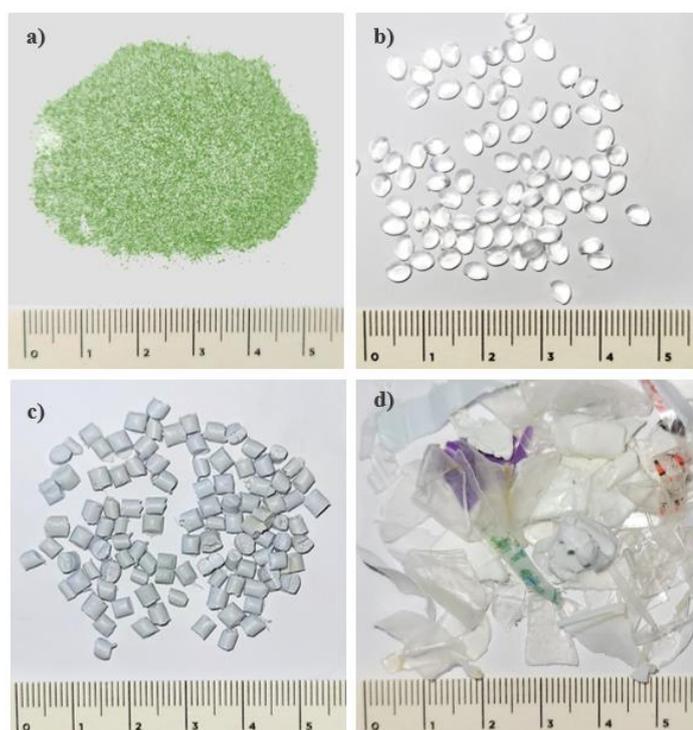


Figura 5 - Materiais utilizados nas amostras: a) resíduo de EVA pós-industrial micronizado (EVA reciclado); b) grade Braskem HM2528 (EVA virgem); c) grade Braskem DPR 007A (PP-PCR); e d) *Flakes* de PP provenientes de aterro sanitário.

Os dados de Índice de Fluidez e percentual de VA dos grades fornecidos pela Braskem estão disponíveis na Tabela 1. Para o EVA reciclado não foi disponibilizado pelo fornecedor qual o valor do parâmetro de índice de fluidez. Estima-se que o percentual de Acetato de Vinila (VA) varie de 15 a 19% em virtude da aplicação em calçados e entressolas.

Tabela 1 - Propriedades dos grades DPR 007A e HM2528.

Grade	Índice de Fluidez (g/10 min) (230°C 2,16kg)	%VA
PP (DPR 007A)	22	-
EVA virgem (HM2528)	25	28

Fonte: (BRASKEM, 2024)

4.2 Formulações e Condições de Processamento

Foram definidas oito amostras para caracterização com diferentes formulações, conforme mostrado na Tabela 2. As amostras 1 e 2 referem-se as amostras de PP-PCR sem a incorporação de EVA, sendo a primeira referente ao grade DPR 007A já disponibilizado em *pellets* e, portanto, sem necessidade de processamento em extrusora e a segunda referente a amostra de *Flake* de PP que passou por extrusão para granulação do material em *pellets*.

Tabela 2 - Formulações das amostras.

Formulação	%	Grade PP (DPR 007A)	Flake PP (reciclado)	EVA reciclado	EVA virgem (HM2528)
Amostra 1		100	-	-	-
Amostra 2		-	100	-	-
Amostra 3		85	-	15	-
Amostra 4		70	-	30	-
Amostra 5		-	85	15	-
Amostra 6		-	70	30	-
Amostra 7		-	85	-	15
Amostra 8		-	70	-	30

O processamento das amostras compostas (Amostras 3, 4, 5, 6, 7 e 8) e da Amostra 2 foi realizado através de extrusão no Centro de Tecnologia e Inovação (CTI) da Braskem S/A em Triunfo/RS. Foi utilizada uma extrusora dupla-rosca *Coperion ZSK 26* com perfil de rosca de mistura. A Figura 6 apresenta um diagrama esquemático do processo de extrusão realizado.

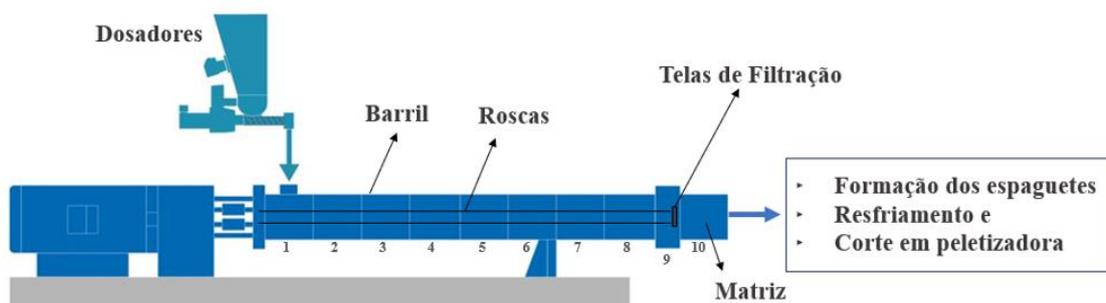


Figura 6 - Diagrama esquemático do processo de extrusão. [Adaptado de COPERION, 2021]

