



Maria Eloisa de Jesus Conceição

**DESIGN CIRCULAR PARA A
GESTÃO DE RESÍDUOS TÊXTEIS:
a manufatura aditiva como tecnologia capacitadora**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutora em Design pelo Programa de Pós-graduação em Design, do Departamento de Artes & Design da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Jorge Roberto Lopes dos Santos
Coorientador: Prof. Cláudio Freitas de Magalhães

**Rio de Janeiro,
setembro 2022**



Maria Eloisa de Jesus Conceição

**DESIGN CIRCULAR PARA A GESTÃO DE
RESÍDUOS TÊXTEIS: a manufatura aditiva como
tecnologia capacitadora**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutora em Design pelo Programa de Pós-graduação em Design da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo:

Prof. Jorge Roberto Lopes dos Santos

Orientador

Departamento de Artes & Design – PUC-Rio

Prof. Cláudio Freitas de Magalhães

Coorientador

Departamento de Artes & Design – PUC-Rio

Profa. Aline Monçores

Departamento de Artes & Design – PUC-Rio

Prof. João Victor Correia de Melo

Departamento de Artes & Design – PUC-Rio

Profa. Natascha Scagliusi

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Profa. Ana Cristina Fontes Moreira

Instituto Politécnico/Universidade do Estado do Rio de Janeiro –

IPRJ/UERJ

Rio de Janeiro, 02 de setembro de 2022

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial, do trabalho é proibida sem a autorização da universidade, da autora e do orientador.

Maria Eloisa de Jesus Conceição

Mestra em Design pela PUC-Rio. Graduiu-se em Tecnologia em Produção do Vestuário (SENAI/CETIQT) em 2014. Técnica Têxtil, com habilitação em Confecção do vestuário (SENAI/CETIQT) em 2011. Durante o período do doutorado foi bolsista CAPES no Núcleo de Experimentação Tridimensional da PUC-Rio, onde trabalhou diretamente com tecnologias digitais aplicadas ao design de moda, e pesquisadora bolsista no projeto *Economia circular: o início de um novo ciclo na indústria da moda*, no Instituto Senai de Tecnologia do SENAI/CETIQT.

Ficha Catalográfica

Conceição, Maria Eloisa de Jesus

Design circular para a gestão de resíduos têxteis : a manufatura aditiva como tecnologia capacitadora / Maria Eloisa de Jesus Conceição ; orientador: Jorge Roberto Lopes dos Santos ; coorientador: Cláudio Freitas de Magalhães. – 2022.

151 f. : il. color. ; 30 cm

Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Artes e Design, 2022.

Inclui bibliografia

1. Artes e Design – Teses. 2. Resíduo têxtil. 3. Design circular. 4. Gestão em Design. 5. Manufatura aditiva. 6. Reciclagem têxtil. 7. Fluxos circulares. I. Santos, Jorge Roberto Lopes dos. II. Magalhães, Cláudio Freitas de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Artes e Design. IV. Título.

CDD: 700

Às minhas sobrinhas Beatriz e Pietra, com a
esperança de que elas possam ter um planeta
mais limpo, saudável e seguro para viver.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Jorge Lopes, pela parceria para a realização desta tese. Minha gratidão por ter acreditado no potencial deste trabalho.

Ao meu coorientador Cláudio Magalhães, pelo apoio, pelas reflexões e incentivo ao longo deste percurso.

À PUC-Rio, por todo conhecimento que me foi proporcionado.

Ao Núcleo de Experimentação Tridimensional (NEXT), Laboratório do Programa de Pós-Graduação em Design da PUC-Rio, pelo suporte necessário para a realização desta pesquisa.

A todos os Pesquisadores e funcionários do Instituto Nacional de Tecnologia (INT), em especial aos membros do Laboratório de Modelos Tridimensionais (LAMOT) e da Divisão de Design Industrial (DIVDI).

À professora Ana Lúcia Nazareth e à Renan Henriques do Laboratório de Polímeros do Instituto de Macromoléculas da Universidade Federal do Rio de Janeiro – IMA/UFRJ, pela cooperação na realização de parte do pré-experimento.

À professora Ana Moreira e os técnicos do Laboratório de Sustentabilidade e Química de Polímeros do Instituto Politécnico da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – IPRJ/UERJ, pelo suporte no processamento do material do pré-experimento.

À CAPES, por conceder o auxílio financeiro que viabilizou a realização deste estudo.

Ao meu pai Eulálio (*in memoriam*), à minha mãe Antonia, meus irmãos, Erivaldo e Evandro, e à minha dinda Maria, pelo apoio na construção da trajetória que me conduziu até aqui.

A André Queiroz, meu Bem e companheiro de todas as horas, não tenho palavras para demonstrar a gratidão que tenho por seu amor, carinho, compreensão, paciência, estímulo, dedicação, troca e aconchego.

À minha professora Jackeline Farbiarz, pelas importantes contribuições e palavras de apoio, e pelo incentivo à carreira acadêmica e reconhecimento profissional.

À minha amiga Natascha Scagliusi, pelas trocas e por toda sua generosidade.

A Bruno Trindade, Renato Oliveira, João Azevedo e Raphael Vinagre pela colaboração no pré-experimento da pesquisa.

A todos os professores e aos funcionários do Departamento de Artes e Design da PUC-Rio.

À comissão examinadora, professoras Dra. Natascha Scagliusi, Dra. Ana Moreira, Dra. Aline Monçores, e professores Dr. Cláudio Magalhães e Dr. João Azevedo, pela participação e pelas sugestões.

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.”

Resumo

Conceição, Maria Eloisa de Jesus; Santos, Jorge Roberto Lopes dos; Magalhães, Cláudio Freitas de. **Design circular para a gestão de resíduos têxteis: a manufatura aditiva como tecnologia capacitadora.** Rio de Janeiro, 2022. 151p. Tese de Doutorado – Departamento de Artes & Design, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O Brasil é um dos líderes mundiais na produção de moda praia e o estado do Rio de Janeiro é o maior produtor deste segmento no país, representado pelo Arranjo Produtivo Local Polo Moda Praia de Cabo Frio. No processo de corte destes modelos há um desperdício médio de 30% de matéria-prima, predominantemente de origem sintética, e grande parte desse montante acaba descartado em aterros sanitários onde pode levar séculos para se decompor. Com o objetivo de sistematizar um conjunto de ações em busca de soluções, investiga-se nesta pesquisa como criar um processo de gestão de resíduos para o arranjo através do uso da tecnologia de manufatura aditiva, considerando as dimensões ambiental, social e econômica. A pesquisa, exploratória e aplicada, analisou a dinâmica dos resíduos têxteis do arranjo para considerar a formulação de estratégias de recuperação de valor desse material. Para tanto, a base teórica apoiou-se nos conceitos de economia circular, para entender as diferentes perspectivas e abordagens de modelos operacionais circulares; de arranjos produtivos locais, tendo em vista o incremento da cooperação entre as empresas que fazem parte do arranjo; de simbiose industrial, como ferramenta inspirada nos ecossistemas naturais para o intercâmbio de materiais; e de manufatura aditiva, tecnologia capacitadora que impulsiona os modelos de economia circular e fortalece sistemas democráticos de fabricação local e distribuída. A pesquisa apresenta como resultados um modelo de fluxo circular aberto para gestão de resíduos têxteis do Arranjo Produtivo Local Polo Moda Praia de Cabo Frio, com base em uma integração intersetorial com empresas de reciclagem têxtil; e, um protótipo de filamento para impressoras 3D, desenvolvido a partir dos resíduos de malha poliamida para ser usado na produção de aviamentos e acessórios. Destaca-se que o sistema de gestão de resíduos

proposto é dinâmico, permitindo que os vínculos estabelecidos entre os interlocutores locais propiciem novas articulações, dentro e fora do arranjo.

Palavras-chave

Resíduo Têxtil; Design Circular; Manufatura Aditiva; Reciclagem têxtil; Fluxos Circulares.

Abstract

Conceição, Maria Eloisa de Jesus; Santos, Jorge Roberto Lopes dos (Advisor); Magalhães, Cláudio Freitas de (Co-Advisor). **Circular design for the management of textile waste: additive manufacturing as enabling technology**. Rio de Janeiro, 2022. 151p. Tese de Doutorado – Departamento de Artes & Design, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Brazil is a world leader in beachwear production, and the state of Rio de Janeiro is the largest producer of this segment in the country, represented by the Local Productive Arrangement of Beachwear Apparel in the city of Cabo Frio, at the State of Rio de Janeiro, Brazil. In the cutting process of these models, approximately 30% of raw material is wasted, mainly of synthetic origin, and is mostly discarded in sanitary landfills, where it can take centuries to decompose. In order to systematize a set of actions to pursue solutions, this research investigates, how to create a waste management process for the arrangement through the use of additive manufacturing technology, considering the environmental, social and economic dimensions. This exploratory and applied research, analyses the dynamics of textile waste from the arrangement to consider the formulation of strategies to recover value from this material. As a theoretical foundation were used the concepts of: (i) circular economy, to understand different perspectives and approaches of circular operational models; (ii) local productive arrangements, to recognize the current scenario and increase cooperation among companies that are part of the arrangement; (iii) of industrial symbiosis, as a tool inspired by natural ecosystems aimed at the exchange of materials; and (iv) additive manufacturing, as an enabling technology that drives circular economy models and strengthens democratic systems of local and distributed manufacturing. The thesis outcomes were an open flow model for textile waste management in a local production arrangement of beachwear apparel, through the intersectoral integration between textile recycling companies and the apparel manufacturers belonging to arrangement; and a prototype of a 3D printer filament using polyamide mesh for printing trims and accessories used in the manufacture of beachwear. It should be

noted that the proposed system is dynamic, allowing the links established between the local interlocutors to provide new articulations, within and outside the arrangement.

Keywords

Textile waste; Circular economy; Additive manufacturing; Recycling Textiles; Circular Flows.

Sumário

1	Introdução	23
2	A questão do resíduo têxtil	28
2.1	Processos de reciclagem de têxteis sintéticos	30
2.2	Panorama da reciclagem têxtil no Brasil	34
2.3	A Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS	37
3	Design circular: economia circular e pensamento sistêmico	42
3.1	Conceito e estrutura da economia circular	43
3.2	Pensamento sistêmico	49
3.3	Cadeia de suprimentos circulares	51
4	Manufatura aditiva: tecnologia capacitadora para a economia circular	61
4.1	A tecnologia de manufatura aditiva	62
4.2	Manufatura aditiva FDM	64
4.3	Formas de alimentação	65
4.4	Parâmetros de extrusão, estratégias de preenchimento e construção	67
4.5	Atributos construtivos do processo	70
4.6	Soluções em materiais reciclados para impressoras 3D	73
4.7	Fabricação local e distribuída: o impacto da manufatura aditiva na cadeia de suprimentos	77
5	Ecosistema industrial: APLs e Simbiose industrial	82
5.1	Arranjo Produtivo Local	84
5.1.2	Classificação dos APLs	86
5.2	Simbiose industrial	90
5.2.2	Fatores viabilizadores de uma simbiose industrial	92
5.2.3	Tipos de simbiose industrial	93

6	Procedimentos metodológicos, métodos e técnicas de pesquisa	96
6.1	Caracterização e tipo de pesquisa	96
6.2	Percurso metodológico	97
6.3	Etapa 1: estudo pré-experimental em laboratório de design	98
6.3.2	Seleção do material: poliamida e suas características	100
6.3.3	Definição e preparação de amostras: resíduos têxteis de malha poliamida	103
6.4	Etapa 2: definição do objeto de pesquisa	105
6.5	Etapa 3: pesquisa de campo	106
6.5.2	Caracterização do APL Polo Moda Praia de Cabo Frio/RJ	107
6.5.3	Principais agentes	108
6.5.4	Diagnóstico dos resíduos	109
6.5.5	Matriz SWOT do arranjo	110
6.6	Etapa 4: desenvolvimento do modelo de gestão de resíduos para o APL Polo Moda Praia de Cabo Frio/RJ	111
6.7	Proposta	112
7	Fluxos circulares para a gestão do resíduo têxtil do APL Polo Moda Praia de Cabo Frio/RJ	113
7.1	Transformando resíduos de malha poliamida em filamento para impressoras 3D	114
7.1.2	Estágio 1 - Materiais e métodos	114
7.1.3	Avaliação dos resultados	116
7.1.4	Estágio 2 - Materiais e métodos	122
7.1.5	Avaliação dos resultados	124
7.1.6	Estágio 3 - Materiais e métodos	125
7.1.7	Avaliação dos resultados	127
7.2	Proposta de ecossistema de gestão de resíduos	128
8	Conclusão	133
9	Referências Bibliográficas	136

Lista de Siglas

Abit – Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção

ABS – *Acrylonitrile Butadiene Styrene*

Acirb – Associação Comercial e Industrial da Rua dos Biquínis

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Abrelpe – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública

APL – Arranjo Produtivo Local

CAD – *Computer Aided Design*

CAM – *Computer Aided Manufacturing*

Cebri – Centro Brasileiro de Relações Internacionais

Cetiqt – Centro de Tecnologia da Indústria Química e Têxtil

Comsercaf – Companhia de Serviços de Cabo Frio

Conama – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CNI – Confederação Nacional da Indústria

DRAM – *Distributed Recycling Additive Manufacturing*

DIVDI – Divisão de Design Industrial

Desis – *Design for Social Innovation and Sustainability*

EC – Economia Circular

EI – Ecologia Industrial

EMF – *Ellen MacArthur Foundation*

FDM – *Fused Deposition Modeling*

Fiea – Federação das Indústrias do Estado de Alagoas

Fiemg – Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais

Fiep – Federação das Indústrias do Estado do Paraná

Fiergs – Federação das Indústrias do Estado do Rio Grande do Sul

Firjan – Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro

FGF – *Fused Granular Fabrication*

HDPE – *High-density Polyethylene*

IEMI – Instituto de Estudos e Marketing Industrial

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica e Aplicada

INT – Instituto Nacional de Tecnologia

IPRJ – Instituto Politécnico do Rio de Janeiro

ISO – Organização Internacional de Normalização

LAMAP – Laboratório de Materiais Poliméricos

LAMP – Laboratório de Modelos e Protótipos

MA – Manufatura Aditiva

MDR – Ministério do Desenvolvimento Regional

MPMEs – Micro, Pequenas e Médias Empresas

NEXT – Núcleo de Experimentação Tridimensional

NISP – *National Industrial Symbiosis Programme*

PA – Poliamida

PBSI – Programa Brasileiro de Simbiose Industrial

PLA – *Polylactic Acid*

PMEs – Pequenas e Médias Empresas

PNRS – Política Nacional de Resíduos sólidos

PR – Prototipagem rápida

PUC-Rio – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

RedeSist – Sistemas Produtivos e Inovativos Locais

REC – Rota da Economia Circular

Sebrae – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas

Senai – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

SI – Simbiose Industrial

UEL – Universidade Estadual de Londrina

UERJ – Universidade do Estado do Rio de Janeiro

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Lista de Figuras

Figura 1 – Estrutura e trajetória de construção da tese	27
Figura 2 – Resíduos têxteis de confecções do Arranjo Produtivo Local Polo Moda Praia de Cabo Frio/RJ	34
Figura 3 – Residômetro Têxtil	35
Figura 4 – Hierarquia da gestão de resíduos sólidos	39
Figura 5 – Planos de resíduos sólidos	40
Figura 6 – Representação simplificada do diagrama de fluxo circular	44
Figura 7 – Evolução da economia circular	45
Figura 8 – Estrutura genérica da economia circular	47
Figura 9 – Representação simplificada da cadeia de suprimentos da indústria da moda	50
Figura 10 – Cadeia de design e suprimentos	51
Figura 11 – Releitura da cadeia de design e suprimentos	52
Figura 12 – Objetivos do design do produto na estrutura genérica de economia circular	53
Figura 13 – Etiqueta de calça jeans de composição mista	54
Figura 14 – Protótipo Ultra Boost	55
Figura 15 – Extração da fibra e processo de secagem Piñatex®	55
Figura 16 – Fibra celulósica à base de laranja e polpa de madeira	57
Figura 17 – Fluxograma das principais operações do processo de manufatura aditiva	63
Figura 18 – Representação esquemática do sistema de impressão FDM64	
Figura 19 – Princípios de alimentação dos processos de extrusão	67
Figura 20 – Representação da geometria transversal do filamento extrusado	68
Figura 21 – Padrão de estratégias de preenchimento das camadas em processos de extrusão de material	69
Figura 22 – Influência do comprimento da linha do <i>raster</i> no tempo de contato entre filamentos adjacentes	73
Figura 23 – Esquema representativo do Parque Eco industrial de Kalundborg	94

Figura 24 – Etapas do percurso metodológico da pesquisa	98
Figura 25 – Fluxograma do experimento	99
Figura 26 – Fluxo o processo de obtenção da poliamida 66 e 6	102
Figura 27 – Quadro geral características do Nylon 66 e 6	102
Figura 28 – Amostras selecionadas para a estágio 1 do pré-experimento	103
Figura 29 – Amostra selecionada para estágio 2 do pré-experimento	104
Figura 30 – Amostras selecionadas para estágio 3 do pré-experimento	104
Figura 31 – Visão geral do bairro da Gamboa e da rua dos Biquínis	108
Figura 32 - Matriz SWOT do APL Polo Moda Praia de Cabo Frio	111
Figura 33 – Etapas do processo de desenvolvimento do filamento a partir de resíduos de malha poliamida	114
Figura 34 – Amostras do estágio 1	115
Figura 35 – Poliamida fundida, processo de moagem e extrusão do filamento	115
Figura 36 – Filamento produzido com malha poliamida e variação do diâmetro dos filamentos	117
Figura 37 – Primeiro teste de impressão com filamento desenvolvido a partir de retalhos de poliamida	118
Figura 38 – Extrusão do filamento com 15% de poliamida virgem e teste de impressão	119
Figura 39 – Sequência de processos de fusão do material	120
Figura 40 – Material na forma de grânulos (pellets)	120
Figura 41 – Projeto DRAM realizado no LAMP	121
Figura 42 – Amostras do estágio 2	122
Figura 43 – Amostra do estágio 2 após 30 min. na estufa	123
Figura 44 – Amostras do estágio 2 após 15 min. na estufa	123
Figura 45 – Avaliação da parte central do material após o processo de fusão	124
Figura 46 – Avaliação da base do material após o processo de fusão	125
Figura 47 – Amostra do estágio 3 (lote 1) após processo de fusão	126
Figura 48 – Amostra do estágio 3 (lote 2) após processo de fusão	126
Figura 49 – Aviamentos e acessórios produzidos com impressora 3D e filamento de poliamida comercial	128

Figura 50 – Proposta de fluxo circular de <i>loop</i> aberto transetorial	129
Figura 51 – Estimativa de acúmulo de resíduos de uma fábrica do arranjo	131
Figura 52– Estimativa de acúmulo de resíduos de todas as fábricas do arranjo	131
Figura 53 – Proposta de design do processo de gestão de resíduo	132

Lista de Quadros

Quadro 1 – Estratégias para o gerenciamento de resíduos têxteis	29
Quadro 2 – Classificação das tecnologias de reciclagem	30
Quadro 3 – Etapas do processo de reciclagem mecânica	32
Quadro 4 – Objetivos da Responsabilidade Compartilhada na Lei 12.305/2010	38
Quadro 5 – Escolas de pensamento referência para a economia circular	46
Quadro 6 – Principais características das estratégias de preenchimento	69
Quadro 7 – Variáveis do processo de extrusão do material	70
Quadro 8 – Principais vantagens no uso da MA para a fabricação sustentável	78
Quadro 9 – Principais diferenças entre os processos de produção em massa e customização em massa	80
Quadro 10 – Características dos APLs	85
Quadro 11 – Principais atores dos APLs	86
Quadro 12 – Classificação e perfil dos APLs quanto ao estágio de desenvolvimento	87
Quadro 13 – Características dos APLs com relação ao estágio de desenvolvimento	89
Quadro 14 – Fatores viabilizadores para projetos de Simbiose Industrial a nível nacional	92
Quadro 15 – Instituições que atuam na mobilização, coordenação e articulação de ações do APL	109
Quadro 16 – Parâmetros do perfil de impressão	117

*“Somos prisioneiros de uma sociedade
"descartável". A única maneira de escapar é
criar um design sustentável”.*

Philippe Starck

1

Introdução

No ciclo de vida de uma peça de roupa pode-se destacar dois momentos críticos que envolvem a geração de resíduos têxteis: a fase de produção, na forma de retalhos provenientes do processo de corte das peças, e a fase de descarte, tanto por parte do consumidor, depois do uso, quanto por parte da empresa, dos produtos não vendidos e devoluções. De acordo com o relatório *A new textiles economy: redesigning fashion's future*, publicado em 2017 pela Ellen MacArthur Foundation, em todo o mundo, a cada segundo, o equivalente a um caminhão de roupas e resíduos têxteis são lançados ou incinerados em aterros clandestinos.

O documentário *Unravel: The final resting place of your cast-off clothing* (2016), mostra a realidade da reciclagem de roupas em Panipat, no norte da Índia, para onde são enviadas cem mil toneladas de peças todos os anos. No mercado de Kantamanto, em Gana, mais de quinze milhões de peças usadas são recebidas toda semana e cerca de 40% desse volume são enviados aos aterros do país (BBC Brasil, 2021). No deserto do Atacama, no Chile, há cerca de quinze anos os descartes têxteis se acumulam, mas agora o problema tem atingido proporções gigantescas afetando uma área de trezentos hectares (extensão equivalente a quatrocentos e vinte campos de futebol) (Paúl, 2022). No Brasil, segundo levantamento da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe), todos os anos são descartadas quatro milhões de toneladas de resíduos têxteis de forma irregular (Puente, 2022). Para além da quantidade de peças descartadas, a preocupação ambiental se estende aos materiais e processos de acabamento utilizados na produção das roupas, que são, majoritariamente, devido ao baixo custo, de origem sintética, e podem levar centenas de anos para se decompor no meio ambiente.

Para pensar em soluções de reciclagem dos resíduos têxteis é preciso mudar a perspectiva em relação as sobras do processo, e essa é uma das premissas da economia circular, eliminar o desperdício transformando o resíduo de um ciclo produtivo em nutriente para retornar ao próprio ciclo de origem, ou em matéria-prima para outra cadeia produtiva. As abordagens fundamentadas nos princípios da economia circular podem promover melhorias transformacionais na utilização e na recuperação de materiais por meio de diferentes estratégias, contudo, para além do design do produto, a economia circular pressupõe ações conjuntas e coordenadas que envolvem o design de toda a cadeia de suprimentos,

isto é, um design circular, cuja proposta é uma prática de projeto baseada nos princípios da economia circular e do pensamento sistêmico (EMF, 2021).

A economia circular é impulsionada pelas tecnologias digitais, pois estas ampliam as oportunidades em inovação material e em processos de fabricação. Nesse sentido, a manufatura aditiva figura uma ferramenta digital de produção que pode implementar mudanças significativas na cadeia de suprimentos, tornando-a uma rede distribuída ágil, resiliente, responsiva e conectada, que permite uma produção customizada e sob demanda. Em contrapartida, a cadeia de suprimentos tradicional possui uma natureza fragmentada, onde fornecedores e fabricantes exercem pouca influência uns sobre os outros, portanto, competem efetivamente para fabricar produtos mais baratos e no menor prazo possível.

Janine Benyus (2016) descreve que em ecossistemas maduros a cooperação parece tão importante quanto a competição, e explica que os primeiros exemplos de uma economia sem desperdício foram os de um conjunto de empresas reunidas num ecoparque industrial e interligadas numa espécie de cadeia alimentar fabril, com o resíduo de cada empresa sendo repassado à vizinha para torna-se matéria-prima ou combustível dessa outra. No entanto, as indústrias não precisam estar geograficamente próximas para formar um ecossistema, desde que estejam interligadas por canais de informação e pelo desejo mútuo de aproveitar o resíduo que produzem.

A economia circular propõe um modelo de desenvolvimento voltado para a promoção da sustentabilidade através do fechamento dos ciclos das cadeias produtivas. À medida que surgem alternativas para as empresas se auto abastecerem em um ecossistema industrial, mais circuitos serão fechados e menos resíduos serão gerados. Assim, à medida que novas articulações ocorrem, o sistema se torna mais complexo e requisita mais cooperação.

Nesse conjunto de circunstâncias, esta pesquisa, exploratória e de natureza aplicada, tem como **tema** a exploração dos princípios da economia circular e o uso de ferramentas digitais de produção como estratégias para a gestão de resíduos têxteis sintéticos da indústria de moda praia. O **problema da pesquisa** se expressa em como identificar formas de reintroduzir o resíduo têxtil pós-industrial, proveniente do processo de corte das peças, no ciclo produtivo de origem utilizando a tecnologia de manufatura aditiva por fusão e deposição.

Considera-se a **hipótese** de que a criação de um fluxo circular de *loop* aberto, fundamentado na simbiose industrial, que estabelece uma relação de benefício mútuo entre empresas, e na tecnologia de manufatura aditiva, que suscita a fabricação local e distribuída, resulta em um modelo de gestão de

resíduos têxteis que pode ser aplicado em um arranjo produtivo de confecções para o gerenciamento das sobras de tecido provenientes da produção. Em poucas palavras, a gestão de resíduos tem relação com a parte estratégica do processo, enquanto que o gerenciamento de resíduos envolve a estrutura das operações durante os procedimentos. O termo *loop* aberto aqui é usado para designar o uso de materiais que refluem para outras empresas que possam realizar o seu processamento, garantido a recirculação do material.

Assim, o **objetivo geral** desta investigação é propor um modelo de gestão de resíduos têxteis para o Arranjo Produtivo Local Polo Moda Praia de Cabo Frio/RJ. Como **objetivos específicos** busca-se: (i) entender os processos e o estado da arte da reciclagem de têxteis sintéticos; (ii) descrever o conceito e a estrutura da economia circular; (iii) compreender como a tecnologia de manufatura aditiva pode promover a transição para um modelo de produção circular; (iv) explicar e classificar os arranjos produtivos locais e, conhecer e identificar os tipos de simbiose industrial; e (v) propor um modelo de gestão de resíduos têxteis.

A **justificativa** desse estudo está na emergência em discutir o problema dos resíduos de têxteis sintéticos diante da situação de sobrecarga ecológica. Em 2020, foram comercializadas 221 milhões de peças do segmento de moda praia, uma redução de 19% em relação ao ano anterior (Prado, 2021). As fibras sintéticas, especialmente a malha poliamida/elastano, são a principal matéria-prima deste segmento, e podem levar centenas de anos para se decompor nos aterros sanitários. Inclusive, o Brasil é um dos líderes mundiais na produção de roupas de banho, e 49% das confecções especializadas neste tipo de peça, concentram-se nos estados de São Paulo, e do Rio de Janeiro, que tem a cidade de Cabo Frio, a 150km da capital, como maior polo produtivo.

O Arranjo Produtivo Local Polo de Moda Praia de Cabo Frio é formado por um aglomerado de mais de cem estabelecimentos e, a maior parte deles, possuem fabricação própria. No arranjo, não existem ações coletivas dirigidas ao gerenciamento dos resíduos têxteis que, na maioria dos casos, são descartados como resíduo comum e acabam no aterro sanitário impossibilitando qualquer processo de reaproveitamento. Há uma lacuna quando se trata de soluções que possam atribuir valor a este material, que poderia servir de nutriente para a própria produção, ou para outros ciclos produtivos, mesmo se tratando de empresas de diferentes áreas de atuação.

Os **métodos** e práticas que compõem a metodologia deste estudo incluem fases distintas, uma pesquisa pré-experimental, como base para um experimento

futuro; e uma pesquisa bibliográfica, que sustenta o pré-experimento e o modelo de gestão de resíduos têxteis que é proposto para o arranjo.

A tese está estruturada em nove capítulos (Figura 1), sendo o último dedicado as referências bibliográficas que foram utilizadas nesta investigação. No presente capítulo, se expôs a ideia central desta pesquisa, o objetivo geral e os alvos específicos desta análise. O capítulo 2 versa sobre o problema dos resíduos têxteis de origem sintética, com a descrição dos processos de reciclagem têxtil e o panorama da reciclagem deste tipo de material no Brasil, e também, faz uma leitura da Política Nacional de Resíduos sólidos.

O capítulo 3, apresenta o conceito de design circular através da estrutura da economia circular e do pensamento sistêmico como base para formar cadeias de suprimentos circulares. A seguir, no capítulo 4, discute-se as implicações do uso da tecnologia de manufatura aditiva como ferramenta para a fabricação distribuída, em termos de configuração de cadeias de valor. Já o capítulo 5, aborda a noção de ecossistema industrial a partir da perspectiva dos arranjos produtivos locais, e de simbiose industrial, como uma ferramenta da ecologia industrial para viabilizar a formação de cadeias de suprimentos circulares.

O capítulo 6 explica os procedimentos metodológicos, os métodos e as técnicas que delinearão o percurso desta pesquisa. Enquanto no capítulo 7, apresentam-se os resultados, que são o protótipo de um filamento para impressoras 3D FDM, produzido com o resíduo de malha poliamida das confecções de moda praia; e o piloto de um modelo de gestão de resíduos têxteis para o Arranjo Produtivo Local Polo Moda Praia de Cabo Frio. As notas conclusivas desta tese são encontradas no capítulo 8, que é seguido de um glossário que reúne os termos do domínio da economia circular e dos temas adjacentes aqui tratados.

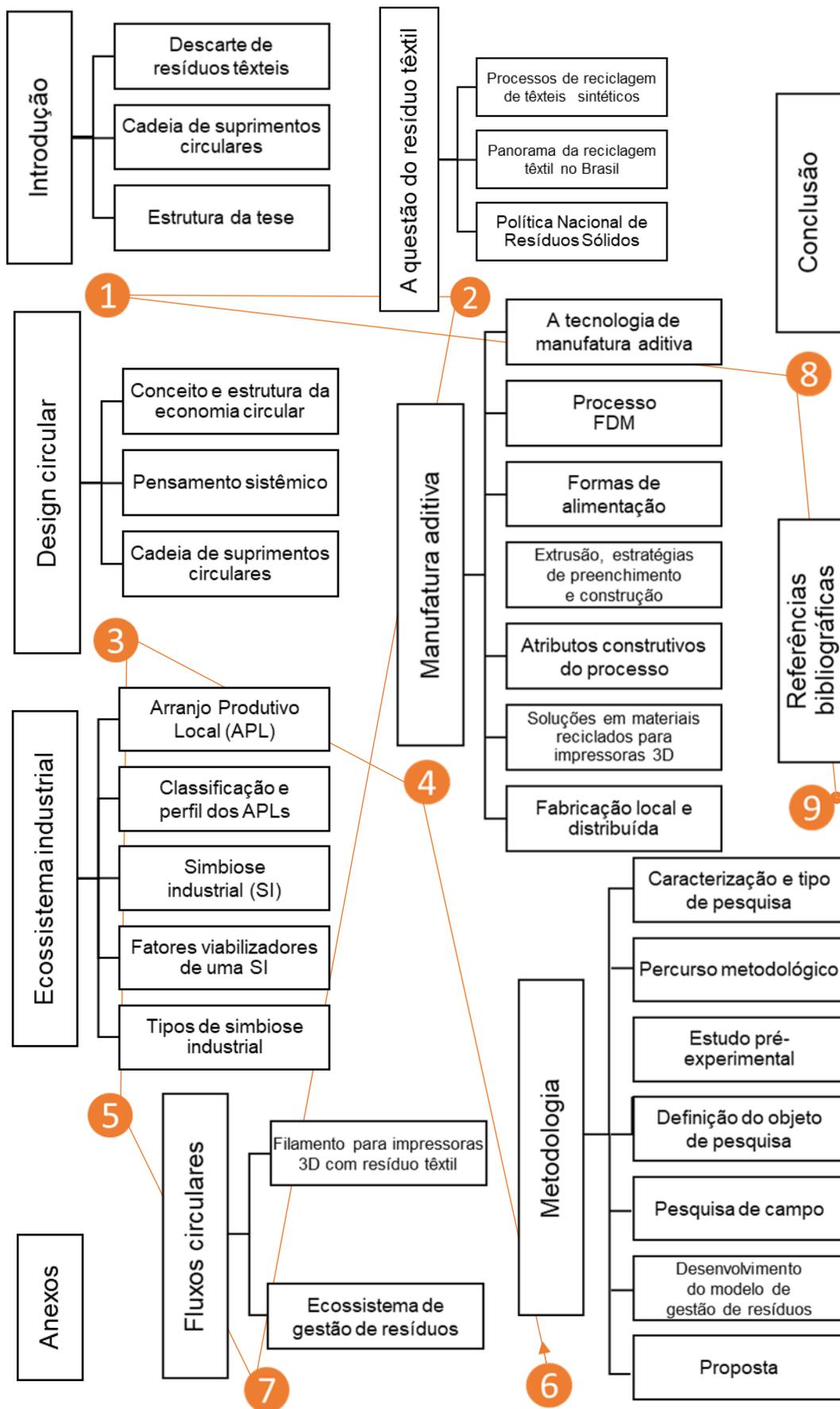


Figura 1 – Estrutura e trajetória de construção da tese.

