

Reciclagem de resíduos têxteis: uma revisão

Textile waste recycling: a review

DOI:10.34117/bjdv8n8-146

Recebimento dos originais: 21/06/2022

Aceitação para publicação: 29/07/2022

Fernanda Schnorr Grando

Especialista em Criatividade, Artes e Novas Tecnologias

Instituição: Universidade Comunitária da Região de Chapecó (UNOCHAPECÓ)

Endereço: Av. Sen. Atílio Fontana, 591 E, Efapi, CEP: 89809-000, Chapecó – SC,
Brasil

E-mail: fernandasg@unochapeco.edu.br

Soleni Kuhn Sette

Mestre em Design

Instituição: Universidade Comunitária da Região de Chapecó (UNOCHAPECÓ)

Endereço: Av. Sen. Atílio Fontana, 591 E, Efapi, CEP: 89809-000, Chapecó – SC,
Brasil

E-mail: solkuhn@unochapeco.edu.br

Eduardo Roberto Batiston

Doutor em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Comunitária da Região de Chapecó - UNOCHAPECÓ

Endereço: Av. Sen. Atílio Fontana, 591 E, Efapi, CEP: 89809-000, Chapecó – SC,
Brasil

E-mail: erbatiston@unochapeco.edu.br

Gustavo Lopes Colpani

Doutor em Engenharia Química

Instituição: Universidade Comunitária da Região de Chapecó (UNOCHAPECÓ)

Endereço: Av. Sen. Atílio Fontana, 591 E, Efapi, CEP: 89809-000, Chapecó – SC,
Brasil

E-mail: g_colpani@unochapeco.edu.br

Josiane Maria Muneron de Mello

Doutora em Engenharia Química

Instituição: Universidade Comunitária da Região de Chapecó (UNOCHAPECÓ)

Endereço: Av. Sen. Atílio Fontana, 591 E, Efapi, CEP: 89809-000, Chapecó – SC,
Brasil

E-mail: josimello@unochapeco.edu.br

Luciano Luiz Silva

Doutor em Química

Instituição: Universidade Comunitária da Região de Chapecó (UNOCHAPECÓ)

Endereço: Av. Sen. Atílio Fontana, 591 E, Efapi, CEP: 89809-000, Chapecó – SC,
Brasil

E-mail: lucianols@unochapeco.edu.br

RESUMO

A área têxtil tem uma parcela significativa nas indústrias, com etapas de processos que vão desde a cultura da fibra, fiação, tecelagem, enobrecimento e beneficiamento, até a confecção dos produtos têxteis, esses utilizados para desenvolvimentos de produtos de todos tipos. Essas indústrias geram significativa quantidade de resíduos durante o processo produtivo, mas na confecção está a problemática das sobras de tecidos, com produção global estimada em torno de 150 milhões de toneladas por ano, sendo 85% desses, destinados de forma incorreta. Diante desse problema, é iminente repensar esses resíduos, transformando-os a partir de algum método de reciclagem ou de reaproveitamento, utilizando-os como matéria prima para outros processos. As soluções usuais para os resíduos têxteis é a destinação como desfibrados para serem utilizados como isolantes térmicos ou acústicos na indústria da construção civil e para enchimentos de artefatos como almofadas, por exemplo. Isto decorre da dificuldade de encontrar meios adequados de separação das misturas de fibras já que as composições dos tecidos usualmente são mistas. O objetivo deste trabalho foi apresentar estudos sobre reciclagem de tecidos por meios químicos e mecânicos, por meio de estudos da literatura. A metodologia usada nesta pesquisa foi RSL - Revisão sistemática de literatura, em que foram selecionados trabalhos que abordaram a reciclagem de material têxtil. O panorama atualizado destas informações pode contribuir para novos esforços direcionados à reciclagem têxtil. Os resultados obtidos dão conta de um esforço contínuo, com destaque às questões de reciclagem química em tecidos mistos, grande impedimento para processos simplificados de reciclagem. Têm-se muitas iniciativas interessantes e promissoras a serem avaliadas.

Palavras-chave: reciclagem de material têxtil, panorama de reciclagem de têxteis, reciclagem mecânica, reciclagem química.

ABSTRACT

The textile area has a significant portion in the industries, with stages of processes that go from the culture of the fiber, spinning, weaving, ennoblement and processing, to the manufacturing of textile products, which are used for the development of products of all kinds. These industries generate a significant amount of waste during the production process, but in the clothing industry there is the problem of leftover fabrics, with global production estimated at around 150 million tons per year, 85% of which are disposed of incorrectly. In view of this problem, it is imminent to rethink these residues, transforming them from some method of recycling or reuse, using them as raw material for other processes. The usual solutions for the textile waste is to be disposed of as shredded material to be used as thermal or acoustic insulation in the construction industry and for filling artifacts such as cushions, for example. This is due to the difficulty in finding adequate means of separating the fiber mixtures since the compositions of the fabrics are usually mixed. The objective of this work was to present studies on fabric recycling by chemical and mechanical means, through literature studies. The methodology used in this research was RSL - Systematic Literature Review, in which works that approached textile material recycling were selected. The updated overview of this information can contribute to new efforts directed towards textile recycling. The results obtained show a continuous effort, with emphasis on the issues of chemical recycling in mixed fabrics, a major impediment to simplified recycling processes. There are many interesting and promising initiatives to be evaluated.

Keywords: recycling of textile materials, textile waste, textile recycling panorama, mechanical recycling, chemical recycling.

