

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
BRUNO MATHEUS STEFANO LEITE

**ESTUDO DOS USOS DE RESÍDUO DE XLPE EM DIFERENTES SITUAÇÕES
E A SUA AVALIAÇÃO EM POLIAMIDA 12 COM DIFERENTES AGENTES
COMPATIBILIZANTES.**

São Bernardo do Campo

2020

BRUNO MATHEUS STEFANO LEITE

**ESTUDO DOS USOS DE RESÍDUO DE XLPE EM DIFERENTES SITUAÇÕES
E A SUA AVALIAÇÃO EM POLIAMIDA 12 COM DIFERENTES AGENTES
COMPATIBILIZANTES.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro Universitário FEI, como
parte dos requisitos necessários para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia de
Materiais. Orientado pelo Prof. Dr. Baltus
Cornelius Bonse.

São Bernardo do Campo

2020

Bruno Matheus Stefano Leite

**ESTUDO DOS USOS DE RESÍDUO DE XLPE EM DIFERENTES SITUAÇÕES
E A SUA AVALIAÇÃO EM POLIAMIDA 12 COM DIFERENTES AGENTES
COMPATIBILIZANTES.**

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado ao Centro Universitário FEI, como
parte dos requisitos necessários para obtenção
do título de Bacharel Engenharia de Materiais.

Comissão julgadora

Orientador e presidente

Examinador (1)

Examinador (2)

São Bernardo do Campo

12/2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais pelos sacrifícios que fizeram por mim e por todos os conselhos, incentivo e apoio que me fizeram ser quem eu sou hoje.

Agradeço a todos os professores do Centro Universitário FEI, em especial aos Prof. Drs. Daniella Caluscio dos Santos, Patrícia Calvão, Rodrigo Magnabosco e William Naville que me aconselharam bastante durante a minha formação acadêmica.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Baltus Bonse pela paciência, compreensão e orientações.

RESUMO

O polietileno reticulado (XLPE) é muito utilizado como isolamento para fios e cabos elétricos, não passível de reciclagem por meio de fusão como ocorre em polímeros termoplásticos não reticulados, logo, a maior parte dos resíduos de XLPE é destinada a aterros ou incineração. Com base nesses fatos, idealizou-se o reaproveitamento dos resíduos deste polímero pela sua incorporação em poliamida 12 (PA12), termoplástico de engenharia, utilizando polietileno graftizado com anidrido maleico (PEgMA) e resíduos dos ionômeros Surlyn® e Sentryglas® para a compatibilização dos polímeros. Para tanto, o presente trabalho traz uma revisão bibliográfica abordando o XLPE, a PA12, o PEgMA, e os ionômeros Surlyn® e Sentryglas®, além de um extenso estado da arte referente ao reaproveitamento de XLPE, tal como sua reciclagem, sua desreticulação, bem como a incorporação do XLPE em matrizes não poliméricas e poliméricas quimicamente semelhantes e quimicamente diferentes, e o uso de ionômeros como agentes compatibilizantes. Os resultados dos diversos trabalhos consultados mostraram que a incorporação de XLPE em matrizes poliméricas quimicamente similares, aumenta a resistência ao impacto e à estabilidade térmica, não precisando de agentes compatibilizantes. Matrizes que possuem propriedades mecânicas superiores ao XLPE terão queda nestas propriedades ao incorporar o XLPE, enquanto matrizes com propriedades mecânicas inferiores ao XLPE terão um aumento destas propriedades. A incorporação em matrizes poliméricas quimicamente não semelhantes resulta em redução nas propriedades mecânicas e térmicas, pela falta de afinidade entre a matriz e o XLPE, necessitando de agentes compatibilizantes. Os ionômeros se mostraram eficazes na compatibilização de polietileno com polímeros polares. Portanto, prevê-se o potencial dos resíduos dos ionômeros Surlyn® e Sentryglas® como agente compatibilizante nos compostos de PA12 e XLPE, podendo aumentar a sua resistência ao impacto, além de agregar valor aos três resíduos.

Palavras chaves: XLPE. poliamida 12. Ionômeros. Agente compatibilizante. Resíduos.

ABSTRACT

Cross-linked polyethylene (XLPE) is widely used as electrical wire and cable insulation. XLPE cannot be recycled by remelting as occurs in non-cross-linked thermoplastic polymers, so most of XLPE residue ends up in landfills or is incinerated. A suggestion to reuse this residue was proposed by incorporating it in polyamide 12 (PA12), an engineering thermoplastic, using polyethylene grafted maleic anhydride (PEgMA) and residues of the ionomers Surlyn® and Sentryglas® as compatibilizers. Therefore, the present work brings a literature review addressing XLPE, PA12, PEgMA, and the ionomers Surlyn® and Sentryglas®, in addition to an extensive state of the art regarding the reuse of XLPE, such as its recycling, its crosslinking, as well as its incorporation in chemically similar and chemically different polymeric and non-polymeric matrices, and the use of ionomers as compatibilizers. The results of the various studies consulted showed that the incorporation of XLPE in chemically similar polymer matrices increases impact strength and thermal stability, without requiring compatibilizers. Matrices that have mechanical properties superior to XLPE will experience a decrease in these properties when incorporating XLPE, while matrices with mechanical properties inferior to XLPE will experience an increase in these properties. The incorporation in chemically dissimilar polymer matrices results in a reduction in the mechanical and thermal properties, due to the lack of affinity between the matrix and XLPE, requiring compatibilizer. Ionomers proved to be effective in compatibilizing polyethylene with polar polymers. These findings allowed us to predict the potential of Surlyn® and Sentryglas® residue as compatibilizer in PA12/XLPE compounds, which may increase their impact strength, in addition to adding value to the three residues.

Key words: XLPE, polyamide 12, ionomers, compatibilizer, residue.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 POLIAMIDAS.....	13
2.2 POLIAMIDA 12.....	15
2.3 POLIETILENO RETICULADO (XLPE)	16
2.3.1 Peróxido (PEX-A)	17
2.3.2 Silano (PEX-B)	18
2.3.3 Radiação (PEX-C)	19
2.4 AGENTES COMPATIBILIZANTES	19
2.4.1 Polietileno enxertado com anidrido maleico	21
2.4.2 Ionômeros	22
2.4.2.1 Sentryglas®	23
2.4.2.2 Surlyn®	24
3 ESTADO DA ARTE	25
3.1 DESRETICULAÇÃO DO XLPE.....	25
3.2 INCORPORAÇÃO DO XLPE EM MATRIZES NÃO POLIMÉRICAS.....	27
3.3 INCORPORAÇÃO DO XLPE EM MATRIZES POLIMÉRICAS	28
3.3.1 Incorporação em matrizes quimicamente semelhantes	28
3.3.2 Incorporação em matrizes quimicamente diferentes	32
3.4 IONÔMEROS USADOS COMO AGENTE DE COMPATIBILIZANTE	33
4 METODOLOGIA	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
6 CONCLUSÕES	37
REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

O conceito de sustentabilidade tem se tornado cada vez mais importante para a sociedade em geral, e com a engenharia de materiais é possível auxiliar na produção e o processamento de materiais com baixo consumo de energia e baixo impacto ambiental, bem como a seleção de materiais, tornando-se assim importante para o engenheiro de materiais abordar a sustentabilidade.

Já são amplamente conhecidos os três Rs da sustentabilidade, ou seja, reduzir, reusar, reciclar (que recentemente foram complementados por outros cinco Rs: refletir, respeitar, reparar, responsabilizar-se, repassar (OBY, s.d.). É dentro deste contexto que este projeto trata da busca de uma solução para um problema real, ou seja, encontrar um destino adequado para resíduos poliméricos que são comumente descartados, agregando valor aos mesmos. Os resíduos contemplados são de polietileno reticulado (XLPE) e de dois ionômeros (Surlyn® e Sentryglas®) que serão objeto de estudo deste trabalho.

Com relação ao resíduo de polietileno reticulado, XLPE, é utilizado como isolamento de fios e cabos elétricos de média e elevada voltagem. A reticulação, embora não interfira nas propriedades dielétricas do polietileno, permite aumentar a temperatura de funcionamento do condutor e reduz o nível necessário de proteção contra curto-circuito e sobrecarga. Porém, a reticulação transforma a natureza termoplástica do polietileno em termofixa, e a reciclagem de polietileno reticulado não pode ser realizada por fusão. Assim, geralmente resíduos e rejeitos de XLPE são incinerados ou descartados em aterros. Uma das sugestões viáveis para o reuso de rejeitos e resíduos termofixos é a moagem e incorporação em resina virgem como carga de enchimento (QUDAIH, 2011).

Com base nos oito Rs da sustentabilidade pensou-se em maneiras de reaproveitar esses resíduos, logo propôs-se incorporar resíduos moídos de XLPE em um termoplástico de engenharia, a poliamida 12, ainda não estudado na incorporação de resíduos de XLPE. Porém, como estes dois polímeros não são compatíveis, formarão duas fases, uma sendo dispersa na outra, com interfaces fracas, resultando em propriedades mecânicas insatisfatórias. Assim, há a necessidade de usar agentes compatibilizantes, que podem melhorar a adesão entre os constituintes da mistura (PRITCHARD, 2005).

Como agente compatibilizante propôs-se então usar resíduos de dois ionômeros à base de poli (etileno ácido metacrílico) produzidos pela DuPont: o Surlyn®, utilizado em tampas e frascos de perfumes; e o Sentryglas®, utilizado como filme interlaminar em vidros laminados para engenharia. Durante o processo produtivo destes dois materiais há a geração de resíduos

que não são facilmente reincorporados ao processo, passando a se tornar um problema econômico para a empresa quanto ao gerenciamento de resíduos. Além disto, estes ionômeros são de uso muito específico e há pouco interesse comercial entre os recicladores para consumir os rejeitos industriais gerados, resultando no seu descarte em aterros ou na sua incineração (OLIVEIRA, 2018; ALMEIDA, 2019).

Portanto, o intuito deste trabalho foi de fazer uma revisão bibliográfica abordando os principais materiais como: resíduo de XLPE, poliamida 12, ionômeros (Sentryglas® e Surlyn®) como agente compatibilizante e um estado da arte abordando temas relacionados à reutilização de XLPE tais como: reciclagem, desreticulação, incorporação em matrizes poliméricas e não poliméricas.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo serão apresentadas características das poliamidas e em específico da poliamida 12, sua fabricação, suas propriedades e aplicações. Além disso, esse capítulo abordará o polietileno reticulado (XLPE), suas variações, o motivo e o efeito da reticulação em polietileno.