2

A questão do resíduo têxtil

Denomina-se resíduo sólido todo material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010). Em outras palavras é todo material derivado da sobra de uma produção, que não possui mais utilidade para determinado processo e que, geralmente, é descartado e tratado como indesejável por muitas empresas.

A prevenção da geração de resíduos deve acontecer em todo o ciclo de vida de produtos ou serviços, o que inclui projeto e desenvolvimento, fabricação, distribuição, uso e pós-uso (Menegucci et al., 2015). Esse pensamento sistêmico pode ajudar uma organização não somente a mitigar seus resíduos e emissões, e conservar recursos, mas também, a reduzir custos.

Em todo o caso, a redução da geração de resíduo na fonte, que inclui modificações no processo, no produto ou no serviço, é considerada a prática mais eficaz (ABNT NBR ISO 14004:2018). Na produção do vestuário, a redução da geração de resíduos têxteis pode se dá através de estratégias de design de produto, como por exemplo, a modelagem “zero resíduo” (*zero waste*) (Saraiva, 2014), ou modelagem digital (Conceição & Santos, 2017; Pires & Menezes, 2020); de design de processo, com uso de softwares desenho auxiliado por computador (CAD - *Computer Aided Design*) específicos de modelagem para o planejamento do processo de corte das peças (Vieira, 2007), ou de tecnologias digitais de produção (Conceição, 2018); e em um último nível, de reciclagem interna, reintegrando os resíduos que não puderam ser evitados no processo, ou de reciclagem externa, recuperando materiais como aparas e retalhos de tecido.

De acordo com dados da Associação Brasileira da Indústria Têxtil (Abit), o Brasil está entre os maiores produtores mundiais de têxteis e confeccionados. Este segmento, como toda atividade industrial, é responsável pela geração de grande volume de diferentes resíduos, entre eles o resíduo têxtil, na maioria das vezes de origem sintética, o que agrava a situação considerando o tempo

necessário para a degradação desse tipo de material, quando descartado de maneira inadequada.

Os resíduos têxteis são caracterizados por aparas, tecidos de malha, tecidos planos, tecidos não tecidos, linhas, fios e acessórios e, segundo a norma ABNT 10004:2018, são classificados como resíduos industriais, não perigosos e não inertes. No caso do descarte de peças prontas, o reuso, a remanufatura e a reciclagem são formas de interceptar roupas usadas, ou não vendidas, que teriam como destino aterros sanitários (Quadro 1).

Estratégias para o gerenciamento dos resíduos têxteis	
Reuso	Opção que usa menos recurso, pois em geral se trata de adquirir e revender as peças no estado em que se encontram.
Remanufatura	Consome mais recursos, pois requer mão de obra e energia para transformar velhos tecidos ou peças em roupas novas.
Reciclagem	É a opção que consome mais recursos, e pode acontecer através de diferentes métodos.

Quadro 1 – Estratégias para o gerenciamento de resíduos têxteis. Fonte: desenvolvido pela autora a partir de Fletcher & Grose (2011) e Gwilt (2014).

Gwilt (2014) comenta que um dos caminhos mais conhecidos para o reuso é a doação do item para instituições de caridade ou para lojas de “segunda mão”, mais conhecidas como brechós. Apesar disso, o prolongamento do uso também tem ocorrido através de venda ou troca de peças em plataformas virtuais. Já a remanufatura, envolve o conceito de explorar o desenvolvimento de uma nova peça de roupa a partir de outra já existente, ou ainda, trabalhar com sobra de material e estoque excedente. Como outras opções têm-se a elaboração de métodos para a desconstrução de peças de forma a obter tecido suficiente para ser trabalhado em outro modelo, e a personalização através de técnicas de *upcycling* com a inclusão detalhes, aviamentos ou acessórios.

A reciclagem, mesmo sendo a opção que faz uso mais intensivo de recursos, ainda é considerada mais ecológica, quando comparada com a produção da fibra virgem. As peças prontas e as sobras de tecido que são descartadas, podem ser transformadas em matéria-prima e retornar ao ciclo produtivo da própria indústria de vestuário, ou abastecer outras cadeias produtivas.

2.1 Processos de reciclagem de têxteis sintéticos

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (BRASIL, 2010), a reciclagem pode ser entendida como o processo de transformação dos resíduos que envolve a alteração das suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos.

Com relação as tecnologias de reciclagem de polímeros, estas podem ser classificadas em quatro categorias, (i) primária, consiste em métodos de processamento sem alteração das características originais do resíduo pós-industrial; (ii) secundária, quando os resíduos pós-consumo são convertidos em subprodutos; (iii) terciária, conversão dos resíduos em produtos químicos ou combustíveis através dos processos de pirólise, hidrólise ou de reciclagem energética; e (iv) quaternária, reciclagem por incineração controlada de resíduos sólidos para a utilização da energia gerada (Quadro 2) (Spinacé & De Paoli, 2005; Zonatti, 2016).

Tecnologias de Reciclagem	
Categorização	Descrição
Primária	Consiste em métodos de processamento sem alteração das características originais do resíduo pós-industrial.
Secundária	Quando os resíduos pós-consumo são convertidos em subprodutos
Terciária	Conversão dos resíduos em produtos químicos ou combustíveis através dos processos de pirólise, hidrólise ou de reciclagem energética.
Quaternária	Reciclagem por incineração controlada dos resíduos sólidos para a utilização do calor gerado.

Quadro 2 – Classificação das tecnologias de reciclagem. Fonte: desenvolvido pela autora a partir de Spinacé e De Paoli (2005) e Zonatti (2016).

Na indústria de vestuário, o maior volume de resíduo têxtil é proveniente do processo de corte das peças, e estes são denominados resíduos pós-industriais, isto é, o que sobra da produção e que não tem mais utilidade para o processo, ou de resíduo pré-consumo.

A reciclagem têxtil pode ser de dois tipos, *mecânica*, que é um processo estabelecido para têxteis e pode acontecer através da reciclagem das fibras, quando o tecido é desfibrado e a fibra é preservada, ou da reciclagem termomecânica, quando as fibras sintéticas são fusionadas antes de serem

refiadas em novas fibras ou remodeladas em outras formas (Ribul et al., 2021); e *química*, que oferece oportunidades substanciais de manter os produtos em ciclo fechado e pode ocorrer através da reciclagem de monômeros, quando a cadeia polimérica é dividida para obter monômeros intactos, ou da reciclagem de polímeros, quando ocorre a desfibragem através de processamento mecânico seguido de um método de dissolução química com solventes específicos, (Fletcher & Grose, 2011; Ribul et al., 2021).

Embora o processo de reciclagem de fibras naturais permaneça basicamente o mesmo, alguns avanços têm sido observados no desenvolvimento de fibras sintéticas recicladas, com processos em larga escala. Empresas como a Patagônia, por exemplo, estão reciclando peças de roupas confeccionadas em poliéster em parceria com a *Teijin Fibers*, que possui o sistema “Eco Circle” de reciclagem de ciclo fechado, fibra a fibra, através da tecnologia de reciclagem química, para transformar o resíduo têxtil de poliéster em uma nova fibra que pode ser utilizada em novos tecidos (Gwilt, 2014).

As fibras químicas sintéticas, obtidas principalmente de fontes não renováveis, foram desenvolvidas ao longo do século XIX, mas só foram aprimoradas no século XX (Pezzolo, 2017). Desde meados dos anos 2000, a produção de sintéticos ultrapassou o volume de produção do algodão (Modifica, FGVces & Regenerate, 2020), tornando-se a principal matéria-prima da indústria têxtil e de vestuário (Magni & Ricchetti, 2017).

O Nylon®, nome comercial para o polímero derivado da resina de poliamida, foi a primeira fibra sintetizada em laboratório e é considerado o mais nobre dos fios, nesta categoria. Devido às suas características – leve e macio, resistente ao uso, a microrganismos e insetos, de fácil tratamento e secagem rápida, não higroscópico, e termodinâmico (Pezzolo, 2017) – é o mais utilizado na produção de peças do segmento de moda praia, esporte, meias e aplicações médicas e estéticas (Marteli, 2011). No período entre 2008 e 2018, o Nylon foi a terceira fibra mais produzida no Brasil (Modifica, FGVces & Regenerate, 2020).

Tanto os métodos mecânicos, quanto os métodos químicos podem ser utilizados na reciclagem do Nylon. Mecanicamente, as fibras podem ser cortadas, trituradas e derretidas para voltar a formar grânulos que são extrusados, processados e texturizados em novas fibras; já quimicamente, são decompostas em monômeros e repolimerizadas para produzir um material de qualidade mais consistente que o produzido no método mecânico, embora consuma mais energia e envolva grande quantidade de produtos químicos, por muitas vezes com alto grau de toxicidade, o que torna o processo mais complexo na sua gestão. Ainda

assim, em comparação com a produção do material virgem, o Nylon reciclado demanda cerca de 80% menos energia (Fletcher & Grose, 2011).

A reciclagem mecânica das fibras envolve a separação dos tecidos por cor, a picotagem ou desfibragem, e a compactação em fardos prontos para serem vendidos para outros mercados. Já a reciclagem termomecânica pode ser viabilizada através do reprocessamento por extrusão, injeção, moldagem por compressão etc. Considerando a reciclagem de tecidos sintéticos à base de poliamida, o processo de reciclagem química inclui as etapas de (i) separação; (ii) termoformagem; (iii) moagem; (iv) lavagem; (v) secagem; e (vi) extrusão (Quadro 3) (Baumi, 2017).

Etapas do processo de Reciclagem Termomecânica	
Etapa	Descrição
Separação	Importante para limitar as impurezas a níveis inferiores a 1% e a presença de macro contaminantes, pois, mesmo em concentrações pequenas estes podem alterar as propriedades do polímero. Na maioria das vezes essa etapa é realizada de forma manual, decorrente do fato de que boa parte das empresas de reciclagem são de pequeno porte, mas também, pode ocorrer de forma automatizada.
Termoformagem	Os resíduos têxteis são adicionados em um tanque reator, onde são transformados em placas plásticas de poliamida.
Moagem	As placas são fragmentadas em moinhos de facas rotativas, transformando-se em poliamida granulada.
Lavagem	Depois de moído, o polímero é lavado em tanques de água aquecida com solução à base de detergente.
Secagem	Esta também é uma etapa crucial, pois alguns polímeros, como a poliamida, podem sofrer hidrólise durante o processamento devido ao teor de umidade.
Extrusão	Os pellets são extrudados na forma de filamento, que pode ser usado em impressoras 3D; ou cortado na granuladora na forma de pellets. Geralmente, são adicionados aditivos como antioxidantes, plastificantes, cargas de reforço, agentes de acoplamento e outras coisas, ou adicionar um percentual de material virgem à mistura para melhorar as propriedades mecânicas do material.

Quadro 3 – Etapas do processo de reciclagem mecânica. Fonte: desenvolvido pela autora a partir de Baumi (2017).

Existe um limite de ciclos de processamento no qual as propriedades dos polímeros são mantidas. No caso do processo de extrusão, Spinacé & De Paoli (2005) sugerem o uso de um desenho específico de rosca, por exemplo, a rosca

com barreiras, que promove uma plastificação do polímero reciclado de forma mais eficiente que as roscas convencionais, reduzindo a degradação do polímero.

No que se refere aos polímeros de uma forma geral, a reciclagem química pode ocorrer por meio de processos de despolimerização por solvólise (reação química com solvente), ou por métodos térmicos (pirólise à baixa e altas temperaturas, gaseificação e hidrogenação), ou ainda, por métodos térmicos/catalíticos (pirólise e a utilização de catalisadores seletivos). A solvólise é utilizada para polímeros como poliésteres, poliamidas e poliuretanas, e os métodos térmicos ou catalíticos são mais utilizados para as poliolefinas, por exemplo, o polietileno (Spinacé & De Paoli, 2005). Ainda pouco desenvolvida no Brasil, a reciclagem química é muito utilizada por indústrias na Europa e no Japão.

Os processos de reciclagem ainda podem ser caracterizados quanto ao tipo de trajetória: (i) reciclagem de circuito fechado, quando a matéria-prima é reinserida no mesmo ciclo produtivo de origem, e (ii) reciclagem em circuito aberto (também chamada de reciclagem em cascata), quando os resíduos se destinam à criação de novos produtos sem necessariamente fazer parte do sistema onde foi gerado (Sadin & Peters 2017).

Ressalta-se que a seleção do método de reciclagem a ser empregado, depende de vários fatores como a quantidade e a qualidade do material, o custo do material e do processamento, a existência de mercado para o produto final etc. Entre as principais dificuldades da reciclagem têxtil no país, relatada pelas empresas do ramo, estão a logística de coleta e transporte de resíduos, e a obtenção de resíduos separados de forma organizada (Amaral,2016; Zonatti, 2016). Como em grande parte das empresas não há um procedimento estabelecido, as confecções acumulam as sobras, de diversas cores e composição, misturadas com papel, plástico e, muitas vezes, com lixo comum, dificultando o processo de identificação e separação do material (Figura 2).

Os tecidos de composição mista, também representam um problema básico na reciclagem têxtil, tanto pela falta de precisão na classificação das peças, quanto pelas restrições dos processos de recuperação. Outro grande desafio é a falta de articulação entre os atores que participam do processo. Para o avanço da reciclagem têxtil é preciso que as empresas, inclusive de setores diferentes, desenvolvam um senso de cooperação mútua para que todo resíduo gerado em processos industriais possa ser recuperado.



Figura 2 – Resíduos têxteis de confecções do Arranjo Produtivo Local Polo Moda Praia de Cabo Frio/RJ.

Guimarães & Baruque-Ramos (2014) avaliaram o potencial da reciclagem têxtil no Brasil no âmbito da gestão ambiental, enquanto que Santos (2020), através de uma revisão sistemática, apresenta pesquisas que se debruçaram na identificação dos impactos ambientais gerados pelos resíduos têxteis.

A gestão dos resíduos envolve uma ampla agenda que inclui a redução da geração, implementação dos sistemas de logística reversa, aumento da recuperação dos materiais e disposição final adequada. O Estudo do Centro Brasileiro de Relações Internacionais (Cebri,2020), apontou que os países que mais avançaram na transição para a economia circular têm em comum o fato de que iniciaram o processo pela reciclagem de resíduos.

2.2 Panorama da reciclagem têxtil no Brasil

Apesar de o Brasil está entre os maiores produtores mundiais de têxteis e confeccionados a reciclagem ainda é pouco expressiva no setor e está concentrada nas regiões Sul e Sudeste do país. Segundo relato de Amaral (2016), dados de importações brasileiras de trapos e desperdício de têxteis (seda, lã,

fibras de algodão, fibras artificiais e sintéticas) indicam que há uma demanda nacional por resíduos que pode ser melhor explorada. Apesar disso, o estudo de Zonatti (2016) aponta que o mercado envolvido com reuso e reciclagem prefere importar resíduos têxteis, por conta de problemas como sujidades, mistura de diferentes matérias-primas, alto custo de mão-de-obra pra realizar a separação, falta de estímulo fiscais e tributários para comercialização dos produtos desenvolvidos, logística reversa, entre outras questões.

A PNRS tornou a gestão de resíduos um processo mandatório para as empresas, inclusive as de vestuário. Apesar disso, a reciclagem de resíduos têxteis ainda acontece de forma incipiente no Brasil. Como não há uma legislação ou orientação específica para o descarte desse tipo de material, a destinação é realizada, na maioria das vezes, de forma inadequada (Amaral, 2016; Zonatti, 2016).

O bairro do Brás, o maior polo comercial de moda na cidade de São Paulo, concentra cerca de cinco mil lojas distribuídas em cinquenta e cinco ruas. De acordo com dados da Logística Ambiental de São Paulo (Loga), nesse aglomerado são gerados, diariamente, cinquenta e quatro toneladas de resíduos têxteis. Somente em 2010, a coleta passou a ser realizada de forma mais estruturada e, atualmente, estabeleceu-se multas para o lojista que deposita o resíduo fora do horário de pré-determinado (Loga, 2021).

O Sustexmoda, grupo de pesquisa que dissemina informações e busca soluções efetivas para os impactos negativos causados pela cadeia têxtil e pela indústria da moda na economia, na sociedade e no meio ambiente, criou, em parceria com a Loga, o Residômetro Têxtil, instrumento que tem como objetivo publicar a estimativa do volume acumulado deste tipo de resíduo na cidade de São Paulo (Figura 3). Para o cálculo, foram considerados todos os dias úteis



Figura 3 – Residômetro Têxtil. Fonte: <https://www.sustexmoda.org/>

contados desde 15 de setembro de 2017 até os dias de hoje. De quando começou a funcionar até 17 de março de 2020, foram computadas trinta e seis mil toneladas de resíduos têxteis e dez mil toneladas de peças prontas. De 18 de março de 2020 a 30 de novembro de 2020, a Loga avaliou que houve uma redução de 40% do volume de material coletado em vista do confinamento da sociedade decorrente da pandemia da Covid 19. De 1º dezembro de 2020 até os dias atuais, a informação é de que a redução, em relação aos dados iniciais, foi de 15% (Sustexmoda, 2022). Dados atualizados do Residômetro estimam que já foram coletadas mais de quarenta mil toneladas de resíduos têxteis e quase quinze mil toneladas de peças prontas.

Outra iniciativa que acontece no bairro é o projeto *Retalho Fashion*, definido como um plano de gerenciamento de resíduos sólidos por meio da organização e promoção da coleta dos resíduos têxteis das confecções instaladas nos bairros do Brás, e também, do Bom Retiro (Carvalho, 2016), segundo maior polo produtivo do estado, com cerca de mil e duzentas confecções. Outro programa semelhante é o *Banco de tecido* que atua nas cidades de São Paulo, Curitiba e Porto Alegre, recolhendo qualquer tipo de sobra de tecido e armazenando-os em um repositório para serem revendidos. Outras ações que se destacam são a empresa *Renovar Têxtil*, que recolhe resíduos têxteis da região do Brás e do Bom Retiro e transforma-os em enchimentos, cobertores, feltros, e mantas térmicas e acústicas para os setores automotivos, da construção civil, de decoração etc. (Renovar, 2022), e o projeto *Retalhar*, que recebe uniformes profissionais usados por funcionários de empresas parceiras, submete-os a um processo de descaracterização, em seguida o tecido é desfibrado e transformado em matéria-prima para indústrias de outros segmentos. Mais de 274 mil quilos de uniformes já foram reaproveitados pelo projeto (Retalhar, 2022).

Na Universidade Estadual de Londrina (UEL), no Paraná, os professores de design Cláudio Sampaio e Suzana Barreto, em parceria com a professora de química Carmem Guedes e o pesquisador do Programa de Pós-graduação em Bioenergia Jonathan Baumi, conseguiram desenvolver e patentear um processo de reaproveitamento da poliamida proveniente da produção de roupas de esporte, utilizando glicerina, subproduto do biodiesel, como dissolvente. O resultado é a separação da poliamida do elastano, e a obtenção da poliamida na forma de pó (Baumi, 2015; Baumi et al., 2017).

No Rio de Janeiro, o projeto Recicladora, dirigido pela professora Ana Moreira, do Instituto Politécnico do Rio de Janeiro (IPRJ/UERJ), propõe a transformação de resíduos têxteis sintéticos do Arranjo Produtivo Local Polo Moda

Íntima de Nova Friburgo/RJ, para reintroduzir o material na cadeia produtiva da própria indústria da moda, mas com propostas para outras indústrias. Ainda em andamento, o projeto já alcançou o mercado local através de uma empresa que produz acessórios plásticos para a indústria de moda íntima da região, utilizando a técnica de moldagem por injeção (Moreira, 2019; Pacheco, Lugon & Moreira, 2016).

A região sudeste é uma das principais produtoras de têxteis e confeccionados do país, e o Estado do Rio de Janeiro possui importantes Arranjos Produtivos Locais APL na área de moda: APL Polo Moda Íntima (Região Serrana); APL Polo Moda Praia (Baixadas Litorâneas); APL de Confecção (Região Noroeste); APL Moda Carioca (Região Metropolitana); APL de Calçados e Acessórios da Baixada Fluminense (Região Metropolitana); e APL de Calçados e Acessórios (Região Médio Paraíba) (Zonatti et al., 2016). Ainda assim, no estudo realizado por Amaral (2016), observou-se a inexistência da atividade de reciclagem têxtil no Estado. Dentre as vinte e uma empresas listadas no estudo, a maioria delas está situada no Estado de São Paulo, seguido pelo Estado de Santa Catarina.

2.3

A Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, e regulamentada pelo decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022, dispõe sobre os princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público, e aos instrumentos econômicos aplicáveis. A PNRS integra a Política Nacional do Meio Ambiente e articula-se com a Política Nacional de Educação Ambiental, sendo caracterizada como um instrumento para avanços na gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

A lei tem como base alguns princípios:

- I - a prevenção e a precaução;
- II - o poluidor-pagador e o protetor-recebedor;
- III - a visão sistêmica, na gestão dos resíduos sólidos, que considere as variáveis ambiental, social, cultural, econômica, tecnológica e de saúde pública;
- IV - o desenvolvimento sustentável;

- V - a ecoeficiência, mediante a compatibilização entre o fornecimento, a preços competitivos, de bens e serviços qualificados que satisfaçam as necessidades humanas e tragam qualidade de vida e a redução do impacto ambiental e do consumo de recursos naturais a um nível, no mínimo, equivalente à capacidade de sustentação estimada do planeta;
- VI - a cooperação entre as diferentes esferas do poder público, o setor empresarial e demais segmentos da sociedade;
- VII - a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos;
- VIII - o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania;
- IX - o respeito às diversidades locais e regionais;
- X - o direito da sociedade à informação e ao controle social;
- XI - a razoabilidade e a proporcionalidade (BRASIL, 2010, Art.6º).

O relatório do Centro de Estudos em Sustentabilidade da FGV EASP (FGVces, 2020), aponta que diferente das legislações da União Europeia, que utilizam o princípio da responsabilidade estendida do produtor, a PNRS traz para a discussão o princípio de responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos (Quadro 4). Tal princípio reconhece que as responsabilidades de um determinado produto, desde o processo produtivo até a etapa pós-consumo, são de todos os atores envolvidos, desde fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, até consumidores, poder público, e catadores de materiais recicláveis.

Objetivo da Responsabilidade Compartilhada

- I - compatibilizar interesses entre os agentes econômicos e sociais e os processos de gestão empresarial e mercadológica com os de gestão ambiental, desenvolvendo estratégias sustentáveis;
- II - promover o aproveitamento de resíduos sólidos, direcionando-os para a sua cadeia produtiva ou para outras cadeias produtivas;
- II - reduzir a geração de resíduos sólidos, o desperdício de materiais, a poluição e os danos ambientais;
- IV - incentivar a utilização de insumos de menor agressividade ao meio ambiente e de maior sustentabilidade;
- V - estimular o desenvolvimento de mercado, a produção e o consumo de produtos derivados de materiais reciclados e recicláveis;
- VI - propiciar que as atividades produtivas alcancem eficiência e sustentabilidade;
- VII - incentivar as boas práticas de responsabilidade socioambiental.

Quadro 4 – Objetivos da Responsabilidade Compartilhada na Lei 12.305/2010. Fonte: desenvolvido pela autora a partir de BRASIL (2010).

Conforme a referida lei, em seu Artigo 3º, do Capítulo II, resíduo sólidos é definido como:

(...) material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010, p. 2).

E, a reciclagem como:

(...) processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração das suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas a transformá-los em insumos ou novos produtos (BRASIL, 2010, p.2).

Segundo as diretrizes aplicáveis aos resíduos sólidos na gestão e gerenciamento, os geradores devem observar a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos e, a disposição final ambientalmente adequada (Figura 4) (Lei 12.305/2010 art. 9º).

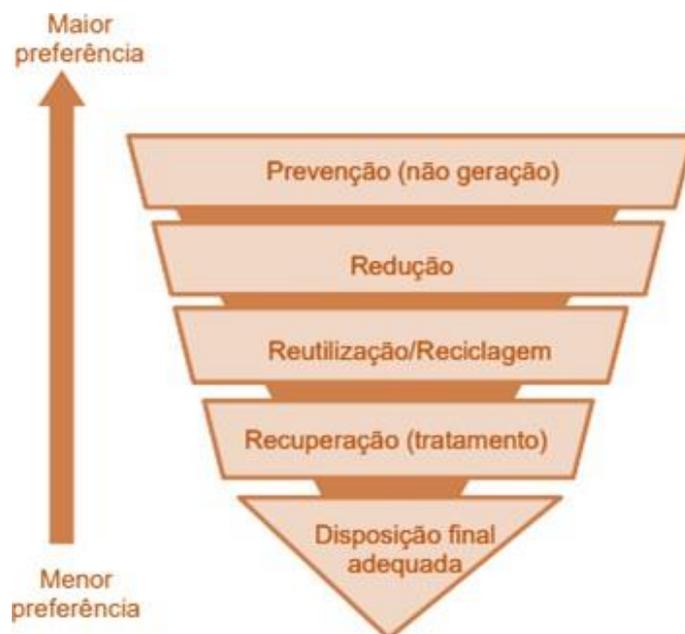


Figura 4 – Hierarquia da gestão de resíduos sólidos. Fonte: adaptado de Carvalho (2016, p.80).

Os Planos de Resíduos Sólidos (Figura 5), representam as estratégias de longo prazo, em âmbito nacional, para operacionalizar as disposições legais, os princípios, os objetivos e as diretrizes da PNRS. O Plano Nacional de Resíduos Sólidos tem início com o diagnóstico da situação dos resíduos no país,

abrangendo o conjunto de tipologias de resíduos de acordo com a PNRS, classificados quanto à sua origem. Os sistemas de logística reversa implantados são caracterizados e seus principais resultados atualizados são descritos. A partir da análise dos cenários, se estabelece um como referência, no qual devem ser contempladas tendências nacionais, internacionais e macroeconômicas.

Nos Planos Estaduais de Resíduos Sólidos, as microrregiões instituídas a cargo de municípios limítrofes abrangem atividades de coleta seletiva, recuperação e reciclagem, tratamento e destinação final dos resíduos sólidos urbanos, a gestão de resíduos de construção civil, de serviços de transporte, de serviços de saúde, agrossilvopastoris e, consideradas as peculiaridades microrregionais, outros tipos de resíduos. Os Planos Municipais podem estar inseridos no plano de saneamento básico previsto e, por fim, o Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, no nível industrial/comercial em função do tipo de resíduo gerado.



Figura 5 – Planos de Resíduos Sólidos. Fonte: adaptado de Carvalho (2016, p.82).

Depois de mais de uma década do estabelecimento da PNRS, em 12 de janeiro de 2022 foi deliberado o decreto nº 10.936 que regulamenta a lei e define as responsabilidades dos geradores de resíduos sólidos e do poder público; a coleta seletiva; a logística reversa; as diretrizes aplicáveis à gestão e ao gerenciamento dos resíduos sólidos; a participação dos catadores de materiais recicláveis e reutilizáveis; os planos de resíduos sólidos elaborados pelo poder público e os planos de gerenciamento de resíduos sólidos; os resíduos perigosos; o sistema nacional de informações sobre a gestão dos resíduos sólidos; bem como a educação ambiental na gestão dos resíduos sólidos.

O decreto também prevê multas para o descumprimento das regras sobre registro, gerenciamento e informação previstas na lei da PNRS (nº 12.305). Os consumidores que descumprirem as obrigações previstas nos sistemas de

logística reversa e de coleta seletiva ficarão sujeitos à penalidade de advertência, e na hipótese de reincidência no cometimento da infração, poderá ser aplicada a penalidade de multa na forma de quantia monetária (BRASIL, 2022).

Com relação a importação de resíduos sólidos, o artigo último do decreto prevê multa para quem importar resíduos sólidos perigosos e rejeitos, cujas características causem dano ambiental, à saúde pública e animal e à sanidade vegetal, ainda que para tratamento, reforma, reuso, reutilização ou recuperação.

A gestão de resíduos, além de ser um serviço de utilidade pública essencial, tem um papel de protagonista na economia circular como orientador do processo de design e manufatura, com vistas ao pleno retorno e aproveitamento dos produtos pós-industriais e pós-uso, como provedor de matéria-prima secundária, e como fornecedor de energia e combustíveis. Tudo isso reflete na redução da geração de resíduos e na mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

Para a Confederação Nacional da Indústria (CNI), a PNRS é a primeira política pública que aborda, de forma mais completa, a questão dos resíduos sólidos debatendo diversos instrumentos de gestão empregados em economias circulares (CNI, 2019), e promovendo a condução de práticas com base nessa abordagem. As empresas têm investido em pesquisa e tecnologia para encontrar novas maneiras de recuperar materiais recicláveis com alto valor agregado existentes nos seus diversos fluxos de resíduos. Todavia, a reciclagem é apenas um dos instrumentos para alcançar a circularidade dos materiais e deve ser precedida por uma série de iniciativas, como o redesenho de sistemas, processos e produtos. É preciso considerar que, mesmo sendo indispensável, a reciclagem, deve ser a última opção em economia circular, isto é, as atividades prioritárias são a não geração, redução e reutilização de resíduos.

3

Design circular: economia circular e pensamento sistêmico

O design circular combina os princípios da economia circular e o pensamento sistêmico para unir materiais, design e modelos de negócios, numa perspectiva inteiramente diferente sobre os produtos. Esse pensamento impulsiona a criatividade e habilita designers a criar de forma mais resiliente e próspera, levando em consideração a eliminação de resíduos e poluição, a circulação de produtos e materiais, e a regeneração da natureza.

Na economia circular (EC), os modelos de negócio, produtos e materiais são projetados para ampliar o uso e reuso, criando uma economia na qual nada é resíduo e tudo tem valor (EMF, 2021). Assim como nos sistemas naturais, o resíduo de um ciclo é reinserido no processo ou torna-se matéria-prima para abastecer outras cadeias produtivas, através do planejamento de todas as fases do ciclo de vida do produto. Este planejamento reúne princípios de escolas de pensamento que vieram antes e que serviram de base para a evolução do conceito de EC, como por exemplo, a ecologia industrial, *cradle to cradle* (do berço ao berço), capitalismo natural, economia azul, economia de serviços/desempenho, entre outras, cujas propostas tangenciam os objetivos de uma produção e consumo dentro dos limites planetários.