1 INTRODUÇÃO

A indústria têxtil tem grande importância mundial de ordem econômica, de geração de empregos, investimentos e receitas. É uma indústria constituída de muitas cadeias com variados processos e fragmentações, o que causa maior impacto ambiental no ciclo de vida (LEAL FILHO *et al.*, 2019). Movimenta milhões de empregos diretos e indiretos na indústria de manufatura, distribuídos em todos os segmentos de sua cadeia produtiva da produção das fibras naturais e químicas, à fiação, tecelagem, malharia, acabamento e costura (AMARAL *et al.*, 2018). O modelo econômico de produção linear baseado em extrair, transformar, e descartar, depende de quantidade significativa de matéria-prima a baixo custo e fácil acesso, como água e energia em abundância (AMARAL *et al.*, 2018). Considerada uma das atividades mais poluidoras do último século, a indústria têxtil é tema de várias pesquisas relatando seus principais impactos, como a contaminação da água, solo e ar, através dos seus detritos sólidos e efluentes (BERLIM, 2012).

As fibras têxteis são materiais crus submetidos a um processo de manufatura que produz os fios usados na indústria de produtos têxteis, como o vestuário ou tecidos especiais a exemplo dos hospitalares, ou bélicos. A classificação dos tecidos depende da classificação das suas das fibras constituintes, que podem ser categorizadas em naturais: derivadas de fontes orgânicas (vegetal, animal, mineral); artificiais: produzidas a partir de fibras que contém celulose natural, e as não celulósicas como as derivadas de algas; as produzidas apenas com substâncias químicas, estas chamadas de fibras sintéticas (UDALE, 2015), resultado da polimerização de petroquímicos como etileno, propileno e benzeno (AMARAL *et al.*, 2018). Tecidos feitos com fibras naturais ou celulósicas são biodegradáveis por sua natureza; atualmente alguns tecidos químicos também podem ter seu processo de decomposição acelerado como o Amni Soul Eco®¹, mas certamente esse não é o fim desejado a um resíduo de feitiço demorado e uso tão nobre como os tecidos.

¹ Amni Soul Eco® “primeiro fio de poliamida 6.6 biodegradável do mundo, cuja fórmula foi aprimorada para permitir que as roupas feitas com esse fio se decomponham rapidamente após descartadas em aterros sanitários.” Brasileiro. Fonte: <https://www.rhodia.com.br/pt/mercados-e-produtos/catalogo-de-produtos/amni.html>

O modo como as fibras são fiadas e os fios produzidos, ao serem entrelaçados, influencia no desempenho e na aparência final do tecido, sendo comum os beneficiamentos e a mistura das fibras (algodão + poliéster, por exemplo) para conseguir características desejadas como maior leveza, pouco amarrotamento, rápida secagem ou algum texturizado. Essas misturas podem agregar valor ao produto, mas, ao mesmo tempo, limitam a reciclagem, pois dificultam uma separação adequada para a correta reciclagem por composição, não sendo possível até então, um método para reciclar fibras naturais e químicas da mesma maneira com os mesmos processos ou reagentes. Tecidos multicomponentes são o maior problema pois é necessário separar em fibras de composição única para possibilitar a reciclagem (NAVONE *et al.*, 2020).

Também, dificuldades na reciclagem têxtil acontecem devido a falha na gestão e nas tecnologias durante a coleta, separação, reciclagem e purificação dos materiais (YOSEF *et al.*, 2018), e apenas uma pequena fração dos produtos são coletados e reciclados. A grande variedade de fibras e cores usadas nos tecidos podem ser considerados fatores limitantes da reciclagem têxtil, tendo desafios nos processos variados para evitar a depreciação da qualidade do material reciclado (ZAMANI *et al.*, 2014).

A fiação, tecelagem, beneficiamentos, confecção de tecidos, são etapas do processo têxtil, cada uma dessas etapas produtivas gera algum tipo de resíduo têxtil e é nesse contexto que a recuperação e reciclagem de materiais têxteis é essencial, não apenas ambientalmente mas também economicamente, reduzindo o efeito estufa, a necessidade por espaços de aterro, o consumo de água e energia, a exacerbada extração dos recursos naturais e conseqüentemente os custos das operações industriais (UDALE, 2015; AMARAL *et al.*, 2018). A reciclagem deve ser priorizada, pois toda cadeia de produção causa impactos ambientais, e conseguir retornar o ciclo evitando as etapas iniciais certamente é uma solução.

O consumo têxtil tem sido percebido como um nicho de pesquisa em relação ao ciclo de vida das roupas e tecidos, da fabricação das fibras aos destinos dados após seu uso. Dentro da indústria de confecção, percebe-se no encaixe/corte o principal gerador de resíduos sólidos; após o cortar os moldes sobre o tecido escolhido, sobram pequenos retalhos com formas complicadas que se transformam em resíduos pré-consumo que serão descartados, sendo essa perda, cerca de 15% dos tecidos utilizado pela indústria

(SALCEDO, 2014). Numa produção de têxteis, estima-se sobras residuais de 15 a 30% dos vários tipos de tecidos fabricado para uso posterior em vestuário (MISHRA *et al.*, 2014). O crescimento do consumo e descarte acompanha o crescimento da sociedade, considerando que a produção de têxteis requer significativos recursos naturais, este fato torna-se um problema (EKSTROM; SALOMONSON, 2014); assim como morar, comer e se transportar, se vestir configura-se essencial à existência social (LEAL FILHO *et al.*, 2019).

Anualmente 150 milhões de toneladas de lixo têxtil são produzidos em todo mundo, estimando-se cerca de 895 milhões de toneladas para o ano de 2050 (MENG *et al.*, 2019). No Brasil, em 2012, já era produzido cerca de 175.000 toneladas de resíduos têxteis ao ano. Estima-se que 95% dos resíduos têxteis tem potencial para a reciclagem (DISSANAYAKE *et al.*, 2018), no entanto, menos de 12% dos materiais recicláveis são coletados no Brasil (LEAL FILHO *et al.*, 2019). A indústria de vestuário é considerada a segunda mais poluidora ficando atrás somente do setor do petróleo, além disso, aproximadamente 32 kg de resíduos têxteis *per capita* são descartados anualmente, 85% desse montante são destinados em aterros ou são incinerados inadequadamente, emitindo uma série de gases tóxicos poluentes e, com lavagens químicas, causam poluição do solo e da água (HU *et al.*, 2018; MENG *et al.*, 2019; ZONATTI, 2016).