As condições de processamento foram: temperatura das zonas: Zona 1: 120 °C, / Zona 2: 190 °C, Zona 3: 220 °C, Zona 4: 220 °C, Zona 5: 190 °C, Zona 6: 180 °C, Zona 7: 170 °C, Zona 8: 160 °C, Zona 9: 160 °C, Zona 10: 180°C, onde a última temperatura corresponde à temperatura da matriz; aditivação com antioxidante *Irganox B215* na proporção de 1000 ppm, e conjunto de telas de filtração do processo de extrusão com *mesh* #40/#80/#40. Os parâmetros de processamento utilizados em cada extrusão são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Condições de processamento.

Formulação	Rotação da rosca [rpm]	Torque [Nm]	Temperatura de Massa [°C]	Dosador 1 [kg/h] (PP-PCR ou PP-PCR + HM2528)	Dosador 2 [kg/h] (EVA reciclado)
Amostra 2	230	76	172	12,0	-
Amostra 3	230	81	183	10,2	1,8
Amostra 4	230	92	173	8,4	3,6
Amostra 5	280	127	192	21,4	3,6
Amostra 6	190	110	188	12,6	5,4
Amostra 7	230	76	190	12,0	-
Amostra 8	230	113	190	12,0	-

4.3 Caracterização das amostras

Para caracterização das amostras foram realizados ensaios mecânicos no Centro de Tecnologia e Inovação (CTI) da Braskem S/A em Triunfo/RS. Para o Ensaio de Índice de Fluidez a análise foi realizada nos *pellets*. Para os demais ensaios mecânicos as análises foram realizadas em corpos de prova injetados conforme norma ASTM D3641.

4.3.1 Análise de Índice de Fluidez (IF)

A análise de Índice de Fluidez (IF) foi realizada conforme norma ASTM D-1238 no equipamento plastômetro *INSTRON CAF MF30* com parâmetros de temperatura 230°C e carga de 2,16 kg, condições padrão para polipropileno. O objetivo desta análise é verificar os resultados de viscosidade das amostras, parâmetro fundamental para direcionamento das aplicações do composto polimérico. As amostras em *pellets* foram pesadas em balança analítica (4 a 8 g) e compactadas no cilindro do barril do plastômetro. Após o tempo de estabilização térmica e de pré-fusão a carga é liberada e o material vai estabilizando seu fluxo na matriz com a ação imposta pelo pistão e carga. O resultado da análise fundamenta-se no tempo necessário para que uma determinada quantidade da amostra escoe pela matriz. Este material que escoar é pesado em um tempo controlado e o Índice de fluidez é expresso em unidade de g/10 min.

4.3.2 Ensaio de Resistência ao Impacto Izod

O ensaio de resistência ao impacto Izod foi aplicado neste estudo por ser um dos métodos mais comuns para avaliação de performance de impacto de polímeros (DIVYATHEJ et al., 2016). O ensaio foi realizado de acordo com o procedimento A da norma ASTM D-256 utilizando o equipamento *CEAST* modelo *Resil Impactor*. O intuito desta análise é avaliar a energia absorvida pelo polímero quando este suporta o impacto de um pêndulo com velocidade e energia pré-determinados. Dessa forma, tem-se como resultado que o material pode quebrar totalmente (tipo de Quebra “C”, completa), parcialmente (tipo “P”) ou não quebrar (“non-

brake”). Para realização do ensaio um dos parâmetros mais importantes é o correto posicionamento do entalhe, realiza-se um entalhe no corpo de prova de maneira que a largura remanescente seja de 10,16 mm ($\pm 0,05$). Os corpos de prova foram submetidos ao condicionamento mínimo de 40 horas e máximo de 96 horas, na temperatura de 23 °C. O resultado deste ensaio é obtido após a realização da análise em 10 corpos de prova.

4.3.3 Ensaio de Módulo de Flexão Secante

Para realização do ensaio de Módulo de Flexão Secante a 1% de deformação foi utilizado o equipamento universal de ensaios mecânicos e célula de carga *INSTRON* modelo 5566. O ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM D790. O objetivo desta análise é verificar qual a rigidez do material analisado. Os corpos de prova injetados são submetidos a uma taxa de deformação pré-definida e posicionados sobre dois suportes. A força é aplicada no ponto central dos corpos de prova e equidistante 51,2 mm um do outro. Assim, durante o ensaio, os corpos de prova são submetidos aos esforços de tração e compressão e a resposta à deformação é medida pelo equipamento por meio da célula de carga. Quando se atinge-se 5% de deformação ou quando ocorre o rompimento do corpo de prova, a deformação é interrompida. Faz-se necessário o condicionamento dos corpos de prova com no mínimo 40 horas e no máximo 96 horas à 23°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) e com 50% ($\pm 5\%$) de umidade relativa do ar. O resultado deste ensaio é obtido após a análise de 5 corpos de prova.