A estrutura da EC recomenda o uso de recursos existentes, a redução das ineficiências do processo produtivo e a análise dos resíduos ou subprodutos a partir de uma perspectiva regenerativa, do início ao fim. Entretanto, alguns autores alertam sobre a importância de não confundir circularidade com o pensamento linear em ciclos (Braungart, 2020). Não se trata apenas de um conjunto de procedimentos e meios para recolher e dar encaminhamento pós-venda ou pós-consumo aos bens industriais. A transição para a EC representa uma mudança sistêmica que constrói resiliência em longo prazo, considerando possíveis inovações e estratégias de redesenho dos modelos de negócio, sob um viés de valor compartilhado, que deve ser entendido como “uma estratégia de gestão para criar valor empresarial mensurável, mediante a identificação e a abordagem de problemas sociais que imbricam o negócio” (Weetman, 2019, p.431).

A essência do pensamento sistêmico está na ideia de que cada parte do sistema influencia o todo, assim, em cada estágio do processo de design deve-se mover para frente e para trás, entre as necessidades do usuário e a consideração do conjunto de elementos interligados, oscilando continuamente entre estas duas

perspectivas, igualmente críticas (EMF, 2021). Ao considerar as interconexões entre as diferentes partes do sistema e compreender como cada elemento se relaciona com o outro, é possível projetar soluções que tenham efeito positivo no sistema em geral, satisfazendo o usuário, mas também, proporcionando benefícios ambientais, sociais e econômicos.

O melhor aproveitamento dos recursos utilizados para a produção de bens começa no projeto. O produto deve ser pensado para que possa ser remanufaturado, reformado ou reciclado, mantendo os componentes e materiais circulando, no mais alto nível de valorização possível.

Na EC a cadeia de suprimentos se transforma em uma cadeia de recursos, melhorando a capacidade de usar materiais secundários (pós-industrial), ao mesmo tempo que estimula o setor de reciclagem (pós-uso). “Além dos fluxos principais, como entrega de produtos duráveis e embalados para atender aos pedidos, pode haver fluxos a granel de volumes previsíveis de subprodutos” (Weetman 2019, p.346).

Na abordagem de projeto circular, a etapa de projeto não é mais uma etapa da cadeia de valor, mas uma atividade que se coloca ao longo de todo o processo (EMF, 2021). O design circular é fundamentalmente sobre enxergar as conexões e projetar sob novos padrões, e como pôr em prática o potencial de cadeias de suprimento circulares, distribuídas, descentralizadas e resilientes. O design circular é sobre uma mudança sistêmica.

3.1

Conceito e estrutura da economia circular

A primeira vez em que o termo economia circular apareceu na literatura foi em 1990, no livro *Economics of Natural Resources and the Environment*, dos economistas David Pearce e Kerry Turner, onde os autores discutem as implicações da interação meio ambiente-economia a partir da representação gráfica dos estágios do sistema produtivo, problematizando a diferença básica entre os sistemas naturais e econômicos, levando em conta o fato de que os sistemas naturais reciclam seu próprio excedente. Investigando as características lineares e abertas dos sistemas econômicos, Pearce & Turner (1990) evidenciam que os resíduos são gerados em todos os estágios, desde o processamento dos recursos, até o descarte realizado pelos consumidores finais, salientando o fato de que esse fluxo acontece de forma ininterrupta.

Para eles, simplesmente dizer que o propósito final da economia é criar utilidade e organizar a capacidade financeira de um território de acordo com isso, é ignorar o fato de que, em última análise, de qualquer maneira, um sistema fechado estabelece limites ou fronteiras, para o que pode ser feito para alcançar essa utilidade (Pearce & Turner, 1990). À luz da contribuição do também economista Kennet Boulding, que descreve a terra como um sistema fechado e circular com capacidade assimilativa limitada, inferindo que a economia e o meio ambiente devem coexistir em equilíbrio (Geissdoerfer et al., 2017), os autores propõem que o sistema linear seja convertido em um sistema circular (Figura 6).

Na representação do diagrama de fluxo circular, Pearce & Turner descrevem como os recursos naturais influenciam a economia fornecendo insumos para produção e consumo, bem como servindo como sumidouro para produtos na forma de resíduos (Geissdoerfer et al., 2017).

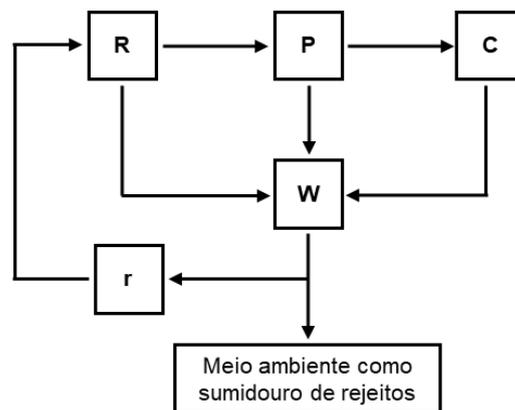


Figura 6 – Representação simplificada do diagrama de fluxo circular proposto por Pearce & Turner, onde “R” representa os recursos, “P” a produção, “C” os bens de consumo, “W” os resíduos e “r” a reciclagem. Fonte: adaptada de Pearce & Turner (1990, p.38).

Entretanto, somente em 2013 o conceito de EC foi propagado através da Ellen MacArthur Foundation (EMF), que se tornou referência no assunto, com a publicação do relatório *Towards the Circular Economy*. Desde então, a compreensão contemporânea da EC e suas aplicações práticas em sistemas econômicos e processos industriais, evoluiu para incorporar os conceitos de várias escolas de pensamento convergente (Figura 7) – a economia do desempenho, capitalismo natural, economia azul, *cradle to cradle* e ecologia industrial, cujos objetivo, estratégia e princípios podem ser apreciados no quadro 5 – e foi definida como um sistema restaurador e regenerativo por intenção e design, que visa manter produtos, componentes e materiais em sua maior utilidade e valor (EMF, 2013). A EC também pode ser entendida como um modelo econômico baseado

em separar crescimento e desenvolvimento da extração, produção e consumo de recursos finitos (Modifica, FGVces & Regenerate, 2020), e, frequentemente, é descrita como uma combinação de atividades de redução, reutilização e reciclagem (Kirchherr, Reike & Hekkert, 2017).

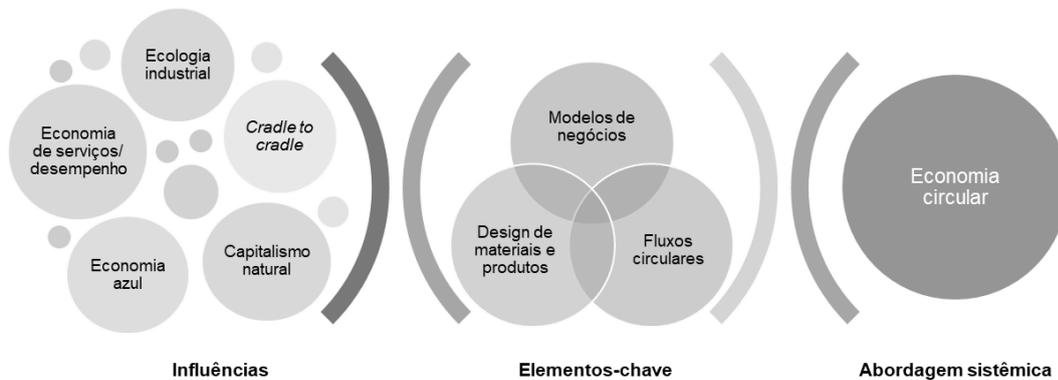


Figura 7 – Evolução da economia circular. Fonte: adaptada de Weetman (2019, p.44).

A circularidade se apresenta como um desdobramento e uma radicalização do pensamento sustentável reivindicando o fim da extração de recursos naturais não renováveis e propondo uma nova perspectiva sobre a matéria-prima e o lixo (Braungart & McDonough, 2002; Senai-SP, 2020). A EC amplia a cadeia de valor para abranger todo o ciclo de vida do produto ou serviço, propondo uma abordagem sistêmica onde o todo e cada uma das partes encontram-se ligados através de interações constantes (Weetman, 2019). Esse relacionamento, baseado em conectividade e dinamismo, envolve diferentes vínculos entre os componentes do sistema. Esse pensamento sistêmico ajuda nas decisões de projeto e evita consequências inesperadas.

Nesse sentido, é também importante que designers conheçam melhor os materiais, os avanços nas técnicas de construção, processos, e toda a cadeia, para que possam ampliar as possibilidades de solução em cada etapa do ciclo de vida do produto. Além disso, é preciso aprender a projetar conjuntamente e promover relações entre os diferentes atores, articulando-os para convergir interesses econômicos e ambientais.

Escola	Objetivo	Estratégia	Princípios
Economia do desempenho (Walter Stahel)	Focar na venda de serviços, em vez de bens, internalizando todos os custos.	Combinar design sistêmico, inovação técnica e comercial, no âmbito de economias regionais, com na recomercialização de bens e ampliação do ciclo de vida dos produtos/componentes.	<ul style="list-style-type: none"> • Conservação da natureza • Limite da toxicidade • Produtividade dos recursos • Ecologia social • Ecologia natural
Capitalismo natural (Paul Hawken, Amory Lovins e Hunter Lovins)	Sobrepôr os interesses ambientais e empresariais, aumentando o lucro ao mesmo tempo que resolve os problemas ambientais.	Adotar tecnologias inovadoras e reconsiderar práticas nocivas com ênfase no “design sistêmico”.	<ul style="list-style-type: none"> • Aumentar a produtividade de recursos • Inspiração na natureza • Fluxo contínuo de serviços • Reinvestir em capital natural
Ecologia industrial (Thomas Graedel)	Ajudar as empresas a compreender como usam os recursos-chave, como monitoram os fluxos de materiais, energia e água, e como se responsabilizam pelo produto durante todo o ciclo de vida.	Otimizar o consumo de energia e materiais, e minimizar a geração de resíduos através do intercâmbio de recursos.	-
Economia Azul (Gunter Pauli)	Questionar todos os materiais usados na produção, eliminar resíduos e qualquer subproduto.	Basear soluções na física, usando sistemas naturais de nutrientes, matérias e energia como modelo ideal.	<ul style="list-style-type: none"> • Substituição de uma coisa, por nenhuma outra • Cascadeamento de nutrientes e energia
Cradle to cradle (McDonough e Braungart)	Alcançar a “ecoficácia”, induzindo a inovação e liderança para objetivos positivos.	Encorajar uma abordagem de pensamento sistêmico, reenquadrando o design para torna-lo regenerativo.	<ul style="list-style-type: none"> • Saúde dos materiais • Reutilização de materiais • Energia renovável • Manejo de água • Justiça social

Quadro 5 – Escolas de pensamento referência para a economia circular. Fonte: desenvolvido pela autora a partir Weetman (2019).

Um dos pontos focais do modelo de EC é promover ativamente a restauração dos sistemas naturais ao mesmo tempo em que busca alternativas para produzir sem causar impactos negativos ao meio ambiente. Suas práticas são norteadas por alguns princípios fundamentais (EMF, 2013; Muthu, 2018; Weetman, 2019):

- **Projetar resíduos:** não existe resíduo quando um produto é projetado, por intenção, para desmontagem, reforma e remanufatura;

- **Resiliência através da diversidade:** modularidade, versatilidade e adaptabilidade são recursos que precisam ser priorizados, e os sistemas naturais devem servir de modelo na busca de soluções sustentáveis;
- **Energia renovável:** todo processo circular deve analisar a energia envolvida no processo de produção, e todos os elementos devem priorizar fontes de energia renováveis;
- **Pensar em sistemas:** entender como as partes se influenciam dentro de um todo é essencial. O pensamento sistêmico enfatiza o fluxo e a conexão ao longo do tempo, e tem o potencial para abranger condições regenerativas;
- **Resíduo como nutriente:** a capacidade de reintroduzir produtos e materiais em ciclos técnicos, ou biológicos através de *loops* restauradores não tóxicos.

Catherine Weetman, referência internacional em EC e cadeia de suprimentos, integrou diferentes abordagens circulares para criar uma estrutura genérica da EC formada por seis blocos: inputs circulares, design de produto, design de processo, fluxos circulares, modelos de negócios e relacionamentos, e capacitadores e aceleradores (2019) (Figura 8). A autora explica que nesta disposição, *os inputs circulares* são recursos sustentáveis, seguros, não tóxicos, renováveis e, preferencialmente, reciclados; o *design do produto*, capacita e encoraja fluxos circulares para manter o produto, as partes componentes e os materiais circulando

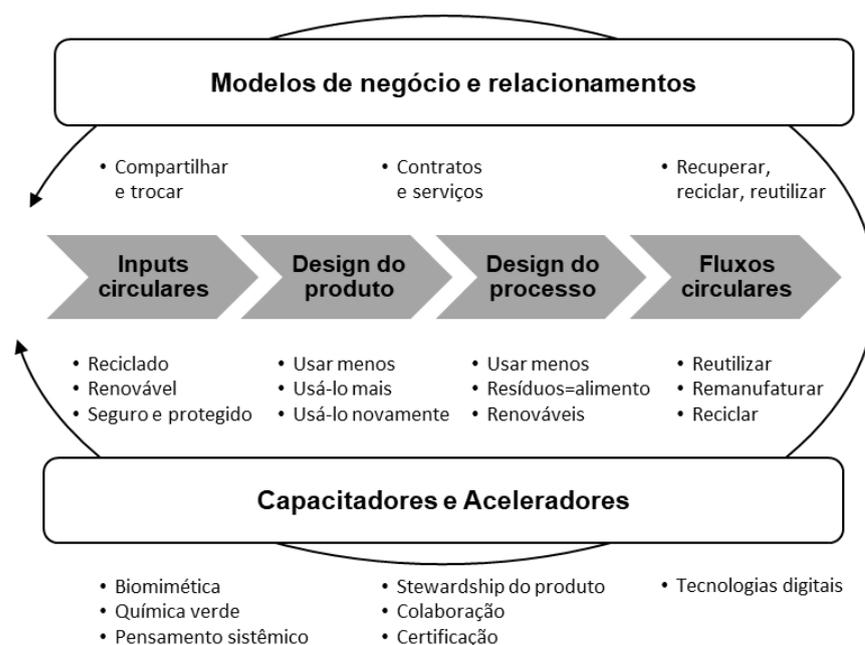


Figura 8 – Estrutura genérica da economia circular. Fonte: adaptado de Weetman (2019, p. 63).

pelo maior tempo em ciclos sucessivos; o *design do processo* inclui o planejamento de fluxos circulares para preservar os recursos através do desenvolvimento de subprodutos e coprodutos para novos ciclos de vida, ou de fluxos simbióticos com outras indústrias; o bloco, *fluxos circulares*, contempla as opções de revenda ou compartilhamento do produto, atribuição de novos usos, ou reciclagem de materiais e/ou componentes para que sejam usados em outro ciclo produtivo; os *modelos de negócio e relacionamentos*, promovem a circulação dos materiais, partes componentes e produtos através de serviços de compartilhamento, sistemas de troca, reparos, reciclagem ou revenda; por fim, o bloco *capacitadores e aceleradores* permite a escolha de melhores materiais, processos, desenvolvimento de subprodutos e o uso de tecnologias digitais.

A relação entre recurso e valor é um dos pontos-chave do debate sobre a EC. Weetman (2019) descreve que a reconcepção de produtos e mercados, a redefinição de produtividade na cadeia, e o desenvolvimento de arranjos produtivos locais, são três formas de criar valor compartilhado. Cada empresa funciona com uma rede complexa de partes interessadas e, segundo a autora, é nesse ambiente que surgem novas oportunidades sob a perspectiva exclusiva de cada grupo, para compreender como capturam, destroem ou perdem valor. A experiência de olhar para o problema do ponto de vista do usuário ou do fornecedor ou da comunidade em torno das fábricas da cadeia de suprimentos permite que novas conexões sejam estabelecidas em busca de soluções para os mais variados problemas.

O primeiro passo para a transição da lógica linear para a circular consiste em analisar as oportunidades de inovação nos modelos de negócios das empresas possibilitando a criação de melhores processos, produtos e serviços, expandindo a proposição de valor e capturando valores perdidos e não percebidos por todas as partes interessadas (CNI, 2018). No Brasil, já são identificadas oportunidades de novos modelos de negócios com geração de investimento e emprego como, por exemplo, nos setores de design e recuperação de materiais que inclui a engenharia reversa, reciclagem, reuso e remanufatura. Nesse contexto, a indústria têxtil e de confecção, com novos materiais e cadeias de valor circulares, é citada como segmento potencial para pôr em prática as abordagens de economia circular (MDR, 2019).

A Rota da Economia Circular (REC) foi estruturada no Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR, 2019), com a justificativa de criar alternativas sustentáveis de gestão e encaminhamento produtivo de resíduos, promovendo a inclusão produtiva e o desenvolvimento regional a partir do seu aproveitamento

econômico. Até o final de 2020 apenas dois polos haviam sido estruturados no país, o Cerrado Circular e o Paraíba Circular.

De acordo com o estudo realizado pelo Centro Brasileiro de Relações Internacionais (CEBRI), fundamentado nas experiências de EC na China, Chile e países da União Europeia, dentre as principais agendas relacionadas à transição para a EC estão (Dubeux & Campos, 2020):

- Adoção do princípio da responsabilidade estendida do produtor;
- Implementação gradual dos sistemas circulares com priorização de produtos e adoção de metas quantificáveis;
- Fomento ao design de produtos sustentáveis visando (i) o aumento da durabilidade, a reusabilidade, e a reparabilidade dos produtos; (ii) a redução do uso de substâncias químicas perigosas; (iii) a redução da obsolescência prematura; (iv) o aumento do conteúdo de matéria-prima secundária; (v) a redução da pegada de carbono no ciclo de vida; e (vi) o aumento da eficiência do uso da energia e de recursos em geral;
- Redução do uso de embalagens, principalmente plásticos, pela prevenção de utilização de embalagens e incentivo à produção de embalagens reutilizáveis e recicláveis;
- Criação e promoção de mercados para matérias-primas secundárias;
- Promoção da simbiose industrial e novos modelos de negócios.

A PNRS, que foi apresentada no capítulo anterior, além de alguns programas e planos regionais, estimulam a adoção de práticas circulares em busca da sustentabilidade.

A economia circular é um modelo no qual a redução no consumo de recursos corresponde a benefícios econômicos e competitivos, aumentando a resiliência do sistema. No entanto, para que isso ocorra, é imprescindível que haja a integração de toda a cadeia, bem como dos atores que dela fazem parte, ampliando as suas interações ao longo do tempo.

3.2 Pensamento sistêmico

Um sistema pode ser entendido como um conjunto de elementos que estão coerentemente interconectados para a realização de alguma coisa (Meadows,

2008). Em um sistema, todos os elementos e interações são essenciais, e cada componente exerce um papel relevante.

Como um sistema regenerativo, a EC pode ter muitas consequências positivas que melhoram a qualidade de vida, a comunidade e o meio ambiente. Aprender a pensar em sistemas faz parte da alfabetização para o processo de mudança. Trata-se de algo mais amplo do que apenas a inovação do produto, e não está atrelada somente a uma questão de inovação tecnológica, mas também sociocultural e organizacional (Vezzoli, 2010). A abordagem sistêmica leva em conta, não somente os produtos e os processos no escopo do design, mas a ideia de que o projeto deve considerar todo o ciclo de vida.

Os membros de um sistema são caracterizados como atores socioeconômicos, com competências e habilidades específicas, e pelas relações de interação e parceria estabelecidas entre eles. Vezzoli (2010) descreve que para configurar um sistema é preciso entender quem são os atores mais apropriados e quais as melhores interrelações possíveis. Assim, as decisões de projeto devem focar na morfologia e na arquitetura do produto, e em toda a sua trajetória até o pós-uso, tendo como premissa a eficiência dos recursos.

A cadeia de suprimentos tradicional possui uma natureza fragmentada, onde fornecedores e fabricantes realizam seus processos de forma independente, exercendo pouca influência uns sobre os outros. Na indústria da moda, de uma forma geral, os varejistas e as marcas não fabricam seus produtos, ao invés disso, fornecem as especificações para redes hierarquizadas de fornecedores em diferentes localidades (Figura 9).

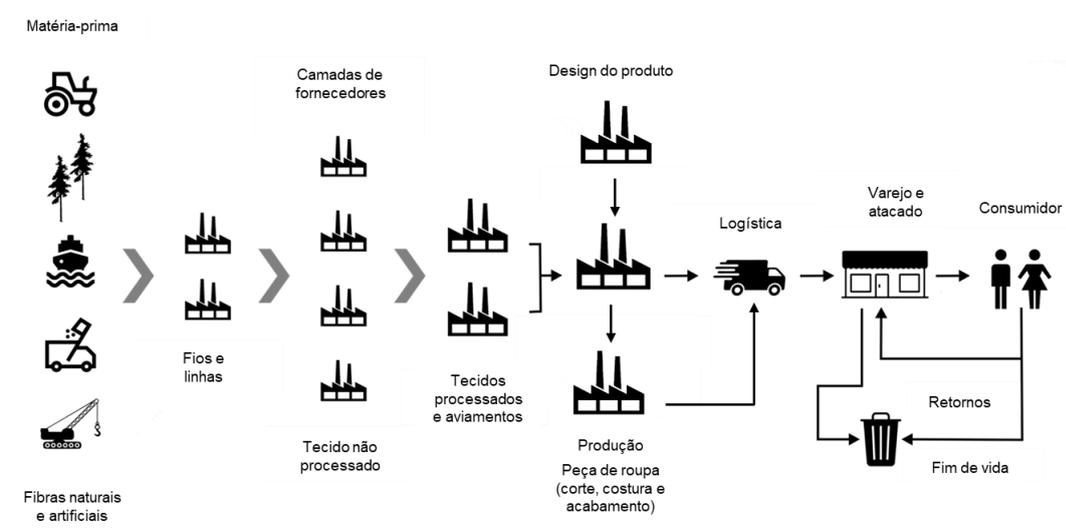


Figura 9 – Representação simplificada da cadeia de suprimentos da indústria da moda. Fonte: adaptada de Weetman (2019, p 226).

A ilustração apresenta os processos típicos da cadeia de suprimentos da moda, começando com a extração de matéria-prima para fabricação das fibras; depois, de fios e linha; em seguida, a fabricação de tecidos e aviamentos; processos de acabamento têxtil; produção; e, por fim, a logística, que envolve a gestão, armazenamento e distribuição. Este tipo de cadeia de suprimento é particular do modelo de produção linear, começa com a extração de recursos e termina com o descarte. Mesmo estabelecendo um sistema, os elementos não constituem uma conexão.

Projetar para a mudança requer a compreensão do processo e da sua complexidade. A abordagem sistêmica eliminará os resíduos que hoje são encaminhados para aterros sanitários ou para incineração, aumentará a produtividade dos recursos, reduzirá as emissões de carbono e os danos ambientais, e fornecerá alternativas à energia do lixo. O pensamento sistêmico é uma ferramenta para redesenhar as cadeias de suprimento e não apenas os produtos.

3.3 Cadeia de suprimentos circulares

A circularidade amplia a cadeia de valor e a sustentabilidade dos processos produtivos mantendo os materiais e recursos na economia pelo maior tempo possível, minimizando a geração de resíduos. Existem diferentes maneiras de incorporar a circularidade nos modelos de negócio e estas oportunidades são delineadas pelos quatro blocos que compõem o fluxo central da estrutura genérica da EC, formando a cadeia de design e suprimentos (Figura 10).

As etapas sequenciais do centro da estrutura abrangem os inputs circulares, design do produto, design do processo e os fluxos circulares. Segundo Weetman (2019), embora possa haver oportunidades de flexibilizar alguns aspectos desses elementos como, por exemplo, para reduzir riscos em caso de variação de custos

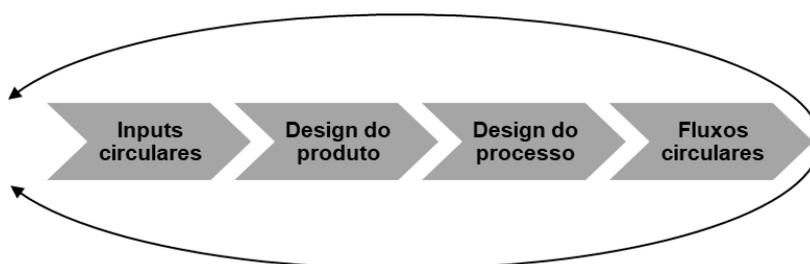


Figura 10 – Cadeia de design e suprimentos. Fonte: adaptada de Weetman (2019).

ou escassez de matéria-prima, basicamente, o design e a lista de materiais induzem as decisões sobre captação, abastecimento ou provisionamento e logística, não o contrário.

O design do produto é um bloco substancial no processo. É nesta etapa que se define limites, que se amplia a flexibilidade na seleção dos inputs, que se determina a modulação da resiliência e a agilidade na cadeia de suprimentos (Weetman, 2019). Por esse motivo, nesta investigação, numa releitura da cadeia de design e suprimentos proposta por Weetman, entende-se que este bloco deve anteceder todos os outros, visto que é a partir do projeto que se define o ciclo de vida do produto (Figura 11).

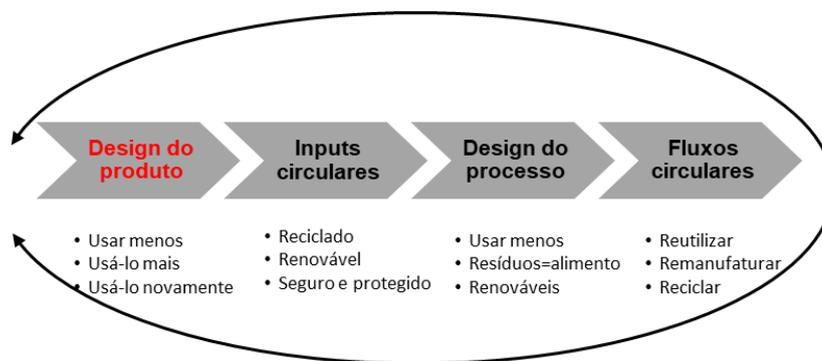


Figura 11 – Releitura da cadeia de design e suprimentos. Fonte: desenvolvida pela autora a partir de Weetman (2019).

Design do produto

Os objetivos do bloco design do produto são: *usar menos*, eliminando desperdício de materiais ou inputs em todos os estágios do processo e reduzindo o uso de materiais virgens; *usá-lo mais*, permitindo a reparação, desmontagem e substituição de componentes para conserto ou atualização do produto; e *usá-lo novamente*, recuperando recursos do processo e do fim de uso.

O bom design do produto contribui para a recuperação dos recursos por meio de estratégias estabelecidas no projeto, que darão as coordenadas para todas as outras etapas da cadeia (Figura 12).

No item 3.2, foi apresentado o conceito de EC, definido por EMF (2013), como *um sistema restaurador e regenerativo por intenção e design*, ou seja, enquanto a prática contemporânea do projeto pensa o produto até o momento que ele é entregue ao usuário, no modelo de produção circular deve-se incluir as

etapas de uso e de fim de vida, tendo em consideração os princípios da EC para reintroduzir produtos e materiais em ciclos técnicos ou biológicos através de *loops* restauradores. Essas percepções devem ser incorporadas ao design do processo e refletidas em diferentes abordagens como no caso do design de vestuário,

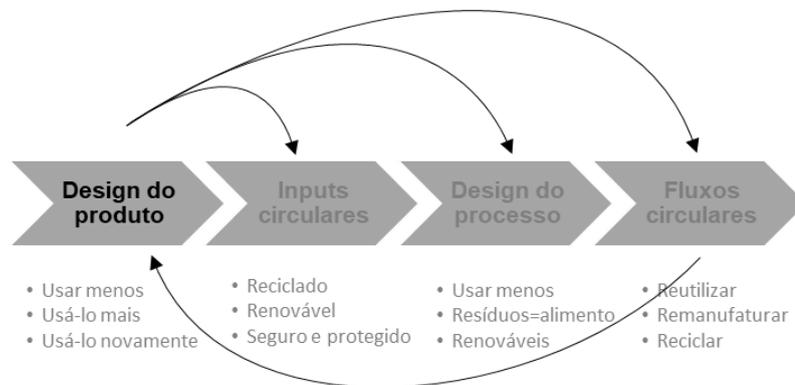


Figura 12 – Objetivos do design do produto na estrutura genérica de economia circular. Fonte: desenvolvida pela autora a partir de Weetman (2019).

projetar a peça para ser multifuncional, modular, reformada, de longa duração etc., ou ainda, pensar um sistema de produção de ciclo fechado, onde a roupa possa ser totalmente reciclada ou compostada no fim da sua vida útil (Gwilt, 2014). O design do produto evolui com apoio de novos materiais, processos, inovações em reciclagem, e à medida que as empresas identificam novas maneiras de reter valor incorporado (Weetman, 2019).

Inputs circulares

Depois do projeto do produto, no bloco *inputs circulares*, define-se os materiais que serão usados na produção, priorizando o uso *reciclados*, *renováveis*, *seguros* (para os sistemas humanos e para os seres vivos) e *protegidos* (no sentido da captação e da acessibilidade).

Substituir materiais virgens por inputs recuperados e reciclados é o objetivo-chave desse bloco. Isso pode ser feito através de estratégias que permitam reinserir os materiais no próprio ciclo produtivo ou colaborar com outras empresas capazes de produzir subprodutos ou coprodutos com os resíduos do processo (Weber, 2018; Duarte & Sanches, 2022).

Muitos pesquisadores estão dedicados a encontrar maneiras eficazes de separar os resíduos compostos e misturados para que sejam transformados em materiais reutilizáveis, ou nutrientes para outros ciclos (Hussein et al., 2021;

Valerio, Muthuraj, Codou, 2020). Na indústria de vestuário, como foi abordado no capítulo 2, um tecido de composição mista torna o processo de reciclagem muito mais complexo (Figura 13). Por isso, numa cadeia de suprimentos circular é desejável que o produto seja monomaterial para facilitar a sua recuperação após o fim da sua vida útil.

Na figura, o tecido da calça jeans é composto por três tipos de fibras, uma fibra natural e duas sintéticas (51% algodão, 32% elastano e 17% poliamida). Neste exemplo, além da mistura, tem-se como agravante o fato de a composição utilizar tecidos de classes diferentes, reduzindo ainda mais as possibilidades de manter o valor dos materiais recuperados e, ao mesmo tempo aumentando os custos de processos de reciclagem.



Figura 13 – Etiqueta de calça jeans de composição mista.

A Adidas®, empresa de equipamentos esportivos, em parceria com a *Parley for the Oceans*, uma rede global voltada à conscientização, preservação e limpeza dos oceanos, desenvolveu em 2015 o protótipo Ultra Boost, um tênis com cabedal feito de fios e filamentos recuperados e reciclados de resíduos oceânicos e redes de pesca ilegal em alto mar, e o solado produzido com a tecnologia de manufatura aditiva, usando poliamidas recicladas (Figura 14).