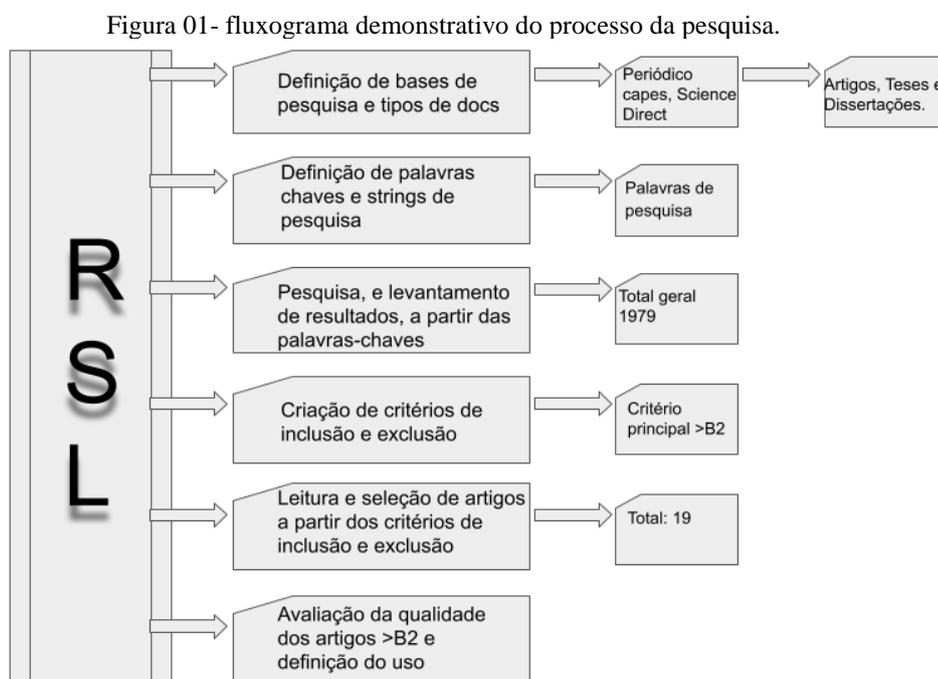
A expressão ‘fibras químicas’, se refere às fibras artificiais e sintéticas em conjunto, diferindo de fibras naturais. Essas, estão sendo cada vez mais produzidas, no ano de 2012, por exemplo, foram 59% em produção de fibras sintéticas, 35% fibras naturais, e 6% fibras artificiais (SALCEDO, 2014). Os tecidos sintéticos, como o poliéster, continuam em pleno crescimento (DISSANAYAKE *et al.*, 2018); apesar de utilizarem recursos naturais finitos e não renováveis, necessitarem de intenso uso de química e energia, e não se decomporem na natureza, utilizar o poliéster reciclado no lugar do convencional pode reduzir entre 55 a 85% a utilização de energia e entre 35 e 75% em emissão de gás carbônico ou gases equivalentes (SALCEDO, 2014).

É necessário e desejável que novas alternativas sejam propostas para uma possível utilização desses resíduos como matéria-prima para novos materiais, mas sem despender mais energia do necessário para ser considerado uma solução ambiental sustentável. A área química tem avançado em pesquisas que se preocupam com todo o ciclo de vida de um produto, visando reduzir ou eliminar resíduos. Essas soluções podem ser empregadas dentro de um ciclo produtivo ou para a solução de problemas já estabelecidos, visando minimizar os impactos ambientais. Deste modo, a pesquisa visa apresentar a inovação nas

tecnologias de reciclagem de resíduos têxteis. Neste sentido, esta pesquisa propôs avaliar trabalhos científicos publicados nos últimos dez anos com abordagem na reciclagem de resíduos têxteis através de processos físicos e químicos, observando os meios mais eficazes e sustentáveis.

2 METODOLOGIA DE COLETA DE DADOS

Este estudo caracterizou-se como uma revisão sistemática de literatura (RSL) em artigos científicos, dissertações e teses. Para tanto, estabeleceu-se procedimentos metodológicos considerados importantes para chegar ao objetivo do estudo, iniciou-se por uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), ilustrada por meio de esquema representativo apresentado na Figura 01:



Fonte: elaborado pelos autores

As buscas sistemáticas foram realizadas em plataformas digitais de buscas direcionadas à área acadêmica, como “*Science Direct*” e “Portal CAPES”. As palavras chaves estabelecidas para a busca e os resultados da pesquisa estão apresentadas no quadro 01 que descreve também as *strings* de pesquisa.

Quadro 01: Quadro de palavras, strings e resultados na base de dados Portal Periódico Capes

Palavras chave com string de busca	Resultados Gerais	Selecionados por título e resumo	Excluídos com base em critérios	Total fixado
Chemic Recycling of textile fibres materials	47	1	0	1
Reciclagem têxtil	60	6	5	1
Reciclagem têxtil química	28	5	4	1
Reciclagem de tecidos sintéticos	9	3	0	3
Reciclagem de tecidos	69	4	3	1
"Recycl* fabric"	194	10	8	2
"textile waste" recycl*	994	28	23	5
'recycling of synthetic fabrics' or 'synthetic textiles' or "synthetic fiber"	578	4	2	2

Fonte: elaborado pelos autores

As buscas resultaram o total de 1.979 títulos de trabalhos, destes foram selecionados por título e resumo o total de 58 trabalhos de pesquisa. Posteriormente, aplicou-se critérios de inclusão e exclusão, nesta etapa fixou-se 16 trabalhos de pesquisa em formato de artigos científicos. Além de artigos científicos, utilizou-se uma tese de doutorado e livros de autores das áreas têxtil e de moda como, por exemplo, Salcedo (2014) e Udale (2009). Por fim, fixou-se um total de 21 referências utilizadas para o embasamento.