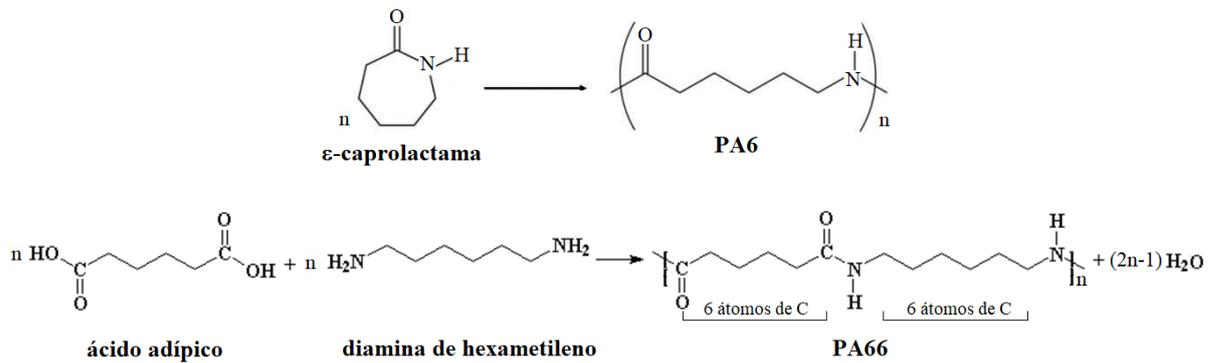
2.1 POLIAMIDAS

As poliamidas possuem boas propriedades mecânicas, especialmente quando são expostas a altas temperaturas ou a solventes orgânicos. Essas propriedades permitiram que as poliamidas fossem aplicadas em situações que apenas o material metálico atendia. Devido a isso, as poliamidas foram os primeiros polímeros reconhecidos como termoplásticos de engenharia. (ARAÚJO, 2002)

Elas são materiais higroscópicos, ou seja, são capazes de absorver a umidade presente no ar, e essa capacidade é explicada pela natureza das ligações secundárias das poliamidas. Devido a essa característica, as propriedades mecânicas, bem como as dimensões do produto são afetadas, visto que com a absorção de umidade ocorre um inchamento do material. A água absorvida da umidade do ar exercerá um papel de plastificante, alojando-se entre as cadeias macromoleculares e assim reduzindo as forças de atração entre elas e aumentando a mobilidade molecular da poliamida, além de aumentar a tenacidade, reduzir a resistência à tração, o módulo de elasticidade e a temperatura de transição vítrea das poliamidas (ARAÚJO, 2002).

Com relação às poliamidas comerciais são divididas em dois grupos. O primeiro grupo é composto por polímeros produzidos da reação de policondensação entre diaminas e ácidos dicarboxílicos, como por exemplo a poliamida 66 (PA66), e o segundo grupo é composto por polímeros produzidos da polimerização de abertura de anel, como por exemplo a poliamida 6 (PA6), conforme mostrado na Figura 1 (ARAÚJO, 2002).

Figura 1: Exemplo de poliamidas, segundo a reação de formação.

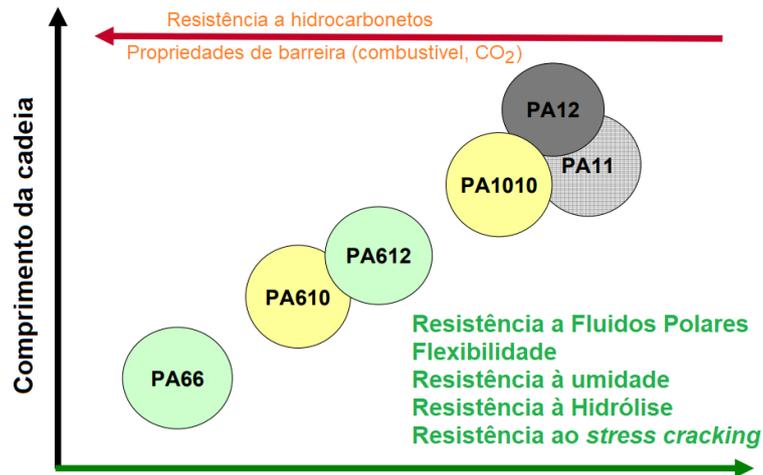


Fonte: POLYMER SCIENCE LEARNING CENTER, 2018.

As poliamidas ainda podem ser classificadas em alifáticas, como PA6, PA12 e PA66, e as aromáticas, chamadas de poliaramidas. Estas apresentam anéis benzênicos em suas unidades de repetição como a poli(*p*-fenileno tereftalamida), conhecidas como Kevlar® e Twaron®, utilizadas em coletes à prova de bala, e a poli(*m*-fenileno tereftalamida), conhecida como Nomex®, usada em roupa à prova de fogo. As poliamidas alifáticas se caracterizam pela estrutura molecular que apresenta repetição de grupos funcionais amida (-CONH-) e grupos de metilenos (-CH₂-) de forma intercalada, formando pontes de amidas contendo cadeias de massa molecular de número médio entre 11.000 e 40.000 g/mol. Cada poliamida é diferenciada por números que indicam a quantidade de carbono proveniente da sua, ou das suas unidades monoméricas. Logo, poliamidas resultantes de reação de diaminas e ácidos dibásicos são classificados por dois números, o primeiro representando a amina e o segundo representando o ácido. (SIMIPELLI; SANTOS, 2010).

O grupo de amida ao longo da cadeia polimérica e seu espaçamento é algo determinante para suas propriedades, visto que quanto menor a sequência de grupos metilênicos entre os grupos amida, maior será a concentração desses grupos polares em polímeros com cadeias de tamanhos semelhantes. Logo, a energia coesiva é maior em poliamidas com grupos de amidas mais próximas quando comparadas com poliamidas de sequência metilênicas maiores. Por consequência as poliamidas com grupo de amida mais próximos possuem maior densidade, rigidez, resistência à tração e à compressão, temperatura de fusão (T_m) e de deflexão ao calor (HDT), resistência a hidrocarbonetos, e capacidade de absorção de umidade. Assim, estas propriedades são inferiores na PA12 em relação à PA6 (ARAÚJO, 2002), ou ainda na PA66 em relação à poliamida 612 (PA612), conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2: Variação das propriedades de poliamidas em função do comprimento do seu mero.

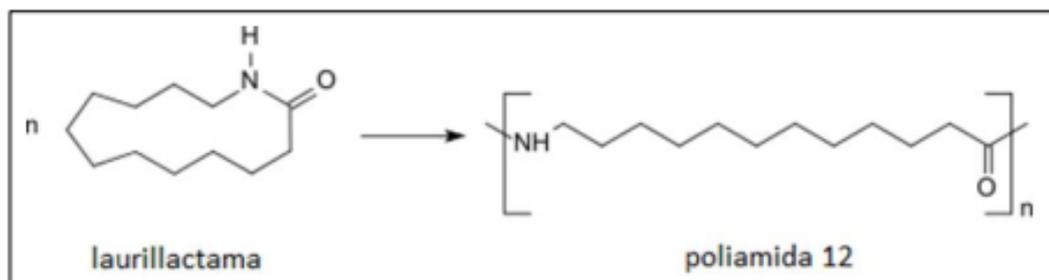


Fonte: DuPont, 2020.

2.2 POLIAMIDA 12

Como já mencionado no subtópico 2.1, a poliamida 12 pertence ao grupo de poliamidas alifáticas lineares. É gerada pela abertura de anel da molécula do laurilactama, Figura 3, (amida cíclica com doze átomos de carbono) (NICHOLSON, 1997). Sua cristalização depende da taxa de nucleação e da taxa de crescimento dos esferulitos (arranjos esféricos) e pode ocorrer a partir da fusão em função da nucleação e do crescimento dos esferulitos, caso a poliamida 12 seja exposta a altas temperaturas (PAOLUCCI, 2018).

Figura 3: Ciclo de abertura de anel para formação da poliamida 12.



Fonte: Nicholson, 1997.

Ela apresenta boa flexibilidade, baixa densidade e alta resistência ao impacto (LADKAU, 2016). Além de apresentar uma excelente relação entre o seu custo e o seu desempenho por ter alta resistência ao impacto, resistência a solventes polares e não polares e

baixa fluência. Além de ser a poliamida que possui menor absorção de água (PAOLUCCI, 2018).

Devido as suas propriedades mecânicas a PA12 possui aplicações como: revestimentos de cabos, linhas de combustíveis automotivos, tubulação de freio, tubos flexíveis para gás, calçados esportivos, cateteres etc (INDUSTRIES, 2011).

2.3 POLIETILENO RETICULADO (XLPE)

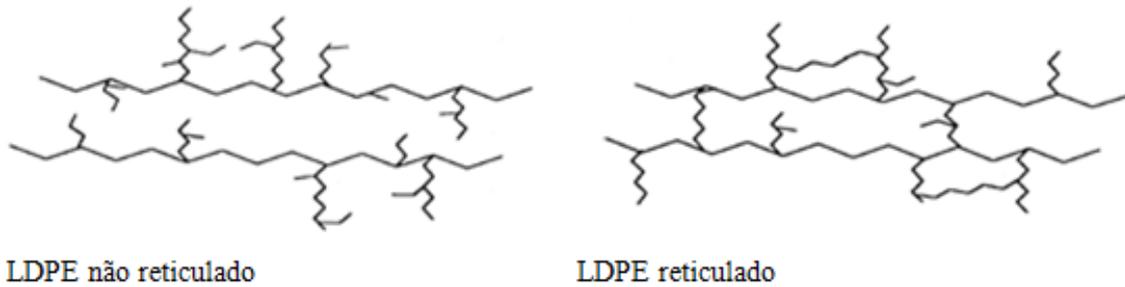
Para agregar valor ao resíduo de XLPE, comumente descartado ou incinerado por causa da sua característica termofixa, neste trabalho o XLPE é a fase dispersa na mistura com a PA12.

O polietileno reticulado é originado da reticulação do polietileno. Ele é um polímero termoplástico de natureza, possibilitando um rápido reprocessamento. Contudo, por ser um termoplástico, no intervalo de 80°C a 130°C o polietileno amolece e escoar, ocasionando perdas de propriedades físicas, e essas perdas acabam por limitar as aplicações do polietileno (TAMBOLI, 2004).

O processo de reticulação em polietileno é um método utilizado para que ele possa ser aplicado em trabalhos com temperaturas iguais ou maiores a 80°C, pois o processo de reticulação muda a natureza do polietileno de termoplástico para termofixo. O processo de reticulação consiste na formação de ligações químicas primárias entre as cadeias poliméricas adjacentes e essas ligações podem ocorrer entre átomos de carbono ou formar uma ponte química ligando dois ou mais átomos de carbono, como é exemplificado na Figura 4. Essas ligações são mais favoráveis em polímeros ramificados do que em polímeros lineares (TAMBOLI, 2004). A reticulação pode ser feita por adição de peróxido ou compostos de silano, ou por radiação, formando ligações cruzadas de C-C ou de Si-O-Si (QUDAIH, JANAJREH, & VUKUSIC, 2011).

A reticulação aumenta a resistência ao impacto, à fluência e à resistência ao crescimento de trincas por tensão ambiental (*stress cracking*), ela também reduz o índice de fluidez e alongamento na ruptura (QUDAIH, JANAJREH, & VUKUSIC, 2011).

Figura 4: Comparação do polietileno não reticulado e do polietileno reticulado.



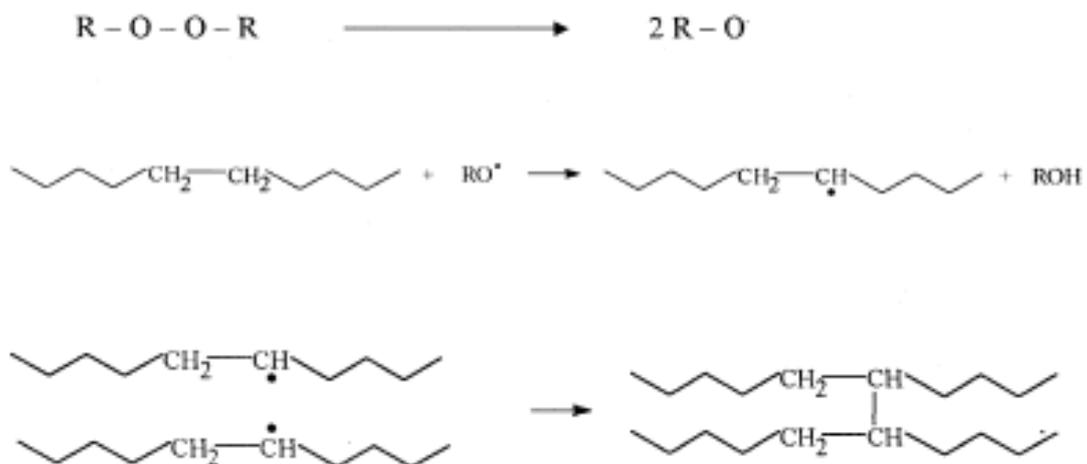
Fonte: TAMBOLI, 2004.