4.3.4 Ensaio de Resistência à Tração

O ensaio de tração foi realizado no equipamento universal de ensaios mecânicos *INSTRON* modelo 5566, conforme ASTM D638. Os corpos de prova foram injetados no modelo tipo I especificado pela norma e o ensaio foi realizado com célula de carga de 5 kN e com velocidade de 50 mm/min. Foram tracionados 5 corpos de prova para cada uma das amostras e coletados os respectivos valores médios. Neste ensaio foram coletados os dados de propriedades: de Tensão na Ruptura, Tensão no Escoamento e Módulo de Elasticidade.

4.3.5 Microscopia Óptica

Para observação do aspecto superficial das amostras foram injetadas placas para visualização e obtenção de imagens. Uma pequena parte da placa injetada foi cortada e preparada em um micrótomo, obtendo-se cortes com 20 μm de espessura. As imagens foram obtidas através de microscopia óptica utilizando microscópio modelo *Leica DMLM*. As imagens foram obtidas com magnificação de 100 \times .

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Processamento

Durante o processamento em extrusora dupla-rosca foram observados comportamentos distintos das amostras. As amostras compostas pelo PP-PCR (Amostras 3 e 4) apresentaram estabilidade durante a granulação em pellets, de forma que o material polimérico extrudado apresentou constância durante todo o processamento. As amostras com *Flake* (Amostras 2, 5, 6, 7 e 8) apresentaram maior instabilidade durante o processamento. Uma provável explicação é que as possíveis impurezas presentes nas amostras com *Flake* podem dificultar o processamento do material. Na Figura 7 são mostrados os *pellets* das amostras que foram extrudadas.

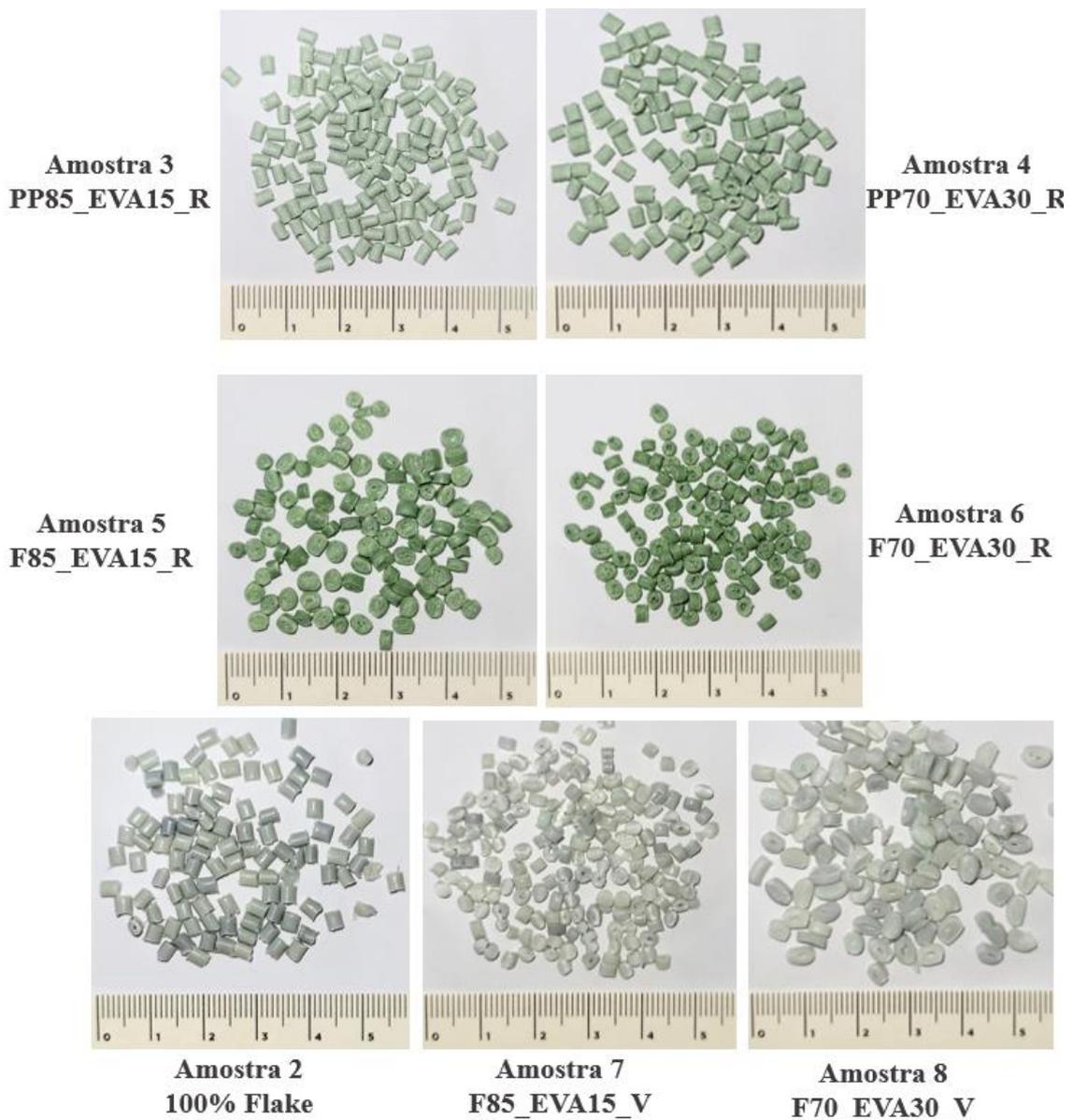


Figura 7 - Amostras em pellets após processamento em extrusora.