3 RECICLAGEM TÊXTIL

Reciclagem, de modo sucinto, é o processo em que um produto ou seus componentes são usados para criar algo novo; representa uma forma técnica ou reuso. Mais especificamente, se refere a utilização de itens descartados, como insumos para fabricação de novos materiais, minimizando o uso de matérias virgens e a disposição de lixos em aterros sanitários ou incineração (AMARAL *et al.*, 2018). Historicamente, a reciclagem têxtil surgiu na Itália em meados do século XIX para recuperação de resíduos de lã (ZONATTI, 2016), desde então essa atividade vem se tornando cada vez mais necessária, devido a quantidade de resíduos gerados pela cadeia têxtil. É um método de produção de fibras que consome baixa energia em comparação a produção de uma fibra virgem (FLETCHER; GROSE, 2011).

São 2 os principais sistemas na reciclagem de tecidos utilizados normalmente; reciclagem mecânica recupera as fibras depois de uma manipulação mecânica. Podemos encontrar diferentes métodos, como desfiar ou triturar. É um processo mais simples, que requer menos energia e sem a utilização de produtos químicos, logo, seu impacto ambiental é menor. Como limitação, temos a espessura da fibra resultante, que não permite fiar fios finos (SALCEDO, 2014). A reciclagem química trata-se ainda de um processo ainda pouco desenvolvido fora da Ásia (SALCEDO, 2014); ela permite a regeneração química das fibras a partir de processos de dissolução que despolimerizam as moléculas das fibras têxteis, para a seguir serem polimerizadas novamente, resultando em novas fibras similares às fibras virgens (SALCEDO, 2014). Mesmo formas de reciclagem de fibras químicas que fazem uso intensivo de energias - re converter o polímero e o re extrudar para formar um novo fio, 80% menos energia é consumido do que a produção da fibra química virgem (FLETCHER; GROSE, 2011).

Normalmente existe uma distinção entre processos químicos e processos mecânicos, contudo, a rota de reciclagem normalmente é através de um mix onde processos mecânicos, químicos e térmicos são utilizados. É possível utilizar 3 caminhos baseados no nível de separação do material a ser recuperado: reciclagem de tecido, reciclagem de fibra, reciclagem de polímero, oligômero e monômero (SANDIN e PETERS 2018 apud LEAL FILHO *et al.*, 2019).

3.1 FIBRAS A SEREM RECUPERADAS

Atualmente, 64% das fibras tem composição sintética de fonte petroquímica, sendo o restante cerca de 24%, algodão, 6% de fibras celulósicas e 1% de lã, restando uma pequena porcentagem as outras fibras naturais, sendo que apenas uma correta separação dos materiais é capaz de permitir uma reciclagem efetiva destes materiais (NAVONE, *et al.*, 2020). Fibras químicas demoram muito tempo para se decompor na natureza, no entanto, é possível encontrar tecnologias capazes de reciclar essas fibras repetidamente com pouca degradação das suas propriedades. De outra forma, as fibras naturais apresentam seus tamanhos reduzidos com os processos mecânicos, sendo necessário adição de novas fibras virgens ou recicladas para serem re-fiadas e se tornarem novamente fios e tecidos (AMARAL *et al.*, 2018).

Cada fibra utilizada tem seus impactos, sendo exemplificado, aqui em produção mundial a principal fibra em cada categoria, sintética, natural e artificial: poliéster (45%), algodão (32%) e viscose (4%) (SALCEDO, 2014). Poliéster tem sua matéria-prima

principal o petróleo cru, implicando variados processos desde o refino até a extrusão e transformação do polímero em fios e fibras de poliéster. Utiliza recursos naturais finitos e não renováveis, intenso gasto químico e de energia e não se decompõe na natureza. Entre 65% e 70% da produção mundial se destina a indústria têxtil, e os 30% restante são usados para embalagens PET, sendo a China responsável por 65% da produção mundial (SALCEDO, 2014). Na produção do algodão, agroquímicos e água são utilizados intensamente, trazendo a degradação da terra a poluição da água, problemas de saúde, contaminações nos alimentos, danos ecológicos, além de ser uma monocultura que utiliza sementes geneticamente modificadas acarretando em danos à biodiversidade (SALCEDO, 2014). A viscose utiliza celulose de madeiras de árvores de rápido crescimento que com a utilização de químicos, são transformadas em uma massa fluida que será fiada. A utilização de árvores acarreta riscos para florestas primárias além de contribuir com a possibilidade de desmatamentos. Possui uso intensivo de energia, além da contaminação com vários produtos químicos da água utilizada em grande quantidade no decorrer do processo (SALCEDO, 2014).

3.2 RECICLAGEM MECÂNICA E RECICLAGEM QUÍMICA: CARACTERÍSTICAS

Existem iniciativas simples e eficientes que buscam reciclar os resíduos têxteis; de maneira mecânica os transformando novamente em fibras que são utilizadas como enchimentos, tecidos-não-tecidos, feltros, mantas térmicas e acústicas, retorno a fiação; ou, mais complexas, utilizando maneiras químicas como dissolução de partes celulósicas ou sintéticas (DISSANAYAKE *et al.*, 2018). As tecnologias de reciclagem de materiais podem ser divididas em 4 categorias, sendo: primária, que recicla sobras e aparas industriais; secundária, que recicla objetos pós consumo por meio de processos mecânicos; terciária, convertendo os resíduos sintéticos em química, combustível ou monómeros; e quaternária, quando o lixo é queimado para gerar calor (DISSANAYAKE *et al.*, 2018). Uma porcentagem dos tecidos não é passível de reciclagem ou reuso, portanto, se torna uma oportunidade de inovar na reciclagem química que consiga reprocessar completamente transformando quaisquer resíduos têxtil em material cru secundário para indústria química e têxtil (LEAL FILHO *et al.*, 2019).