Utilizar materiais renováveis ao invés de materiais finitos é outro propósito do bloco inputs circulares. Para isso, a busca de materiais alternativos de fontes não convencionais tem sido incentivada, tal como, o uso de resíduo agroalimentar

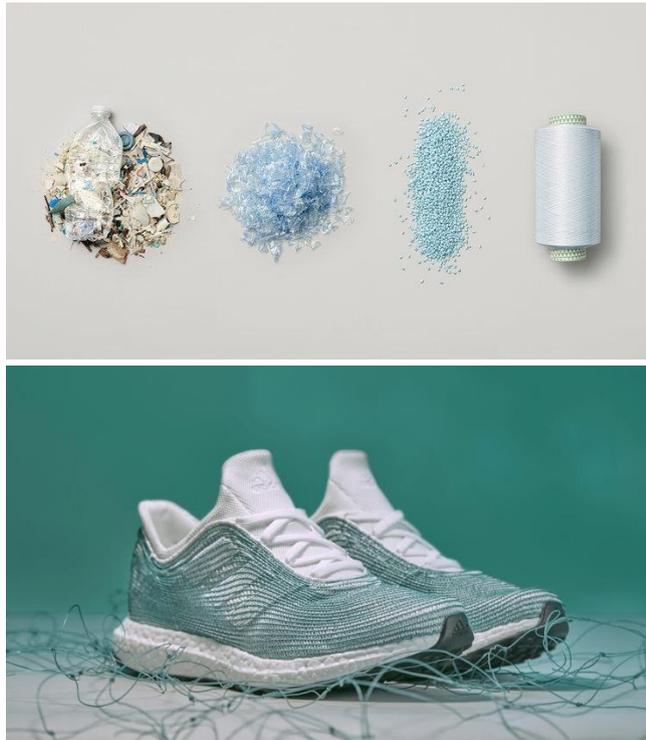


Figura 14 – Protótipo Ultra Boost desenvolvido com materiais recicláveis. Fonte: https://www.adidas.com.br/gr_originals_parley

na produção de tecidos circulares que podem ser regenerados no fim de sua vida útil (Pinheiro, 2021; Neto et al., 2022). A Piñatex® é um têxtil natural inovador feito de resíduos de fibra da folha do abacaxi, um subproduto da agricultura existente, e o seu uso cria um fluxo de renda adicional para as comunidades agrícolas (Figura 15). As inovações entre diferentes setores representam o potencial da circularidade em estabelecer redes de colaboração entre as indústrias, e reflete na redução do impacto ambiental gerado por ambas.



Figura 15 – Extração da fibra e processo de secagem Piñatex®. Fonte: <https://www.ananas-anam.com>

Sobre o uso de materiais seguros e protegidos, o foco está em garantir que a matéria-prima seja segura para a saúde humana e para os demais seres vivos, livre de toxinas, ou que envolvam riscos na fase de extração e durante a fabricação. Quando for possível usar um material biológico, no lugar de um material técnico, deve-se fazê-lo.

Design do processo

Na etapa de design do processo analisa-se cada etapa do processo produtivo, suas dependências, entradas e saídas de materiais e outras variáveis, investigando possibilidades de aplicar os princípios da economia circular. Também é importante considerar os recursos incorporados, como água e energia necessários para transformar ou processar os materiais. Os objetivos deste bloco são semelhantes aos do design do produto, incluem *usar menos*, considerar *resíduos como alimento*, e optar por *processos renováveis*.

O design do processo deve almejar a circularidade em todos os estágios ao longo da cadeia de suprimentos. O escopo inclui métodos de produção própria na empresa (*in-house*), assim como nos processos de *upstream* (design do produto, abastecimento e aquisição) e de *downstream* (distribuição e logística reversa), estejam eles sob controle próprio ou sejam gerenciados por fornecedores e parceiros. O *upstream* começa com a extração ou colheita de materiais, e pode ter impactos maiores do que os processos realizados na própria empresa. As avaliações do ciclo de vida ajudam a determinar os diferentes impactos de cada estágio, embora possam ser altamente complexas e demoradas.

Para a estratégia *usar menos*, é possível aplicar os princípios da eficiência de recursos, optando por inputs não totalmente utilizados ou ajustando o processo para eliminar a necessidade de novas entradas. Considerar *resíduos como alimento*, envolve incorporar a reciclagem de *loop* fechado, pretendendo recuperar inputs técnicos para a reutilização e extrair o mais alto valor e benefício dos inputs biológicos, como no caso da *Orange Fiber*, uma empresa italiana que produz tecidos sustentáveis a partir de subprodutos de frutas cítricas (Figura 16). De acordo com a empresa, em todo o mundo, são geradas cerca de 150 mil toneladas de subproduto de resíduos cítricos por ano, gerando grandes custos ambientais. A *Orange Fiber* é reconhecida internacionalmente como a melhor prática para a indústria da moda sustentável e está envolvida em várias iniciativas para ampliar os limites da sustentabilidade na cadeia de suprimentos de alimentos e de têxteis.



Figura 16 – Fibra celulósica à base de laranja e polpa de madeira. Fonte: <https://orangefiber.it>

Outra estratégia de design do processo, é sobre o uso de *renováveis* no lugar de recursos finitos. Alguns exemplos habituais dessa prática são os inputs de processos biológicos no lugar de compostos químicos, uso de energia de fonte renovável, reuso de água dos processos etc. A simbiose industrial, que nesta pesquisa é abordada com maior profundidade no capítulo 5, pode oferecer soluções potenciais de *loop* aberto em apoio a esses processos. Embora, como foi dito antes, o design do produto planeje e predetermine as ações das outras etapas da cadeia, ainda há espaço para decisões de captação e abastecimento através da colaboração entre equipes de diferentes empresas para promover trocas mais intensas entre comprador e fornecedor.

A colaboração e o relacionamento desenvolvem parcerias com prestadores de serviço, envolvendo logística, fabricação e análise de dados e, dentro da empresa, significa trabalhar em estreito entrosamento com as equipes de design e manufatura para aprofundar a compreensão das necessidades de cada setor, para facilitar a proposição de soluções.

Tendo representado os blocos centrais da estrutura, descreve-se a seguir, os blocos, superior, que simboliza os modelos de negócio e relacionamentos, e o inferior, que constitui os capacitadores e aceleradores.

Modelos de negócio e relacionamentos

Osterwalder & Pigneur (2010) definem modelo de negócio como a base sobre a qual uma empresa cria, entrega e captura valor. Um modelo de negócio circular é àquele que se estabelece a partir de sistemas de *loops* fechados ou abertos, promovendo a longevidade dos materiais e produtos. Este modelo é apoiado em formas de “consumo colaborativo”, ou seja, aluguel, troca, empréstimo etc. (Konietzko, Bocken & Hultink, 2019), isto significa, sistemas produto-serviço (Vezzoli, 2010), cujo foco está no desempenho e no resultado. Muitas pesquisas analisam tendências de afastamento do modelo comercial tradicional, baseado no ato de ter a posse de algo, ou seja, um modelo no qual a empresa fabrica um produto e vende ao cliente (Gloria, 2020).

O design de modelos de negócio e relacionamentos para uma economia circular exige diferentes perspectivas e abordagens não convencionais, devido às diversas implicações que causam à cadeia de suprimentos, como o aumento de consumíveis de manutenção, e dos fluxos reversos nos modelos de aluguel e serviços, além da necessidade de acompanhar os ativos (estoque, produtos inacabados etc.) e os produtos dos sistemas de compartilhamento, para garantir que estejam acessíveis e prontos para o próximo usuário.

Os modelos de negócio circulares são considerados a força motriz na transição para EC (Lewandovsky, 2016). São impulsionadores que criam valor para os diversos atores envolvidos e para o meio ambiente, à medida que reduzem o descarte de produtos e ampliam as possibilidades de relacionamento.

Capacitadores e aceleradores

Por fim, o bloco inferior, capacitadores e aceleradores, reforçam o apoio às estratégias de economia circular explorando novas formas de criar e captar valor em todo o conjunto de atividades desenvolvidas pela empresa, ou seja, desde a relação com os fornecedores até à fase da distribuição final. Ao mesmo tempo, os avanços da tecnologia incrementam a qualidade dos processos e ajudam a captar mais valor, influenciando as escolhas ou melhorando a circulação de materiais e produtos.

Os capacitadores são os mecanismos de mercado, novos ou renovados, que podem encorajar a reutilização de materiais e aumentar a produtividade dos recursos, e estão divididos em: abordagens para mudança de mentalidade – biomimética (Benyus, 2016), *química verde* (Lancaster, 2016), *pensamento*

sistêmico (Meadows, 2008; Osterwalder & Pigneur, 2010), e inovação frugal (Radjul & Prabhu, 2015) –; e tecnologias – *manufatura aditiva* (Hopkinson, Hague & Dickens, 2005; Volpato, 2017), *internet das coisas* (Buyya & Dastjerdi, 2016; Veneri & Capasso, 2018), *tecnologia autônoma, rastreamento de ativos, big data, computação em nuvem*, e *novos materiais* através de processos bioquímicos e de biorrefino (Tavares, 2018).

Com relação aos aceleradores, estes podem ser internos, quando ajudam as empresas a se tornar mais eficientes, competitivas, ou a desenvolver produtos, serviços e modelos de negócio; ou externos, quando fornecem condições para o progresso de modelos de EC. Faz parte deste escopo, a colaboração, certificação, *stewardship* do produto, tecnologias e inovações digitais.

A colaboração entre empresas e fornecedores, entre empresas do mesmo setor ou de setores diferentes, entre empresas e organizações de pesquisa, ou entre empresas e governo abre novas possibilidades para compartilhar conhecimento e encontrar maneiras de alinhar visões e objetivos (Weetman, 2019, p.154). As *certificações* ajudam a definir padrões para ingredientes éticos, ambientais, que respeitem o bem-estar animal, abrangendo todos os setores industriais. A *stewardship do produto*, é uma estratégia de gestão ambiental que estimula os produtores a assumir a responsabilidade por todo o ciclo de vida do produto, incluindo produção, uso e pós-uso. As *tecnologias e inovações digitais* permitem a conexão entre as partes interessadas, viabilizam a transparência da rede de abastecimento, e a criação de processos de produção alternativos.

A manufatura aditiva, por exemplo, que é abordada no próximo capítulo, exerce múltiplos impactos sobre *midstream* da cadeia (processo de fabricação) e repercute em parte do *downstream* (distribuição). Em uma cadeia de suprimentos circular, a manufatura aditiva pode reduzir consideravelmente a necessidade de transporte de matérias-primas e de produtos acabados, e a necessidade de embalagens primárias, secundárias e terciárias. Além disso, pode ser considerada uma tecnologia ecologicamente correta porque, praticamente, não gera desperdício ou resíduo no processo de impressão.

Um dos grandes desafios para a desenvolvimento de uma cadeia de suprimentos circular é a integração entre os vários atores envolvidos. Como afirma Weetman (2019), os profissionais de design, abastecimento, fabricação, logística, atendimento a consumidores e manejo de resíduos, precisam trabalhar em estreita colaboração para o desenvolvimento de soluções e melhorias. À medida que o modelo de produção circular se desenvolve e amadure, essas abordagens

atingem outros níveis, incentivando a captação de melhores materiais a partir de fontes resilientes, seguras e confiáveis.

As cadeias de suprimento circulares desenvolverão abordagens de ecossistemas industriais, com subprodutos e outros fluxos simbióticos. O foco da cadeia de suprimentos se deslocará dos fluxos diretos, que consistem na entrega de produtos ou serviços de forma convencional, e se concentrará na construção de uma rede de nutrientes que recebe e distribui grande variedade de materiais e produtos. As roupas serão projetadas para serem refeitas, desmontadas e recicladas, estimulando *loops* de inovação e, por consequência, ampliando a infraestrutura de pontos de coleta e de reciclagem.

A EC é uma proposta com potencial de mudar a qualidade da discussão contemporânea sobre desenvolvimento sustentável (Abramoway, 2014) e deve ser incorporada ao núcleo das cadeias globais de valor. O modo de produção circular supõe um design voltado para eliminar a noção de lixo, a partir de mecanismos que permitam ampliar exponencialmente o uso dos materiais e produtos (Braungart & McDonough, 2009). Trata-se de reorganizar as cadeias de suprimento criando novos fluxos, para seguir uma lógica de revalorização dos nutrientes de ciclos técnicos e biológicos.

As abordagens circulares implicam reconsiderar e redesenhar sistemas complexos, envolvendo colaboração e compartilhamento de conhecimento entre todas as partes interessadas. Nesse sentido, o escopo e a escala das cadeias de suprimento mudam profundamente com o envolvimento crescente tanto no *upstream* quanto no *downstream*.

4

Manufatura aditiva: tecnologia capacitadora para a economia circular

À medida que aumentam as preocupações com o meio ambiente ocorre uma crescente atualização das tecnologias que influenciam desde a criação de novos materiais até o desenvolvimento de novas técnicas, com o propósito de evitar desperdício de qualquer natureza (Bruno, 2017). A manufatura aditiva (MA), termo técnico para o que anteriormente era conhecido como prototipagem rápida e, mais recentemente, como impressão 3D (Santos, 2017), é um exemplo de tecnologia que proporciona condições para originar novos processos produtivos.

A MA é considerada uma tecnologia capacitadora essencial para implementar mudanças na cadeia de suprimentos, e exerce papel central na progressiva redução da distância entre a produção em massa, que enfatiza economias de escala, e a fabricação de produtos sob demanda, que elimina a necessidade de estoque (Bruno, 2017; Mojtabi, Torabi & Nonino, 2019; Tasé Velázquez, 2020). As motivações para o uso da manufatura aditiva variam de acordo com o setor de aplicação. Na indústria de vestuário, por exemplo, suprir a produção de aviamentos, acessórios, aparelhos e componentes da máquina de costura, reduzindo o tempo de desenvolvimento desses produtos, custos operacionais com matéria-prima, e os impactos relacionados ao transporte e distribuição.

Mas, como a manufatura aditiva pode possibilitar modelos circulares de produção e consumo? Explorar o tópico da MA sob a ótica da economia circular fornece uma compreensão mais abrangente das implicações do seu uso, para melhorar a sustentabilidade dos sistemas industriais e permitir novas configurações para a cadeia de suprimentos.

Para tanto, buscou-se compreender como funcionam os sistemas de manufatura aditiva, mais particularmente, a tecnologia de modelagem por fusão e deposição (*Fused Depositon Modeling* - FDM), para definir estratégias de recuperação dos resíduos têxteis utilizando-a como ferramenta. Os tópicos a seguir versam sobre o conceito, o processo, as formas de alimentação, parâmetros de extrusão, estratégias de preenchimento e construção, atributos construtivos e soluções em materiais reciclados para impressoras 3D FDM.

4.1 A tecnologia de manufatura aditiva

De acordo com a Organização Internacional de Normalização (ISO), historicamente, a prototipagem rápida (RP), surgida no final da década de 1980 com a introdução da tecnologia de estereolitografia, foi a primeira aplicação comercialmente significativa para a manufatura aditiva e, portanto, tem sido comumente usada como um termo geral para esse tipo de tecnologia. Gibson et al. (2015) explicam que o termo prototipagem rápida é usado por uma variedade de indústrias para descrever um sistema que cria rapidamente a representação do produto antes do lançamento final ou da sua comercialização. Em outras palavras, a ênfase está na materialização de algum produto, cujo resultado é um protótipo ou um modelo base para outras amostras e, eventualmente, referência para a produção do modelo final. Contudo, destaca-se que a diferença determinante é que no lugar de protótipos, atualmente, já é possível construir objetos aptos para o uso final através de processos de MA.

Volpato & Carvalho (2017) definem a MA como um processo de fabricação por meio da adição de sucessivas camadas de material, a partir de formas projetadas virtualmente com o auxílio de sistemas de desenho auxiliado por computador (CAD). Os objetos são fabricados em quatro operações (Figura 17), onde a primeira compreende a obtenção do modelo 3D, que pode se dar, basicamente, o projeto da forma geométrica ou do escaneamento digital do objeto; a segunda envolve a exportação do modelo no formato STL (*Standard Triangle Language* ou *Standard Tessellation Language*) e consolidação da peça de acordo com as propriedades fundamentais do material pretendido; a seguinte, inclui o planejamento do processo para a fabricação da camada (fatiamento e definição de estruturas de suporte e estratégias de deposição do material); e por último, a materialização da peça em uma impressora 3D (ISO/ASTM, 2021). Muitas vezes, o objeto precisa passar por um pós-processamento, como remoção de estrutura de suporte ou limpeza, no entanto, esta é considerada uma etapa separada do processo, uma vez que é realizada após a conclusão do ciclo de fabricação.

As tecnologias de MA se diferenciam umas das outras na forma como constroem suas camadas e/ou pela natureza da matéria-prima utilizada. Os processos estão divididos em três categorias: sistemas baseados em líquidos, *Stereolithography Jetting System*, *Direct Light Processing*, *High-Viscosity Jetting*, *Maple Process*; sistemas baseados em pó, *Selective Laser Sintering* e *Direct*

Metal Laser Sintering; e sistemas baseados em sólidos, *sheet lamination* e *Fused Deposition Modeling* (Conceição, 2018; Mwema & Akinlab, 2021).

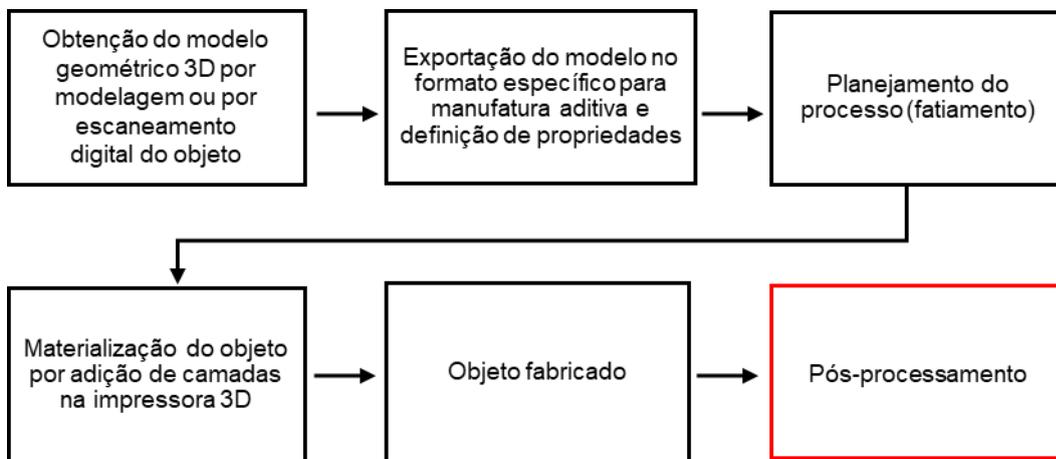


Figura 17 – Fluxograma das principais operações do processo de manufatura aditiva.

A MA por fusão e deposição de material (FDM) quando comparada aos outros sistemas, é considerada de baixo custo, de simples manuseio e pode ser utilizada em um ambiente doméstico ou de escritório (Gibson, Rosen & Stucker, 2015a; Trindade, 2019). É uma tecnologia bastante flexível que opera com uma diversidade de materiais como polímeros puros, compósitos de polímero com metais, polímeros cerâmicos, ou qualquer outro material que esteja ou possa ser transformado em uma pasta possibilitando a sua extrusão, e posterior cura ou secagem (Sun et al., 2008).

Com relação às dimensões de sustentabilidade, o uso da manufatura aditiva torna a cadeia de suprimentos mais simples e eficiente, reduz necessidade de transporte, apresenta menos perda de material, gera menos resíduo e não depende de moldes (Mojtaba, Torabi & Nonino, 2019). No lugar de grandes volumes de produtos acabados, fabricados em série, é possível produzir somente o necessário para atender cada pedido, possibilitando a customização em massa que é caracterizada pela capacidade de produzir uma peça única de acordo com as especificidades de cada usuário (Conceição, 2018; Weetman, 2019).

A eficiência de recursos, com melhorias nas fases de uso e produção; o prolongamento da vida útil, por meio de reparos, remanufatura e substituições de partes componentes; padrões socioeconômicos mais sustentáveis, como a conexão entre pessoa e produto e relações mais próximas entre produtores e consumidores, estão entre os benefícios potenciais no uso da tecnologia de MA (Despeisse e Ford, 2015; Durão et. al., 2017). Com esta tecnologia é possível

projetar cadeias de valor mais curtas, mais localizadas e mais colaborativas, e fabricar de forma descentralizada, autônoma e orientada ao usuário.

4.2 Manufatura aditiva FDM

Embora existam diferentes técnicas de criar extrusão, na manufatura aditiva, o aquecimento é a opção usada para derreter o material, através de um cabeçote constituído por um componente de elevação de temperatura (“b” na Figura 18), que é empurrado por um sistema de alimentação por motor em direção ao bico extrusor (Figura 18) (Gibson, Rosen & Stucker, 2015b).

Segundo a descrição de Volpato (2017), para se obter a geometria de cada camada, o cabeçote extrusor, de modo habitual, é montado sobre um sistema com movimentos controlados no plano X-Y, e a plataforma de construção (“e” na Figura 18) é constituída de um mecanismo elevador que a desloca para baixo, na direção do eixo Z, ao término de cada camada. Todavia, há a possibilidade de o cabeçote extrusor se deslocar para cima, enquanto a plataforma de construção permanece estacionária. E também há sistemas de impressão FDM que trabalham com camadas não planares.

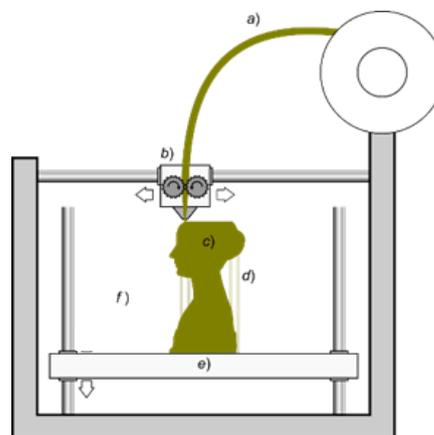


Figura 18 – Representação esquemática do sistema de impressão FDM, onde (a) filamento do material de alimentação; (b) cabeçote extrusor com bico extrusor do material; (c) objeto em construção; (d) estrutura de suporte; (e) plataforma de construção móvel; (f) área de construção do objeto. Fonte: Conceição (2018).

Dependendo do material, o bico extrusor pode trabalhar desde a temperatura ambiente até uma temperatura de fusão específica, como é o caso da extrusão de polímeros. Para materiais na forma de filamento, é essencial que

ao sair do bico, no estado pastoso, o mesmo se solidifique e aglutine rapidamente quando depositado na plataforma de construção ou sobre a camada previamente depositada. Essa solidificação deve ser relativamente rápida, para que o material mantenha a estrutura pretendida para a fabricação do objeto, porém lenta o suficiente para que a camada subsequente possa aderir à anterior (Friedrich & Walter, 2021). A precisão deste processo depende dos parâmetros definidos no planejamento da impressão, e da espessura do fio que é expurgado, que pode atingir a ordem de 0,1 mm (ISO/ASTM, 2021).

Manter a pressão contínua durante a deposição do material é um requisito do sistema de extrusão para que, combinada com uma velocidade controlada de deslocamento do cabeçote, possam manter a seção transversal do filamento constante (Volpato, 2017, p.146).

Alguns modelos de impressoras 3D FDM dispõem de plataformas de construção reclusas em câmaras fechadas que são mantidas aquecidas a uma temperatura inferior à do cabeçote de extrusão, de forma que o material solidifique quando em contato com a camada anterior, provocando a aderência.

4.3

Formas de alimentação

Há uma grande variedade de materiais utilizados na produção de filamentos para impressoras 3D FDM como madeira, concreto, materiais condutores, fibra de carbono, policarbonato, polipropileno, poliamida, magnéticos, halocrômicos, entre outros. Entretanto, de acordo com Conceição (2018), os filamentos termoplásticos de uso mais comum são o de ABS (acrilonitrila butadieno estireno), menos viscoso, resistente a impactos e brilhante, e o de PLA (poli (ácido lático)), que libera menos gases em sua queima e é biodegradável. Cada aplicação exige um tipo de material, uma vez que cada um possui características específicas de resistência e durabilidade (Dave & Davim, 2021).

Conforme Volpato (2017), as principais variações no processo de extrusão estão relacionadas ao modo como o cabeçote é alimentado. Geralmente, usa-se o material na forma de filamento contínuo, que é tracionado por roletes, empurrado para o interior do cabeçote e compelido pelo bico extrusor (Figura 19a). Volpato destaca que neste método o filamento deve possuir propriedades mecânicas que assegurem que não ocorrerá a flambagem (encurvadura do filamento) antes da

entrada no cabeçote. Além disso, as propriedades de escoamento do material (reologia) devem permitir um fluxo contínuo e constante durante o processamento.

Nesse sistema podem ocorrer interrupções na passagem do filamento, devido a possíveis variações de diâmetro ao longo do seu comprimento; aumento da temperatura do filamento antes da entrada no cabeçote, comprometendo a sua função de êmbolo; ou, ainda, variações na temperatura de extrusão, que podem aumentar a pressão necessária para expulsar o material através do bico.

Outra opção é usar o material na forma de bastões finos dentados, com perfil de cremalheira nas laterais, que são obtidos por meio do processo de moldagem por injeção (Figura 19b). Neste caso, os roletes são substituídos por engrenagens que conduzem o filamento de forma mais controlada, melhorando a precisão na deposição de cada camada.

Materiais granulados ou em forma de pó que possam ser processados por um parafuso extrusor, apresentam-se como uma variação do processo de extrusão (Figura 19c). Neste caso, o cabeçote processa o material de forma similar a uma micro extrusora de plástico. Este método também tem sido denominado Fabricação por Granulado Fundido (*Fused Granular Fabrication* - FGF) ou impressão 3D de pellets, e a relevância desse processo se deve ao fato de permitir a ampliação da gama de materiais utilizados, a redução do custo e do ciclo de produção do filamento, e o aproveitamento efetivo dos resíduos de impressão. E depois, se tratando de polímeros reciclados, evita-se um processamento adicional ao filamento, o que pode ser relevante para manter suas propriedades mecânicas.

A impressão 3D de pellets baseia-se na tecnologia de extrusão de plásticos, onde os pellets são simultaneamente aquecidos, misturados e conduzidos por meio da ação giratória do parafuso de Arquimedes (Thompson, 2015). A FGF é indicada para a impressão de objetos com geometria menos complexa, sem ângulos que demandem suporte, e com espessura de parede maior que 2mm (Woern & Pearce, 2018).

Por último, a alimentação pode ocorrer com o material na forma inicial pastosa, que é compelido através da ação de um êmbolo com pressão exercida em direção ao bico extrusor (Figura 19d e 19e). Este princípio tem alcançado avanços na extrusão de biomateriais (Ozbolat & Hospodiuk, 2016), tintas funcionais, suspensões coloidais e tintas biológicas (Duty et al., 2018). Tais sistemas podem ser aquecidos ou não, a depender das propriedades do material que está sendo utilizado.

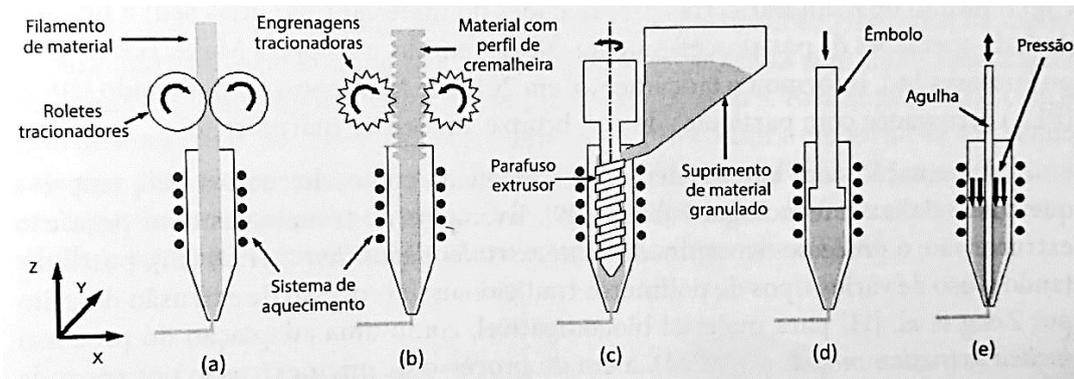


Figura 19 – Princípios de alimentação dos processos de extrusão de material: filamento contínuo (a) ou varetas com perfil de cremalheira (b), material granulado, em pó ou em pasta processados por parafuso extrusor (c), êmbolo (d) ou pressão com agulha controladora de vazão (e). Fonte: Volpato (2017, p. 147).

Com relação às propriedades térmicas dos materiais, Stevens & Covas (1995) explicam que o volume específico dos polímeros no estado sólido aumenta, praticamente, de forma linear com a temperatura para que o coeficiente de expansão pode ser usado de forma útil. No estado de derretimento, a expansão é também, praticamente, linear com a temperatura, mas de forma útil a uma taxa mais alta do que no estado sólido. Segundo os autores, os polímeros semicristalinos, como é o caso da poliamida, mostram um aumento repentino do volume específico, logo abaixo do ponto de fusão, devido à desordem das regiões cristalinas ao estado completamente amorfo da fusão. A magnitude deste aumento dependerá do grau de cristalinidade no polímero sólido.

4.4

Parâmetros de extrusão, estratégias de preenchimento e construção

Os principais parâmetros do filamento extrusado são a largura (contorno e preenchimento), distância entre filamentos (*gap*) e espessura da camada. A largura e a espessura do filamento são definidas pelo usuário no sistema de planejamento, geralmente dentro de uma faixa de opções permitida, previamente testada e calibrada (Volpato, 2017).

O processo de fabricação de uma camada inicia-se com a deposição do filamento formando o contorno ou perímetro fechado da seção transversal do objeto, em seguida, o interior desta área é preenchido, considerando que a largura do filamento do contorno pode ser especificada com um valor diferente da largura do filamento do preenchimento (Figura 20) (Dave & Davim, 2021).

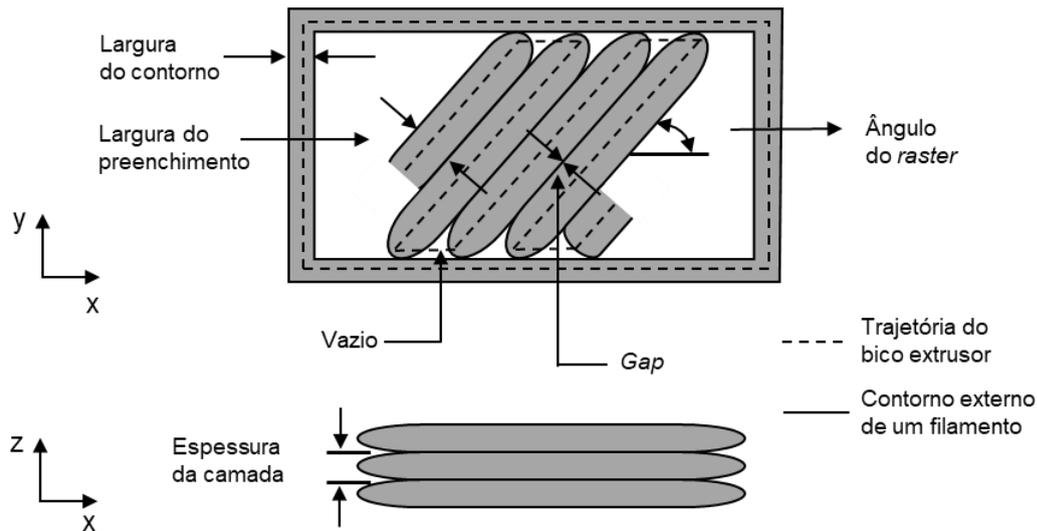


Figura 20 – Representação da geometria transversal do filamento extrusado com os parâmetros de controle: largura do filamento, espessura da camada, *gap* e distância entre filamentos. Fonte: adaptada de Volpato (2017, p.158).