5.2 Caracterização

5.2.1 Propriedades Mecânicas

Os resultados dos ensaios mecânicos de Resistência ao Impacto Izod a 23°C, Módulo de Flexão Secante e Tração são mostrados na Tabela 4, cada resultado é apresentado juntamente com seu respectivo desvio padrão.

Tabela 4 - Resultados dos Ensaio Mecânicos.

Amostra	Módulo de Flexão Secante [MPa]	Izod [J/m]	Tipo de quebra	Tração		Módulo Elástico na Tração [MPa]
				Tensão de Ruptura [MPa]	Tensão no Escoam. [MPa]	
Amostra 1 - PP-PCR	1240 ± 11,2	42,6 ± 2,1	C	18,4 ± 1,24	24,0 ± 0,11	1580,0 ± 25,5
Amostra 2 - Flake PP-PCR	1110 ± 14,6	52,3 ± 5,1	C	21,3 ± 4,02	28,8 ± 0,13	1400,0 ± 19,8
Amostra 3 - PP85_EVA15_R	1000 ± 12,9	39,7 ± 1,6	C	17,9 ± 0,34	19,2 ± 0,05	1280,0 ± 33,0
Amostra 4 - PP70_EVA30_R	843 ± 3,5	46,6 ± 2,5	P	14,9 ± 0,07	15,4 ± 0,08	1060,0 ± 27,9
Amostra 5 - FL85_EVA15_R	945 ± 3,7	36,5 ± 1,8	C	21,8 ± 0,63	22,6 ± ,08	1120,0 ± 49,2
Amostra 6 - FL70_EVA30_R	766 ± 1,9	39,2 ± 1,8	P	17,0 ± 0,38	17,6 ± 0,15	924,0 ± 58,8
Amostra 7 - FL85_EVA15_V	886 ± 2,3	87,0 ± 2,7	C	15,7 ± 0,37	23,0 ± 0,05	1100,0 ± 10,7
Amostra 8 - FL70_EVA30_V	661 ± 4,2	141,0 ± 3,4	P	15,2 ± 0,13	18,7 ± 0,08	835,0 ± 4,4

As alterações na rigidez (módulo) em função da tenacidade (resistência ao impacto) podem ser melhor visualizadas na Figura 8, Figura 9 e Figura 10 que correlacionam os resultados dos dois parâmetros para cada grupo de amostras.

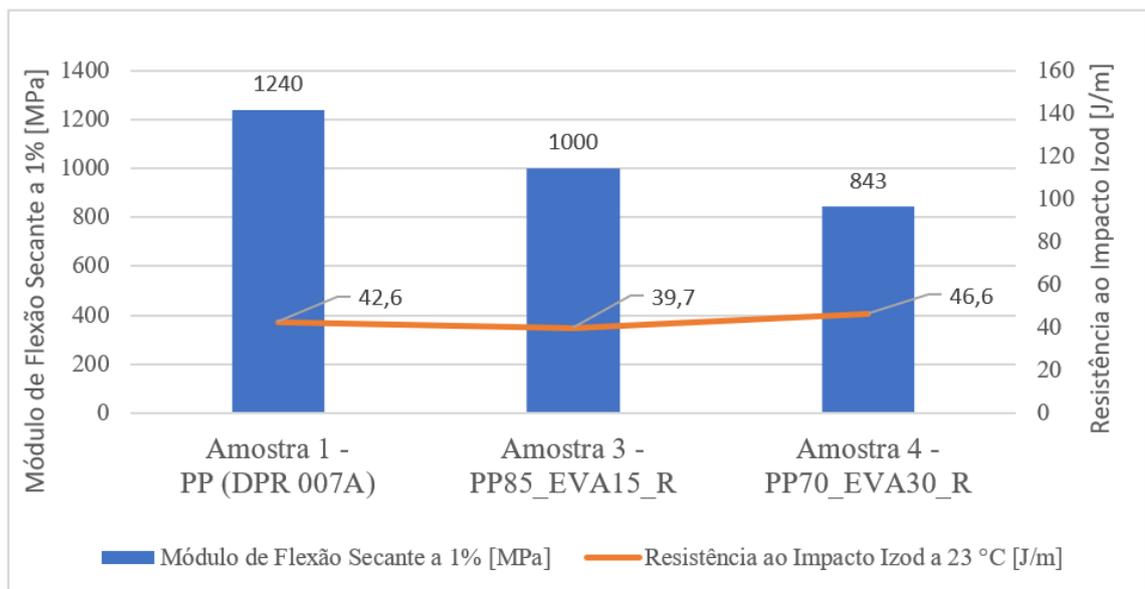


Figura 8 - Resultados dos ensaios de Resistência ao Impacto Izod e Módulo de Flexão para as amostras com PP (grade DPR 007A) + EVA reciclado.