Para a obtenção de polietileno reticulado (XLPE), existem três métodos diferentes, denominado, PEX-A, PEX-B e PEX-C, tratados a seguir:

2.3.1 Peróxido (PEX-A)

Neste método utiliza-se peróxido, que inicia a formação de radicais nos átomos de carbono ao longo das cadeias e cria consecutivas ligações C-C por recombinação, como esquematizado na Figura 5. É possível obter uma reticulação uniforme, entretanto requer um tempo longo devido ao processo que exige alta temperatura acima da temperatura de fusão e extrusão consecutiva em alta pressão (GOUTTEFARDE, 2009).

Figura 5: Representação da reticulação por peróxido



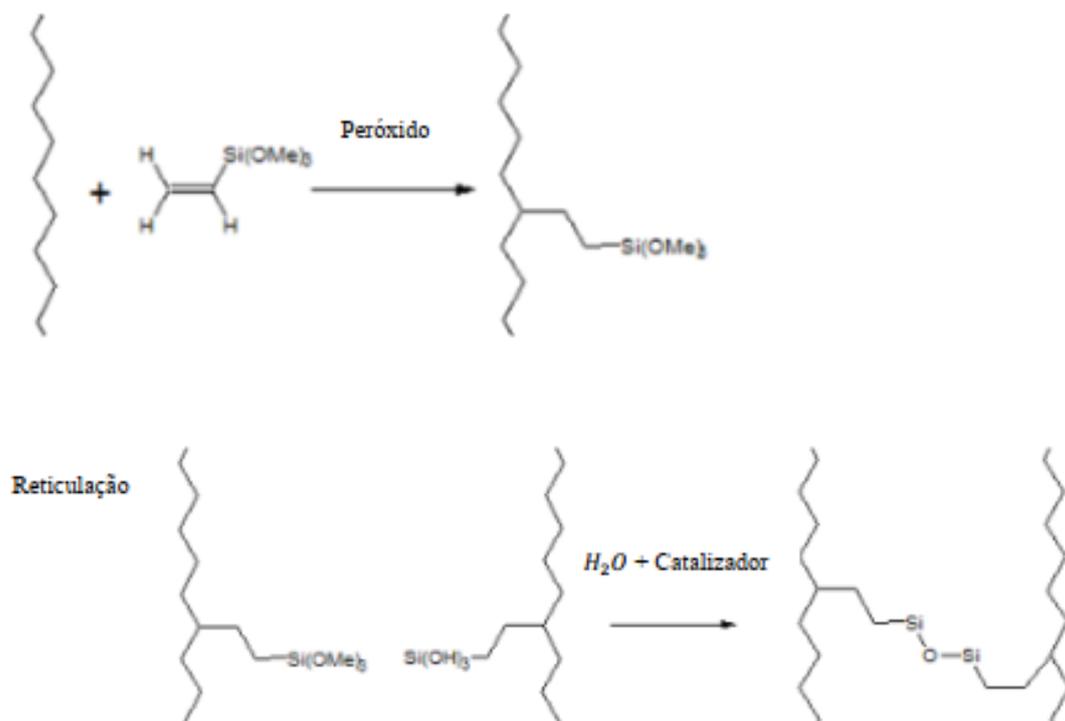
Fonte: TAMBOLI, 2004.

2.3.2 Silano (PEX-B)

Neste método utiliza-se o silano para a reticulação. A reticulação é realizada por meio de um processo de pós-extrusão secundária, utilizando um agente de reticulação junto a um catalisador (Figura 6).

Esse método (PEX-B) é um dos métodos mais baratos e comuns. Para esse método é necessária uma modificação química no polímero por meio de enxerto de viniltrimetoxissilano com uma pequena quantidade de peróxidos, assim possibilitando a incorporação de grupos silanos reativos, na presença de vinilsilano como comonômero. A condensação de silano entre as ligações as conecta (C-C-Si-O-Si-C-C) (GOUTTEFARDE, 2009).

Figura 6: Representação gráfica da reticulação por silano.

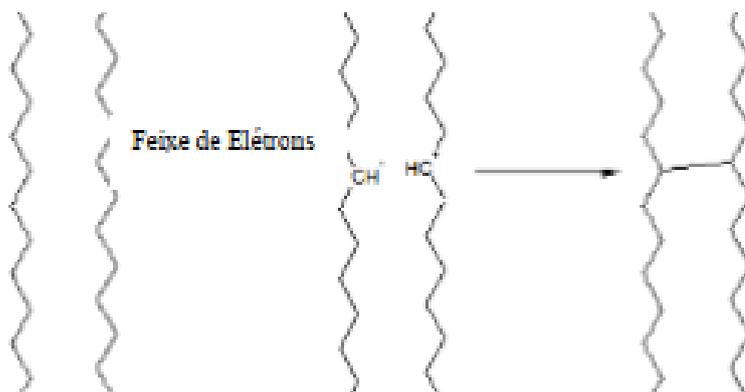


Fonte: Fonte: Gouttefarde, 2009.

2.3.3 Radiação (PEX-C)

Esse método ocorre por meio de uma irradiação de elétrons. Quando os elétrons altamente energéticos atingem as cadeias de PE, algumas ligações C-H ou C-C se quebram e essa quebra leva à formação de radicais. Esses radicais, geralmente, reagem com um outro radical em sua vizinhança, criando localmente ligações entre as principais cadeias, Figura 7 (GOUTTEFARDE, 2009).

Figura 7: Representação esquemática da reticulação por radiação



Fonte: Gouttefarde, 2009.

A seguir é abordado o tema de agentes compatibilizantes.

2.4 AGENTES COMPATIBILIZANTES

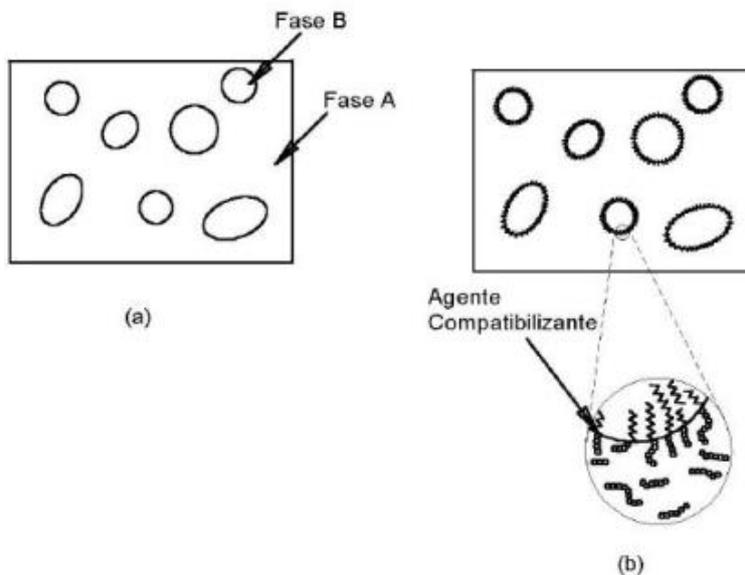
Pela falta de compatibilidade relatada entre poliamidas e polietileno (SCALICE, 2009), há a necessidade de utilizar agentes compatibilizantes.

Os agentes compatibilizantes são muito utilizados em blendas poliméricas imiscíveis, fazendo com que estes formem uma nova mistura, e costuma-se usar emaranhados moleculares para ligar dois polímeros diferentes. Eles também são usados para melhorar as propriedades de blendas de polímero + resíduos de polímeros, e para compatibilizar polímeros com cargas de madeira ou minerais. Eles podem atuar como surfactantes sólidos e assim reduzir o coeficiente de tensão interfacial, reduzindo o tamanho das partículas de um polímero disperso no outro, melhorando assim a sua dispersão e homogeneidade. Agentes compatibilizantes são copolímeros, geralmente em bloco ou enxertados (PRITCHARD, 2005). Os copolímeros em

bloco possuem longas cadeias moleculares nas quais uma sequência de várias unidades estruturais idênticas, P, é seguido por uma sequência de várias unidades estruturais diferentes, Q, todas na mesma cadeia. A sequência, P, é compatível com o polímero A e a sequência, Q, é compatível com o polímero B. A sequência P pode ou não ser idêntica quimicamente à unidade de repetição do polímero A. Os copolímeros enxertados possuem a cadeia principal com um tipo de mero, sequência P, e as ramificações desse copolímero possui outro tipo de mero, sequência Q (PRITCHARD, 2005).

A presença de compatibilizante na interface da blenda é essencial para a eficiência do composto, já que o compatibilizante irá reduzir a tensão, estabilizar a morfologia e aumentar a adesão interfacial entre as fases da blenda como demonstrado na Figura 8 (PRITCHARD, 2005).

Figura 8: representação de blendas imiscíveis e compatibilizadas.



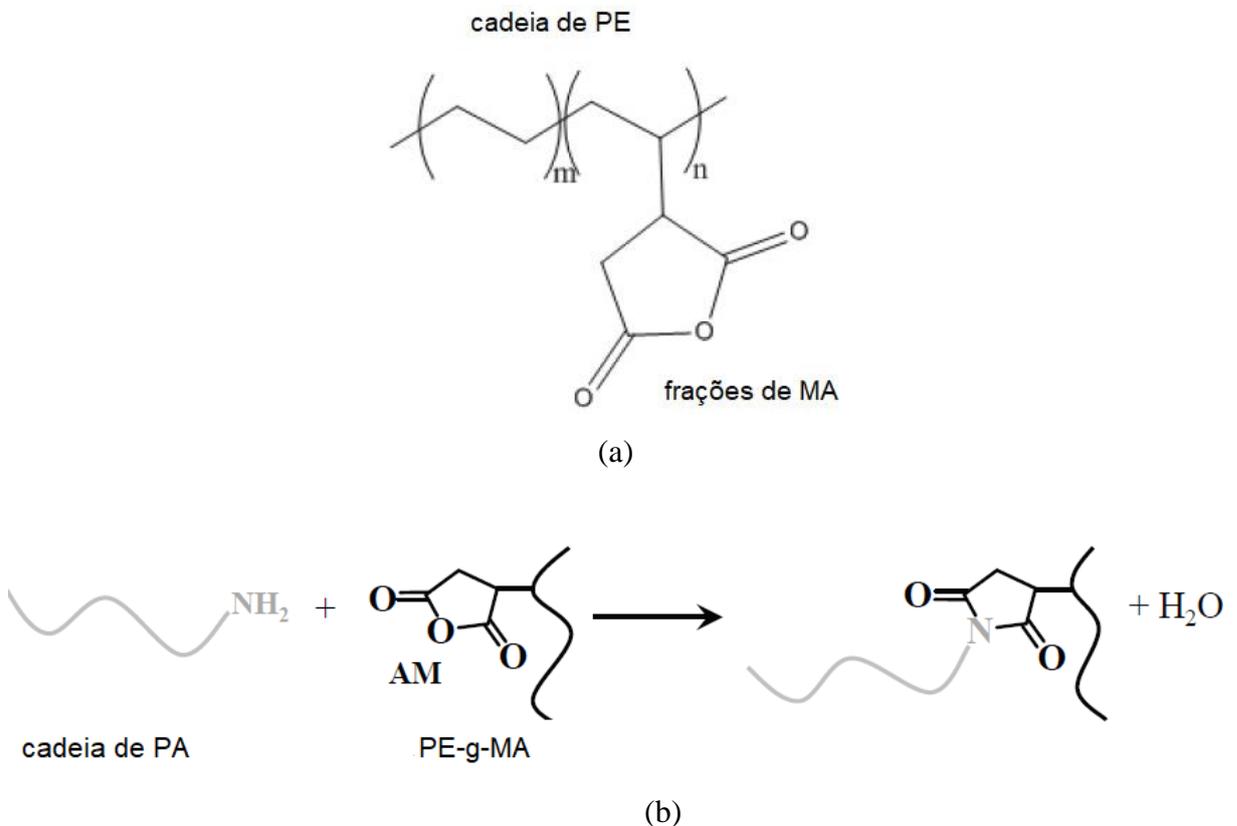
Fonte: BECKER, 2002.