Outro critério que precisa ser definido no processo de extrusão é o espaçamento entre filamentos adjacentes (*gap*). Friedrich & Walter (2021) explicam que a deposição pode ter como objetivo um contato lateral entre filamentos vizinhos ou uma deposição espaçada, com uma distância maior. Essa segunda opção pode ser empregada quando se deseja reduzir o tempo de impressão, em circunstâncias onde a resistência mecânica não é relevante, ou quando se deseja obter um objeto mais leve ou de estrutura porosa. Alguns sistemas de planejamento de projeto (softwares de fatiamento) tratam o espaçamento do filamento como percentual de preenchimento ou de densidade interior (*infill*).

Para Volpato (2017), a espessura da camada também é uma especificação muito importante, e pode ser determinada dentro de uma faixa de variação de acordo com o diâmetro do bico extrusor e do material utilizado.

Com relação as estratégias de preenchimento, as principais opções disponíveis estão relacionadas a forma como o material é depositado dentro do contorno. As alternativas mais tradicionais são o preenchimento do tipo *raster*, *contour* (ou *offset*), ou a combinação de ambos (Figura 21). Entretanto, estratégias adicionais de preenchimento, como *rectilinear* e *honeycomb*, podem ser definidas de acordo com a disponibilidade do sistema de planejamento. Nesse sentido, Kim et al. (2022) propõem um esquema de empilhamentos de camadas que aumenta

as propriedades mecânicas, ao mesmo tempo que reduz o tempo de impressão através de um padrão de preenchimento continuamente variado.

No preenchimento tipo *raster*, dependendo da complexidade do contorno, vários trechos desconectados podem ser gerados exigindo reposicionamento do cabeçote de extrusão para que seja possível alcançar toda a área em que o material deve ser depositado (Guajardo-Trevino et al., 2022).

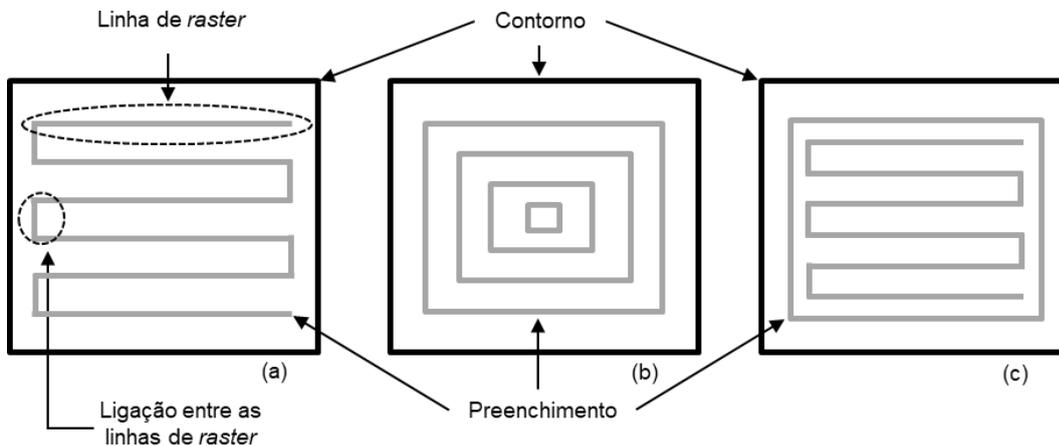


Figura 21 – Padrão de estratégias de preenchimento das camadas em processos de extrusão de material: *raster* (a), *contour* (b), e combinação entre *raster* e *contour* (c). Fonte: adaptada de Volpato (2017, p.160).

As alternativas de preenchimento têm o objetivo de reduzir a distância de deslocamento quando não há deposição do material, em consequência tem-se a redução no tempo de construção do objeto. No quadro 6 pode-se observar as principais características de cada estratégia.

Preenchimento	Características
Raster	Preenchimento por meio de deslocamentos lineares paralelos alternados, gerando uma trajetória tipo zigue-zague. O parâmetro <i>gap</i> específico entre filamentos do <i>raster</i> e do contorno pode ser controlado. Um parâmetro fundamental nessa estratégia é a definição do ângulo de inclinação das linhas <i>raster</i> . Geralmente, emprega-se essa alternativa para reduzir o tempo de impressão.
Contour	Preenchimento com uma trajetória contendo vários contornos fechados equidistantes, obtidos a partir das geometrias de controle da camada.
Combinação Raster + Contour	Combinação entre as duas estratégias de preenchimento (<i>raster</i> e <i>contour</i>), que se inicia com alguns contornos equidistantes, cujo número é definido pelo usuário, e finaliza o preenchimento da área com a estratégia tipo <i>raster</i> .

Quadro 6 – Principais características das estratégias de preenchimento, *raster*, *contour* e combinação entre *raster* e *contour*. Fonte: desenvolvido a partir de Volpato, 2017.

4.5 Atributos construtivos do processo

As variáveis que influenciam os processos de extrusão do material podem ser divididas em quatro categorias: (i) parâmetros específicos da máquina; (ii) parâmetros específicos de operação; (iii) parâmetros específicos do material; e (iv) parâmetros específicos de geometria (Volpato, 2017). A qualidade interna e externa dos objetos impressos é determinada pela otimização dessas variáveis, que são interdependentes e devem ser analisadas como tal, para que se tenha objetos de alta qualidade (Quadro 7).

Operação	Máquina	Material	Geometria
Espessura da camada	Diâmetro do bico	Viscosidade	Comprimento do vetor de preenchimento
Largura do filamento depositado	Taxa de alimentação do material (filamento ou pellets)	Rigidez do filamento	Estrutura de suporte
Velocidade do cabeçote	Velocidade dos roletes tracionadores (filamentos) ou velocidade do parafuso extrusor (pellets)	Flexibilidade	Quantidade de trechos de <i>raster</i>
Temperatura de extrusão	Vazão	Condutividade térmica	Tempo entre deposição de camadas
Temperatura da câmara	Diâmetro do filamento ou dimensão dos pellets	Higroscopia	
Padrão de preenchimento	Convecção no interior da câmara	Características do ligante	
		Características do pó	

Quadro 7 – Variáveis do processo de extrusão do material. Fonte: adaptado de Volpato (2017, p. 164).

Volpato explica (2017) que de forma semelhante, se o objetivo for melhorar a produtividade do processo, os parâmetros, em especial os que estão relacionados à velocidade de deposição do material (espessura da camada, velocidade do cabeçote, largura do filamento e distância e frequência dos reposicionamentos em vazio para iniciar nova deposição), podem ser combinados

para reduzir o tempo de fabricação, mas mantendo a qualidade padrão da deposição do filamento.

A qualidade das superfícies obtidas por extrusão, da mesma forma que as demais tecnologias de manufatura aditiva, varia conforme a orientação do objeto em relação ao plano de construção durante a fabricação (Mwema & Akinlab, 2020; Patadiya; Dave & Rajpurohit, 2019). Em superfícies planas paralelas ao plano X-Y, por exemplo, a última camada do objeto, apresenta um acabamento com geometria em zigue-zague, onde os filamentos são depositados lado a lado. Volpato (2017) torna compreensível que as superfícies planas na direção vertical, em relação aos eixos X-Y, tendem a apresentar uma rugosidade que é resultado do formato elíptico do filamento depositado, e que é influenciado pela espessura da camada. Nas superfícies planas inclinadas ou curvas, o acabamento varia com a inclinação, conforme o efeito degrau, onde quanto menor o ângulo de inclinação, mais esse efeito é observado.

A face do objeto que fica em contato com a plataforma de construção ou com estruturas de suporte é afetada pelas características da superfície dessas estruturas (Thrimurthulu; Pandey & Reddy, 2004; Kovan & Topal, 2017). A camada do objeto acaba reproduzindo as irregularidades da superfície que serve de apoio, ou o registro das estruturas de suporte, prejudicando o acabamento e a precisão dimensional. Volpato (2017) sugere que uma opção para corrigir esse problema é alterar as configurações dos parâmetros de deposição da camada da base ou das estruturas de suporte por meio da redução da distância entre dois filamentos e/ou duplicação da última camada refinada da base.

No início e no final da impressão, em virtude da pressão positiva no interior do cabeçote de extrusão, mesmo após a interrupção de sua alimentação, o material pode continuar escoando no bico extrusor por um tempo e essa ação está diretamente relacionada com a sua reologia (Alghamdi, Nair & Neithalath, 2019). Por esse motivo, o momento de interrupção do fluxo deve ocorrer um pouco antes do ponto de chegada ou de parada do cabeçote extrusor, e para isso, deve-se inverter o sistema de alimentação (método conhecido como *suck back*).

Após as devidas considerações sobre os parâmetros de extrusão, estratégias de preenchimento e orientação da peça, pode-se ainda aprimorar as propriedades intrínsecas do material melhorando a ligação entre os filamentos (Friedrich & Walter, 2020). Assim, como último aspecto de interesse para análise do pré-experimento realizado nesta tese, tem-se a aderência do material no processo de extrusão, que é analisada através dos filamentos adjacentes, numa mesma camada, e também entre filamentos de camadas subsequentes.

Em uma mesma camada pode ocorrer a falta de contato físico lateral entre filamentos, dando origem a espaços vazios. Neste caso, o parâmetro *gap* deve ter um valor negativo para induzir um contato forçado. No entanto, Volpato (2017) alerta que um valor muito negativo causará uma sobreposição excessiva do material e, como consequência, uma deformação da superfície da camada depositada. O autor ainda destaca que a escolha do *gap* pode variar de acordo com a peça, e deve ser calibrado tendo em consideração o material utilizado, de forma que, principalmente, o diâmetro do filamento esteja de acordo com o especificado.

Ainda com relação a aderência entre filamentos da mesma camada, outro possível problema é a fraca união resultante de um contato não adequado, o que compromete a resistência do objeto. Além do parâmetro *gap*, a união de filamentos adjacentes, na mesma camada, depende da temperatura de deposição e da difusão lateral, tanto no momento da deposição quanto ao longo do ciclo de fabricação (Sun et al. 2008).

Quando se trata da aderência entre filamentos adjacentes em camadas diferentes, o tempo entre o contato do filamento anterior com o posterior e, por consequência, a temperatura dos filamentos no momento do contato, são variáveis sobre as quais não se consegue ter um controle absoluto durante o processo de deposição por extrusão. Isso porque, por exemplo, em um trecho de preenchimento *raster*, o tempo que o filamento leva para receber o contato da camada subsequente depende do comprimento da linha do *raster*, que está relacionado ao contorno da geometria do objeto (Guajardo-Trevino et al., 2022). Assim, quanto maior o comprimento da linha do *raster*, mais tempo o filamento depositado terá para resfriar antes de receber o contato da camada seguinte, e quanto menor o tempo entre as deposições, melhor a aderência entre filamentos (Sun, 2008), ou seja, o filamento pode ter menos tempo para resfriar até a deposição do filamento superior (região A da Figura 22), e regiões em que esse tempo é maior (região B da Figura 22).

Portanto, a temperatura de contato pode variar desde a temperatura de extrusão até o limite da temperatura da câmara de construção ou do ambiente, no caso de versões desktop mais simples. Em resumo, quanto maior for a variação de temperatura, maior será a variação da aderência entre os filamentos. Por isso, é desejável que o software de fatiamento utilizado permita que o projetista possa controlar os caminhos do *raster*, de acordo com a geometria de cada objeto.

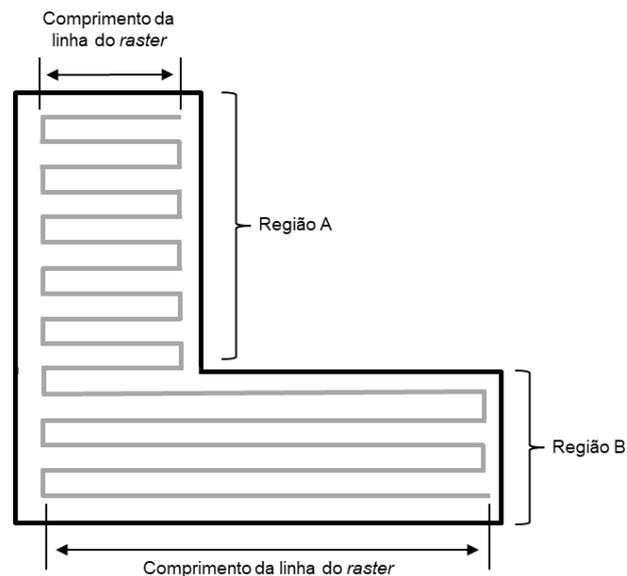


Figura 22 – Influência do comprimento da linha do *raster* no tempo de contato entre filamentos adjacentes. Fonte: adaptado de Volpato (2017, p.169).

Chong et al. (2017) demonstraram problemas de adesão e empenamento da impressão 3D com o uso de filamentos de material reciclado, mas Schirmeister et al. (2019), relatam uma abordagem bem sucedida para superar esses desafios, variando a composição da plataforma de construção e otimizando os parâmetros de processamento, como as taxas de extrusão, o diâmetro do bocal, a temperatura e a trajetória do *raster*.

A adesão entre os filamentos na mesma camada e entre camadas adjacentes afeta a resistência mecânica do material. Schirmeister et al. (2019) descobriram que otimizar a temperatura do bico resulta em uma adesão mais forte entre as camadas implicando diretamente no aumento da resistência mecânica. Destaca-se, no entanto, que para cada material processado, existe uma temperatura de trabalho recomendada, abaixo da qual a aderência estará comprometida.

4.6

Soluções em materiais reciclados para impressoras 3D

Como foi dito, os polímeros termoplásticos são a principal matéria-prima para os filamentos utilizados nas impressoras 3D FDM, e os processos de reciclagem para este tipo de material têm evoluído progressivamente.

A reciclagem distribuída, que pode ser entendida como uma “rede inteligente” composta por pequenas unidades de reciclagem coordenadas, é uma forma de lidar com a questão dos resíduos plásticos e apoiar o desenvolvimento da EC (Zhong & Pearce, 2018). Em levantamento realizado na base *Scopus*, apurou-se que o termo *reciclagem distribuída* apareceu pela primeira vez em 2013, com estudos dirigidos pela pesquisadora Megan Kreige como, por exemplo, o que analisou o ciclo de vida da reciclagem distribuída pós-consumo de polietileno de alta densidade para filamentos de impressoras 3D (Kreiger et al., 2013). Neste mesmo ano, o pesquisador holandês Dave Hakkens propôs um novo modelo para a reciclagem de plásticos com o lançamento da versão I do *Precious Plastic*, um projeto *open source* com a proposta de criar e interconectar pequenos espaços de reciclagem para operar em escala reduzida (Hakkens, 2021).

Nos últimos anos, pesquisas e iniciativas com abordagens baseadas na reciclagem distribuída de plástico para tecnologias de MA de código aberto, têm emergido rapidamente (Santander et al. 2020). Sanchez et al. (2020) argumentam que a rápida evolução técnica da MA permite uma nova via para impulsionar a EC através do conceito de *Distributed Recycling Additive Manufacturing* - DRAM (Reciclagem Distribuída via Manufatura Aditiva), que está relacionado ao uso de materiais reciclados como matéria-prima para a produção de filamentos de impressoras 3D.

O trabalho de Sanchez et al. (2020) examinou os atuais avanços nos processos de reciclagem de termoplásticos por meio de tecnologias de manufatura aditiva com base em seis tópicos (recuperação, preparação, composição, matéria-prima, impressão, qualidade), e concluíram que poucos trabalhos exploraram as etapas de recuperação e preparação, enquanto um grande avanço já foi feito nos outros estágios. Além deste resultado, os autores também identificaram potenciais caminhos de investigação no pré-tratamento de material reciclado, a nível local e nas fases de impressão, de forma a conectar o desenvolvimento da DRAM com a ambição da EC a nível micro, através da interação; meso, com a constituição de grupos para intercâmbio de materiais; e macro, com o alcance da interdependência sistêmica.

Os efeitos da reciclagem de um filamento PLA através da análise das propriedades mecânicas do material impresso em 3D, foram determinados por Pillin et al. (2008), que concluíram que o peso molecular e a viscosidade do polímero diminuíram 46% e 80%, respectivamente, após cinco ciclos de reciclagem, comportamento esperado para polímeros de condensação como o PLA. Na investigação, apenas o módulo de tração do PLA permaneceu inalterável.

Em contraste, os índices de tensão e deformação na ruptura, fatores reológicos e dureza, diminuíram gradativamente.

Mohammed et. al (2017) examinaram o potencial do uso de ABS 100% reciclado para formar filamentos de impressoras 3D FDM, e constataram que o material pode ser reciclado e reformado em filamento sem a adição de material virgem. No entanto, os autores destacam que notáveis mudanças nas características do polímero foram observadas, refletidas pela degradação das propriedades mecânicas durante os testes de tração e, pela diminuição no fluxo de fusão do polímero, o que exigiu a redução da velocidade do *raster* para obter impressões replicáveis.

A adequação de um tipo de polietileno de alta densidade (HDPE), proveniente de resíduos sólidos urbanos, foi investigada por Angatkina (2018), que relatou desafios relacionados ao empenamento e dificuldade de adesão da primeira camada do material durante a extrusão. Problemas semelhantes foram relatados por Schirmeister et al. (2019), que testaram diferentes materiais como plataforma de construção obtendo bons resultados com o uso de folhas de SEBS (copolímero de estireno, etileno, butadieno e estireno), que permaneceram intactas após a remoção do objeto impresso podendo ser reutilizada várias vezes.

O uso de filamentos para impressoras 3D produzidos a partir da reciclagem de fibras de poliamida 12 foi estudado por Vidakis et. al. (2021), que submetem o material a seis ciclos de reciclagem, e em cada ciclo realizaram o controle de qualidade do filamento através de um sistema de monitoramento em tempo real com o uso de sensores ópticos (sistema embutido na extrusora). Dentre outras conclusões, os autores identificaram que a partir do quinto ciclo o fluxo do material ficou comprometido, dificultando a extrusão do filamento devido à interrupção do fluxo. Os autores sugerem que uma possível reticulação (ligação cruzada na cadeia polimérica) de baixo grau pode ser o motivo dessa reação.

No experimento realizado por Baumi et. al. (2017) para reciclar fragmentos têxteis de malha, foi utilizada glicerina resultante do processo de produção de biodiesel, para produzir poliamida 66 reciclada em pó. As notas conclusivas da pesquisa evidenciam resultados bem sucedidos, e indicam que o material não sofreu alteração na estrutura química. Como desdobramento, os autores intentam processar o material na forma de filamento para avaliar o seu desempenho em uma impressora 3D FDM.

Do ponto de vista técnico, Sanchez et al. (2020) destacam que a qualidade final é a principal questão para produtos reciclados mecanicamente. Os autores

apresentam um quadro de caracterização técnica, com base em três elementos principais, para uma avaliação holística da qualidade do material processado:

- **Estrutural e morfológico:** determina a natureza química dos constituintes do polímero reciclado;
- **Viabilidade de produção e estabilidade:** refere-se às propriedades macroscópicas (térmicas, mecânicas e reológicas) dos reciclados;
- **Compostos de baixo peso molecular:** refere-se à análise de produtos de degradação (aditivos, impurezas, contaminantes) na estrutura do polímero.

Os polímeros pós-industriais e pós-consumo apresentam menor peso molecular e desempenho mecânico em relação aos polímeros virgens, pois a ação degradativa, decorrente dos estresses térmicos e mecânicos, levam a uma sensível queda das propriedades físicas do material (Bucella et al., 2012).

Diferentes extensores de cadeia, projetados especificamente para restaurar as propriedades originais de polímeros degradados, podem ser sintetizados para reciclagem. Esses aditivos são usados durante a polimerização ou no processo de extrusão reativa (em que ocorre reações químicas) do polímero. A escolha do aditivo ideal é muito complexa e depende da tecnologia de processamento. Por outro lado, segundo Bucella et al. (2012), os extensores de cadeia para polímeros processados por operações de fiação devem ser tão lineares quanto possível para promover o alinhamento das moléculas que formam a cadeia. Os autores também analisaram as propriedades reológicas e mecânicas da poliamida 6 (PA6), afim de determinar a quantidade apropriada de extensor e o conjunto ideal de parâmetros para melhorar as propriedades do polímero.

A abordagem de reciclagem distribuída de plástico como fornecedora de filamentos de impressoras 3D FDM amplia o caráter sustentável desta tecnologia que está entre as mais utilizadas atualmente, tanto para aplicações industriais quanto para uso pessoal. Os atributos da manufatura aditiva, a natureza do processo em si e a variedade de materiais, têm grande potencial para promover cadeias de suprimentos circulares.

4.7

Fabricação local e distribuída: o impacto da manufatura aditiva na cadeia de suprimentos

De acordo com Weetman (2019), a fabricação distribuída (FD) tende a ser um elemento-chave na transição para um modo de produção circular. De forma antagônica a produção centralizada tradicional, que fabrica grandes volumes de produtos em série, a FD reestrutura as matérias-primas e os métodos de fabricação para que os processos ocorram muito mais próximos do lugar onde o produto será consumido (Srai et al., 2016).

Novas estratégias estão sendo exploradas para aproximar produção e demanda, motivadas pela ascensão e implementação de tecnologias digitais na produção, como é o caso da tecnologia de manufatura aditiva que oferece a possibilidade de mudar o paradigma da cadeia de suprimentos.

Também definida como manufatura redistribuída por alguns autores (Ford & Minshall, 2015; Tuner et al., 2019), a FD foi estabelecida pelo *Engineering and Physical Sciences Research Council* (Conselho de Pesquisa em Engenharia e Ciências Físicas), como tecnologias, sistemas e estratégias que mudam a economia e a organização da manufatura, particularmente no que diz respeito à localização da feitura.

A FD apresenta desafios em termos de troca de informação, comunicação e controle entre os locais de produção, mas, como afirma Durão et al. (2017), o ambiente industrial conectado, que se convencionou chamar de Indústria 4.0 ou 4ª Revolução Industrial, pode ser a resposta para superar esses aspectos. A partir de um estudo de caso envolvendo os departamentos de design e de engenharia de uma empresa, Durão et al. (2017) analisaram o desenvolvimento de uma rede de FD bem sucedida, em que o modelo do produto fora desenvolvido na Alemanha, por meio de softwares de modelagem 3D, e a estrutura de fabricação aconteceu no Brasil, sendo a MA o principal processo produtivo.

Considerando as especificidades dos processos de MA, surge um amplo campo de oportunidades para desenvolver meios de produção mais sustentáveis em diferentes níveis (Despeisse & Ford, 2015), e MA é uma tecnologia que tem enorme potencial para melhorar a eficiência dos recursos e viabilizar os modelos de economia circular, com mudanças na escala de fabricação e na distribuição.

Ao avaliar a sustentabilidade do processo de MA ou de qualquer processo de fabricação, deve-se considerar todo o ciclo de vida do produto para que os impactos de cada etapa sejam identificados. Entretanto, majoritariamente, o

processo de fabricação através da tecnologia de MA apresenta diversas vantagens para a cadeia de suprimento (Quadro 8).

Principais vantagens no uso da MA para a fabricação sustentável
<ul style="list-style-type: none"> • Menos desperdício, devido à natureza do processo aditivo, ao contrário das peças que são produzidas por manufatura subtrativa; • Não há necessidade de uso de ferramentas ou acessórios especializados para utilizar a tecnologia de manufatura aditiva; • Tem a capacidade de construir peças funcionalmente leves, e com resistência mecânica; • Reduz a necessidade de grandes quantidades de matéria-prima na cadeia de suprimentos e transporte; • Eficiente em termos de material quando comparada a processos como usinagem e fundição tradicionais; • Capacidade de produzir geometrias otimizadas na relação resistência-peso; • Menos impacto da peça ao longo de seu ciclo de vida, resultando em menor pegada de carbono, menos energia incorporada e melhor modelo econômico; • Capacidade de criar peças de reposição sob demanda, reduzindo ou eliminando estoque.

Quadro 8 – Principais vantagens no uso da MA para a fabricação sustentável. Adaptada de Despeisse & Ford (2015).

Para Durão et al. (2017), a fabricação de peças sobressalentes e o seu fornecimento em tempo hábil são atividades complexas para diversos setores, e destacam que a FD de peças de reposição em locais mais próximos do usuário final pode apresentar diversas vantagens como redução do tempo de entrega e redução dos custos com logística.

Uma das notáveis características do uso da MA é a possibilidade de construir formas complexas, com montagem mais simples ou sem montagem, utilizando apenas um tipo de material. Igualmente, pode-se imprimir partes componentes de produtos obsoletos por meio do escaneamento das peças existentes e criar o design com base na imagem escaneada.

A FD também é uma alternativa para enfrentar situações de crise. Nos primeiros meses da pandemia da Covid-19, em 2020, houve uma escassez de equipamentos de proteção individual (EPIs) para os profissionais de saúde, resultado tanto da alta demanda, como da falta de matéria-prima disponível para a produção, devido aos bloqueios em todo o mundo. Diferentes laboratórios de MA em instituições de ensino de diversos países, mobilizaram suas equipes para produzir localmente esses equipamentos utilizando impressoras 3D e arquivos digitais dos modelos compartilhados pela internet. O professor Jorge Lopes, do Núcleo de Experimentação Tridimensional, laboratório que faz parte do

Departamento de Artes & Design da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), coordenou um projeto que fez parte de uma rede interinstitucional para desenvolver, avaliar, produzir e distribuir EPIs para hospitais e instituições de referência do estado, utilizando diferentes tecnologias de MA (Santos et al., 2020).

Sob outra perspectiva, há duas questões sensíveis relacionadas ao uso da MA, o direito de propriedade intelectual, quando produtos existentes são escaneados e impressos por terceiros, e a escolha de recursos finitos, como metais, plásticos derivados de petróleo e resina. Todavia, em relação aos materiais, como foi apresentado no item anterior, há avanços encorajadores no uso de termoplásticos reciclados, que aumentam as possibilidades de fluxos circulares, além do desenvolvimento de biomateriais.

A mudança de um sistema de fabricação centralizado para um modelo distribuído torna a cadeia de suprimentos mais ágil, resiliente e responsiva. Além de permitir o redesenho de produtos e processos, o uso da tecnologia de MA também viabiliza a produção customizada e sob demanda.

Produção sob demanda e customização em massa

Customização em massa é um termo genérico usado para descrever a fabricação de produtos customizados para um mercado de massa (MacCarthy, Brabazon, Bramham, 2003), cunhado por Stanley Davis em 1987, e popularizado em 1993 no livro de Joseph Pine. Segundo Pine (1993), através da aplicação de novas tecnologias e novos métodos de gerenciamento, seria possível encontrar alternativas para um novo paradigma de produção, criando opções de customização através da flexibilidade e capacidade de resposta rápida.

Na verdade, a customização em massa é uma proposição incrivelmente atraente tanto para consumidores como para produtores. Os consumidores obtêm um produto a um preço razoável e sob medida que reflete sua seleção pessoal de cores, recursos, funções e estilos. Os produtores, por sua vez, conseguem reduzir seus estoques e despesas gerais de fabricação, eliminar o desperdício em suas cadeias de suprimentos e obter mais precisão de informações sobre demanda. Em outras palavras, a customização em massa é uma proposta de ganha-ganha” (Codoni & Martineli, 2006, p.3) (Tradução livre).

A MA possibilita a produção sob demanda em substituição a produção em série, que resulta no armazenamento de grande quantidade de mercadoria, com prazos muito mais rápidos, redução de custo substanciais e de desperdício, tanto na fase de fabricação, quanto no estágio de recuperação, por meio do uso de

materiais mais simples e recicláveis. As principais diferenças entre os processos de produção em massa e customização em massa estão descritas no quadro 9.

O uso da MA gera algumas implicações para a cadeia de suprimentos, como designs customizáveis ou exclusivos que podem ser feitos sob encomenda, reduzindo os estoques e o risco de obsolescência, e a produção de peças de reposição, também sob encomenda, e em instalações locais, mantendo os produtos em uso por muito mais tempo e possibilitando o serviço de reparo qualificado para produtos de consumo e para tecnologias.

	Produção em massa	Customização em massa
Foco	Eficiência através da estabilidade e controle.	Variedade e possibilidade de customização através da flexibilidade e resposta rápida.
Objetivo	Desenvolvimento, produção, marketing e entrega de bens e serviços a preços baixos.	Desenvolvimento, produção, marketing e entrega acessível de bens e serviços com possibilidades de customização.
Características	Demanda instável; mercados homogêneos; baixo custo, qualidade consistente; padronização de bens e serviços; produtos com o ciclo de desenvolvimento longo e tempo de vida útil curto.	Demanda fragmentada; nichos heterogêneos; baixo custo e alta qualidade; bens e serviços customizados; produtos com o ciclo de desenvolvimento curto e tempo de vida útil prolongado.

Quadro 9 – Principais diferenças entre os processos de produção em massa e customização em massa. Fonte: adaptado de Conceição (2018).

Como explica Santos (2017), arquivos tridimensionais digitalmente customizados são desenvolvidos para a obtenção da geometria/volumetria desejada por meio de tecnologias não invasivas de obtenção de imagens, como base para a personalização (como é o caso da digitalização do corpo humano para a confecção de órteses, próteses e equipamentos esportivos). Mas também, é possível fazer objetos customizáveis sem nenhuma digitalização recorrendo ao design paramétrico. Empresas de todos os tamanhos estão usando a MA para criar design de produtos individualizados numa forma de customização em massa. Na moda, além de acessórios e aviamentos, peças inteiras já foram produzidas utilizando sistemas de manufatura aditiva à base de pó (*Selective Laser Sintering* – SLS) e à base de sólidos (*Fused Deposition Modeling* – FDM) (Conceição, 2018). Muitas pesquisas têm investigado o potencial da fabricação distribuída através da tecnologia de MA, por exemplo, analisando o ciclo de vida ambiental da produção (Kreiger, et al., 2014), desenvolvendo códigos de reciclagem de

polímeros para fabricação distribuída (Hunt et al., 2015), e analisando formas de gerenciar e programar serviços distribuídos de manufatura aditiva (Mai et al. 2016).

Associada às ferramentas de virtualização do design e de produção, e de plataformas em nuvem para integração da informação em toda a rede de valor, a MA pode produzir cada peça, cada objeto, com alto grau de individualização, sem que isto represente perdas econômicas ou restrição de acesso por aumento de custos (Bruno, 2017). A customização em massa levanta uma série de questões, que são vitais para explorar e, obviamente, a grande diversidade de requisitos que podem ser capturados vai requerer técnicas e ferramentas diferentes.

Ao se estabelecer um novo tipo de relação entre pequena e larga escala, e entre global e local, os sistemas distribuídos desafiam os modelos de produção dominantes e sua infraestrutura tecnológica e dá origem a redes capazes de transformar a produção tradicional.

5

Ecosistema industrial: APLs e Simbiose industrial

Arranjo Produtivo Local (APL) são aglomerações de empresas do mesmo setor ou correlatas, localizadas em um mesmo espaço geográfico, com a presença de agentes econômicos, políticos e sociais, e que apresentam vínculos e interdependência num ambiente de especialização produtiva (Cassiolato & Lastres, 2003). Essas aglomerações possibilitam e privilegiam a análise de interações, particularmente aquelas que levam à introdução de novos produtos e processos (Lastres & Cassiolato, 2000).

Os APLs são construídos por um sistema endógeno, ou seja, de dentro para fora, como consequência de uma lógica territorial que contempla especificidades locais como o passado, a cultura e as relações exercidas entre as empresas (Mendonça, 2008; Oliveira, França & Rangel, 2019).

O principal objetivo de um APL é unificar a cadeia produtiva com atividades comuns, buscando o desenvolvimento das empresas por meio de ações conjuntas e cooperadas (Cardoso, 2014). Com potencial de gerar o incremento da capacidade interna de inovação, da competitividade e do desenvolvimento local, os arranjos impulsionam articulações e vínculos consistentes que resultam em interação, cooperação e aprendizagem (Oliveira et al., 2017).