A reciclagem mecânica é a mais amplamente utilizada pela simplicidade da tecnologia, economia e menor dano ambiental. É um processo mecânico onde tritura-se ou se desfia um tecido transformando em retalhos de tamanhos preestabelecidos de acordo com as especificidades, máquina e o produto final desejado. Posteriormente, os

retalhos passam por vários rolos cobertos de pregos que vão completando o processo de desfibrção resultando em mantas fofas de fibras. No entanto, com essas novas fibras não é possível fiar fios finos como as microfibras, perdendo seu valor a cada reciclagem (SALCEDO, 2014).

De acordo com a composição do tecido, as fibras estruturadas podem voltar para indústria de cobertores, estofamento, geotêxtis, e outras fibras. Podendo retornar ao processo de fiação. Normalmente, os materiais reciclados são aplicados em campos como: automotivos; mobiliário; naval; isolantes para produção de mantas térmicas ou acústicas; produção de carpetes; estofamento de brinquedos; preenchimento de almofadas; e solas de sapato (LEAL FILHO *et al.*, 2019; AMARAL *et al.*, 2018). No entanto, a grande maioria dos resíduos têxteis reciclados mecanicamente, retornam ao mercado com valor econômico e qualidade reduzidos (MENG *et al.*, 2019).

No processo de reciclagem química, os tecidos sintéticos são submetidos a uma regeneração química a partir de dissolução para despolimerizar as moléculas em questão, para em seguida executar a repolimerização obtendo novas fibras com qualidade equivalente às fibras virgens (SALCEDO, 2014). A separação da celulose do poliéster usando dissolução de N-metilmorfolina-N-óxido como solvente químico, mostrou-se mais benéfica do que a incineração que acontece em países onde essa é a única opção para o destino do resíduo têxtil (ZAMANI *et al.*, 2014).

De acordo com Leal Filho *et al.* (2019), tecnologias químicas devem ser priorizadas, pois são capazes de possibilitar a reciclagem de tecidos com composições mistas e variadas, como as misturas naturais + sintéticas (LEAL FILHO *et al.*, 2019).

Os polímeros sintéticos como poliéster, nylon e acrílico podem ser reciclados por muitos círculos dentro da cadeia; os processos que envolvem manipulação química das fibras possibilitam a regeneração das fibras e sua re-fiação, sendo muitas vezes necessário adicionar material virgem já que alguns polímeros decaem a cada reciclagem, mantendo o desafio de produzir fibras com qualidade melhor ou equivalente aos materiais naturais, e utilizar processos com menos emissão de carbono (LEAL FILHO *et al.*, 2019).

3.3 PROCESSOS DE RECICLAGEM: APLICAÇÕES E USABILIDADES

Novas técnicas de reciclagem têxtil estão sendo desenvolvidas; abordagens de processos mecânicos incluem o reuso de materiais para a produção de novos fios e não tecidos. Não existem métodos mecânicos de separar fibras mistas dos tecidos (RAMAMOORTHY, *et al.*, 2014), sendo a dissolução ou compósitos mais apropriados,

apesar de utilizarem solventes tóxicos. É necessário encontrar alternativas com métodos que sejam menos onerosos para reciclar e reusar os tecidos mistos (RAMAMOORTHY, *et al.*, 2014).

Isolantes térmicos termomoldados a partir de uma camada de nylon/spandex (NS) triturado, outra camada de poliuretano (PU) também triturado, sobrepostos de mais uma camada de poliuretano (PU), após calor e pressão - como um sanduíche, demonstraram ser uma forma promissora, com resultados positivos em relação aos isolamentos convencionais (DISSANAYAKE *et al.*, 2018). Tais usos têm se mostrado possível e com as mesmas propriedades dos materiais isolantes convencionais.

Outra forma de reciclagem de resíduos têxteis é apontada com a sua utilização para isolamento térmico em construções. No entanto, essa aplicação não se dá de modo direto, mas sim classificando conforme sua natureza (natural, sintético) e aplicado de acordo com as categorias: tipo de fibra qualidade e cor (ISLAM; BHAT, 2019). Os resíduos são cortados, desfiados sem quebrar o comprimento das fibras, e são classificados de acordo com comprimento, resistência e contagem. Observa-se que as fibras sintéticas podem tornar a formação de polímeros. A usabilidade vai depender das propriedades finais. Dependendo do que se deseja as fibras podem ser misturadas para aproveitar suas propriedades (ISLAM; BHAT, 2019).

Em um processo termomecânico de fusão, a mistura de poliamida 6 e poliuretano termoplástico funde produzindo fios híbridos através da extrusão, permitindo o desenvolvimento de fibras misturadas com novas morfologias e propriedades (KUNCHIMON *et al.*, 2019). Também, três experimentos de reforço em compósitos foram realizados com mistos de algodão/poliéster: - pressionando apenas tecido triturado em um molde a temperatura de fusão do poliéster, - o tecido triturado termo moldado em matriz termofixa de óleo de soja, seco e moldado por compressão - e com fibras bicomponentes com temperatura de fusão menor como matriz, misturadas e cardas e feltradas com agulha. Os resultantes, que podem ter espessura de 0,5 a 1, 4 mm dependendo dos parâmetros do tipo de compósito desenvolvido, foram cortados em corpos de prova e submetidos a variados testes térmicos, mecânicos e viscoelásticos, mostrando boas promessas de utilização no campo dos compósitos (RAMAMOORTHY, *et al.*, 2014).