Em alguns casos maximizar a compatibilidade de uma mistura não é desejável, pois um certo grau de heterogeneidade, incompatibilidade e baixa resistência interfacial melhoram a resistência ao impacto (PRITCHARD, 2005).

2.4.1 Polietileno enxertado com anidrido maleico

O agente compatibilizante polietileno enxertado com anidrido maleico (PE-g-MA) é obtido da modificação de poliolefinas por enxertia de anidrido maleico, em extrusão reativa e com a utilização de um peróxido (ROOR*) como iniciador. Com o início da reação, radicais livres são gerados, devido à quebra de ligação entre os átomos de oxigênio, iniciando uma reação de enxerto. Esse agente compatibilizante é utilizado em diversas áreas em que é necessário a compatibilização entre polímeros e outros materiais. Após a reação os compostos apresentam grupos polares que irão interagir com a fase polar e grupos apolares que irão interagir com a fase apolar (Rabello, 2013). A Figura 9 apresenta a estrutura de um PE-g-MA e a provável reação de compatibilização com uma poliamida.

Figura 9: (a) estrutura química do PE-g-MA e (b) sua provável reação de compatibilização com a poliamida



Fonte: ÉPINAT, 2014.

2.4.2 Ionômeros

Ionômeros são polímeros com as cadeias principais hidrofóbicas com pequenas quantidades de grupos iônicos unidos a seus grupos laterais ou terminais. Os ionômeros apresentam boas propriedades físico-mecânicas, térmicas, óticas e excelentes propriedades adesivas. Devido a essas propriedades eles são utilizados em recobrimentos por extrusão, co-extrusão e laminação, na fabricação de peças moldadas por sopro e em embalagens de alimentos. Além disso, seu uso se estende para as indústrias automotiva, médica e elétrica (GUTIÉRREZ & BRAHAM, 1999).

Na literatura há vários relatos do uso de ionômeros poliolefínicos como agentes de compatibilização (RAMIREZ, 1998; GUERRERO, 2001; CHOUDHURY, 2008; BARRAL, 2009; SHOJAEI, 2014).

Segundo Almeida (2019), rejeitos de Surlyn® foram utilizados na formação de blendas com poliamida 6 e essa incorporação promoveu aumento de tenacidade das blendas, um aumento na deformação na ruptura nos ensaios de tração, aumento na resistência ao impacto e melhoria no processamento, tanto no processo de extrusão quanto no de injeção quando comparado ao processamento de poliamida 6 pura. O índice de fluidez apresentou redução no valor quando o ionômero foi adicionado na blenda.

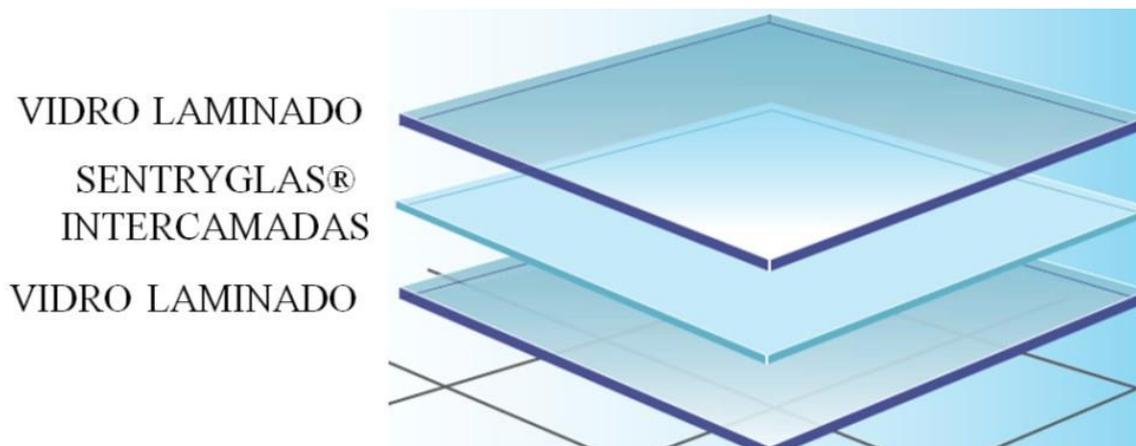
No trabalho de Oliveira (2018), o ionômero Sentryglas® foi incorporado nas matrizes de polietileno de alta densidade e de polietileno de baixa densidade e essa incorporação resultou em melhorias sensíveis na adesão entre os componentes e nas propriedades mecânicas de ambas as matrizes.

Alguns testes foram realizados nos corpos de prova do polietileno de alta e baixa densidade. No ensaio de tração o polietileno de alta densidade apresentou propriedades inferiores comparados ao composto puro, mantendo a tendência de redução em todos os aspectos analisados, enquanto o polietileno de alta densidade só teve uma melhora nos resultados quando o *masterbatch* foi adicionado. O polietileno de baixa densidade apresentou aumento em todas as suas propriedades mecânicas quando comparado ao polietileno de baixa densidade puro. No ensaio de flexão o polietileno de alta densidade apresentou um aspecto mais flexível, enquanto o polietileno de baixa densidade demonstrou um aumento em suas propriedades mecânicas conforme aumentava-se o teor de incorporação de ionômero. No ensaio de impacto apenas o composto de polietileno de alta densidade contendo *masterbatch* teve um aumento na resistência ao impacto.

2.4.2.1 *Sentryglas®*

O Sentryglas® criado pela Dupont é um ionômero utilizado entre camadas de vidros laminados, como mostra a Figura 10. Essa aplicação permite que vidros mais finos consigam suportar carregamentos maiores e atender determinadas funções estruturais (DUPONT, 2009).

Figura 10: Esquema de aplicação do Sentryglas® entre as camadas de vidro.



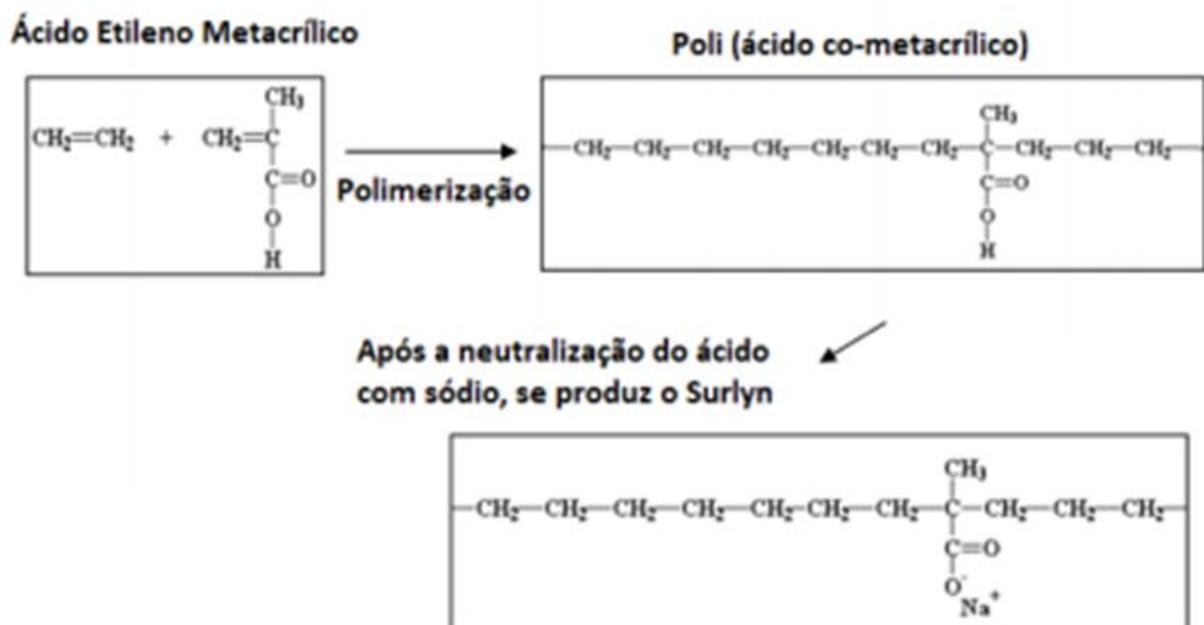
Fonte: DuPont Laminated Glas, 2008.

O Sentryglas® é um composto polimérico que apresenta baixa suscetibilidade à umidade ou a efeitos relacionados a condições climáticas e apresenta uma boa estabilidade de borda. O Sentryglas® pode ser utilizado em vidros planos, curvos, vidros recozidos, temperados, semitemperados, coloridos, armados, impressos e serigrafados. Ele é utilizado nessa variedade de vidros, por apresentar translucidez, boa claridade mesmo depois de anos de uso e boa estabilidade quando comparado a outros compostos como PVB e EVA (DUPONT, 2009). Segundo a DuPont, o Sentryglas® apresenta uma ótima durabilidade, flexibilidade em design e controle de radiação UV e uma maior resistência e rigidez quando comparado ao PVB e ao EVA. Além disso o Sentryglas® apresenta ótima resistência à quebra, já que mantém os estilhaços presos a intercamada (DUPONT, 2009).

2.4.2.2 *Surlyn*®

O *Surlyn*® é um copolímero aleatório de poli(ácido etileno co-metálico), criado pela DuPont, que contém 5,4% mol de ácido metacrílico que foi neutralizado com metais alcalinos ou hidróxido de zinco. A produção do *Surlyn*® ocorre por meio de uma copolimerização de etileno e ácido metacrílico e essa copolimerização é realizada por uma reação de radicais livres de alta pressão, como mostra a Figura 11 (REYNOLDS, 2011).

Figura 11: Reação de copolimerização do *Surlyn*®.



Fonte: REYNOLDS, 2011.

O *Surlyn*® é uma resina atrativa para o setor de embalagens, já que ele apresenta excelente desempenho em vedação, resistência à tração, tenacidade, transparência e resistência a óleos e gorduras. Essa atração que o setor de embalagens tem pelo *Surlyn*® se explica pela existência de grupos carboxílicos nas laterais da cadeia e por sua interação molecular por pontes de hidrogênio (SARANTÓPOULOS, 2002). Além das embalagens, o copolímero é aplicado, também, no setor esportivo como em capas de bola de golfe e em botas de esqui, devido a sua alta resistência e dureza (REYNOLDS, 2011).