Na natureza, um ecossistema pode ser entendido como o conjunto formado pelas interações entre as comunidades vivas e os fatores não vivos do ambiente. Um agrupamento de características físicas, químicas e biológicas que influenciam a existência das espécies que interagem entre si, formando um sistema estável. As interrelações que existem entre os vários tipos de consumidores de um ecossistema formam uma cadeia alimentar, onde os consumidores primários, se alimentam dos produtores; os secundários, se alimentam dos primários; os terciários, estão no topo da cadeia; e os decompositores, são responsáveis pela decomposição da matéria, transformando-a em nutrientes que estarão novamente disponíveis no ambiente.

Quando se fala em um modelo de produção circular esse tipo de correspondência ajuda a pensar em como mudar a forma pela qual se produz e como se utiliza os recursos naturais. Se uma empresa “terciária” se conecta com outras “secundárias” que tenham afinidade com as suas atividades, assim como os fungos que ajudam as árvores a multiplicar sua superfície de raiz e a captar muito mais água e nutrientes, ela amplia a própria capacidade de fazer melhor uso

dos recursos em comparação com outra que atua isoladamente, apenas com as suas “próprias raízes”. Desde que a relação estabelecida seja benéfica para todas as partes interessadas, esse ecossistema pode viver em parceria por um longo tempo tipificando uma simbiose industrial.

A expressão simbiose industrial (SI) representa a cooperação entre um conjunto de empresas que otimizam os fluxos residuais para reaproveitar a matéria-prima em outros processos produtivos (Weetman, 2019). Essa prática é uma forma de minimizar os impactos causados pela geração de resíduos, e quando desempenhada de forma estruturada, entre diferentes atores (academia, indústria e poder público), amplia as vantagens econômicas, sociais e ambientais decorrentes da sua prática. Esse esforço coletivo e simultâneo pode resultar em benefícios como a redução de custos com material, logística e gerenciamento de resíduos.

A SI é uma aplicação da ecologia industrial, que propõe ajudar as empresas a compreender como usam os recursos, como monitoram os fluxos de materiais, energia e água, e também, como se responsabilizam pelo produto durante todo o seu ciclo de vida. A SI é uma abordagem que aponta para a criação de processos produtivos de ciclo aberto ou fechado, onde os resíduos são transformados e retornam para a cadeia de valor. Os diferentes mecanismos de cooperação industrial que podem ser estabelecidos são flexíveis e estão sujeitos à localização, aos tipos de indústrias envolvidas, matérias-primas e outras coisas, cada circunstância resultará em grupamentos com características específicas (Ferrão, Jordão & Mendes, 2003).

Pensar em uma SI formada por arranjos produtivos constituídos pelos atores econômicos, não necessariamente próximos, mas trabalhando de forma estreita, significa, de forma macro, o aumento da resiliência dos sistemas; o crescimento econômico e de empregos; e a ampliação do potencial de uso dos recursos; e de forma micro, propicia a redução do custo da produção; a geração de novas fontes de receita; o aumento do relacionamento entre os envolvidos; e ainda, o aumento da resiliência das organizações. Além do que, o potencial para inovações sociotécnicas que pode surgir dessa simbiose abre espaço para o desenvolvimento de cadeias de suprimentos circulares, com ciclos produtivos infinitos e redes interconectadas e transeitoriais, que substituem os processos isolados por sistemas integrados denominados de ecossistema industrial.

5.1 Arranjo Produtivo Local

Cardoso (2014) explica que o APL supõe a existência de uma aglomeração de empresas, localizadas no mesmo território, que apresentam especialização produtiva e mantêm vínculos de articulação, interação, cooperação, e aprendizagem recíproca e com outros atores locais. Ainda segundo o autor, o termo aglomeração – produtiva, científica, tecnológica e/ou inovativa – tem como aspecto central a proximidade territorial, que amplia benefícios como o acesso a matérias-primas, equipamentos e mão de obra. Quando associada a EC, a proximidade geográfica das empresas pode contribuir para a redução da emissão de poluentes atmosféricos, de resíduos, da poluição de efluentes etc.

Com base em Fuini (2013), Queiroz & Souza (2017) esclarecem que o conceito de APL foi sistematizado no Brasil por um grupo de pesquisadores reunidos na Rede de Pesquisa em Sistemas e Arranjos Produtivos e Inovativos Locais (Redesist), do Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IE/UFRJ), a partir de pesquisas realizadas nos anos de 1990 sobre meios inovadores, sistemas nacionais e locais de inovação.

De acordo com Instituto de Pesquisa Econômica e Aplicada – IPEA (2006), um dos benefícios dos APLs é que eles possibilitam a convergência de interesses entre as partes interessadas. Esse associativismo, principalmente formado por empresas de pequeno e médio porte (Cassiolato & Lastres, 2003), é dirigido pela busca do bem comum com foco em ampliar as chances de sobrevivência e crescimento individuais, o que é particularmente relevante no caso dos pequenos negócios (Silva, 2011).

O crescimento e o desenvolvimento do APL dependem da sinergia das partes envolvidas para ampliar o conhecimento, regular as relações criadas pelos atores econômicos e sociais, e buscar apoio de sistemas institucionais voltados aos interesses e às necessidades das atividades desenvolvidas na região (Simonetti & Kamimura, 2017).

O APL pode ser de configuração *vertical*, quando apresenta uma estrutura complexa formada pela interação e cooperação de agentes em diferentes elos da cadeia produtiva local; ou *horizontal*, ocorre com empresas localizadas no mesmo elo da cadeia produtiva com relações que podem ser diretas ou mediadas por associações empresariais.

O conceito de APL apresenta algumas peculiaridades em sua organização, tal como a dimensão territorial, a diversidade de atores, as inovações e

aprendizados, o conhecimento tácito, e a governança (Cassiolato et al., 2003) (Quadro 10).

Característica dos APLs	
Dimensão territorial	Território onde os processos produtivos se estabelecem, como municípios ou microrregiões.
Diversidade de atores	Além da interação entre os concorrentes e fornecedores, ocorre também à participação de universidades, organizações do setor público e privado, instituições de pesquisa e desenvolvimento.
Inovações e aprendizados	Surgem com base na interação dos atores através da transmissão do conhecimento, inserção de novos processos e produtos, introdução de formatos organizacionais que tem capacidade de trazer mudanças técnicas.
Conhecimento tácito	Não mensurável e nem ensinado formalmente, mas que é socializado pelos indivíduos, organizações e empresas, e facilitado pelo contato direto resultante das interações proporcionadas pela proximidade territorial que facilita a difusão entre as empresas.
Governança	Liderança do APL, geralmente exercida por empresários ou pelo seu conjunto representativo – sindicatos, associações.

Quadro 10 – Características dos APLs. Fonte: desenvolvido pela autora a partir de Cassiolato & Lastres (2003).

O sentido geral da palavra cooperação é o de trabalhar em conjunto envolvendo relações de confiança mútua e com coordenação em níveis diferenciados. A cooperação no APL ocorre de forma interativa e dinâmica, podendo ser de dois tipos: *cooperação produtiva*, que visa a obtenção de economias de escala e de escopo, bem como a melhoria dos índices de qualidade e produtividade, ou *cooperação inovativa*, que resulta na diminuição de riscos, custos, tempo e, principalmente, no aprendizado interativo, dinamizando o potencial de inovação (Cardoso, 2017; Oliveira et al., 2017).

As ações conjuntas do APL ocorrem em diferentes momentos e, entre diferentes atores, entre os quais: i) *atores econômico* (clientes, parceiros e competidores; fornecedores de insumos, componentes, ou de equipamentos; fornecedores de serviços técnicos); ii) *atores do conhecimento* (consultores, universidades e institutos de pesquisa); iii) *atores de regulação* (órgão gestor do APL e governo em seus vários níveis; e iv) *atores sociais* (sindicatos, associações empresariais, organizações de suporte e organizações do chamado terceiro setor) (Cassiolato & Lastres, 2003) (Quadro 11).

Principais atores dos APLs	
Atores econômicos	<ul style="list-style-type: none"> • Clientes, parceiros e competidores • Fornecedores de insumos, componentes ou equipamentos • Fornecedores de serviços técnicos
Atores do conhecimento	<ul style="list-style-type: none"> • Consultores • Universidades • Institutos de pesquisa
Atores de regulação	<ul style="list-style-type: none"> • Órgão gestor do APL • Governo em seus vários níveis
Atores sociais	<ul style="list-style-type: none"> • Sindicatos • Associações empresariais • Organizações de suporte • Organizações do chamado terceiro setor

Quadro 11 – Principais atores dos APLs. Fonte: Desenvolvido pela autora a partir de Cassiolato & Lastres (2003).

As empresas, os produtores de bens e serviços finais, os fornecedores de matérias-primas e equipamentos, os prestadores de serviços, as comercializadoras e os clientes, também são considerados atores do arranjo (Cardoso 2014).

5.1.2 Classificação dos APLs

Cada arranjo apresenta suas próprias características com relação a origem, contexto econômico, ambiente sociocultural, nível de complexidade da cadeia produtiva, entre outros aspectos. Cardoso (2014) descreve que com relação ao grau ou estágio de desenvolvimento, os arranjos podem ser classificados em três níveis: (i) *arranjos incipientes*, desarticulados e carentes de lideranças legitimadas; (ii) *arranjos em desenvolvimento*, atraem novas empresas e incentivam empreendedores a investirem em competitividade; e (iii) *arranjos desenvolvidos*, possibilitam inovações em produtos, processos e formatos organizacionais gerando maior competitividade. As principais características de cada nível de arranjo estão elencadas no quadro 12.

Classificação	Perfil
Arranjos incipientes	<ul style="list-style-type: none"> • foco individual • baixo desempenho empresarial • isolamento entre empresas • ausência de interação do poder público • ausência de apoio/presença de entidade de classe • mercado de atuação restrito • base produtiva mais simples
Arranjos em desenvolvimento	<ul style="list-style-type: none"> • foco setorial • possíveis estreitamento nos elos da cadeia produtiva • dificuldade de acesso a serviços • interação com entidade de classe • mercado local/estadual/nacional
Arranjos desenvolvidos	<ul style="list-style-type: none"> • foco territorial • estreitamento das demandas comerciais coletivas • interação com a comunidade • mercado estadual/nacional/internacional • finanças de proximidade mais avançadas • base institucional local diversificada e abrangente • estrutura produtiva ampla e complexa

Quadro 12 – Classificação e perfil dos APLs quanto ao estágio de desenvolvimento. Fonte: Conceição, Magalhães & Lopes (2022).

Para além da evolução do estágio de desenvolvimento, os APLs apresentam características distintas que os diferenciam de outros tipos de agrupamentos locais, como a dimensão territorial, o espaço onde os processos ocorrem; a diversidade de atividades e de atores econômicos, políticos e sociais; a participação e interação entre empresas e órgãos de classe, instituições públicas e privadas e a comunidade; conhecimento tácito, compartilhamento e socialização de saberes através de gerações; inovação e aprendizado interativos, fundamental para a troca de conhecimento e ampliação da capacidade produtiva e inovativa; e governança, que são os modos de coordenação entre os agentes (Cardoso, 2014). Outras características contribuem para definir o grau de maturidade do arranjo, e estas estão sistematizadas no quadro 13.

	Arranjos incipientes	Arranjos em desenvolvimento	Arranjos desenvolvidos
Desenvolvimento local	São relevantes porque interferem de forma positiva nos tributos do município e na geração de empregos, mas os resultados obtidos estão aquém da sua potencialidade.	Atraem novas empresas e incentivam os empreendedores locais a participar da geração de renda; surgem atividades econômicas relacionadas com o crescimento do arranjo e maior competitividade ao longo da cadeia produtiva; e demanda de serviços.	São a mola propulsora do desenvolvimento local; provocam no município o efeito “bola de neve”, atraindo mais empresas, fornecedores, prestadores de serviços etc.
Liderança	As lideranças são conhecidas, mas não legitimadas; carecem de uma visão empresarial; área de influência e atuação é local; atuam isoladamente.	As lideranças são mais legitimadas e capacitadas; atuam em entidades de classe, mas com ênfase maior no trabalho setorial; relações informais; desenvolvem iniciativas coletivas de compra, venda e acesso a equipamentos produtivos de tecnologia avançada.	As lideranças atuam em entidades de classe, conselhos municipais e regionais, preocupados com o arranjo como um todo; há regras formais de relacionamento entre os líderes; surgem mais poderes deliberativos além dos consultivos.
Atores e cooperação	Sem entidades de classe ou com entidades pouco desenvolvidas; não há integração entre o poder público e a iniciativa privada; falta consenso entre as lideranças locais.	Embriões de entidades de classe mais desenvolvidas; o meio empresarial reforça sua atuação a partir de grupos setoriais que executam em conjunto ações relevantes para o desenvolvimento do APL; sindicatos patronais e de trabalhadores marcam presença, ainda que de forma tímida; cooperação entre os setores das empresas com seus fornecedores e suas entidades.	O meio empresarial está organizado em entidades bem desenvolvidas que atuam não só em nível municipal, mas também nos níveis regionais, estadual e nacional; os atores relevantes para o desenvolvimento social, político e econômico reconhecem as lideranças, facilitando a integração do APL.
Recursos financeiros	Os agentes financeiros estão presentes, mas não são proativos no desenvolvimento das empresas; análises individualizadas; se valem de financiamentos com custos altos; não tem investimentos por	Permite que os bancos apliquem o conceito de <i>finanças de proximidade</i> ; as empresas juntam recursos próprios e esforços para garantir a realização de pequenos investimentos.	O sistema financeiro, já atua com as empresas do arranjo; linhas de crédito do BNDES e de seus agentes são, normalmente, direcionadas a essas empresas; investem no desenvolvimento, com recursos próprios e de

	falta de financiadores.	relevantes para o meio empresarial.	terceiros.
Gestão do processo	Ausência de plano de desenvolvimento e de ações integradas.	Integração entre o meio empresarial e o poder público, especialmente na cogestão de questões que se referem ao desenvolvimento econômico.	Plano mais amplo e complexo, elaborado pelos parceiros governamentais e empresariais, incluindo uma clara distribuição de tarefas para cada um dos atores envolvidos.
Inovação e tecnologia	A ausência de integração impede a difusão da inovação e a melhoria coletiva do processo produtivo; as tecnologias já conhecidas não são aplicadas; não há centros de pesquisa ou de profissionalização; não investem em novas tecnologias; ausência nas feiras do setor.	Centros de educação profissional e de aperfeiçoamento técnico; investimento em novas tecnologias e novos produtos; participação regular das empresas em feiras do setor; contato com centros de pesquisa; acesso a novas tecnologias de produção e gestão; contato entre empresas facilita ganhos incrementais de inovação pela difusão.	Presença de centros de pesquisa e instituições de ensino superior com propostas específicas para o arranjo; a região torna-se referência para questões de inovação tecnológica; centros de educação profissional e de aperfeiçoamento bem equipados e com quadro funcional de alto nível.
Mercado e competitividade	O produto não tem identidade local; o mercado regional é acessível, conhecido e parcialmente atendido pelo arranjo; os demais mercados são pouco acessíveis ou mesmo inacessíveis.	O produto já começa a ser identificado com alguma característica sociocultural local; são realizadas pesquisas relativas a inovações e questões mercadológicas; as empresas são mais competitivas e arriscam a participação em novos mercados.	As empresas apresentam-se mais competitivas e atuam em outros níveis de mercado (regional, nacional e internacional); são implementadas iniciativas de marketing territorial.

Quadro 13 – Características dos APLs com relação ao estágio de desenvolvimento. Fonte: Conceição, Magalhães & Lopes (2022).

A articulação entre os conceitos de APL e de Simbiose Industrial, como veremos adiante, intersecciona os propósitos da economia circular promovendo ações sustentáveis e reduzindo o impacto dos processos produtivos no meio ambiente.

5.2 Simbiose industrial

A origem da nomenclatura simbiose está na ecologia e é utilizada para denominar a associação benéfica e recíproca entre dois ou mais seres vivos de espécies diferentes (Borschiver et al. 2018). Assim como na natureza, a simbiose industrial pode resultar em relações favoráveis entre empresas de diferentes setores industriais a partir de práticas de economia circular que ajudam a fechar ciclos, e que desvinculam o crescimento das empresas do consumo de recursos (Starlander, 2003).

O novo paradigma de inovação, para além do uso de novas tecnologias, está associado a novas formas de articulação. As etapas necessárias para promover novas parcerias passam pela sensibilização, análise dos recursos e de possíveis sinergias para criar novas formas de cooperação que influenciem positivamente tanto o crescimento dos atores envolvidos quanto o aumento das capacidades inovativas de cada empresa (Weetman, 2019). Essa cooperação fortalece o poder de compra, ao viabilizar o compartilhamento de recursos; possibilita a convergência de habilidades, com a reunião de diferentes competências; e garante o investimento em pesquisa e inovação, com a divisão de custos entre as partes interessadas (Chertow & Park, 2016).

A Ellen MacArthur Foundation define simbiose industrial (SI) “como a troca de materiais ou fluxos de resíduos entre empresas de forma que os resíduos de uma se tornem matéria-prima para outra” (Weetman, 2019, p.97). Em outros termos, é um arranjo produtivo no qual indústrias diferentes, não necessariamente próximas, trocam produtos, resíduos e insumos mutuamente, melhorando o desempenho ambiental, social e econômico, frente às atuações individuais (Borschiver et al. 2018).

A ecologia industrial (EI) surge como uma metáfora e propõe fundamentar uma mudança de paradigma que leve ao desenvolvimento sustentável, e pode ser entendida como um meio de manter o nível dos recursos disponíveis em harmonia com a evolução econômica, cultural e tecnológica (Ferrão, 2009; Veiga & Magrini, 2009). A EI é um modelo conceitual para promover uma mudança sistêmica que envolve o projeto de infraestruturas industriais como se fossem uma série de ecossistemas interligados (Tibbs, 1993). Significa recriar a indústria à imagem da natureza.

Desde 1993, Tibbs considerava que a chave para a criação de ecossistemas industriais era reconceituar os resíduos como produtos, não apenas na busca de formas de reaproveitamento de resíduos, mas também na seleção de processos com resíduos prontamente reutilizáveis. O autor apresenta como exemplo o caso da DuPont® que costumava descartar a hexametilenodimina, um subproduto gerado durante a produção de Nylon, e ao buscar alternativas para o descarte encontrou um mercado promissor nas indústrias farmacêutica e de revestimento.

A SI é considerada uma das abordagens da EI cujo princípio básico é adotar uma visão sistêmica dos processos para lidar com as causas subjacentes do impacto dos fluxos industriais sobre o meio ambiente. Deste modo, a SI oferece contribuições relevantes para a EI na medida em que adota e implementa características dos ecossistemas naturais gerando transações mutuamente rentáveis e processos mais eficientes. Numa SI é possível ir além das conexões restritas e destinadas ao reaproveitamento de água, de energia e de materiais, porém, o escopo desta investigação limita-se a essa perspectiva considerada por alguns autores (Posch, 2010) como SI de primeira geração.

A comercialização ou permuta de resíduos e outros recursos de uma empresa para outra é cada vez mais comum. É uma forma de atribuir valor ao que seria descartado através da identificação de oportunidades inexploradas, permitindo que as empresas possam gerar novas receitas, com negócios alternativos, e reduzir custos, através da melhoria dos seus processos (Ferrão, 2009). Essa prática reforça a ideia de valor compartilhado e o nível de entrega vai depender das conexões que são construídas entre as partes.

O conceito de “ciclos de materiais” é apresentado Tibbs (1993), como uma extensão da ideia de ciclos biológicos, como os ciclos de carbono e nitrogênio, para incluir os fluxos do sistema industrial. A ideia de ecossistema industrial concentra-se no intercâmbio eficiente de subprodutos entre as empresas como uma analogia aos indivíduos de diferentes espécies no ecossistema biológico, com base em uma cultura de cooperação que inclua as empresas e os demais atores sociais locais.

Economias são como ecossistemas, ambos consomem água e energia e as transformam em produtos, com a diferença de que a indústria faz isso de forma linear. O desafio continua sendo a necessidade de integrar a indústria e os sistemas naturais para que se estabeleça uma relação de mutualismo, até que todo o sistema industrial reflita o mundo natural. Nesse sentido, a natureza dispõe de muitos modelos que podem ser usados para criar sistemas econômicos autossustentáveis.

5.2.1

Fatores viabilizadores de uma simbiose industrial

As principais premissas associadas a SI focam no mutualismo, na cooperação e no compartilhamento. Entre os benefícios obtidos através dessa cooperação estão a redução da pegada ecológica, a otimização de recursos, e o uso de fontes de energia limpas (Sehnm & Pereira, 2019). Desenvolvido a partir de Borschiver et al. (2018), o quadro 14 apresenta os fatores viabilizadores de uma simbiose industrial.

Categoria	Elementos dos fatores constituintes	Potencial das áreas de influência
Técnica	Atributos físicos, químicos e locais de fluxos de entrada e saída; capacidade relacionada ao processamento de fluxos de energia, água e gestão de resíduos; disponibilidade de tecnologias confiáveis para permitir sinergias.	Número e diversidade de possíveis ligações simbióticas; extensão do investimento e dos esforços necessários para desenvolver e manter sinergias.
Política	Políticas ambientais globais; natureza e implicações de leis e regulamentos relevantes; impostos, taxas, multas, subsídios e créditos pertinentes.	Desenvolvimento e adoção de medidas ambientais sobre tecnologias e práticas desejadas.
Econômica e financeira	Custo de insumos virgens, valor econômico de resíduos e subprodutos correntes e o impacto dos elementos políticos; economia de custos; potencial de geração de receita e tempo de retorno; tamanho do investimento de capital e custos de manutenção de sinergias.	Extensão da vantagem econômica e competitividade de ganho; decisões de empresas privadas; necessidade de fonte alternativa de financiamento.
Informacional	Disponibilidade de informações oportunas e confiáveis sobre o projeto em questão; sistema de gerenciamento de informações que, sistematicamente, monitorem dinâmicas de mudanças e avaliem a conveniência e viabilidade de várias opções.	Possibilidades para identificar sinergias; capacidade de articular sinergias; percepção de riscos das empresas.
Organizacional e motivacional	Confiança; abertura para o outro e para novas ideias; percepção de risco; nível de interação social e proximidade mental; disponibilidade local de poder de decisão; histórico organizacional; natureza da interação entre a indústria e órgãos públicos.	Presença ou criação da estrutura institucional necessária para o projeto; desenvolvimento e manutenção de sinergias.

Quadro 14 – Fatores viabilizadores para projetos de Simbiose Industrial a nível nacional. Fonte: adaptado pela autora de Borschiver et al. (2018).

Henriques et al. (2021) explicam que a relevância desses fatores depende do fator econômico, associado a reivindicações para o melhor aproveitamento dos recursos envolvidos.

A auto-organização, processo pelo qual os componentes do sistema formam estruturas estáveis através de seus vários pontos nodais, é considerada como um aspecto significativo na formação de uma SI. Sistemas auto-organizados se formam sem qualquer intenção, como resultado de interações locais entre os elementos do sistema. Chertow & Ehrenfeld (2012) argumentam que um dos elementos mais distintivos da SI é que, enquanto todos os atores industriais buscam reduzir seus próprios custos e aumentar os seus benefícios, àqueles que integram redes simbióticas também participam da criação de benefícios ambientais públicos. Embora não haja um acordo sobre o número mínimo para constituir uma simbiose, autores indicam que é preciso pelo menos três empresas diferentes, trocando ao menos dois recursos para refletir os elementos da rede, enfatizando transações bidirecionais.

Com base em uma revisão aprofundada e sistemática da literatura existente, Mortensen & Kornov (2019) identificaram três fases principais no desenvolvimento de uma SI: i) conscientização e interesse na simbiose industrial; ii) alcance e exploração de conexões; e iii) organização. Além disso, apresentaram cinco fatores críticos (condições contextuais, atores, papéis dos atores, características dos atores e atividades dos atores) que influenciam o processo em diferentes níveis, e em diferentes momentos.

Em um estudo sobre intermediação de SI facilitada, Patala, Salmi & Bocken (2020) descrevem a figura do intermediário em SI como àquele que desempenha funções como intermediar relações entre fornecedores e usuários; processar informações para novas tecnologias e facilitar o desenvolvimento tecnológico. Os autores identificaram três atribuições para o intermediário de SI: *facilitar*, fornecendo oportunidades e espaço para outras pessoas agirem; *configurar*, ajustando a forma material e simbólica da tecnologia; e *intermediar*, estabelecendo, nutrindo e ajustando as conexões entre os diferentes atores.

5.2.2

Tipos de simbiose industrial

Starlander (2003) classifica a SI em dois tipos, *colocalizadas*, quando as empresas estão localizadas em um mesmo aglomerado, e *virtuais*, quando estão

distribuídas em diferentes áreas, municípios ou países. Em ambos os casos, os ganhos podem ser compartilhados entre todos os elos da cadeia, gerando resultados para as empresas, a sociedade, e o meio ambiente (Mirata, 2004).

Um exemplo de simbiose industrial colocalizada é o Parque eco industrial Kalundborg na Dinamarca, primeiro projeto de simbiose industrial do mundo que teve início em 1961. Benyus (2016) relata que a parceria começou com a instalação de quatro empresas, todas elas associadas e dependentes uma das outras para a obtenção de água e energia. Hoje, o eco parque conta com catorze parceiros que compartilham água, energia e materiais, beneficiando o meio ambiente, a economia e o crescimento da comunidade local (Figura 23) (Borschiver et al. 2018; Symbiosis DK, 2022).

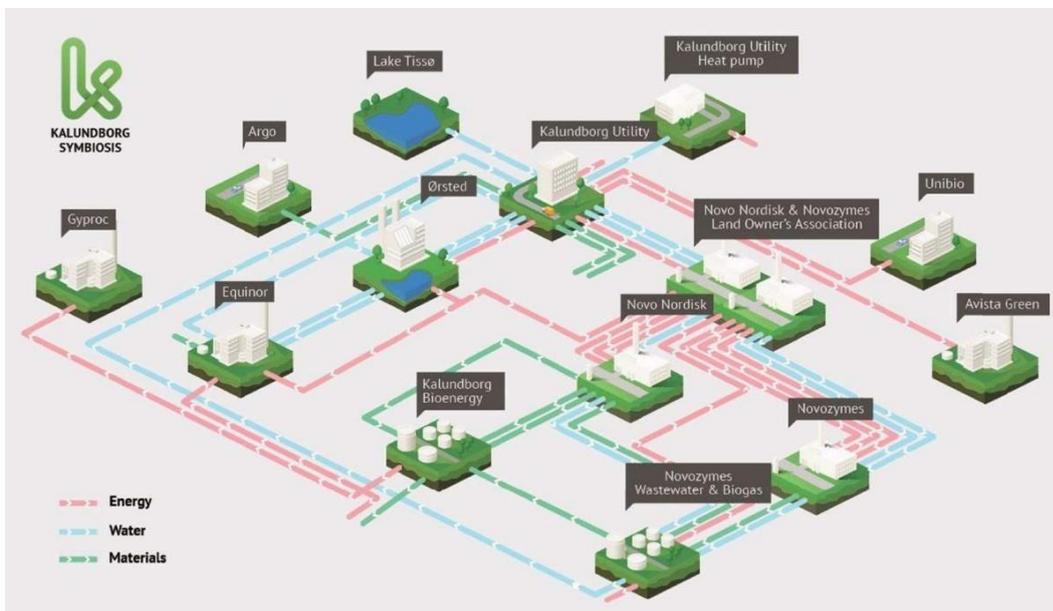


Figura 23 – Esquema representativo do Parque Eco industrial de Kalundborg (DK). Fonte: <http://www.symbiosis.dk/en/>

No Brasil, o Polo Petroquímico de Camaçari na Bahia (Tanimoto, 2004) e, o Programa Rio Ecopolo no Rio de Janeiro (Fragomeni, 2005), também representam um tipo de SI colocalizada.

Já o Programa Nacional de Simbiose Industrial (*National Industrial Symbiosis Programme* – NISP), lançado no Reino Unido em 2003, é um exemplo de SI virtual que fornece metodologia, ferramentas, técnicas e capacitação para criar fluxos sinérgicos entre as empresas. Em 2007, o programa foi expandido para a China, México e Brasil. O Programa Brasileiro de Simbiose Industrial (PBSI), articulado pela Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais

(FIEMG), com o apoio da FIERGS (Rio Grande do sul), FIEP (Paraná) e FIEA (Alagoas), teve como principais motivações a diminuição de custos para as empresas e a melhoria de desempenho ambiental (Paula, Abreu & Sousa, 2015).

De 2009 a 2015, o Programa Mineiro de Simbiose Industrial viabilizou a recuperação de 140 mil toneladas de resíduos, deixou de utilizar 200 mil toneladas de recursos naturais, diminuiu a emissão de carbono em 90 mil toneladas, reutilizou mais de 13 milhões de m³ de água, e reduziu os custos com a reciclagem de materiais das empresas participantes em 8,7 milhões de reais (Conceição, Magalhães & Santos, 2022).

Em uma SI baseada na troca de resíduos, as empresas reciclam, doam ou comercializam as sobras de materiais, por meio de revendedores terceirizados, para outras instituições de forma unidirecional e, geralmente, com foco principal no estágio de fim de vida (Chertow, 2000).

A metodologia do NISP se baseia em estabelecer comunicação com empresas que tenham potencial de participação para discutir possíveis soluções para os rejeitos gerados. Segundo Jensen et. al (2011), inicialmente, esse contato trata do problema de destinação de um resíduo de forma específica e, com o tempo, também são discutidos fatores logísticos mais abrangentes e possibilidade de destinação de mais subprodutos. Os participantes incluem desde microempresas a multinacionais de todos os setores da indústria. Como esse modelo de simbiose depende de ligações virtuais e não de localização, permite que os benefícios sejam expandidos para envolver comunidades econômicas regionais, cujo potencial para a identificação de trocas de subprodutos está vinculado ao número de empresas que podem ser conectadas.

Para Weetman (2019), os modelos tradicionais de indústria, de base linear – que extrai, produz e descarta –, devem ser transformados em “ecossistemas industriais”. A SI, como uma aplicação da ecologia industrial, é uma forma de enfrentar os desafios da sustentabilidade e alcançar uma economia circular com processos e produtos responsáveis. Deste modo, a indústria é reestruturada sob o formato de um sistema fechado baseado em relações simbióticas, e intrinsecamente ajustado às tolerâncias e características dos sistemas naturais.

A SI é um fator determinante para a reestruturação do modo de produção fabril em níveis ambientalmente seguros. Como destaca Pacheco (2013), a centralidade da simbiose industrial advém da operacionalidade do fechamento do ciclo, já que é por meio dela que se torna possível reaproveitar os fluxos do metabolismo industrial através de uma relação de mutualismo.

6

Procedimentos metodológicos, métodos e técnicas de pesquisa

Este capítulo está estruturado para explicar o conjunto de procedimentos metodológicos, sistematizados com base nos objetivos, que contribuirão para a investigação do problema proposto pela tese. Apresentam-se as pesquisas aplicadas neste estudo, considerando o método, a abordagem, os instrumentos de coleta de dados, de análise e de interpretação de resultados.

Para melhor compreensão dos procedimentos metodológicos, rememora-se que o foco principal deste estudo está em propor um modelo de gestão de resíduos têxteis para o Arranjo Produtivo Local Polo Moda Praia de Cabo Frio, sob a perspectiva da economia circular. Para tanto, buscou-se formas de identificar como reintroduzir o resíduo no ciclo produtivo utilizando processos de reciclagem têxtil e ferramentas digitais; compreender as interações estabelecidas e potenciais entre os atores do arranjo; e projetar um fluxo circular de materiais para a gestão do resíduo têxtil, levando em conta um outro paradigma para a cadeia de suprimentos.