É possível observar que na Amostra 4, composta pelo PP-PCR com 30% de EVA reciclado, ocorreu o aumento de 9,4% da propriedade de resistência ao impacto em comparação com a amostra de referência (Amostra 1). No entanto, verifica-se uma queda de aproximadamente 32% no módulo de flexão e no módulo elástico.

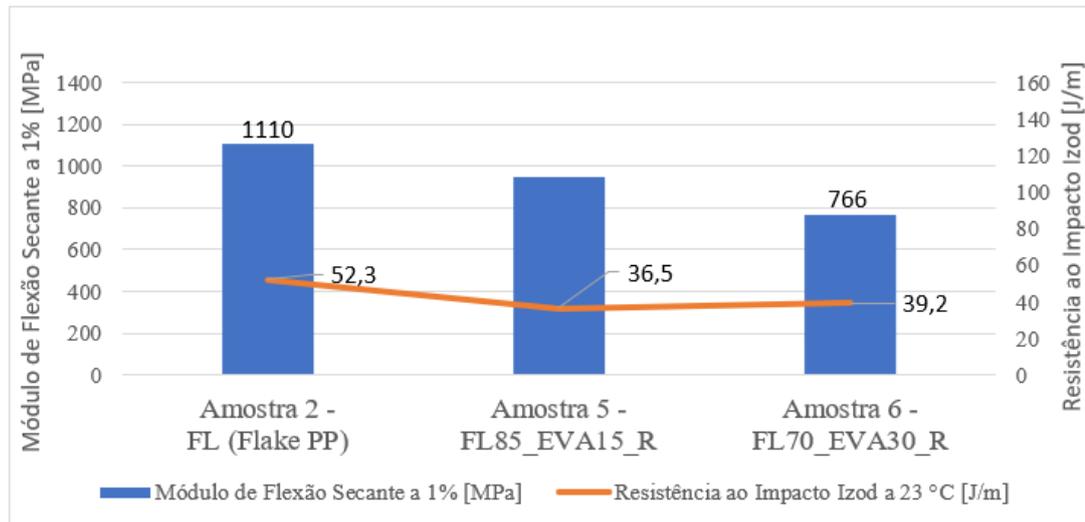


Figura 9 - Resultados dos ensaios de Resistência ao Impacto Izod e Módulo de Flexão para as amostras com *Flake* PP-PCR + EVA reciclado.

A partir da Figura 9 é possível observar que com relação a amostra de referência de *Flake* (Amostra 2) não ocorreram melhorias em propriedades mecânicas em nenhum dos percentuais de adição do resíduo de EVA. Observa-se uma melhoria do impacto na amostra com 30% de resíduo em comparação com a amostra com 15%. Uma possível explicação para os resultados inferiores em propriedades mecânicas nas amostras com *Flake* em comparação com as amostras com o uso do grade PP-PCR é que o último, por tratar-se de um grade comercial, passou por um processo de processamento mais robusto, de forma que as impurezas oriundas do material reciclado (*Flake*) são removidas de forma mais adequada.

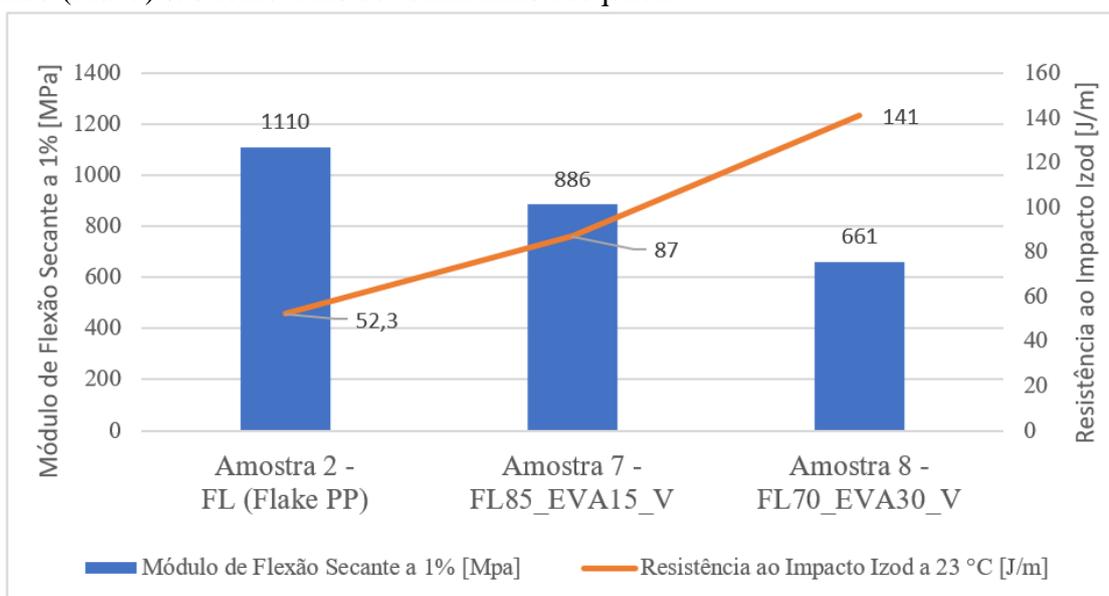


Figura 10 - Resultados dos ensaios de Resistência ao Impacto Izod e Módulo de Flexão para as amostras com *Flake* PP-PCR + EVA virgem (HM2528).