3 ESTADO DA ARTE

O polietileno reticulado (XLPE) é insolúvel e infusível, em outras palavras adquire características de um termofixo. Ainda não existem métodos eficientes que sigam os oito Rs com relação a polímeros reticulados, porém, existem algumas alternativas que podem ser de grande utilidade como, por exemplo, a desreticulação e a incorporação em matrizes poliméricas ou não.

3.1 DESRETICULAÇÃO DO XLPE

Em 2009, na Coreia do Sul, foi realizado um estudo sobre a reciclagem de poliolefinas reticuladas pela desreticulação em um fluido supercrítico (CHO, 2016). No estudo, o XLPE foi uma ferramenta para a reciclagem da resina termofixa e para isso ele foi inserido em reatores, submetendo-se a altas pressões, temperaturas, em um fluido supercrítico, composto de etanol, metanol e 2-propanol, e sal. A exposição do XLPE a essa mistura causou, simultaneamente, a quebra das ligações cruzadas nos pontos mais frágeis e a redução da massa molar do polímero. Após esse processo, o polímero foi seco e passou por uma extrusora obtendo-se pellets de XLPE reciclado. Nesse trabalho concluiu-se que a pressão e a temperatura foram determinantes para a quebra da reticulação a extrusão do material foi possível em uma extrusora monorroscas e a massa molecular do polímero diminuiu após a desreticulação mas não houve diminuição da resistência mecânica e nem a formação de outros grupos funcionais.

Em 2009, Lu, Zhang e Liang estudaram a possibilidade de desvulcanização de borracha de pneu moída (GTR) e XLPE para transformá-los em materiais reformatáveis. Para isso cortou-se o XLPE em lascas de 1 cm a 3 cm e a GTR em partículas de 340 μm misturando-os em reator mecanoquímico para realizar a degradação parcial da borracha e do XLPE. Após ciclos de moagem e remoção de água e preparação das amostras por mistura (50/50), adição de dois diferentes agentes de cura (enxofre e peróxido) e fusão por meio de uma prensa hidráulica eletricamente aquecida, eles estudaram o comportamento reológico, propriedades mecânicas e medição de frações de gel.

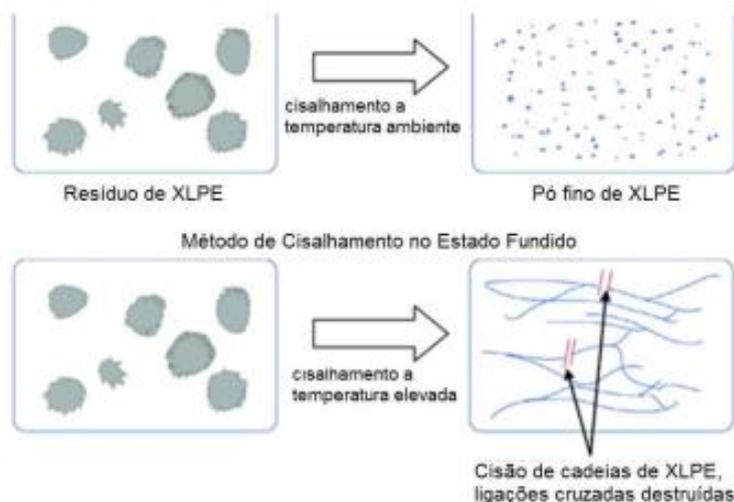
No comportamento reológico, observou-se um comportamento pseudoplástico, pois a viscosidade aparente da mistura diminuiu com o aumento da taxa de cisalhamento. Nas propriedades mecânicas as amostras com 8 ciclos de moagem e curadas com peróxido apresentaram uma redução de capacidade, mas em contrapartida, as curadas com enxofre apresentaram uma melhora nas propriedades mecânicas como: aumento de 42% na resistência

à tração, 24% no alongamento de ruptura. As amostras que passaram por 20 ciclos de moagem mecanoquímica conseguiram atingir uma resistência à tração de 6,0 MPa e aumento no alongamento na ruptura de 185,3%. Já após a vulcanização dinâmica a resistência à tração aumentou para 9,1 MPa e o alongamento a ruptura para 201,2%.

Lu, Zhang e Liang concluíram que o método de reciclagem estudado para a mistura XLPE/GTR é econômico e fácil para a industrialização quando comparado aos processos já existentes.

Sekiguchi e seus colegas, em 2007, estudaram dois métodos de reciclagem para o XLPE. O método de cisalhamento em estado sólido ocorre por meio de um moinho na temperatura ambiente. Esse método consiste em triturar o XLPE em partículas de aproximadamente 0,3 mm. Já o método de cisalhamento no estado fundido ocorre em temperaturas acima de 200°C em uma extrusora dupla rosca. A grande diferença entre os dois processos consiste na estrutura do produto, representado pela Figura 12.

Figura 12: Diferença das estruturas nos processos de reciclagem.



Fonte: FONSECA, 2015.

Após o processamento pelos dois métodos de reciclagem, concluiu-se que o método de cisalhamento no estado fundido é útil como isolamento para fios, devido à cisão de cadeias de XLPE, ou seja, as ligações cruzadas destruídas que proporcionarão um melhor isolamento elétrico.

Em 2016 Lopez, Bouzarafa, Bouhelal, Saci e García estudaram a possibilidade de desreticulação de LDPE.

Várias amostras de LDPE reticulado foram preparados utilizando peróxido, catalisador e enxofre pela técnica de reação de reticulação reversível (RXR) visando diferentes graus de reticulação. Testes como análise reológica, torque, espectroscopia de infravermelho, difração de raios X, análise termogravimétrica (TGA) e calorimetria exploratória diferencial (DSC) foram utilizados para comparar os LDPE reticulados por peróxido e enxofre. Com esses testes observou-se uma modificação em grau de cristalinidade, tamanho dos cristais e estabilidade térmica chegando à conclusão de que por meio do método RXR é possível utilizar LDPE reticulado na preparação de materiais recicláveis.

Após todos os estudos realizados com o XLPE visando a sua desreticulação, observou-se que existem processos possíveis para a desreticulação e reaproveitamento do XLPE que são econômicos e fáceis quando comparados a outros processos de reciclagem. Além da reciclagem do XLPE focado em indústrias de fios elétricos a reutilização do XLPE pode ocorrer também na preparação de materiais recicláveis.

3.2 INCORPORAÇÃO DO XLPE EM MATRIZES NÃO POLIMÉRICAS

Ariza, (2018), incorporou o XLPE em concreto, para estudar as mudanças das propriedades mecânicas (resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade) em corpos de prova de sete e vinte e oito dias após o preparo, com incorporações de 2%, 4% e 6% em massa. Observou que apenas a incorporação de XLPE em 2% aumentou a resistência à compressão, resistência à flexão e o módulo de elasticidade, entretanto a incorporação de 4% e 6% reduziram as propriedades mecânicas quando comparadas as propriedades do concreto puro. Ariza observou que de acordo com a porcentagem de XLPE as quantidades mineralógicas dos compósitos são modificadas mudando assim as propriedades mecânicas. Logo, concluiu-se que o carbono presente no concreto poderia contribuir com uma melhora na resistência à compressão e a flexão.

Em 2011 na universidade de Minho, Portugal, um grupo de alunos que cursava Engenharia Civil estudaram a possibilidade de incorporar resíduos de XLPE moído, proveniente de fios e cabos, na formação de um asfalto de alto desempenho, focado para estradas e rodovias (MACHADO, 2011). Produziu-se quatro misturas de 50/70 variando apenas a porcentagem de XLPE de 5,0% e 5,5%. Esse estudo mostrou que a utilização do XLPE em asfalto aumentou a resistência à deformação do asfalto, aumentou a rigidez do asfalto, diminuiu o consumo de betume/piche + pedra + areia, tornou o produto mais ecológico mantendo a sensibilidade a água, reduziu o custo comercial do asfalto já que o XLPE é refugo e diminuiu a

densidade do produto final, assim como na incorporação de XLPE em concreto. Essa redução de densidade ocorreu justamente pelo XLPE ocupar parte do espaço do produto sendo que o XLPE é menos denso do que o concreto e o asfalto. Das misturas analisadas a que mais teve êxito foi a mistura convencional contendo 5,5% de XLPE que obteve uma densidade de 2353 kg/m³ com 2,5% de vazio.

Com base nos estudos apresentados sobre incorporação de XLPE em asfalto e concreto observou-se que o XLPE atua de forma positiva nas matrizes melhorando as resistências à flexão e à compressão, bem como a rigidez (módulo elástico) e reduzindo a densidade do produto. Vale a ressalva de que esse bom desempenho no aumento das propriedades mecânicas irá depender da porcentagem de XLPE incorporado na matriz, tratando-se de teores relativamente baixos.

3.3 INCORPORAÇÃO DO XLPE EM MATRIZES POLIMÉRICAS

Quanto à sua incorporação em matrizes poliméricas, o XLPE pode ser incorporado em matrizes quimicamente semelhantes como: os polietilenos de baixa densidade (LDPE), de alta densidade (HDPE), de média densidade (MDPE) e linear de baixa densidade (LLDPE). Mas também em matrizes quimicamente diferentes como: polipropileno (PP, apolar), acrilonitrila butadieno estireno (ABS, polar) e poliamida (PA, polar).

A seguir será apresentado trabalhos de incorporação em matrizes quimicamente semelhantes e em seguida em matrizes quimicamente diferentes ao XLPE.

3.3.1 Incorporação em matrizes quimicamente semelhantes

Em polímeros quimicamente semelhantes, a incorporação do polietileno reticulado (XLPE) ocorre com mais facilidade não precisando de um agente compatibilizante.

Cucchiara e Bonse (2015) avaliaram as propriedades térmicas e mecânicas de composto de polietileno de alta densidade (HDPE) contendo XLPE proveniente de revestimento de fios e cabos elétricos. Nesse trabalho eles incorporaram de 5 a 30% de XLPE e avaliaram algumas propriedades como resistência ao impacto, resistência a flexão, HDT e resistência a tração. Com exceção da resistência ao impacto que sofreu um aumento, todas as outras propriedades sofreram uma redução conforme a porcentagem de XLPE aumenta. Após a análise dos resultados, Cucchiara observou que o XLPE se dispersou na matriz de PEAD apresentando uma boa adesão entre as fases. Essa boa adesão se deu por ambos serem polietileno.

Já Freitas e Bonse (2017) estudaram o efeito do teor e do tamanho de partícula do XLPE e como essas partículas de 100, 500 e 900 μm afetam nas propriedades do HDPE. Nesse trabalho avaliou-se a resistência à tração, deformação na ruptura, resistência à flexão, resistência ao impacto, deflexão térmica e de todas essas propriedades apenas a resistência ao impacto aumentou, o restante das propriedades reduziram. Freitas também observou, através do MEV, uma forte interação entre a matriz e o XLPE o que corrobora e evidencia o aumento de resistência ao impacto.

Em 1992, Oganda, incorporou até 25% em massa de XLPE pulverizado em PE virgem. Após ensaios em rotomoldagem, observou-se que as partículas de 0,5 mm apresentaram um acabamento áspero na peça, as de partícula 0,15 mm resultaram em acabamentos com superfícies mais bem acabadas. Com essas observações concluiu-se que o tamanho das partículas e a temperatura tem grande influência no acabamento da superfície interior da peça. Além do que, a mistura pode ser realizada em rotomoldagem, moldagem por injeção e moldagem por sopro.