Estudou-se, ainda, a aplicação de resíduos têxteis em compósitos verdes para aplicação estrutural. As aplicações de compósitos estruturais requerem alta rigidez, força e resistência à fadiga que podem ser alcançadas por reforço com estruturas fibrosas. No

trabalho realizado por Mishra *et al.* (2014) foi avaliado o comportamento mecânico e térmico de fibras de algodão / PP (polipropileno), estudando a força de tração, impacto e carga térmica. Os autores observaram que tanto as fibras quanto os resíduos têxteis de diversas fontes como, por exemplo, naturais e sintéticos, podem ser utilizados como reforço para fabricação de compósitos verdes reciclados.

É possível um método de feltragem com agulha, onde fixam-se fibras através de repetidas agulhadas em camadas sobrepostas desenvolvendo feltros ou tecidos-não-tecidos, pode ser usado para reforços em compósitos através de molde injetado a vácuo ou VARTM. Um molde fechado é preenchido em fluxo rápido misturando fibra/resina, em um processo barato e de alta qualidade (MENG *et al.*, 2019).

Quando a estratégia buscada é a reciclagem química, consegue-se retornar quase que totalmente a pureza dos materiais virgens, como no processo onde através da hidrólise de ácido sulfúrico é possível a produção de nanocelulose a partir de resíduos têxteis de viscose (PRADO *et al.*, 2019). Fibras regeneradas de celulose são consideradas um bom mercado em crescimento, as mais comuns são viscose, rayon e lyocell. O algodão pode ser regenerado usando água como solvente coagulante, encontrando espaço na indústria têxtil, na indústria de fibra de carbono como material de baixo custo, e como material starter da produção de bioetanol (DE SILVA *et al.*, 2014). Também é possível utilizar Líquido Iônico (IL), porém, ainda não é economicamente viável (DE SILVA *et al.*, 2014). É possível retirar a celulose de tecidos mistos, a exemplo do algodão e poliéster, reciclando a celulose para produzir a viscose. A celulose tem uma complexa hierarquia na sua estrutura, com micro cristais geralmente chamados de nanocelulose; este material é interessante, pois, possui propriedades únicas, com alta força e baixa densidade, sendo cada vez mais buscada para diversos usos (PRADO *et al.*, 2019).

Pode-se também envolver processos químicos como a dissolução e a separação do poliéster com a ajuda de tereftalato de dimetila, ou, a repolimerização de poliéster possibilitando a fiação a partir de suas fibras (ZAMANI *et al.*, 2014), ou a desfibragem. Experimentações encontradas propõem processos bioquímicos para reciclar algodão, poliamida, poliéster e lã, em monômeros para produção de glicose, de bioetanol hidrolisado, de proteína hidrolisada, para resina e adesivos, e oligômeros de poliamida para indústria química (LEAL FILHO *et al.*, 2019).

Na Lituânia uma estratégia foi o desenvolvimento de uma tecnologia usando químicas sustentáveis e comerciais para utilizar o resíduo têxtil como fonte de algodão regenerado, para suprir a demanda como fonte de celulose. Consiste em um processo em

três etapas, iniciando com um banho em ácido nítrico como pré-tratamento; seguido de dissolução do material orgânico em dimetilsulfóxido (DMSO), finalizando com um processo de branqueamento usando hipoclorito de sódio e diluente e diluído em ácido hidroxiclórico para recuperação final e purificação do algodão. Em relação aos efluentes gerados como a água contaminada por ácido e solventes obtidas após a lavagem, é usado um evaporador de rotação para extrair as partes poliméricas e regenerar o DMSO enquanto o ácido é regenerado por carbono ativado, garantindo um ciclo de vida circular (YOSSEF *et al.*, 2018).

Para obter o poliéster regenerado da mistura poliéster + lã, enzimas promovem uma digestão seletiva com aplicação de uma queratinase nas fibras de lã, possibilitando sucesso na reciclagem e recuperação total do poliéster. A queratina hidrolisada resultante, rica em nutrientes, pode ser adicionada a meios de crescimento microbiano, ou incorporada em biofertilizantes, ou alimentos para animais (NAVONE, *et al.*, 2020).

Uma proposta de reciclagem de resíduos têxteis foi proposta por Wang *et al.* (2018), a qual trata de reciclagem biológica dos resíduos têxteis. Neste estudo, usou-se os resíduos têxteis como fonte de carbono na fermentação fúngica submersa para produzir celulase. Utilizou-se a celulase produzida como um catalisador para hidrólise de resíduos têxteis para obter hidrolisado rico em glicose e fibra de poliéster (PET). A proposta é que posteriormente esse hidrolisado possa ser convertido em bioplásticos e a fibra de PET restante poderia ser aproveitada em novas aplicações em têxteis. O estudo ilustra o uso efetivo de recursos via substituição de recursos não renováveis por matéria-prima reciclada, além disso, é possível reduzir a produção têxtil maximizando as utilidades de roupas fazendo reuso ou reciclando e, desse modo, reduz o uso de recursos naturais (WANG *et al.*, 2018).