Nas seções a seguir apresentam-se: (6.1) caracterização e tipo de pesquisa; (6.2) percurso metodológico; (6.3) estudos pré-experimentais; (6.4) definição do objeto de pesquisa; (6.5) pesquisa de campo; (6.6) proposta.

6.1

Caracterização e tipo de pesquisa

Há muitas razões que determinam a realização de uma pesquisa (Gil, 2002, p.17), no caso desta tese, as motivações são de ordem prática, mas não exclusivamente, e decorrem do anseio de conhecer com intenção de criar condições apropriadas para alcançar os resultados pretendidos.

Quanto aos objetivos, a pesquisa classifica-se como exploratória pois, a partir da proximidade com o problema, buscou aprimorar as ideias e as descobertas obtidas durante o processo de investigação, de forma flexível, considerando variados aspectos relativos ao fato estudado (Gil, 2002, p.41), para avaliar uma situação concreta a partir de dados de um grupo. É também caracterizada como exploratória, na medida em que procurou verificar a existência

de estudos que exploram a reciclagem de resíduos têxteis, mantendo o valor agregado da matéria-prima, em associação com tecnologias digitais de produção.

O delineamento da pesquisa envolveu limitar, fragmentar e decompor o que se constituiu objeto de estudo. Assim, estruturou-se a investigação em três fases, e em cada momento adotou-se um tipo de procedimento técnico: (fase 1) pesquisa pré-experimental, onde buscou-se refazer as condições do fato a ser estudado para observá-lo sobre controle (Lakatos & Marconi, 2003); (fase 2) pesquisa bibliográfica, que baseou-se em material já elaborado, constituído por livros, monografias, artigos científicos, publicações periódicas e material digital de fontes especializadas (Gil, 2002); e (fase 3) pesquisa de campo exploratória, na qual obteve-se descrições quantitativas do objeto de estudo, utilizando como procedimento de coleta de dados entrevistas não-estruturadas focalizadas e observação não-participante (Lakatos & Marconi, 2003).

Para tanto, lançou-se mão de uma abordagem mista, recorrendo simultaneamente a pesquisa qualitativa, que permitiu a aproximação necessária para a busca do conhecimento, e quantitativa, que traduziu em números as informações que foram coletas e analisadas na pesquisa de campo.

A pesquisa é de natureza aplicada, portanto, os resultados obtidos poderão ser utilizados como base para solução de problemas semelhantes, sendo indispensável assegurar as necessidades de adaptação a cada contexto.

6.2

Percurso metodológico

Conforme Gil (2002), a pesquisa exige que as ações desenvolvidas ao longo de seu processo sejam efetivamente planejadas. Ainda de acordo com o autor, é a partir da natureza do problema que se determina os procedimentos que serão adotados para a obtenção de respostas significativas.

Para alcançar o propósito desta tese, que se traduz em criar um processo de gestão de resíduos têxteis para o APL Polo Moda Praia de Cabo Frio, foi substancial organizar ações que permitissem identificar como reciclar o material, entender o fluxo desse resíduo, bem como, as relações estabelecidas e potenciais entre os atores que fazem parte do arranjo selecionado como amostra.

O percurso metodológico, através do qual construiu-se a presente investigação, e cuja síntese pode ser apreciada na figura 24, foi subdividido em cinco etapas e em cada uma delas realizou-se um conjunto de ações: (1)

experimento em laboratório, compreendeu a pesquisa e definição do material e estudos pré-experimentais; (2) definição do objeto, envolveu a seleção e revisão de literatura, definição do problema e objeto da pesquisa; (3) pesquisa de campo, consistiu no diagnóstico do fluxo de resíduos e análise das relações entre os atores do arranjo; (4) desenvolvimento do modelo de gestão de resíduos, incluiu pesquisa e entrevista com atores potenciais; e (5) proposta, abrangeu a elaboração e design do processo de gestão dos resíduos têxteis.

Desta forma, no conjunto das coisas e fatos reais, o entendimento da problemática da pesquisa foi acontecendo e ganhando novos contornos, sem interrupções ou lacunas, à medida em que as ações foram realizadas.

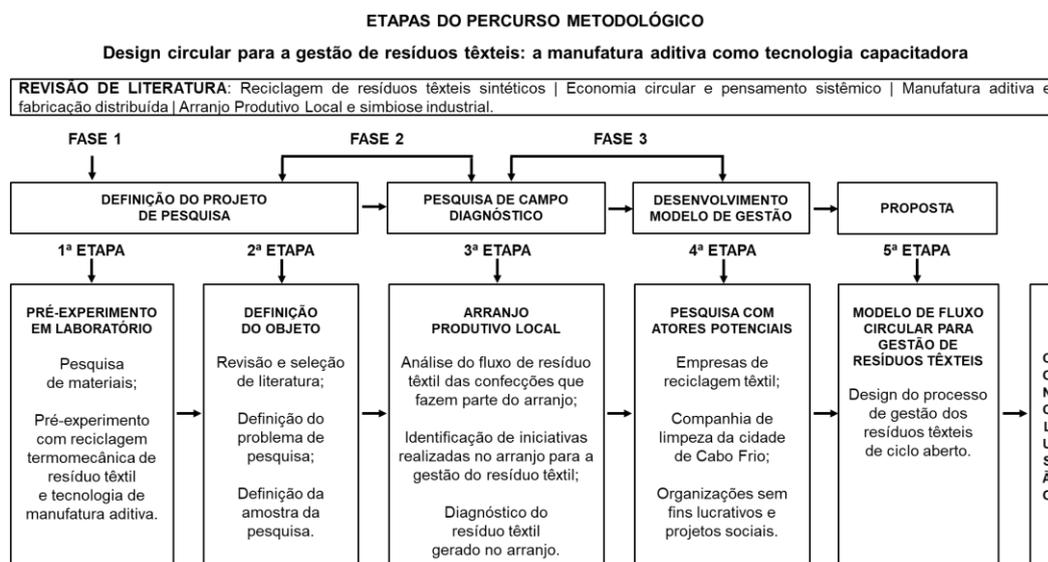


Figura 24 – Etapas do percurso metodológico da pesquisa.

A seguir, descreve-se cada uma dessas etapas desta pesquisa com suas respectivas ações, práticas, técnicas, e instrumentos de coleta e análise de dados.

6.3

Etapa 1: estudo pré-experimental em laboratório de design

Um pré-experimento é caracterizado pela realização de uma única intervenção durante o processo (Campbell & Stanley, 1979). Embora esteja sujeito à validade interna, esse tipo de experimento fornece informações que permitem destacar aspectos relevantes de serem considerados em um possível experimento futuro (Selltiz; Wrightsman & Cook, 1976). Nesta pesquisa, o estudo

pré-experimental foi dividido em três estágios e a sequência das ações realizadas estão esquematizadas no fluxograma ilustrado na figura 25.

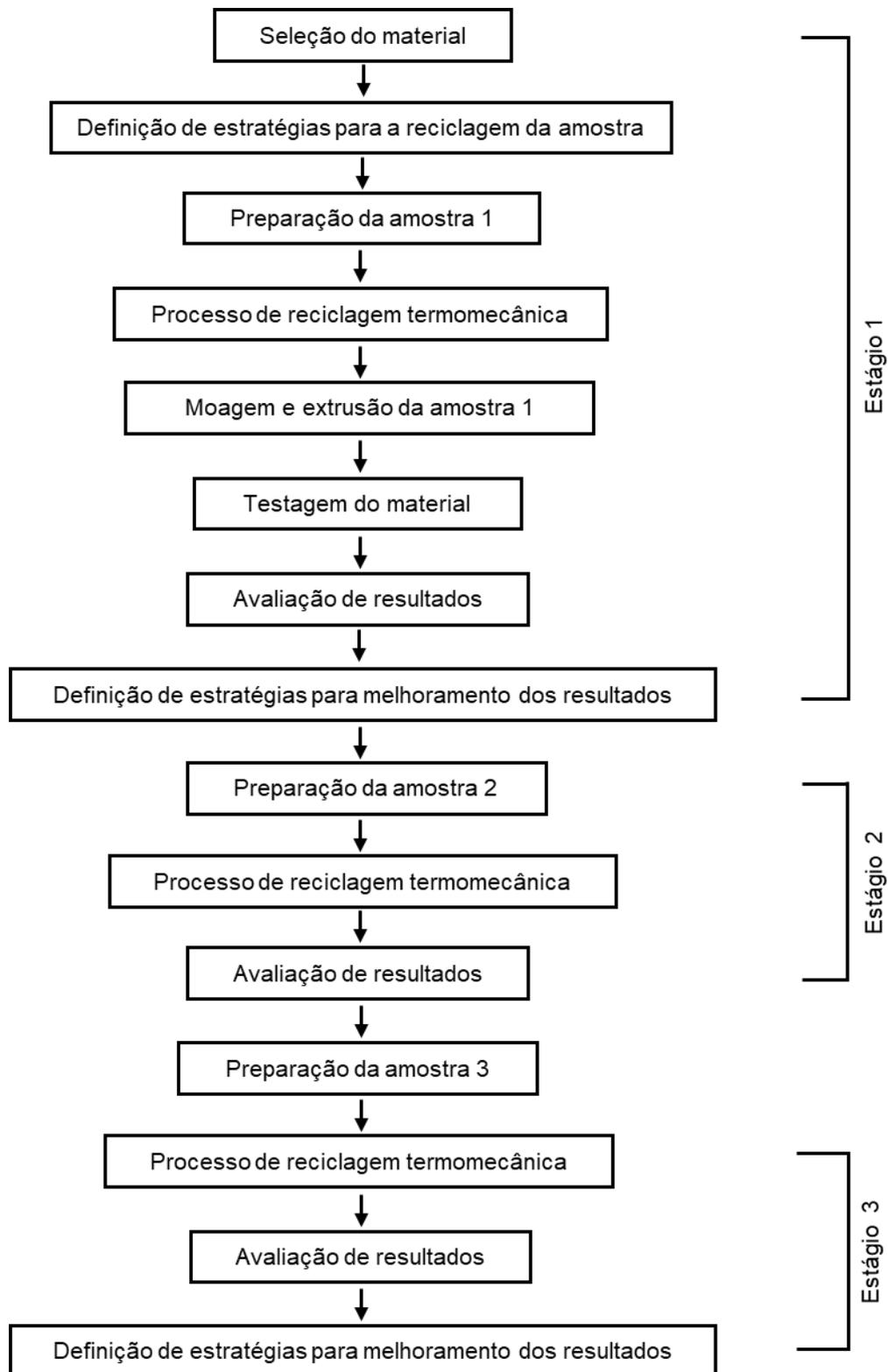


Figura 25 – Fluxograma do experimento.

6.3.1

Seleção do material: poliamida e suas características

A decisão sobre a escolha do resíduo de malha poliamida como material para a realização do pré-experimento levou em consideração dois aspectos, o fato de ser um têxtil sintético, e de ser um polímero da classe dos termoplásticos.

As fibras químicas sintéticas, obtidas principalmente do petróleo, mas também do carvão mineral, são demasiadamente mais nocivas ao meio ambiente devido ao longo período necessário para a degradação de suas partículas, que pode levar centenas de anos (Pezzolo, 2017).

O desenvolvimento dessa classe de fibras foi dirigido pela poliamida 66 (PA66) em 1935, que foi idealizada para reproduzir as propriedades da seda (tecido natural de origem proteica). Anos depois, o fio foi denominado Nylon e utilizado na confecção de meias femininas (Colombi, 2017). Posteriormente, o avanço e o aperfeiçoamento das pesquisas levaram à produção da fibra de poliamida 6 (PA6).

Os algarismos que acompanham a sigla PA, indicam o número de átomos de carbono presente na molécula, no caso da PA66, os números representam dois grupos funcionais reativos, o ácido adípico e a hexametilenodiamina (Magni & Ricchetti, 2017; Factori, 2009). Já a PA6 é derivada da molécula do composto orgânico caprolactama (CPL), que possui seis átomos de carbono (Colombi, 2017).

As poliamidas integram o grupo dos termoplásticos e são polímeros de grande interesse comercial para aplicações têxteis e de engenharia devido à combinação de propriedades como boa resistência química e à abrasão, elevada resistência a tensão e a flexão, estabilidade dimensional e fácil processamento (Factori, 2009). Os termoplásticos “amolecem” sob aquecimento, fluem sob pressão, solidificam-se quando submetidos a resfriamento, num processo reversível (Thomé, 2016), e permitem que sejam moldados por ação isolada ou conjunta de calor e pressão (Spinacé & De Paoli, 2004), repetidas vezes. Igualmente, estas são características que coadunam com os requisitos básicos dos filamentos utilizados em impressoras 3D do tipo FDM.

Quanto à origem, as poliamidas são classificadas como polímeros sintéticos (Thomé, 2016). No que se refere à disposição das suas moléculas, apresentam estrutura semicristalina (uma fase cristalina e uma fase amorfa). Quanto ao processo de obtenção, são consideradas polímeros de condensação, ou seja, são formadas através de reações intermoleculares, que ocorrem em diferentes etapas,

e em geral envolvem mais de um tipo de monômero (Magni & Ricchetti, 2017) (Figura 26). Thompson (2015) explica que no estágio 1 os monômeros são levados a um recipiente reator e no estágio 2 são aquecidos e agitados continuamente, até se unirem formando longas cadeias de polímeros. O autor descreve que à medida que a água gerada como subproduto evapora (12 - 24 horas), a mistura líquida torna-se cada vez mais viscosa. No estágio 3, o polímero passa pelo processo de extrusão, é cortado na forma de chips ou pellets, e depois passa por um processo de secagem por cerca de 30 horas.

A presença de ligações de hidrogênio, também conhecidas como pontes de hidrogênio, na cadeia das poliamidas as tornam higroscópicas, o que significa que possuem grande capacidade de absorver umidade (Factori, 2009). Embora esta seja uma característica adversa, por exemplo, em relação ao aspecto estabilidade dimensional, em particular para poliamidas 66 e 6, a higroscopicidade favorece a maleabilidade do material, atuando como um plastificante natural após o processamento (Soares, 2021a). A cristalinidade é uma propriedade diretamente relacionada e inversamente proporcional à higroscopia da fibra, isto é, quanto maior a cristalinidade menor é a higroscopicidade e a penetração de corantes (Baumi, 2015).

Thomé (2016, p. 28) argumenta que nos polímeros, enquanto a temperatura de fusão (T_m) é uma transição na qual a fase cristalina perde sua estrutura repetitiva, a temperatura de transição vítrea (T_g) pode ser entendida como um ganho de mobilidade da fase amorfa (desordenada), responsável por características como rigidez, capacidade calorífica e o coeficiente de expansão térmica. A grande quantidade de regiões polares na cadeia das poliamidas, decorrente das ligações secundárias de hidrogênio, interfere na T_g do material. Ainda de acordo com a autora, um polímero está no estado vítreo, quando se encontra abaixo da T_g , não havendo energia interna suficiente para permitir o deslocamento de uma cadeia em relação à outra, tornando-se duro, rígido e quebradiço.

Por conta do caráter higroscópico das poliamidas, é indicado que antes de qualquer processamento o material seja submetido a um sistema de secagem para evitar a sua hidrólise, que é a degradação do material sob alta temperatura por presença de umidade (Soares, 2021b).

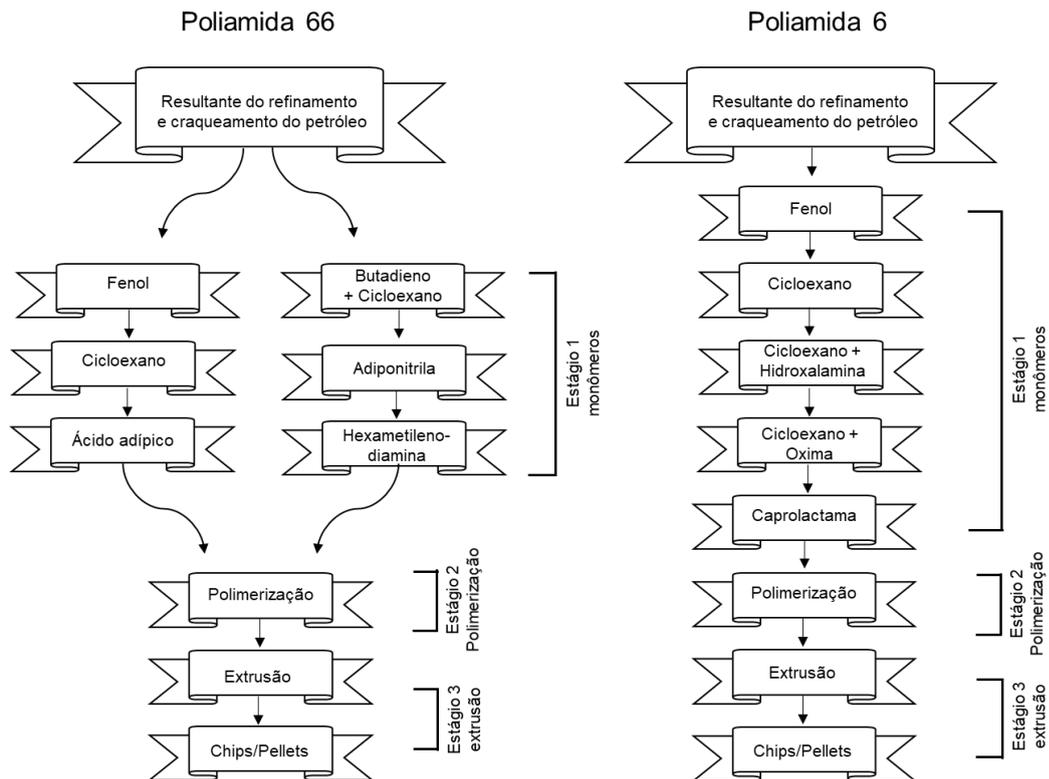


Figura 26 – Fluxo o processo de obtenção da poliamida 66 e da poliamida 6. Fonte: adaptado pela autora de Magni & Ricchetti (2017, p.32-33).

Na figura 27, ilustrada abaixo, pode-se observar um resumo das principais características do Nylon 66 (PA66) e do Nylon 6 (PA6).

Poliamidas		
Classificação geral		
Quanto a origem	Polímero sintético	
Quanto ao processo	Polímero de condensação	
Quanto a estrutura	Semicristalina (1 fase amorfa e 1 fase cristalina)	
Comportamento térmico	Termoplástico	
Propriedades térmicas		
	Nylon 66 (PA66)	Nylon 6 (PA6)
Ponto de fusão (T_m)	260°C	220°C
Temp. transição vítrea (T_g)	55°C	50°C
Temp. de processamento	240-290 °C (extrusão)	230-280°C (extrusão)
Propriedades físicas		
Tensão de escoamento	90 (68) MPa	80 (60) MPa
Absorção de água	1,3%	1,6%

Figura 27 – Quadro geral características do Nylon 66 e 6.

Em aplicações têxteis a poliamida, base formadora do Nylon, é leve e macia, resistente à abrasão, microrganismos e insetos, não encolhe e não deforma, é de fácil tratamento e secagem rápida, aquece pouco e favorece a transpiração do corpo (Pezzolo, 2017). Pode ser utilizada como composição única ou em combinação com outras fibras, por exemplo, a fibra de elastano, tornando-se particularmente apropriada à confecção de peças de moda praia e esporte.

O pensamento que deu origem a expectativa de transformar resíduos têxteis em matéria-prima para impressoras 3D, partiu da hipótese de que se a poliamida é um polímero termoplástico e o filamento utilizado nas impressoras 3D FDM são termoplásticos, então é possível transformar resíduos têxteis de poliamida em filamento para impressoras 3D FDM.

Assim sendo, selecionou-se amostras de resíduos de malha poliamida para a realização do pré-experimento utilizando como processos, as tecnologias de reciclagem termomecânica e a manufatura aditiva.

6.3.2

Definição e preparação de amostras: resíduos têxteis de malha poliamida

Para o pré-experimento utilizou-se malha de poliamida/elastano e para a recuperação do material, optou-se pela tecnologia de reciclagem termomecânica, por ser um processo relativamente simples, de baixo custo e pela disponibilidade dos equipamentos necessários.

No estágio 1, foram selecionadas três amostras de malha de poliamida/elastano (98%poliamida/2%elastano) (Figura 28), de cores distintas, com o objetivo de verificar se o pigmento poderia causar alguma interferência no processo de reciclagem do material.



Figura 28 – Amostras selecionadas para a estágio 1 do pré-experimento.

No estágio 2, selecionou-se uma amostra de malha poliamida/elastano sem a identificação da composição têxtil, considerando que em uma situação real nem sempre será possível obter esse dado com segurança (Figura 29).



Figura 29 – Amostra selecionada para estágio 2 do pré-experimento.

No estágio 3, utilizou-se dois lotes, (1) uma mistura de malhas com diferentes cores e composições, e (2) malha poliamida/elastano na cor branca, com composição 90%poliamida/10%elastano (Figura 30).



Figura 30 – Amostras selecionadas para estágio 3 do pré-experimento.

Como estratégia, estabeleceu-se em cada estágio do pré-experimento alterações relacionadas à cor, composição têxtil e variação da quantidade de

material submetido, simultaneamente, ao processo de fusão, buscando a aplicação mais adequada para orientar o desenvolvimento de um novo material através dos objetivos experimentais.

Pode-se dizer que o pré-experimento tangencia a abordagem de “Design Orientado por Material” (*Material Driven Design - MDD*), que sugere uma série de etapas para projetar produtos significativos, quando o ponto de partida é o material (Karana et al., 2015). Ainda assim, para além do material, ao longo do percurso buscou-se considerar a combinação material + estrutura + processo para entender como esses elementos estão inter-relacionados.

6.4

Etapa 2: definição do objeto de pesquisa

O objeto de pesquisa corresponde àquilo que se deseja saber ou realizar acerca de determinado assunto. Representa o conteúdo que se evidencia e em torno do qual se desenvolve toda a discussão ou indagação (Lakatos & Marconi, 2003). Engloba a formulação do problema, a hipótese e *corpus* da pesquisa.

Nesta tese, a *reciclagem de resíduos têxteis sintéticos pós-industrial para o desenvolvimento de um modelo de gestão de resíduos têxteis da indústria de moda praia do Rio de Janeiro*, é tomada como objeto de investigação, e o *Arranjo Produtivo Local Polo Moda Praia de Cabo Frio/RJ* representa a amostra deste universo.

A escolha desta amostra para a pesquisa deveu-se a relevância do arranjo para o segmento de moda praia no estado do Rio de Janeiro, sendo constituído por mais de cem lojas que ocupam toda a extensão de uma rua.

A pesquisa pré-experimental consistiu em delimitar o objeto, fornecendo um conjunto de dados que permitem destacar aspectos relevantes de serem considerados em um futuro experimento.

O arcabouço teórico foi fundamentado sobre quatro eixos: (1) reciclagem de resíduos têxteis sintéticos; (2) economia circular e design circular; (3) manufatura aditiva e fabricação distribuída; e (4) simbiose industrial. Essa estrutura apoiou o pré-experimento e a pesquisa de campo, e foi sustentáculo para a condução do estudo que resultou no desenvolvimento do modelo de gestão de resíduos têxteis, proposto nesta tese. Assim, com o cruzamento da problemática, da fundamentação e dos dados coletados define-se o *corpus* da pesquisa.

6.5

Etapa 3: pesquisa de campo

Para descrever a situação do contexto em que está sendo feita a investigação, realizou-se um estudo de campo exploratório no APL Polo Moda Praia de Cabo Frio para compreender o fluxo e obter um diagnóstico dos resíduos têxteis gerados pelas confecções, e identificar as relações estabelecidas entre os atores do universo pesquisado.

Gil (2002) explica que pelo fato de o estudo de campo evidenciar as interações entre os membros de um grupo investigado, a pesquisa é desenvolvida, principalmente, por meio de observação direta das atividades e entrevistas para captar o que ocorre no grupo. Desta forma, as técnicas de pesquisa adotadas para a coleta de dados foram a observação não-participante e entrevistas não-estruturadas focalizadas.

Na observação não-participante, tomou-se contato com a realidade do APL Polo Moda Praia de Cabo Frio, mas sem integrar-se a ele. Este tipo de procedimento tem caráter sistemático e exige que a observação seja consciente, dirigida e ordenada para um fim determinado, neste caso, o fluxo de resíduos têxteis da produção. A experiência direta com a situação do estudo foi essencial para entender os princípios, o modo de agir e os acordos estabelecidos no grupo, além de possibilitar acompanhamento do processo de corte e de separação de resíduos de duas empresas que integram o aglomerado.

Classificada como uma fonte de evidência secundária, a entrevista é uma técnica de investigação social para a coleta de dados que ajuda no diagnóstico ou no tratamento de um problema social (Lakatos & Marconi, 2003). Os tipos de entrevistas variam de acordo com o propósito. Nesta pesquisa optou-se pela entrevista não-estruturada focalizada, que propiciou liberdade para desenvolver cada situação na direção considerada adequada. No lugar de formular perguntas, criou-se um roteiro com tópicos relativos ao problema estudado que conduziram conversas informais realizadas por telefone e presencialmente.

A pesquisa ocorreu durante os meses de março de 2022 (por telefone) e em abril do mesmo ano (presencialmente), com os principais articuladores do arranjo e potenciais atores externos. Parte das informações sobre o grupo foram levantadas na primeira fase da pesquisa, a partir da análise de monografias que realizaram estudos de caso sobre o aglomerado (Cardoso, 2005; Peixoto, 2006; Valle, 2007; Moura, 2012).

6.5.1

Caracterização do APL Polo Moda Praia de Cabo Frio/RJ

Cabo Frio é um município brasileiro localizado ao leste do estado do Rio de Janeiro. Junto com as cidades de Araruama, Búzios, Arraial do Cabo, Iguaba Grande, São Pedro da Aldeia, Saquarema, Rio das Ostras e Macaé, forma a chamada Região do Lagos. Cabo Frio é a sétima cidade mais antiga do Brasil (Cardoso, 2006), com 410.415 km² de extensão territorial, densidade demográfica de 453,75 hab./km² e, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e estatística (IBGE), uma população de 234.077 habitantes (estimada para 2021).

As principais atividades econômicas da cidade são o turismo, a pesca, o vestuário moda praia, a extração de petróleo, a agricultura, a agropecuária e o artesanato. Mas, atualmente, o turismo, e por consequência, o vestuário de moda praia, segundo a Prefeitura de Cabo Frio, são as atividades mais expressivas da região. A produção de roupas de banho tem grande relevância econômica, com forte contribuição para o PIB local, e social, por empregar grande parte da população feminina (Cardoso, 2006).

A fabricação de artigos de moda praia na cidade teve início em 1953 com a costureira Nilza Rodrigues Lisboa, que mais tarde se tornara empresária e incentivadora de outras costureiras da região. Sua atuação no bairro da Gamboa, onde residia, foi determinante para a formação do APL Polo Moda Praia de Cabo Frio (Cardoso, 2006). Localizado no Gamboa Shopping (construído em 2002), na tradicional Rua dos Biquínis, antes Rua José Rodrigues Povoas (Figura 31), o APL é constituído, em grande maioria, por empresas de micro e pequeno porte (Peixoto, 2005), e é a maior rede de moda praia da América, com mais de cem lojas especializadas neste segmento (Moura, 2012). A “cooperação e o associativismo”; o “mercado”; e o “empreendedorismo” são os fatores que mais influenciam o APL Polo Moda Praia de Cabo Frio (Valle, 2007).

Este aglomerado forma um APL na modalidade arranjos geográficos (casuais), que é caracterizado por ocasionais elos interfirmas, escassa experiência de cooperação e instituições locais fracamente desenvolvidas. O arranjo possui alta especialização produtiva no segmento de moda praia, e



Figura 31 – Visão geral do bairro da Gamboa (destaque em amarelo) e da rua dos Biquínis (destaque em vermelho). Fonte: adaptado do Google Earth (2022).

governança mais ou menos formalizada através da Associação Comercial e Industrial da Rua dos Biquínis (Acirb), atualmente sem atividade.

Dados da Acirb estimam que sejam fabricadas e comercializadas, anualmente, cerca de cinco milhões de peças, gerando milhares de empregos fixos e temporários. É importante ressaltar que a sazonalidade tem forte influência na geração de empregos, provocando grande rotatividade de funcionários entre os períodos de alta e baixa temporada (Peixoto, 2005; Cardoso, 2006).

O fortalecimento da Acirb, principal ator social do aglomerado, já resultou em alguns avanços almejados para o arranjo, como a revitalização da Rua dos Biquínis, a inauguração de uma sede própria (hoje desativada) e o lançamento do livro *Biquini: duas peças que mudaram a rua e o mundo*, que conta a história da Rua e do desenvolvimento do APL Polo Moda Praia de Cabo Frio, publicado no ano de 2015.

6.5.2 Principais agentes

As principais instituições que atuam na mobilização, coordenação e articulação de ações do APL Polo Moda Praia de Cabo Frio são a Associação

Industrial e Comercial da Rua dos Biquínis (Acirb); a Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro (Firjan); o Sebrae/RJ e a Prefeitura Municipal de Cabo Frio (Quadro 15).

Instituição	Atuação no APL
Associação Industrial e Comercial da Rua dos Biquínis – (Acirb)	Realiza ações conjuntas para melhorias no APL e articula a comunicação entre os empresários.
Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro (Firjan)	Desenvolve ações para fomentar a busca de novos mercados para exportação dos produtos.
Sebrae/RJ	Elabora estudos prospectivos, programas e oficinas específicas para o segmento, fomenta a busca de novos mercados.
Prefeitura Municipal de Cabo Frio	Investe em obras, manutenção, serviços de coleta e iluminação.

Quadro 15 – Instituições que atuam na mobilização, coordenação e articulação de ações do APL.

6.5.3 Diagnóstico dos resíduos

Selecionou-se três para a realização da entrevista não-estruturada focalizada, um ator econômico (A), representado por uma encarregada de produção de uma das fábricas; um ator de regulação (B), responsável pela Diretoria de Serviços Urbanos da Comsercaf (Companhia de serviços de Cabo Frio); e um ator social (C), vice-presidente da Associação Comercial e Industrial da Rua dos Biquínis (Acirb) e empresária.

A primeira entrevistada (C), detalhou o panorama geral do fluxo de resíduos têxteis do arranjo. Apurou-se que apenas duas das empresas que fazem parte do aglomerado realizam o descarte do resíduo têxtil de forma ambientalmente adequada. (C) relata que cerca de 98% dos empresários não se responsabilizam pelo resíduo têxtil que geram, segundo ela, “a maioria deixa o lixo na rua como se fosse resíduo comum”. Este fato foi confirmado por (B), que destaca que os resíduos têxteis são misturados com o lixo orgânico, inviabilizando o processo de reciclagem têxtil. Como não há um programa de coleta seletiva voltado para esse tipo de resíduo, este acaba sendo encaminhado para o aterro sanitário da cidade.

(A) trabalha há nove anos em uma das empresas do arranjo que realiza o descarte adequado. Um dos pontos mais interessantes do seu depoimento é o

fato de que a iniciativa de gerenciamento do resíduo têxtil não partiu dos gestores (*top-down*), e sim do funcionário responsável pelo setor de corte (*bottom-up*), que observando o volume de matéria-prima descartada no lixo comum diariamente, resolveu pesquisar alternativas para o reaproveitamento do material junto a uma empresa de reciclagem têxtil, localizada em outra cidade. O requisito para a comercialização dos resíduos é que estejam em sacos de descarte e separados por composição (100% poliamida, de maior valor, separado das demais proporções, ex. de 98%poliamida/2%elastano, 90%poliamida/10% elastano, entre outras proporções de menor valor). O material é armazenado por um período que varia entre seis meses a um ano (a depender do montante acumulado) até que a empresa de reciclagem têxtil faça a coleta.