Em 2011 Qudaih, Janajreh e Vukusic incorporaram 5%, 10% e 15% em massa de XLPE com silano em pó, com tamanho médio de partícula de 1,25 mm, em LDPE. Dentre as porcentagens a que obteve o melhor resultado foi a amostra com 15% de XLPE, o qual apresentou um aumento de 37,2% na tensão de escoamento, 17% no módulo de Young, 22,4% na tensão de ruptura, mas também apresentou uma redução de 3,3% na temperatura de fusão quando comparado ao material virgem.

Em 2013, Janajreh e Alshrah estudaram a possibilidade de usar XLPE, reticulado com enxofre, como carga em LDPE em proporções de 10, 20 e 100%, analisando a tensão ao escoamento, módulo de Young, inclinação em 0,5 e força máxima. Essa experiência mostrou que comparando com o produto original as variações nas propriedades térmicas eram toleráveis, retomando milhões de barris de combustível fóssil o que resultou na transformação da indústria de fios e cabos em uma indústria mais sustentável e com desperdício quase zero.

Gouttefarde (2009) incorporou 40%, 50%, 60% e 70% em massa de resíduo de Si-XLPE micronizado, com tamanhos de partículas variando de 0,4 mm a 0,6 mm, proveniente de uma empresa fabricante de fios e cabos em matriz de LLDPE. As moldagens realizadas foram por meio de injeção e moldagem por extrusão de fita. Com essa extrusão o produto apresentou rugosidade, ela foi considerada uma falha e foi reduzida por meio de uma pré-composição. Após essas composições serem testadas por empresas parceiras do segmento, o teor de XLPE foi reajustado para valores menores de 10%, 15% e 20%.

Boss, em 2014, comprovou-se que em todos esses polímeros no qual o XLPE foi incorporado em MDPE. Uma amostra pura de MDPE apresentou $6,0 \text{ kJ/m}^2$ de resistência ao impacto, quando incorporado 30% de XLPE com silano, com 0,6 mm de tamanho de partícula e grau de 75% de reticulação, a resistência ao impacto testada pelo ensaio Charpy foi de 13 kJ/m^2 e $9,3 \text{ kJ/m}^2$. Vale a ressalva que a espessura da parede era de 4 mm e 6 mm respectivamente. Já em amostras com a mesma incorporação, apenas com a diferença de que a partícula possui 1 mm e o grau de reticulação é de 55%, a resistência ao impacto foi de 11 kJ/m^2 e $8,5 \text{ kJ/m}^2$ com espessura da parede de 4 mm e 6 mm respectivamente.

Em um LLDPE incorporou-se 50% de XLPE micronizado entretanto o cabo extrudado apresentou rugosidade, reduzindo a porcentagem de XLPE para 20%. Situação essa que não ocorreu com o HDPE com incorporação de 70% de XLPE micronizado, com 0,5 mm de tamanho, sendo diretamente injetado. Mesmo com uma diminuição de fluidez, o composto injetado, apresentou uma alta rigidez, alto grau de ductilidade e resistência ao impacto, porém mesmo a incorporação apresentando bons resultados, a incorporação de 50% de XLPE micronizado em HDPE apresentou melhores resultados (BOSS, 2014).

O grupo de pesquisa sueco Swerea IVF realizou um projeto com parceria com empresas como AB Volvo, Nexans, Hellermann Tyton, Reflex Film, Axjo Plasti e Norner, focando na reciclagem mecânica de cabos elétricos.

Nesse projeto sueco a incorporação de XLPE em polietileno de média densidade (MDPE) micronizado foi utilizado no processo de moldagem rotacional. A moldagem rotacional foi necessária devido à presença de antioxidantes, utilizado para evitar degradação oxidativa. A aplicação de XLPE em MDPE aumentou a resistência ao impacto, principalmente nas amostras com 30% de XLPE. Com relação às amostras que apresentaram aumento na resistência ao impacto, selecionaram sete amostras, sendo quatro contendo 30% de XLPE, para avaliarem resistência ao impacto, influência do tamanho de grão e espessura da parede. As amostras de MDPE puro apresentaram impacto de $6,0 \text{ kJ/m}^2$. As amostras que continham 30% de incorporação de XLPE com 75% de reticulação, reticulado com silano e tamanho de partícula igual a 0,6 mm apresentou 13 kJ/m^2 (com espessura de parede de 4 mm) e $9,3 \text{ kJ/m}^2$ (com espessura de parede de 6 mm) de resistência ao impacto Charpy. Já as amostras com as mesmas características das anteriores, diferenciando apenas o tamanho de partícula de 0,6 mm para 1 mm e o grau de reticulação de 75% para 55%, apresentaram resistência ao impacto de 11 kJ/m^2 (com espessura de parede de 4 mm) e $8,5 \text{ kJ/m}^2$ (com espessura de parede de 6 mm) (BOSS, 2014).

Falando mais um pouco sobre a reciclagem mecânica, conseguiu-se incorporar 50% de XLPE micronizado ao LLDPE, entretanto o cabo extrudado apresentou rugosidade limitando assim a porcentagem de XLPE a 20%. Também se incorporou XLPE micronizado em HDPE e observaram que a incorporação de 70%, com tamanho de 0,5 mm, moldado diretamente por injeção manteve sua rigidez, resistência ao impacto e alto grau de ductilidade, mas quando comparado a uma composição 50/50 de XLPE/HDPE a composição 50/50 apresentou melhores propriedades (BOSS, 2014).

Em 2017, Leite e Bonse avaliaram o efeito do tamanho da partícula de XLPE nas propriedades de HDPE. Foram incorporadas partículas de 400 µm a 1300 µm e observou-se que a resistência à tração, deformação a ruptura, resistência ao impacto, temperatura de fusão e estabilidade de degradação aumentaram conforme as partículas de XLPE iam aumentando, mas, ao mesmo tempo, a resistência à flexão reduziu. Logo, conclui-se que, conforme as partículas de XLPE vão aumentando as propriedades superiores em XLPE melhoram, mas as inferiores reduzem.

Fonseca e Bonse (2015) estudaram a incorporação do polietileno reticulado (XLPE), a teores de 5%, 10% e 20%, em polietileno de baixa densidade (LDPE) e foi observado que, com exceção da resistência à tração, todas as outras propriedades mecânicas (deformação na ruptura, tenacidade, resistência ao impacto) aumentaram.

Esse aumento se deu pela adição de XLPE que apresenta melhores propriedades, em consequência, ele melhora as propriedades da matriz LDPE.

Assim como mencionado no HDPE, o XLPE apresenta uma ótima adesão com o LDPE dispensando o uso de agentes compatibilizantes e isso se dá pelo fato de ambos serem quimicamente idênticos, conclusão essa, reforçada pela avaliação em MEV no trabalho de Fonseca e Bonse (2015).

3.3.2 Incorporação em matrizes quimicamente diferentes

Em 2018, Silva e Bonse analisaram os efeitos do XLPE como modificador de impacto em polipropileno (PP). Pelo fato de que o PP e o XLPE apresentem estruturas diferentes as chances de compatibilidade eram reduzidas, logo utilizou-se copolímero de etileno propileno (EPM) como agente compatibilizante como um meio de aumentar a compatibilidade do XLPE com o PP.

Após a realização dos testes de um corpo de prova puro e de PP com variantes de 5% a 25% de XLPE e de 4% a 8% de EPM, observou-se que resistência à tração, deformação a ruptura, temperatura de fusão, estabilidade de degradação e resistência à flexão reduziram, mas a resistência ao impacto aumentou.

Essa redução e aumento nas propriedades, como já explicado anteriormente, ocorre pois o PP possui propriedades superiores em relação ao XLPE com exceção da resistência ao impacto que foi a única propriedade que aumentou com a adição de XLPE.

Moraes e Bonse (2017) estudaram a incorporação de XLPE em compósito de matriz polimérica termoplástica de PP/EPDM/talco avaliando a resistência à tração, deformação a ruptura, resistência à flexão, resistência ao impacto, temperatura de fusão e estabilidade a degradação com uma variação de 0%, 10%, 20% e 30% de XLPE.

Com a análise morfológica realizada por meio de MEV, observou-se as placas lamelares de talco, as fendas de arrancamento e a fase borrachosa do EPDM em forma de gotas. Com essas observações foi possível concluir a incompatibilidade e a falta de adesão do XLPE com a matriz. Dos testes realizados observou-se que com exceção da temperatura de fusão e da estabilidade a degradação que aumentaram, todas as outras propriedades, mencionadas anteriormente, reduziram e mais uma vez a explicação se dá pela inferioridade das propriedades mecânicas e superioridade das propriedades térmicas do XLPE comparado a matriz PP/EPDM/talco, e a falta de adesão entre as fases, resultando na redução das propriedades mecânicas e no aumento das propriedades térmicas.

Relembrando o projeto realizado pelo grupo de pesquisa sueco Swerea, mencionado no tópico 3.3.1. Dentro desse trabalho também se estudou a incorporação de XLPE granulado. Incorporou-se a um PP homopolímero reciclado, com enchimento e baixo percentual de modificador de impacto, XLPE granulado, com tamanho de partícula entre 3-8 mm, e XLPE micronizado, com tamanho de partícula de 1 mm e foi possível observar um aumento significativo na resistência ao impacto nas amostras com XLPE granulado (BOSS, 2014).

Soares e Bonse (2019) estudaram, segundo um planejamento fatorial 2^2 com ponto central, formulações com teores de XLPE de 5, 15 e 25% e de PEgMA de 2, 4 e 6%, ambos em massa, nas propriedades mecânicas e térmicas (resistência à tração, deformação a ruptura, resistência ao impacto, temperatura de fusão, estabilidade de degradação, resistência à flexão) de poliamida 6 (PA6). O uso do agente compatibilizante foi necessário, pois diferente do HDPE e do LDPE, a PA6 não possui uma estrutura semelhante à do XLPE dificultando a possibilidade de compatibilização da matriz com o XLPE. Diferentemente ao observado com as matrizes anteriores, a resistência ao impacto não aumentou. Conforme imagens obtidas por MEV faltou adesão entre a PA6 e o XLPE, indicando que o agente compatibilizante não teve função efetiva, o que gerou espaços entre carga e matriz ocasionando a propagação de trincas e reduzindo a resistência ao impacto. Este fato foi uma das razões da proposição do trabalho atual.

3.4 IONÔMEROS USADOS COMO AGENTE DE COMPATIBILIZANTE

Desde 1998 já se era estudado a aplicação de Surlyn® como um agente compatibilizante. Estudou-se a compatibilização de PET com HDPE, utilizando o Surlyn® como agente compatibilizante. Neste trabalho preparou-se misturas de PET/HDPE 25/75, 50/50 e 75/25 sem e com 7,5% em massa de Surlyn® (RAMIREZ, 1998).

Para chegar a algumas conclusões, utilizou-se DSC, análise de espectroscopia de infravermelho e MEV e após todas as análises foi possível concluir que as amostras com Surlyn® apresentavam uma superfície de fratura mais uniforme e com melhor adesão, já as amostras sem o Surlyn® apresentavam poros ou cavidades muito marcadas indicando a falta de adesão entre os polímeros.