Um estudo feito nos Estados Unidos relata a experiência de reciclagem química elaborada a partir da utilização de Líquido Iônico (LI). Considerou-se que a mistura mais utilizada para a criação de tecidos é o poliéster e o algodão. Para este tipo de tecido, cuja composição efetiva-se pela mistura de fibra natural vegetal (algodão) juntamente a um polímero (poliéster), o processo, de modo resumido, se deu pela adição ou imersão do tecido do Líquido Iônico que reagiu rapidamente separando as fibras. O Algodão é dissolvido pelo líquido a uma temperatura de aproximadamente 120°, sendo possível a separação do poliéster (DE SILVA *et al.*, 2014). Ao usar líquidos iônicos é possível um processo solvente para a separação química de poliéster e algodão não agressivo ao meio ambiente. No processo a celulose é dissolvida em AMIMCl (cloreto de 1-alil-3-

metilimidazólio) tornando muito fácil a separação do poliéster e do algodão. Os componentes de celulose são dissolvidos, além da vantagem de dos líquidos iônicos serem reciclados e reutilizados no processo. Tanto o algodão quanto o poliéster podem ser recuperados com qualidade sendo regenerados em várias formas. A tecnologia mostra que existe uma rota fácil para reciclar tecidos de misturas de algodão, não mostrando diferença significativa entre polímeros reciclados e os polímeros virgens (DE SILVA *et al.*, 2014).

3.4 BARREIRAS PARA A RECICLAGEM TÊXTIL

Pode-se apontar vários aspectos que dificultam ou limitam a reciclagem dos materiais como: viabilidades econômicas; composição dos resíduos têxteis; indisponibilidade de materiais têxteis recicláveis; limitações tecnológicas; falta de informação e participação pública limitada; má gestão, políticas e normas fracas (LEAL FILHO *et al.*, 2019). No entanto, um dos maiores desafios encontrados na sociedade é a reciclagem eficiente dos resíduos têxteis devido às suas misturas. Cerca de 15% dos tecidos são reciclados enquanto 85% são mandados a aterros. Dos reciclados, apenas cerca de 15% retornam em forma das fibras originais, pois como a maioria das roupas são feitas de uma mistura de fibras; individualmente são passíveis de reciclagem, porém ao estarem misturadas, técnicas mecânicas de separação não são suficientes. O poliéster só é solúvel em solventes muito fortes como o hexafluoroisopropanol e fenol tetracloreto, altas concentrações ácidas também são investigadas como 75% de ácido sulfúrico aquoso e 85% de ácido fosfórico aquoso, contudo, essas soluções não são sustentáveis ao meio ambiente além de degradar as fibras naturais (DE SILVA *et al.*, 2014).

A *viabilidade econômica* figura como uma das principais barreiras, pois devido a extensa cadeia produtiva e de suprimentos, os processos de reciclagem, coleta, separação e transporte acabam desencorajando com seu alto custo; a *composição* de muitos produtos têxteis faz com que os mesmos sejam inapropriadas para reciclagem pois as dificuldades em separar o mix de vários tipos de resíduos com diferentes propriedades mecânicas e tecnológicas, não permite que a reciclagem seja sempre viável (LEAL FILHO *et al.*, 2019).

Há *limitações técnicas* de tecnologias para separar e preparar o resíduo têxtil para reciclagem; a maior parte dos métodos não é capaz de separar pigmentos e outros contaminantes das fibras originais. Além dos desafios de separar e decompor, as

tecnologias químicas e mecânicas para reciclagem também são limitadas e requerem investimentos significativos em pesquisa para superar as limitações existentes e introduzir novas e efetivas tecnologias. Existe, também, uma lacuna entre o *acesso de informação do cidadão e a participação pública*, sabendo que existe uma relação significativa entre o conhecimento sobre a reciclagem e as atitudes de reciclagem dos cidadãos, o desconhecimento do que pode ser reciclado e o não comprometimento com os ideais da reciclagem são duas atitudes que se opõe a reciclagem. Mesmo cidades que priorizam a reciclagem de lixos como vidro, madeira, papel, plástico e metal, deixam de lado a questão dos têxteis (LEAL FILHO *et al.*, 2019). *Gestão, políticas e normas fracas* acarretam conflitos de interesses entre os diferentes elos da cadeia produtiva. Sem normas e o suporte de políticas governamentais, não é possível um crescimento rápido e amplo das indústrias de reciclagem (LEAL FILHO *et al.*, 2019).

3.5 ESTRATÉGIAS PARA A RECICLAGEM TÊXTIL

Os processos e metodologias para recuperar e reciclar estão em constante evolução tecnológica (AMARAL *et al.*, 2018). O motivo da reciclagem ser tão benéfica é devido ao fato dela reduzir a necessidade de recursos primários. Também ajuda na criação de novos negócios e entregas inovadoras como meios mais eficientes de produzir e consumir, criando oportunidades para integração social e coesão. Comunidades em vulnerabilidade social são integradas em cooperativas que podem trabalhar para economia circular coletando, separando, transportando e reciclando o lixo, criando empregos e dando oportunidades a pequenos negócios (LEAL FILHO *et al.*, 2019).

Como soluções que possibilitam a simplificação da reciclagem têxtil, tem-se a Economia circular com responsabilidade estendida do fabricante, considerando a indústria responsável por lei de prover e gerenciar a reciclagem dos seus produtos no fim do seu uso (LEAL FILHO *et al.*, 2019); e Design para reciclagem, por meio de uma estratégia radical de design onde os processos iniciais antecipam uma reciclagem e considera a existência da roupa e produto como material cru a ser retornado ao ciclo e assim sucessivamente (LEAL FILHO *et al.*, 2019).

4 PERSPECTIVAS FUTURAS PARA A RECICLAGEM TÊXTIL

É preciso adequar-se às necessidades do mercado no quesito responsabilidade social e produção em quantidade que atenda a demanda, mas sem considerar os impactos dos processos de manufatura na sociedade e no ambiente. Portanto, se faz necessário

tecnologias de reciclagem química ou de reaproveitamento como material para compósitos, utilizando insumos e processos amigáveis ao ambiente, capazes de recuperar de alguma maneira o resíduo têxtil.