Observando a Figura 10 verifica-se que com a adição do grade virgem de EVA ocorre um aumento significativo de aproximadamente 170% no impacto das amostras com *Flake*, o que pode ser explicado pelo alto teor de VA presente no grade HM2528 e por se tratar de um material não reticulado. No entanto, observa-se uma grande queda no módulo de flexão. Através da análise da Tabela 4 pode-se observar também uma queda significativa no módulo elástico.

Uma explicação para a diminuição das propriedades de rigidez, módulo e tensão de escoamento com a adição do EVA reciclado em algumas das amostras é que esse é um comportamento típico e esperado quando ocorre a incorporação de polímeros com características elastoméricas em matrizes vítreas, como o PP (PESSAN et al, 2009).

Em todas as duplas de amostras com 30% de EVA (reciclado ou virgem) ocorre um aumento da resistência ao impacto com relação as amostras de 15%, como pode ser verificado entre as Amostras 3 e 4, Amostras 5 e 6, e Amostras 7 e 8. Além disso, ocorre uma mudança no tipo de quebra do ensaio de impacto. As amostras puras e com percentual de 15% apresentam quebra do tipo “C” (completa) e as amostras com 30% de EVA apresentam quebra do tipo “P” (parcial), evidenciando o aumento da tenacidade com adição de 30% de EVA. Os resultados de melhoria nas propriedades de resistência ao impacto com a adição de 30% se assemelham com os dados obtidos por THOMAS, 1987.

5.2.2 Índice de Fluidiez

Os resultados das análises de índice de fluidez são mostrados na Figura 11.

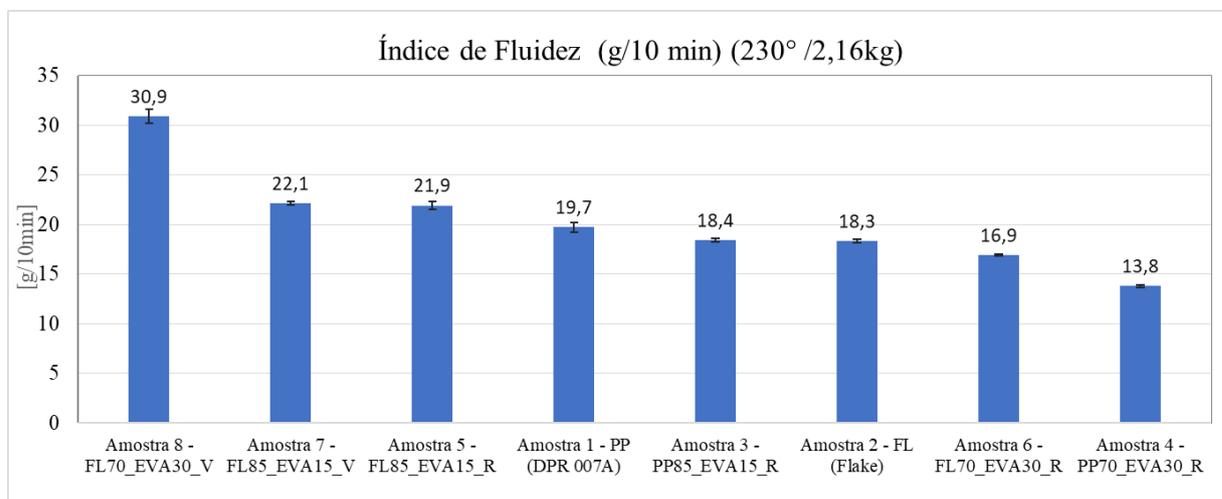


Figura 11 - Resultados da análise de índice de fluidez.

Verifica-se que o índice de fluidez aumenta com a adição do EVA virgem, resultado esperado já que o grade HM2528 apresenta índice de fluidez com valor 25 g/10min, valor superior ao dos demais materiais. As amostras com 30% de EVA reciclado apresentam os menores valores de índice de fluidez. Dessa forma, verifica-se que a viscosidade aumenta progressivamente com a adição do resíduo de EVA. Por se tratar de um material reticulado, as redes tridimensionais do EVA reciclado ocasionam um aumento de viscosidade no polipropileno. Além disso, a presença de possíveis cargas inorgânicas no EVA reciclado também contribuem para o aumento da viscosidade e conseqüente diminuição do índice de fluidez.

5.2.3 Microscopia Óptica e Análise Visual

A Figura 12 apresenta os resultados de microscopia óptica de uma pequena região das placas injetadas com magnificação de 100 \times .