Em agosto de 2001 Guerrero, Lozano, Gonzáles e Arroyo estudaram misturas de PET e HDPE com e sem agente compatibilizante Surlyn®. A olefina presente no Surlyn® é compatível com o HDPE e os grupos de ácido carboxílico possuem afinidade com as carbonilas presentes no PET. Para avaliar a eficácia do agente compatibilizante, realizou-se análise de espectroscopia de infravermelho, DSC, MEV e alguns testes relacionados às propriedades mecânicas.

Já em 2014, Shojaei e colegas aplicaram o Surlyn® como agente compatibilizante na produção de nanocompósitos de LDPE/ Surlyn®/argila organofílica. Esse nanocompósito foi preparado por meio de uma extrusora de dupla rosca, mistura selecionada e avaliado por análise de difração de raios X, propriedades mecânicas e propriedades térmicas. Com as avaliações realizadas nos dois métodos, concluiu-se que o método no qual a extrusora foi utilizada para a

mistura resultou em uma melhor dispersão e intercalação dos nanocarga. Além de que os nanocompósitos apresentaram um aumento na resistência à tração, alteração nula na temperatura de fusão e cristalização, mas uma diminuição na estabilidade térmica dos nanocompósitos conforme o teor de argila aumenta.

Barral e seus companheiros, em 2009, publicaram um artigo no qual o Surlyn® foi utilizado como agente compatibilizante para mistura de PP e etileno-álcool vinílico (EVOH). Preparou-se amostras binárias com proporções de 90/10, 70/30 e 60/40 de PP/EVOH e amostras ternárias de PP/EVOH/Surlyn®. A adição do Surlyn® como compatibilizante modificou substancialmente o comportamento de cristalização do PP, essa redução é evidente quando os valores de K foram obtidos para as mesmas temperaturas de cristalização em relação ao PP líquido, a mistura PP/EVOH e a PP/EVOH/Surlyn®. Com a análise das constantes de velocidade do processo de cristalização isotérmica das amostras notou-se que a presença do Surlyn® altera o equilíbrio das interações intermoleculares do EVOH, causando um efeito de compatibilização resultando na supressão de sua atividade de nucleação e no aumento de energia livre de nucleação. Esses resultados trazem por consequência a redução da velocidade de cristalização e formação de uma pequena fração de polimorfo trigonal no PP.

Em 2009 Barral e seus colaboradores também estudaram sobre a influência da compatibilização na atividade nucleante em misturas de PP e EVOH utilizando 10% em massa de Surlyn® como um agente compatibilizante e mantendo os procedimentos do trabalho citado anteriormente, entretanto nessa pesquisa analisou-se a cristalização por DSC. Observou-se que o comportamento de cristalização do PP é afetado pela presença do agente compatibilizante Surlyn®. Entretanto esse efeito de compatibilização não é suficientemente relevante para modificar o comportamento de cristalização do EVOH.

Em 2008 Choudhury investigou sobre o PEAD reforçado com fibras de sisal em diferentes teores e como as propriedades mecânicas de tração, flexão e impacto se alteram de acordo com os teores de sisal (de 5% a 20% da massa do compósito). Nesse trabalho utilizou-se o Surlyn® como agente compatibilizante. Houve um aumento de 17% na resistência à flexão, 28% no módulo de elasticidade à tração, 16% na resistência à tração e 30% no módulo de elasticidade na flexão.

Com base nos trabalhos apresentados o Surlyn® apresentou um ótimo desempenho como agente compatibilizante em diferentes incorporações. Dando ênfase a boa compatibilidade com PE devido à presença de olefina no Surlyn® que tem compatibilidade com a família de polímeros PE.

4 METODOLOGIA

Baseado nos vários trabalhos já realizados pelo grupo de pesquisa de polímeros do Centro universitário FEI, que abordam a incorporação de XLPE moído em diversas matrizes sem e com agente compatibilizante, usando extrusão em extrusora dupla rosca, com injeção subsequente de corpos de prova para ensaios mecânicos, térmicos e morfológicos, propôs-se prever a viabilidade técnica da incorporação de resíduos de XLPE em um termoplástico de engenharia, a poliamida 12, ainda não estudado pelo grupo.

Para tanto realizou-se uma extensa revisão bibliográfica e do estado da arte. Para a criação do estado da arte pesquisou-se artigos científicos em revistas especializadas da área, trabalhos de conclusão de curso, dissertações de mestrado, teses de doutorado, abordando, entre outros, a desreticulação do XLPE, reutilização dos resíduos de XLPE por meio de incorporações em matrizes não poliméricas e poliméricas (quimicamente semelhantes e quimicamente diferentes ao XLPE). Além dos estudos de XLPE, pesquisou-se também estudos a respeito da utilização de ionômeros como o Surlyn® como agentes compatibilizantes.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos trabalhos mencionados, observou-se que com a adição de XLPE a resistência à tração, deformação na ruptura, resistência à flexão e deflexão térmica reduziram e essa redução se dá justamente pela adição do XLPE que possui essas propriedades inferiores a matriz de HDPE. Entretanto, a resistência ao impacto aumentou, pelo fato de o XLPE ser mais resistente ao impacto do que o HDPE, aumentando assim essa propriedade.

Observou-se também que o XLPE teve um bom resultado com relação ao aumento da resistência ao impacto e à estabilidade térmica, não precisando de agentes compatibilizantes. Matrizes que possuem propriedades mecânicas superiores ao XLPE tiveram queda nestas propriedades ao incorporar o XLPE, enquanto matrizes com propriedades mecânicas inferiores ao XLPE tiveram um aumento destas propriedades, conforme esperado pela regra de mistura. Esta regra postula que uma propriedade mecânica de um material composto pode ser estimada pela média ponderada do volume das propriedades das fases, supondo que a adesão entre as fases seja perfeita (RABELO, 2000).

Com relação aos trabalhos de XLPE incorporados em matrizes poliméricas não semelhantes, a incorporação do XLPE necessitou de agentes compatibilizantes e fez por reduzir as propriedades mecânicas e térmicas do produto. Essa diminuição de propriedades se deu, provavelmente, pela falta de afinidade entre a matriz e o XLPE, diferente do que ocorreu nas matrizes quimicamente semelhantes. Após apresentar todas essas pesquisas, pode-se observar que o resíduo de XLPE, sem o uso de compatibilizante adequado, não é uma alternativa viável quando se trata de melhoras de propriedades, entretanto é viável para aplicações nas quais o preço é uma variável a ser considerada.

Os resultados esperados seriam semelhantes aos trabalhos de incorporação de XLPE em matrizes poliméricas quimicamente semelhantes, ou seja, diminuição das propriedades mecânicas e térmicas, má adesão do XLPE a PA12 na ausência de agentes compatibilizantes. Na presença do Surlyn®, como compatibilizante, esperar-se-ia uma boa adesão do XLPE com a PA12, visto que o Surlyn® mostrou compatibilizar o PE e o PET, um polímero polar, com certa semelhança com a PA. Como o Sentryglas® é um ionômero bastante semelhante ao Surlyn®, espera-se resultados semelhantes ao da Surlyn®.

6 CONCLUSÕES

A realização da revisão bibliográfica abordando resíduos de XLPE, poliamida 12, ionômeros (Sentryglas® e Surlyn®) como agente compatibilizante e um estado da arte abordando temas relacionados à reutilização de XLPE tais como reciclagem, desreticulação, e a incorporação em matrizes poliméricas e não poliméricas, possibilitou chegar às seguintes conclusões.

Quando XLPE é incorporado em matrizes poliméricas quimicamente similares, terá um bom resultado com relação ao aumento da resistência ao impacto e à estabilidade térmica, não precisando de agentes compatibilizantes. Matrizes que possuem propriedades mecânicas superiores ao XLPE terão queda nestas propriedades ao incorporar o XLPE, enquanto matrizes com propriedades mecânicas inferiores ao XLPE terão um aumento destas propriedades, conforme esperado pela regra de mistura.

Quando o XLPE é incorporado em matrizes poliméricas quimicamente não semelhantes, as propriedades mecânicas e térmicas do produto reduzirão, pela falta de afinidade entre a matriz e o XLPE, diferente do que ocorre nas matrizes quimicamente semelhantes. Haverá então a necessidade de agentes compatibilizantes.

Os ionômeros se mostraram eficazes na compatibilização de polietileno com polímeros polares como o PET, devido à presença de olefina no Surlyn® que tem compatibilidade com a família de polímeros PE. Baseado nisso, prevê-se o potencial dos resíduos dos ionômeros Surlyn® e Sentryglas® como agente compatibilizante nos compostos de PA12 e XLPE, podendo aumentar a sua resistência ao impacto, além de agregar valor aos resíduos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Laerte José. **Propriedades mecânicas e térmicas de blendas de poliamida 6/rejeitos de ionômeros Surlyn®**. 2019. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2019. Disponível em:<<http://sofia.fei.edu.br:8080/pergamumweb/vinculos/00004f/00004f89.pdf>. Acesso em 11 jun. 2020.

AMBIENTAL, Oby Engenharia. **8 R's da sustentabilidade**. 2016. Disponível em:<<http://www.obyambiental.com/8-rs-da-sustentabilidade/>>. Acesso em: 15 jun. 2020.

ARAÚJO, Rogério Gomes. **Análise das propriedades micro e macroscópicas de blendas de poliamida 4,6/Poliamida 6**. Disponível em:<<E:/FEI/Engenharias%20de%20Materiais/9º%20semestre/Trabalho%20final%20de%20curso%201/Bibliografa/Dissertações%20PA/188380.pdf>>. Acesso em 29 mai. 2020.

ARES, A.; Marcos, C.; GÓMEZ, M.; ELLIS, G.; ABAD, M. J.; BARRAL, L. **Aspectos cinéticos de la cristalización isoterma del polipropileno isotáctico en sus mezclas con un copolímero de etileno-alcohol vinílico**. 2009. 13 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia, Revista Iberoamericana de Polímero, Mexico, 2009. Disponível em:<<http://www.ehu.eus/reviberpol/pdf/NOV09/ares.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2020.

ARES, A.; MARCO, C.; GÓMEZ, M.; ELLIS, G.; ABAD, M. J.; BARRAL, L. **Influencia de la compatibilización sobre la actividad nucleante en mezclas de polipropileno y copolímero de etileno-alcohol vinílico**. 2009. 14 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia, Revista Iberoamericana de Polímero, México, 2009. Disponível em:<https://www.researchgate.net/profile/Gary_Ellis2/publication/277260654_Influencia_de_la_compatibilizacion_sobre_la_actividad_nucleante_en_mezclas_de_polipropileno_y_copolimero_de_etileno-alcohol_vinilico/links/55d4d75408aef1574e975be8.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2020.

ARIZA, Julio Alejandro Trillos. **Evaluacion mecanica del concreto con adición de polietileno reticulado reutilizado**. 2018. 118 f. TCC (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Pontifica Bolivariana Seccional Bucaramanga, Bucaramanga, 2018. Disponível em: <<https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/5507>>. Acesso em: 3 nov. 2020.

ANGELLI, J. A. M.; PAOLI, M. A. D. **Glossário de termos aplicados a polímeros**, 2000.

BOSS, A. Recycling of electrical cables: With focus on mechanical recycling of polymers. **Swerea IVF-Report Public**, 21813. Jan., 2014. Disponível em: <<http://cable.extranet.swereaivf.se/documents/2014/06/recycling-of-electrical-cables-withfocus-on-mechanical-recycling-of-polymers.pdf>>. Acesso em 11 nov. 2020.