A reciclagem têxtil não deve ser considerada um fim nela mesma, mas uma rota para a implementação de uma economia circular. Deve ser considerada um caminho de benefícios socioeconômicos significando um crescimento da economia de uma nação (LEAL FILHO *et al.*, 2019).

Observou-se por meio dos trabalhos que a reciclagem de resíduos têxteis é possível envolvendo mistura de processos de reciclagem, podendo dessa maneira contribuir com a sustentabilidade, com a economia e com a ciência de novos materiais. Percebeu-se também que cada caso é um caso devido às diferentes composições químicas e de construção, significando um longo caminho de pequenas iniciativas a galgar, mas que já apresentam resultados satisfatórios e possíveis, ficando como dificuldade os tornar viáveis economicamente.

A grande questão ainda estará na coleta e separação, ou seja, questão que perpassa a sociedade. No caso da indústria têxtil, a economia circular traz oportunidade de envolver toda a cadeia produtiva, o mesmo produto e seus constituintes têm potencial para retornar a cadeia produtiva numerosas vezes multiplicando a geração de receitas e empregos diretos e indiretos.

Pode-se apontar promissoras possibilidades de reciclagem como, por exemplo, utilização do processo de fermentação fúngica, numa perspectiva biológica, que sugere um esforço na direção da reciclagem verde ou mesmo a elaboração de compósitos verdes, numa perspectiva interessante e atual. Diversas áreas de pesquisa direcionam-se nesse caminho de compósitos tendo em vista sua vasta e potencial aplicação na área de plásticos e materiais construtivos.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, M. C.; ZONATTI, W. F.; SILVA, K. L.; JUNIOR, D. K.; NETO, J. A., BARUQUE-RAMOS, J. Industrial textile recycling and reuse in Brazil: case study and considerations concerning the circular economy. *Gestão e Produção*, v.25, n.3, p. 431-443, 2018.
- BERLIM, L. *Moda e sustentabilidade: uma reflexão necessária*. São Paulo: Estação das letras e cores, 2012.
- DE SILVA, R., WANG, X., & BYRNE, N.. Recycling textiles: the use of ionic liquids in the separation of cotton polyester blends. 2014.
- DISSANAYAKE, D.G.K.; WEERASINGHE, D.U.; WIJESINGHE, K.M.D.M.P.. Developing a compression moulded thermal insulation panel using postindustrial textile waste. *Waste Management*, ago. 2018.
- EKSTROM, K. M.; SALOMONSON, Nicklas. Reuse and Recycling of Clothing and Textiles – A Network Approach. *Journal of Macromarketing*, v. 34, n. 3, 2014.
- FLETCHER, K.; GROSE, L. *Moda & sustentabilidade: design para mudança*. São Paulo: Senac São Paulo, 2011.
- HU, Y., DU, C., PENSUPA, N., & LIN, C. S. K. Optimisation of fungal cellulase production from textile waste using experimental design. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018.
- ISLAM, S.; BHAT, G. Environmentally-friendly thermal and acoustic insulation materials from recycled textiles. *Journal of Environmental Management*, 2019.
- KUNCHIMON, S. Z.; TAUSIF, M.; GOSWAMI, P.; CHEUNG, V. Polyamide 6 and thermoplastic polyurethane recycled hybrid Fibres via twin-screw melt extrusion. *Journal of Polymer Research*, 26:162, 2019.
- LAVONE, L.; MOFFITT, K.; HANSEN, K.-A; BLINCO, J.; PAYNE, A.; SPEIGHT, R. Closing de textile loop: Enzymatic fibre separation and recycling of wool/polyester fabric blends. *Waste Management*, v. 102, 2020.
- LEAL FILHO, W.; ELLAMS, D.; TYLER, D.; BOITEN, V. PACO, A.; MOORA, H.; BALOGUN, A.-L.. A Review of the sócio-economic advantages of textile recycling, *Journal of Cleaner Production*, jan. 2019.
- MENG, X.; FAN, W.; MA, Y.; WEI, T.; DOU, H.; YANG, X.; TIAN, H.; YU Y.; ZHANG, T.; GAO, L.. Recycling of denim fabric waste into high-performance composites using needle-punching nonwoven fabrication route. *Textile Research Journal*, 2019.
- MISHRA, R., BEHERA, B., & MILITKY, J. . Recycling of textile waste into green composites: Performance characterization. *Polymer Composites*, 2014.

PRADO, K. S.; GONZALES, D.; SPINACÉ, M. S. A. Recycling of viscose yarn waste through one-step extraction of nanocellulose. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 136, 2019.

RAMAMOORTHY, S. K.; PERSSON, A.; SKRIFVAR, M. Reusing Textile Waste as Reinforcements in Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2014.

SALCEDO, E. *Moda ética para um futuro sustentável*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 2014.

UDALE, J. *Fundamentos do design de moda: tecidos e moda*. Porto Alegre: Bookman, 2009 e Porto Alegre: Bookman, 2015.

WANG, H., KAUR, G., PENSUPA, N., UISAN, K., DU, C., YANG, X., & LIN, C. S. K. Textile waste valorization using submerged filamentous fungal fermentation. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018.

YOUSEF, S.; TATARIANTS, M.; TICHONOVAS, M.; SARWAR, Z.; JONUSKIENÈ, I. A new strategy for using textile waste as a sustainable source of recovered cotton. *Resources, Conservation & Recycling*. v. 145, 2019.

ZAMANI, B.; SVANSTROM, M.; PETERS, G.; RYDBERG, T.. A Carbon Footprint of Textile Recycling: A Case Study in Sweden. *Applications and Implementation*, v. 19, n. 4, 2014.

ZONATTI, W. F. *Geração de resíduos sólidos da indústria brasileira têxtil e de confecção: materiais e processos para reuso e reciclagem*. Universidade de São Paulo - Escola de Artes Ciência e Humanidades. São Paulo, 2016.