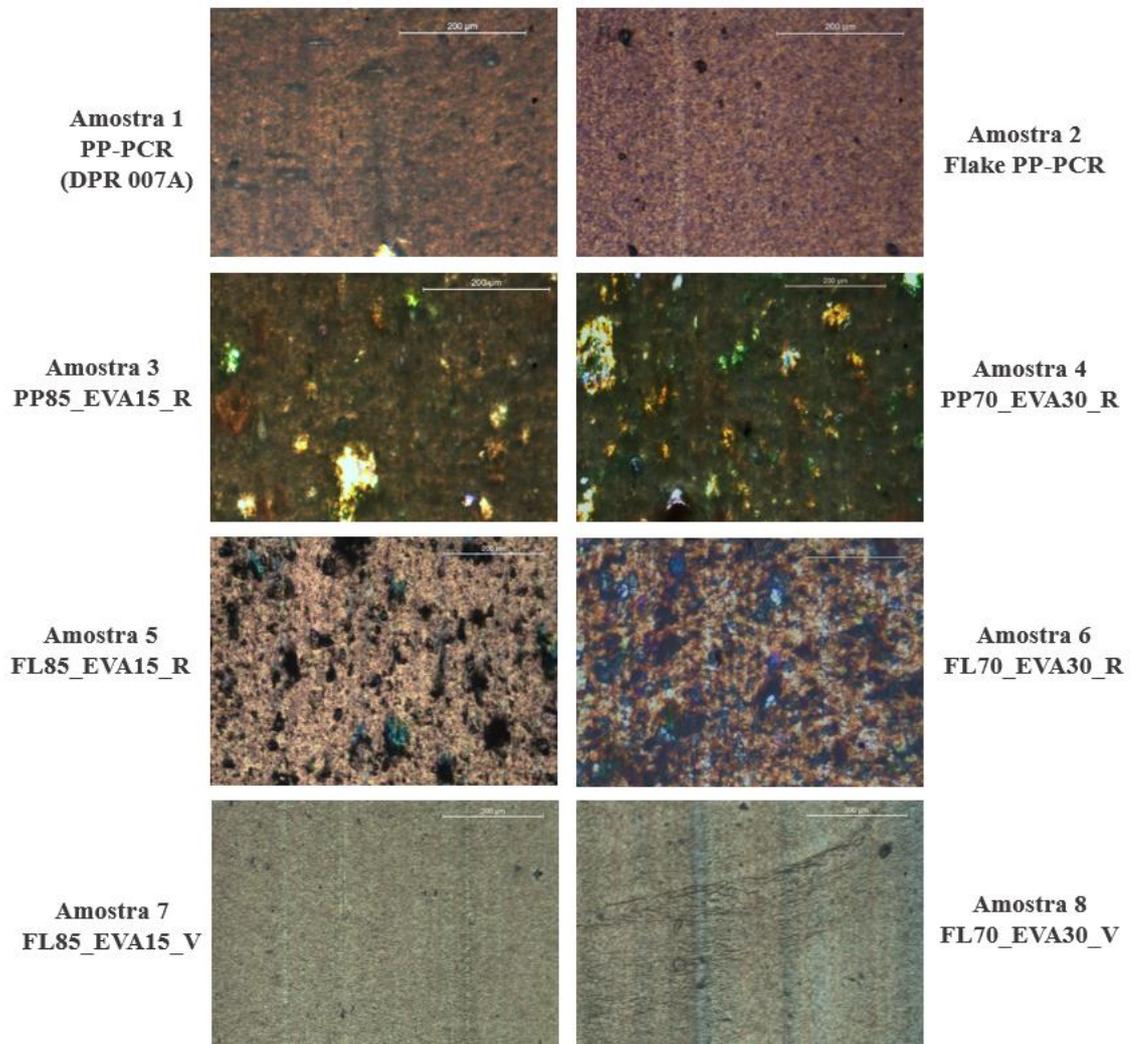


Figura 12 - Imagens obtidas por microscopia óptica com magnificação de 100 \times .

As amostras com EVA virgem apresentam uma matriz com aspecto homogêneo e as amostras com EVA reciclado apresentam perfil heterogêneo por tratar-se de um material reticulado com estrutura de polarização diferente da matriz polimérica.

A partir da análise visual das placas é possível verificar que as amostras com PP-PCR (grade DPR 007A) apresentam maior homogeneidade. A Figura 13 apresenta um comparativo entre as placas com PP-PCR e com *Flake*. É possível observar que a amostra com *Flake* apresenta uma região com possíveis contaminações ou material não homogeneizado. Conforme comentado no capítulo 5.2.1, essas impurezas podem ter impactado nos resultados de propriedades mecânicas.



Figura 13 - Placas injetadas das amostras puras de PP-PCR (Amostra 1) e *Flake* PP-PCR (Amostra 2).

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi analisada qual a influência da incorporação como carga do resíduo pós-industrial de EVA micronizado (moído) nas propriedades mecânicas do Polipropileno Reciclado Pós consumo (PP-PCR). Através dos resultados de ensaios de Resistência ao Impacto Izod, Módulo de Flexão e Resistência a Tração foram observadas alterações em suas propriedades com a adição de 15% e 30% de EVA.

Foi observado que o resíduo de EVA reciclado atua como tenacificante em percentuais de 30% nas amostras com PP-PCR, porém, impacta negativamente nas propriedades mecânicas de módulo de flexão e módulo elástico.