CASTRO, Bruno Dorneles de; MAZIERO, Rômulo; RUBIO, Juan Carlos Campos. **Utilização de químicos em compósitos polietileno/sisal e a influência nas propriedades mecânicas**. 2019. 7 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Foz do Iguaçu, 2019. Disponível em: <<http://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2019/I-044.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2020.

CHOUDLHURY, A. **Isothermal crystallization and mechanical behavior of ionomer treated sisal/HDPE composites**. *Materials science and engineering A*, v. 491, p. 492-500, 2008

CUCCHIARA, Mayara; **Avaliação das propriedades térmicas e mecânicas de compostos de polietileno de alta densidade contendo polietileno reticulado proveniente de revestimento de fios e cabos elétricos**, 2015. 40f. Monografia (Iniciação científica) – Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2015.

Dupont™ Sentryglas® - **Laminated Glass Interlayers**, 2009. Catálogo de produto.

DuPont Renewably Sourced (RS) Engineering Polymers. Disponível em: <http://www.tecnologiademateriais.com.br/mt/2010/cobertura_paineis/congresso_pe/apresentacoes/dupont.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2020.

ÉPINAT, Chloé. **Morphology development and rheological properties of reactively compatibilized Polyamide 6 / High Density Polyethylene blends**. 2015. 289 f. Monografia (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Université Claude Bernard, 2015. Disponível em: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01128466>. Acesso em: 26 nov. 2020.

EVONIK INDUSTRIES, 2011. **VESTAMID® Polyamide 12 Innovative and reliable**. Disponível em: <https://www.vestamid.com/sites/lists/re/documentshp/vestamid-l-compoundsen.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2020.

FREITAS, R. S. **Efeito do teor e do tamanho de partícula do polietileno reticulado (XLPE) nas propriedades de engenharia de polietileno de alta densidade (HDPE)**. 2017. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2017. Disponível em: <http://sofia.fei.edu.br:8080/pergamumweb/vinculos/00002d/00002dec.pdf>. Acesso em: 20 set. 2020.

FONSECA, Luis Fernando Vilas. **Incorporação de polietileno reticulado (XLPE) provenientes de revestimentos de fios e cabos elétricos em matriz de polietileno de baixa densidade**. 2015. 26f. Iniciação Científica — Dept. de Engenharia de Materiais, Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, São Paulo, 2015

GOUTTEFARDE, R.-M. **Mechanical recycling of XLPE from cable production waste**. 2009. 96 f. Master thesis (Department of Materials and Manufacturing Technology) - Chalmers University of Technology, Göteborg, 2009. Disponível em: <http://cable.extranet.swereaivf.se/documents/2014/04/mechanical-recycling-of-xlpe-fromcable-production-waste.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2020.

GUERRERO, Carlos; LOZANO, Tomás; GONZÁLEZ, Virgilio; ARROYO, Eliud. **Properties and morphology of poly(ethylene terephthalate) and high-density polyethylene blends**. 2001. 82 v. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.1975>. Acesso em: 20 nov. 2020.

GUTIÉRREZ, M.; BRAHAM, E. **Ionómeros: poli(etileno-acrilato de metilo) modificado con sales de sodio, calcio y aluminio**, Revista de la Sociedad Química de México, México. v. 43, n. 6, p. 204-210, Nov./Dec. 1999. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/26465488_Ionomeros_polietilenacrilato_de_metilo_modificado_con_sales_de_sodio_calcio_y_aluminio>. Acesso em: 12 jun. 2020.

GOUTTEFARDE, R.M. **Mechanical Recycling of XLPE from cable production waste. Department of Materials and Manufacturing Technology**, 2009. Acesso em 12 jun. 2020.

HOSSEINKHANLI, Homayoon. **Thermal, mechanical, and barrier properties of polyethylene/surlyn/organoclay nanocomposites blown films prepared by different mixing methods**. 2014. 21 v. Monografia (Especialização). Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/vnl.21373>>. Acesso em: 20 nov. 2020.

JANAJREH, Isam; ALSHRAH, Mohammed. **Remolding of C ross-Linked Polyethylene Cable Waste: Thermal and Mechanical Property Assessment**. 2013. 5 v. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, J. Of Thermal & Environmental Engineering, Canada, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/268804099_Remolding_of_C_ross-Linked_Polyethylene_Cable_Waste_Thermal_and_Mechanical_Property_Assessment. Acesso em: 20 nov. 2020.

LADKAU, Nadine et al. **Efficient production of the nylon 12 monomer ω -aminododecanoic acid methyl ester from renewable dodecanoic acid methyl ester with engineered Escherichia coli. Metabolic Engineering**. 2016. DOI: 10.1016/j.ymben.2016.02.011. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26969251>.> Acesso em: 01 nov. 2020.

LEITE, Victória Correia de Melo. **Efeito do tamanho de partículas de XLPE (polietileno reticulado) nas propriedades de PEAD (polietileno de alta densidade)**. 2017. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Engenharia, Centro Universitário Fei, São Bernardo do Campo, 2017

LU, Canhui; ZHANG, Xinxing; LIANG, Mei. **Mechanochemical recycling and processing of waste crosslinked polymers: waste tire rubber and waste XLPe from cable residues.** 2009. 8 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Materiais, Engenharia, Sichuan University, Chengdu, 2009.

MACHADO, A.V; SILVA, H.M.R.D.; OLIVEIRA, J.R.M.; COSTA, L.M.B. **Waste polymers recycling in high performance asphalt mixtures.** *In:* WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities. 1st International Conference, 9, 2011. Guimarães, **Anais...** Portugal: University of Minho, 2011. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/15505/1/Paper_WASTES-46-HS-vfinal.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2020.

CHO, Hang-Kyu. **Physical and rheological properties of thermoplasticized crosslinked-polyethylene foam in supercritical methanol.** South Korea, 2009. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/251318476_Physical_and_Rheological_Properties_of_Thermoplasticized_CrosslinkedPolyethylene_Foam_in_Supercritical_Methanol>. Acesso em 15 nov. 2020.

MAGLIO, G.; PALUMBO, R. - **The role of interfacial agents in polymer blends. Polymer Blends, Processing, Morphology and Properties.** New York, Plenum Press, 1984. Acesso em: 11 jun. 2020.

MADANI, Lakhdar; BELKHIAT, Saad; BERRAG, Amine; NEMDILI, Saad. **Investigation of dielectric behavior of water and thermally aged of XLPE/BaTiO₃ composites in the low-frequency range.** 2015. 29 v. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, International Journal Of Modern Physics B, International Journal Of Modern Physics B, Eua, 2015. Disponível em: <<https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0217979215501866>>. Acesso em: 10 nov. 2020.

MORAES, Everton de. **Incorporação de polietileno reticulado em compósito de matriz polimérica termoplástica de PP/EPDM/Talco**. 2017. 118 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Engenharia, Centro Universitário Fei, São Bernardo do Campo, 2017.

NICHOLSON, John W. **The chemistry of polymers**. 2. ed. Royal Society of Chemistry: 1997.

OGANDA, J. **Crosslinked PE can be recycled**. *Plastics Technology*, Jun1, 1992. Acesso em: 17, nov. 2020.

OLIVEIRA, . **Efeito da incorporação de paras do ionômero Sentryglas nas propriedades de engenharia do PEAD e do PEBD**. 2018. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Universitário Fei, Centro Universitário Fei, São Bernardo do Campo, 2018.

PAOLUCCI, F. **Quantification of isothermal crystallization of polyamide 12: modelling of crystallization kinetics and phase composition**. *Polymer*. S0032-3861(18)30873-5. 2018.DOI: 10.1016/j.polymer.2018.09.037. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032386118308735>>. Acesso em: 29 nov. 2020.

PRITCHARD, Geoffrey. **Plastic Additives**. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire Sy4 4nr, Uk: Rapra Technology, 2005.

QUDAIH, R.; JANAIREH, I.; VUKUSIC, S. E. **Recycling of cross-linked polyethylene cable waste via particulate infusion**. In: GLOBAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE MANUFACTURING, 8., 2010, Abu Dhabi. *Advances in Sustainable Manufacturing: Proceedings...* Heidelberg: Springer, 2011. p 233-239. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-20183-7_34>. Acesso em: 10 nov. 2020.

QUDAIH, R.; JANAIREH, ZAMZAM. **Characterizing and assessment of polyethylene recycling**. Masdar Institute of Science and Technology and Ducab Inc., Abu Dhabi, UAE, November. 2013. Acesso em: 14 nov. 2020.

RABELLO, M; PAOLI.M. A. D. **Aditivação de termoplásticos.**, Artliber, 2013.

REYNOLDS, Phillip J. **A Surlyn® Ionomer as a Self-Healing and Self-Sensing Composite.** 2011. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Science And Engineering Of Materials, Department Of Metallurgy And Materials, University Of Birmingham, Birmingham, 2011. Disponível em: <<http://etheses.bham.ac.uk/3272/1/Reynolds12MRes.pdf>>, Acesso em 12, jun. 2020.

SACI, H.; BOUHELAL, S.; BOUZARAF, B.; LÓPEZ, D.; FERNÁNDEZ-GARCÍA, M.. **Reversible crosslinked low density polyethylenes: structure and thermal properties.** 2016. 9 f. Monografia (Especialização) – Disponível em: 16 nov.2020.

SARANTÓPOULOS, Claire et al. **Embalagens plásticas flexíveis: principais polímeros e avaliação de propriedades.** Campinas: CETEA/ITAL, 2002.

SCALICE, R. K., BECKER D., SILVEIRA, R. C. **Developing a new compatibility table for design for recycling.** Product: Management & Development, Vol. 7 n° 2 December 2009. Disponível em: < <https://pmd.igdp.org.br/article/586fc520f7636eea018b45f4/pdf/pmd-7-2-141.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2020.

SEKIGUCH, Yoitsu; OHKAWA, Noriyuki; NOJO, Hitoshi; HASHIMOTO, Satoru. **Development of recycling technology of XLPE.** 2007. 6 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia, J-Power Systems Corp, Japão, 2007.

SILVA, Louise Mariano Ruiz. **Resíduo de polietileno reticulado (XLPE) como modificador de impacto em polipropileno.** 2018. 134 f. Mestrado - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia, Centro Universitário Fei, São Bernardo do Campo, 2018.

SIMPELLI, E. R.; SANTOS, P. A. **Plásticos de engenharia: principais tipos e sua moldagem por injeção.** São Paulo: Artliber Editora, 2010.

SOARES, Elias Augusto Ferreira. **Efeito dos teores de polietileno reticulado e agente compatibilizante nas propriedades mecânicas e térmicas de poliamida 6**. 2019. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Centro Universitário Fei, Centro Universitário Fei, São Bernardo do Campo, 2019.

SOARES, A; FONSECA, A; SOUSA, B; CARVALHO, C; DELDUQUE, N. **Produção de Nylon**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Porto: 2010. 24 pág. Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~projfeup/cd_2010_11/files/QUI610_relatorio.pdf>. Acesso em: 10, nov. 2020.

TAMBOLI, S.M.; MAHSKE, S.T.; KALE, D.D. **Crosslinked polyethylene**. *Indian Journal of Technology*, 2004.

TESIS, Tomas Lozano Ramirez. **Compatibilización de materiales plasticos mezclas PET-HDPE**. 1998. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidad Autónoma de Nuevo León, México, 1998. Disponível em: <http://eprints.uanl.mx/6386/1/1080098273.PDF>. Acesso em: 20 nov. 2020.

WIEBECK, H.; HARADA, J. **Plásticos de engenharia: tecnologia e aplicações**. São Paulo: Artliber Editora, 2005.