Verifica-se que é possível produzir compostos com polipropileno reciclado e resíduo de EVA micronizado pós-industrial sem a utilização de agentes compatibilizantes. De forma que o EVA reciclado, apesar de reduzir propriedades mecânicas de rigidez, pode ser direcionado para atuar como carga, evitando seu direcionamento para aterros sanitários.

Sugestões para Trabalhos Futuros:

- Avaliar qual a influência da adição de agentes compatibilizantes em amostras PP-PCR e resíduo de EVA.
- Avaliar a adição de resíduo pós consumo de EVA em amostras com polipropileno virgem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPLAST - Associação Brasileira da Indústria do Plástico. **Perfil do ano de 2022**. Disponível em: <<https://www.abiplast.org.br/publicacoes/perfil-2022abiplast/>>

ALLEN, R. D. et al. **Design of experiments for the qualification of EVA expansion characteristics**. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, [s. l.], v. 21, n. 4–5, p. 412–420, 2005.

ASTM D1238. **Standard test method for melt flow rates of thermoplastics by extrusion plastometer**, 2023. West Conshohocken.

ASTM D256. **Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics**, 2023. West Conshohocken.

ASTM D3641-21. **Standard Practice for Injection Molding Test Specimens of Thermoplastic Molding and Extrusion Materials**, 2021, West Conshohocken.

ASTM D790. **Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**, 2023. West Conshohocken.

COPERION. **Coperion Supplies Twin Screw Extruder to Ghent University for Chemical Plastic Recycling**. Disponível em: <<https://www.coperion.com/en/news-media/newsroom/2021/coperion-supplies-twin-screw-extruder-for-chemical-plastic-recycling>>

CUNHA R. B. et al, **Influência de agente reticulante e de resíduos de EVA nas propriedades de placas de EVA utilizadas na indústria de calçados**. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 8, 2022.

BHOWMICK, A. K; STEPHENS, H. L. **Handbook of Elastomers**. 2nd. New York: Marcel Dekker, Inc., p 930, 2001.

BRASKEM. **Catálogo de Produtos**. Disponível em: <<https://www.braskem.com.br/busca-de-produtos>>

DIVYATHEJ, M.V.; VARUN, M.; RAJEEV, P. **Analysis of mechanical behavior of 3D printed ABS parts by experiments**. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, v. 7, n. 3, p. 16-124, 2016.

EAVES, David. **Handbook of polymeric foams**. [S. l.: s. n.], 2004.

FERNANDES B. L.; M.; DOMINGUES A. J. **Caracterização Mecânica de Polipropileno Reciclado para a Indústria Automotiva**. PUC-PR. Curitiba, 2007

GALVE, J. E. et al, **Dimensional Stability and Process Capability of an Industrial Component Injected with Recycled Polypropylene**. *Polymers*, v. 11, 2019.

GARLET, G. **Aproveitamento de Resíduos de E.V.A. como Agregado para Concreto Leve na Construção Civil**. Dissertação de Mestrado, [s. l.], p. 160–176, 1998.

LABARTA, J. A. R; Olaya, M. M.; Marcilla, A. **DSC Study of Transitions Involved in Thermal Treatment of Foamable Mixtures of PE and EVA Copolymer with Azodicarbonamide**, Journal of Applied Polymer Science, v. 102, p. 2015-2025, 2006.

LAGO, G.L. **Avaliação da Qualidade do Polipropileno Pós-Consumo Proveniente de Empresas de Reciclagem**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2022.

MEDEIROS, M. T. S. **Investigação Dos Efeitos Radiolíticos No Poli (Etileno-Co-Acetato De Vinila) (Eva)**. Universidade Federal de Pernambuco. 2016.

MOORE Jr, E. P. **Polypropylene Handbook**. New York: Hanser Publishers, 1996.

OLIVEIRA, M. G. et al. **Caracterização das propriedades reológicas e dinâmicas de composições de borracha natural com resíduo de EVA**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 14, n. 5, p. 301-306, 2004.

PEREIRA, J. R. D. **Influência do uso de agente modificador de impacto nas propriedades do copolímero randômico de polipropileno**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.

PESSAN, C. C. et al. **Caracterização de blendas PP/EVA/PP-g-MA através de reometria de torque e análises mecânicas**. São Carlos - SP: Anais do 10º, CBPol, 2009.

RABELLO, M. **Aditivação em Polímeros**. São Paulo, p 19-21, 2000.

ROMANO, R. S. G. **Estudo da irradiação do polipropileno para possibilitar o controle de sua degradação ambiental**. Universidade de São Paulo, 2017.

SAMPER, M. D. **Interference of biodegradable plastics in the polypropylene recycling process**. Materials, v. 11, n. 10, p. 1886, 2018.

THOMAS, S. **Tensile impact strength of blends of polypropylene and ethylene-vinyl acetate copolymer**. Materials Letters, v 5, n 9, 1987.

ZATTERA, Ademir J. et al. **Caracterização de resíduos de copolímeros de etileno-acetato de vinila - EVA**. Polímeros, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 73–78, 2005.