(A) estima que o volume acumulado no ano de 2021 foi de cerca de 7 toneladas, considerado por ela um volume reduzido, devido à redução da produção no último biênio em cerca de 50%. O valor recebido pela venda dos resíduos é dividido entre a equipe responsável pela iniciativa (encarregada, cortador e auxiliar de corte), e, nas palavras de (A) “funciona como uma boa renda extra”. A prática já é realizada há seis anos, o que equivale a dizer que mais de 43 toneladas de resíduos têxteis sintéticos, de uma única loja, que teriam como destino o aterro sanitário, foram encaminhadas para o processo reciclagem.

Apesar da relevância do arranjo produtivo local, não há, um programa de gestão de resíduos têxteis ou qualquer orientação sobre a forma adequada de realizar o descarte esse tipo de material.

6.5.4 Matriz SWOT do arranjo

A matriz SWOT identifica e avalia as Forças (Strengths), Fraquezas (Weakness), Oportunidades (Opportunities) e Ameaças (Threats) enfrentadas por uma indústria, setor, empresa ou organização (Gao & Peng, 2011 apud Bull *et al.*, 2016; Ghazinoory, Abdi & Azadegan-Mehr, 2011). É uma ferramenta que tem origem em pesquisas de gestão estratégica conduzidas nos anos de 1960 e 1970, e surge da perspectiva de que o desempenho de um determinado agente em relação a um determinado objetivo depende do modo pelo qual este agente interage com fatores internos (forças e fraquezas), e externos (oportunidades e desafios) (Bull *et al.*, 2016). A matriz SWOT pode ser usada tanto para a análise

de uma situação quanto como uma contribuição para um processo de planejamento estratégico em nível corporativo da empresa (Foong, 2007).

Após a reunião dos dados coletados formulou-se a matriz SWOT do arranjo para analisar suas principais características e o potencial de formação de uma simbiose industrial no aglomerado para o gerenciamento de resíduos têxteis (Figura 32). O grande desafio do APL é estimular o engajamento dos empresários na busca de soluções para melhorias no arranjo. A comunicação do grupo de cerca de 40 lojistas acontece, quase que na totalidade, através de um grupo de troca de mensagens por aplicativo. As reuniões presenciais têm baixa adesão, o que implica na dificuldade de tomada de decisões.



Figura 32 - Matriz SWOT do APL Polo Moda Praia de Cabo Frio

6.6

Etapa 4: desenvolvimento do modelo de gestão de resíduos para o APL Polo Moda Praia de Cabo Frio/RJ

A partir dos resultados do pré-experimento, da revisão de literatura e da pesquisa de campo inicia-se o desenvolvimento do modelo de gestão de resíduos do arranjo fundamentado no conceito de ecossistema industrial, que na perspectiva da ecologia industrial, implica em um sistema econômico em que os consumos de energia e materiais são otimizados e integrados em diferentes indústrias, e os resíduos de um processo servem de matéria-prima para outros (Frosch & Gallopulos, 1989 apud Ferrão, 2009).

Para o desenvolvimento do modelo de gestão de resíduos buscou-se uma imitação consciente de sistemas naturais a partir da ideia de teia alimentar, que representa o conjunto de cadeias alimentares que se entrecruzam e extrapolam

as possibilidades definidas pelo conceito de cadeia alimentar, levando em consideração que um elemento pode ocupar diferentes níveis tróficos.

A recuperação de materiais exige a formação de redes e operações de logística para promover fluxos simbióticos entre as empresas, transformando resíduos em subprodutos (Weetman, 2019). Deste modo, a partir do modelo de fluxo de nutrientes proposto por Weetman (2019), o desenvolvimento do fluxo de recuperação dos resíduos têxteis do APL Polo Moda Praia de Cabo Frio envolveu: (1) desenvolver maneiras de reciclar o material e reintroduzi-lo no próprio ciclo produtivo de origem, e (2) engajar novos atores/parceiros que possam utilizar o resíduo como matéria-prima ou dá destinação final ambientalmente adequada para estes resíduos.

O processo de tomada de decisões utilizou-se como ferramenta a matriz SWOT desenvolvida para arranjo, atentando para os pontos fortes, as oportunidades, as limitações e riscos potenciais na elaboração e no desenvolvimento do modelo. O estudo resultou um piloto de um modelo de ecossistema industrial para a gestão do resíduo têxtil do arranjo, que é descrito no próximo capítulo.

6.7 Proposta

O modelo de gestão apresentado defende que uma abordagem de economia circular para a gestão de resíduos têxteis não pode estar vinculada somente a processos de reciclagem, e exige uma visão holística da cadeia que deve incluir a comunidade.

As iniciativas de reciclagem têxtil geralmente estão no fim do processo, o que envolve as peças que não foram vendidas e as peças pós-consumo. Nesta pesquisa, procurou-se desenvolver estratégias para incorporar a reciclagem de *loop* aberto no segundo estágio de desenvolvimento do produto, a produção.

Após a fase implantação será possível obter indicadores de desempenho que permitam avaliar os resultados obtidos com o modelo de gestão de resíduos têxteis, apurar e conhecer os fatores limitantes, entre outras coisas.

Este capítulo apresentou os procedimentos metodológicos, métodos e técnicas de pesquisa aplicados para o alcance dos objetivos propostos nesta tese, de forma a validar o seu caráter científico.

7

Fluxos circulares para a gestão do resíduo têxtil do APL Polo Moda Praia de Cabo Frio/RJ

Na estrutura da economia circular proposta por Weetman (2019), os fluxos circulares estão no fim do processo, e o escopo deste estágio envolve os requisitos reutilizar, remanufaturar e reciclar. Nesta pesquisa, buscou-se estratégias para incorporar a reciclagem no *midstream* da cadeia, que corresponde ao processo de fabricação. O desenvolvimento no *midstream* da cadeia de suprimentos para a economia circular, inclui, dentre outras coisas, a predisposição para a fabricação distribuída, a simbiose industrial, criação de subprodutos e coprodutos, remanufatura e o uso de tecnologias capacitadoras.

De acordo com Weetman (2019), muitas escolas de pensamento salientam o princípio do resíduo como “alimento”, mas aqui, adota-se a abordagem *cradle to cradle*, que se refere aos materiais como “nutrientes”, pois essa perspectiva contribui para preservar a capacidade de cada material de nutrir um novo produto ou processo. Os nutrientes técnicos são os materiais minerados ou extraídos da crosta terrestre, e incluem combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás, e materiais sintéticos, como os plásticos à base de petroquímicos. A economia circular propõe que os nutrientes técnicos sejam projetados para sustentar ciclos sucessivos de recuperação, mantendo o máximo do seu valor, para evitar que retornem à biosfera na forma resíduo em aterros irregulares.

Segundo a Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Vestuário (ABIT), o Brasil é um dos líderes mundiais na produção de moda praia, e o estado do Rio de Janeiro é o maior produtor deste segmento no país. No processo de corte destes modelos há um desperdício de aproximadamente 30% de matéria-prima na forma de retalhos, e grande parte desse montante acaba descartado de forma irregular. O pré-experimento desta pesquisa objetivou identificar formas de reintroduzir o resíduo têxtil no ciclo produtivo das peças, aumentando, dessa forma, a vida útil do material.

Apresenta-se como resultados desta pesquisa o processo de obtenção de um protótipo de filamento para impressoras 3D produzido a partir da reciclagem termomecânica do resíduo têxtil, e o piloto do modelo de design do processo de gestão de resíduos para o APL Polo Moda Praia de Cabo Frio, com base no conceito de simbiose industrial.

7.1

Transformando resíduos de malha poliamida em filamento para impressoras 3D

No estágio 1 do pré-experimento apurou-se como transformar o resíduo têxtil pós-industrial de malha poliamida, proveniente do processo de corte da produção de peças de moda praia, em filamento para impressoras 3D. Com base no estudo de Sampaio (2017), que utilizou a reciclagem termomecânica para transformar resíduos de malha em diferentes objetos, buscou-se encontrar um meio de converter o resíduo têxtil em um material de alto valor, para identificar oportunidades de reinserir o material no próprio ciclo produtivo de origem. Para esse propósito, replicou-se o experimento do estudo de referência acrescentando-se outras etapas para obter o material na forma de filamento (Figura 33).



Figura 33 – Etapas do processo de desenvolvimento do filamento a partir de resíduos de malha poliamida.

7.1.1

Estágio 1 - Materiais e métodos

A primeira fase do pré-experimento foi realizada no Laboratório de Materiais Poliméricos do Instituto Nacional de Tecnologia LAMAP – INT. Os equipamentos utilizados foram: balança digital de precisão (Acculab VI-3mg – capacidade 300g e leitura: 0,001g); estufa industrial (Thermosolda 500L - temperatura máxima 300°C capacidade 500kg); moinho de facas de bancada (SEIBT); extrusora de filamento (SAGEC); e uma impressora 3D FDM (Felix Printer 3.0).

Foram selecionadas amostras de malha poliamida (98%poliamida/2%elastano) de três cores. O material passou por um processo de cominuição manual, e foram dispostos de modo diferente na bandeja (tiras, fragmentos pequenos, fragmentos grandes, e de forma aleatória) com o objetivo de verificar se esse aspecto influenciaria no processo de fusão (Figura 34a e 34b).

As amostras foram submetidas ao processamento por fusão em estufa industrial, pré-aquecida a 260°C, durante um período que variou entre 8 e 10 minutos. Percebeu-se que não era interessante dispor muitas camadas do

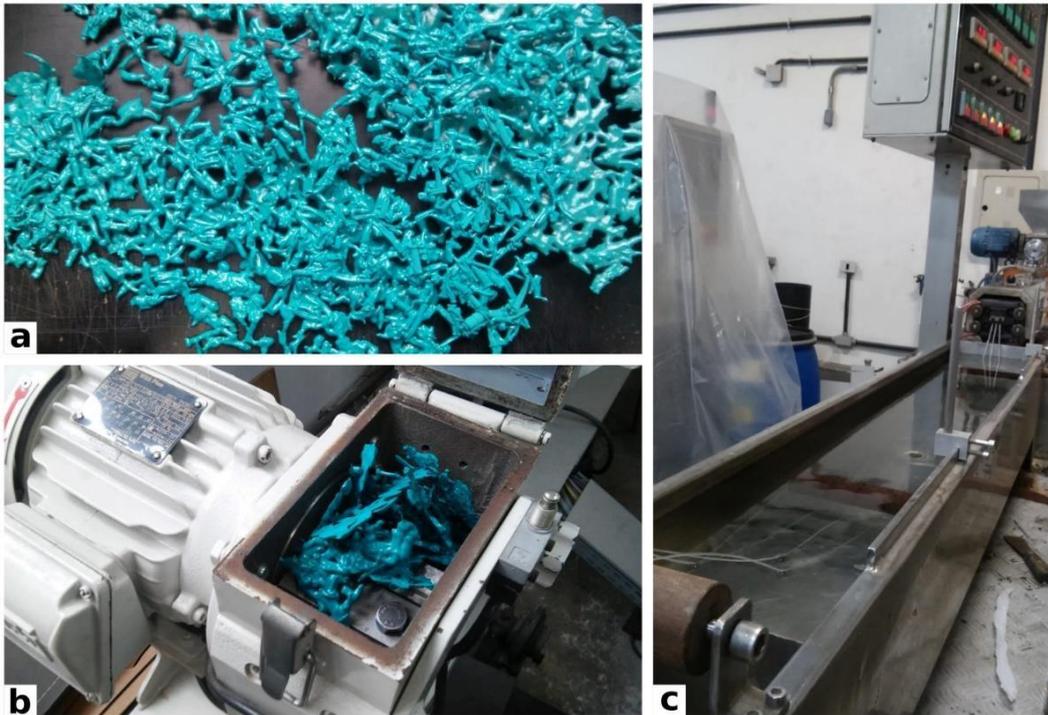
material porque a fusão ocorria gradualmente, da base para a superfície, e um tempo prolongado na estufa poderia causar a degradação de parte do material até que o derretimento estivesse finalizado. Por ser um polímero sintético de estrutura semicristalina (uma fase cristalina e uma fase amorfa), a poliamida não possui um ponto de fusão crítico, e sim um intervalo de temperatura em que ocorre o derretimento completo. Por isso, a temperatura de fusão da poliamida deve ser tratada como uma faixa de valores (Spinacé & De Paoli, 2005).

Após o período de exposição, os retalhos transformaram-se em um plástico resistente e flexível (Figura 34c). Destaca-se a maleabilidade do material resultante, que pode ser atribuída a higroscopicidade característica das poliamidas 66 e 6.



Figura 34 – Amostras do estágio 1. Disposição em diferentes formatos (a) e (b), e amostra depois do processo da fusão (c).

O próximo passo foi utilizar um moinho de facas rotativas para transformar a poliamida fundida (Figura 35a) em pequenos grânulos (pellets) (Figura 35b), e depois realizar o processo de extrusão. Os grânulos foram colocados no funil de carga do barril da extrusora onde ocorre, simultaneamente, o aquecimento, a Figura 35 – Poliamida fundida (a), processo de moagem (b) e extrusão do filamento (c).



mistura (quando é o caso) e a condução do material até o cabeçote, pela ação do parafuso de Arquimedes.

No processo de extrusão de polímeros (Thompson, 2015), o material derretido é pressionado através da matriz até a calha de resfriamento (tanque de água), onde se solidifica novamente na forma de filamento (Figura 35c).

7.1.2 Avaliação dos resultados

Neste primeiro estágio do pré-experimento, utilizou-se três cores de malha poliamida com a mesma composição têxtil. Durante o processo de fusão e moagem todas as amostras apresentaram comportamentos similares, no entanto, na etapa de extrusão observou-se que a amostra 3 (Figura 36a, à direita) apresentou um filamento com diâmetro mais estável. Diante desse fato ponderou-se que o resultado da extrusão foi influenciado pelas características inatas de cada pigmento, associadas a outros fatores, como por exemplo, as propriedades mecânicas do material.

Destaca-se dois pontos críticos no processo, a irregularidade no tamanho dos grânulos obtidos após a moagem, o que dificulta a condução do material, de

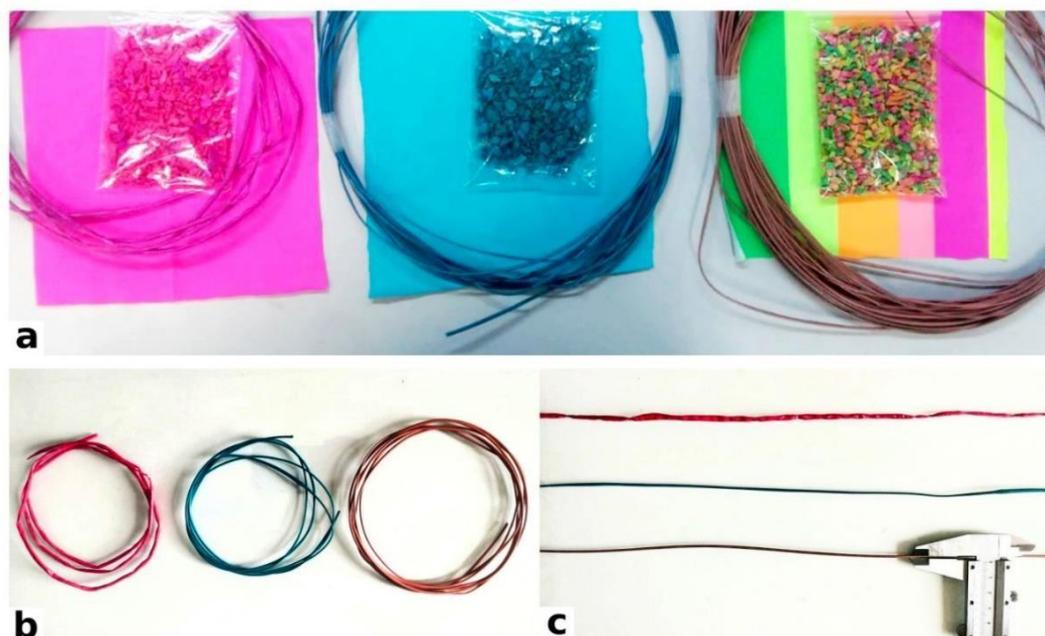


Figura 36 – Filamento produzido com malha poliamida (a) e (b) e variação do diâmetro dos filamentos (c).

forma contínua, do funil de carga até a matriz da extrusora; e o comportamento reológico, ou seja, o desempenho do fluido com relação a resistência de escoamento, que pode ou não ser influenciado pela temperatura e/ou pela velocidade, o que exigiu um fino ajuste no aquecimento das correias da extrusora para garantir um fio com diâmetro regular.

Foi realizado um teste de impressão com o filamento produzido utilizando uma impressora 3D FDM (Felix Printer 3.0), cujo perfil (configuração dos parâmetros de impressão) (Quadro 16) foi determinado com base nas configurações recomendadas para filamentos à base de poliamida disponíveis no mercado.

Perfil de impressão	
Temperatura da extrusora	240 - 270°C
Temperatura da mesa	110 - 130°C
Distância de retração	30 (mm)
Velocidade de impressão	30 - 50 (mm/s)
Cooler de resfriamento	desligado
Distância de separação do raft	0,1 - 0,2 (mm)

Quadro 16 – Parâmetros do perfil de impressão.

Filamentos industriais à base de poliamida apresentam dificuldade de fixação na plataforma de construção, por isso foi utilizada cola bastão, específica para esta finalidade, na superfície da plataforma.

A partir da terceira sobreposição do material notou-se uma dificuldade de aderência entre os filamentos adjacentes em camadas diferentes, e a interrupção do fluxo (Figura 37). Algumas variáveis podem influenciar esse comportamento:

(i) a temperatura de extrusão pode afetar a condutividade térmica e a vazão do material e influenciar o tempo de contato da camada anterior com a posterior e, por consequência, a temperatura dos filamentos no momento do contato; (ii) a velocidade de deposição das camadas de impressão pode estar abaixo do ideal; (iii) a impressora 3D utilizada no pré-experimento não possui câmara de construção fechada (como recomendado para uso de poliamida), assim a temperatura do ambiente pode interferir na temperatura do material no momento da deposição das camadas.



Figura 37 – Primeiro teste de impressão com filamento desenvolvido a partir de retalhos de poliamida.

Entre as alternativas para remediar esse aspecto estão: usar um plastificante, para reduzir a viscosidade do material fundido; um extensor de cadeia, para promover a ligação entre as moléculas; ou adicionar um percentual de pellets de poliamida virgem à mistura, para reforçar as propriedades do material, antes da etapa de extrusão do filamento. Considerando esta última alternativa, realizou-se um segundo teste no Laboratório de Modelos e Protótipos (LAMP) do Departamento de Artes & Design da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) com a colaboração do professor João Azevedo, acrescentando 15% de pellets de poliamida virgem ao material durante a extrusão. Obteve-se um filamento de aspecto rugoso e de menor resistência, quando

comparado aos obtidos com utilizando apenas resíduos têxteis, contudo, foi possível obter um corpo de prova que superou a dificuldade de aderência entre as camadas de impressão (Figura 38).



Figura 38 – Extrusão do filamento com 15% de poliamida virgem e teste de impressão.

Ademais, cogitou-se sobre o fato de que o polímero passa por sucessivos processos de fusão (derretimento dos retalhos, extrusão do filamento e processo de impressão) portanto, inexoravelmente, suas propriedades mecânicas sofrem interferência (Figura 39).

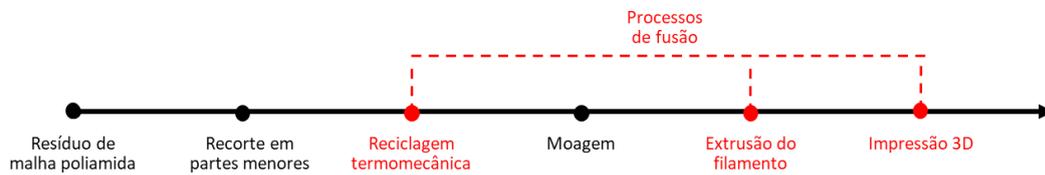


Figura 39 – Sequência de processos de fusão do material. Fonte: desenvolvido pela autora, 2021.

Para todos os tipos de filamento, recomenda-se o armazenamento em embalagem fechada com dessecante ou em caixa aquecida para evitar a absorção de umidade. Sobretudo no caso da poliamida, que possui uma alta higroscopicidade, a umidade pode formar bolhas de ar que ocupam o espaço do próprio material no interior do filamento causando interrupções (falhas) no fluxo durante a extrusão. Em alguns casos é possível remover a umidade externa do material colocando o filamento em uma estufa por um período de 1 a 4 horas, com temperatura média de 90°C.

Sobre a busca de alternativas para evitar os sucessivos processos de aquecimento do material, considera-se realizar testes mudando a forma de alimentação da extrusora, ou seja, no lugar de filamento, que é forma mais tradicional de alimentação de impressoras 3D FDM, utilizar o material em

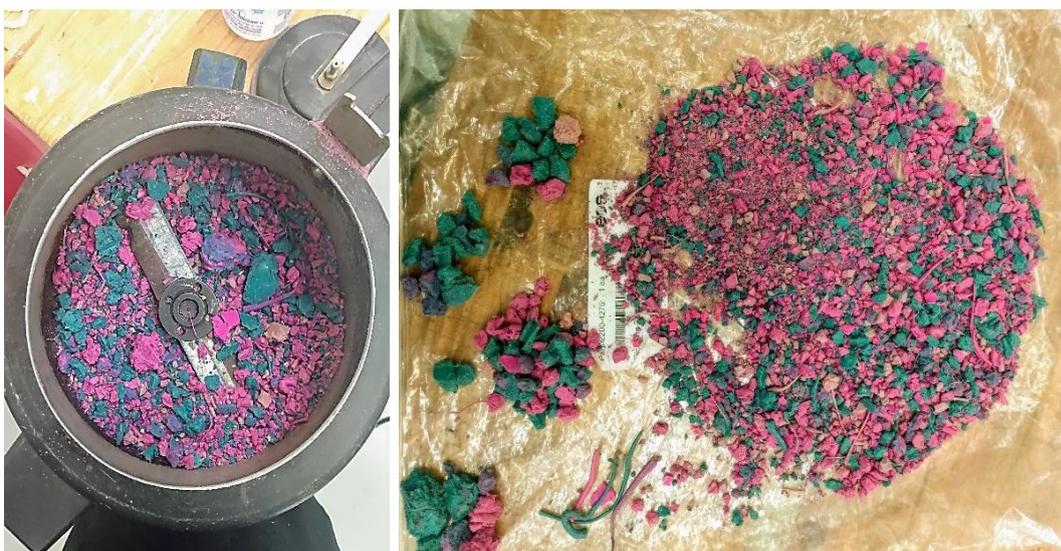


Figura 40 – Material na forma de grânulos (pellets).

grânulos, eliminando a etapa de extrusão e, conseqüentemente reduz a necessidade de uso de outros equipamentos, tornando o processo ainda mais simplificado. A fabricação por granulado fundido (FGF), ou impressão 3D de pellets, reduz o custo e o ciclo de produção do material utilizado na impressora 3D. Na representação acima (Figura 40), os resíduos, provenientes do processo de calibração da extrusora, foram transformados em grânulos utilizando uma trituradora de baixo custo desenvolvida pelo pesquisador Raphael Vinagre do Laboratório de Biodesign (LABiodesign) da PUC-Rio.

A factibilidade desta opção é tem com base em outros experimentos semelhantes, como o que tem sido realizado pelo professor João Azevedo, no LAMP da PUC-Rio, que utiliza sobras de plásticos, dos experimentos do laboratório, na forma de pellets, diretamente na impressora 3D (Figura 41).



Figura 41 – Projeto DRAM realizado no LAMP. Fonte: cedida pelo professor João Azevedo.

7.1.3 Estágio 2 - Materiais e métodos

O estágio 2 do pré-experimento foi realizado no Laboratório de Polímeros do Instituto de Macromoléculas da Universidade Federal do Rio de Janeiro - IMA/UFRJ. O equipamento utilizado foi uma estufa industrial (Thermosolda 500L - temperatura máxima 300°C capacidade 500kg).

Nesta etapa, selecionou-se amostras de malha poliamida/elastano sem a identificação do percentual da composição têxtil. Assim como no estágio 1, os retalhos foram recortados e dispostos de modo diferente na bandeja, com uma quantidade maior de camadas de tecido (Figura 42).



Figura 42 – Amostras do estágio 2. Disposição do material em diferentes formatos.

As amostras foram submetidas ao processo de fusão na estufa industrial, pré-aquecida a 260°C. Diferente das amostras no estágio 1, o tempo de exposição para o completo derretimento do material foi demasiadamente maior.

Na figura 43, a amostra foi exposta ao aquecimento por um período de 15 minutos. É possível observar na imagem que o processo de fusão ocorreu parcialmente, com uma parte do material ainda no estado original. Na figura 44 o tempo de exposição foi de 30 minutos, tempo suficiente para perceber o aparente derretimento completo do material.



Figura 44 – Amostras do estágio 2 após 15 min. na estufa.



Figura 43 – Amostra do estágio 2 após 30 min. na estufa.

7.1.4 Avaliação dos resultados

Não foi possível dá continuidade as outras etapas, porque o processo de fusão dos retalhos não ocorreu como esperado. O material resultante foi um plástico duro e quebradiço, com uma aparência lisa na parte superior e aerada no centro (Figura 45), com a presença de muitos espaços vazios indicando alto teor de umidade na amostra. Na base, o material alcançou uma condição intermediária, entre o estado original e a fusão completa, assumindo uma forma plana, como uma folha de papel, porém frágil (Figura 46). O alto teor de umidade da amostra também justifica a hidrólise, ou seja, a degradação do material sob alta temperatura por presença de umidade.



Figura 45 – Avaliação da parte central do material após o processo de fusão.



Figura 46 – Avaliação da base do material após o processo de fusão.

7.1.5 Estágio 3 - Materiais e métodos

O estágio 3 do pré-experimento foi realizado no Laboratório de Sustentabilidade e Química de Polímeros do Instituto Politécnico da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – IPRJ/UERJ. O equipamento utilizado foi a “Recicladora”, protótipo de um projeto dirigido pela professora Ana Moreira para a reciclagem de resíduos têxteis da produção de peças do Arranjo Produtivo Local Polo Moda Íntima de Nova Friburgo/RJ.

Nesta etapa foram utilizados dois lotes de amostra: (1) uma mistura de retalhos de malha de diferentes composições, e (2) malha poliamida/elastano na cor branca, com composição 90%poliamida/10%elastano. O material foi colocado na “Recicladora” sem a necessidade de tratamento prévio, como por exemplo secagem em estufa ou processo de cominuição. O tempo de exposição das amostras não foi registrado, pois está relacionado ao volume de material que é submetido ao aquecimento, não sendo, portanto, uma variável de controle. A temperatura de processamento utilizada foi na faixa de 250-280°C e o resultado pode ser observado nas figuras 47 e 48.



Figura 47 – Amostra do estágio 3 (lote 1) após processo de fusão.



Figura 48 – Amostra do estágio 3 (lote 2) após processo de fusão.

O processo de fusão do lote 1 ocorreu mais rápido, no entanto identificou-se forte resíduo de odor no material obtido. Os grumos formados após o derretimento apresentaram um grau de dureza superior a todas as outras amostras, inclusive as dos outros estágios do pré-experimento. Já o lote 2, levou mais tempo submetido ao aquecimento até atingir o derretimento completo. Os grumos formados exibiram uma aparência resistente, flexível, e sem odor.

7.1.6 Avaliação dos resultados

Buscou-se com o pré-experimento, obter informações que permitissem destacar aspectos relevantes de serem considerados em um experimento futuro. Identificou-se que a cor é uma variável importante, assim como a quantidade de material que é processado simultaneamente. Realizar um tratamento prévio na amostra, como por exemplo um processo de cominuição ou de secagem em estufa, contribui para otimizar o resultado do material após o derretimento.

Devido as diferentes possibilidades de composições têxteis de uma malha, não é recomendado processar os resíduos têxteis sem antes identificar a composição dos artigos. Acredita-se que o lote 1 da amostra do estágio 3 continha também malha a base poliéster, já que o resultado do material fundido apresentou forte resíduo de odor, que é uma característica da queima desta categoria de polímeros, quando na forma de material têxtil.

A partir dos resultados surgem alguns questionamentos que podem resultar em pesquisas futuras, tais como: esse processo é viável em escala industrial? Quais as melhores práticas para a separação e identificação do resíduo têxtil? A reciclagem química é uma alternativa mais adequada para a recuperação dos resíduos têxteis sintéticos?

Embora ainda seja necessário mais trabalho para melhorar a qualidade do filamento extrusado, o teste realizado com a impressora 3D apresentou resultados animadores, já que foi utilizado apenas resíduo têxtil sintético como matéria-prima.

Após testes realizados com filamento comercial à base de poliamida, atesta-se que é possível produzir aviamentos e acessórios utilizando uma impressora 3D FDM (Figura 49), para abastecer a produção de uma confecção de moda praia.

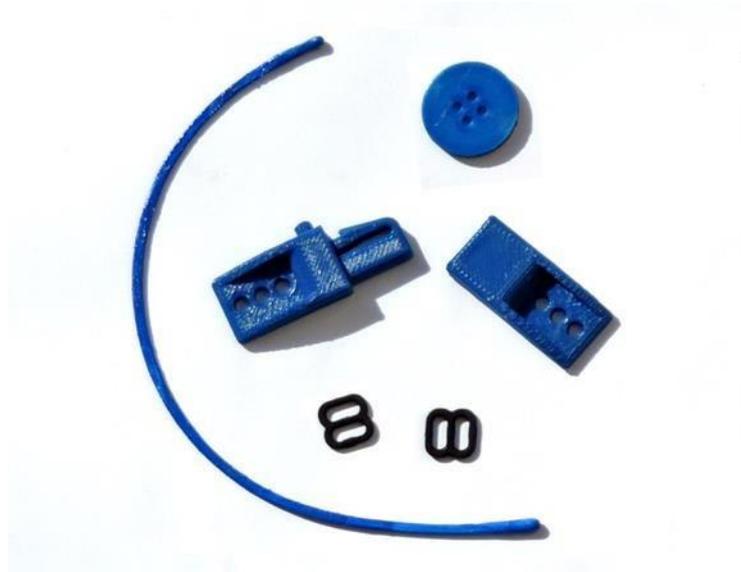


Figura 49 –Aviamentos e acessórios produzidos com impressora 3D e filamento de poliamida comercial.

Além disso, também é possível imprimir componentes da máquina de costura (calcador, chapa da agulha, porta carretel), aparelhos de costura (bainha, viés, vivos), gabaritos, ou ainda, para atender outras necessidades que a própria empresa pode identificar no decorrer do processo. Desta forma, a fabricação é local, distribuída e pode acontecer sob demanda.

Na maioria das vezes, o processo de reciclagem têxtil transforma os resíduos em um material de menor valor como, por exemplo, desfibrados e enchimento que são utilizados em produtos ou componentes da indústria esportiva e automobilística, como foi apresentado no capítulo 2. O protótipo de filamento obtido no pré-experimento desta pesquisa, ressignifica os resíduos têxteis acrescentando uma nova camada às possibilidades de coprodutos que são obtidos a partir dos processos de reciclagem deste tipo de material, preservando o seu valor.

7.2

Proposta de ecossistema de gestão de resíduos

Em um ecossistema a cadeia alimentar representa as relações de alimentação que existem no grupo. Nas cadeias, o fluxo de energia é unidirecional, ou seja, é sempre em um mesmo sentido – produtores, consumidores e decompositores ocupando o mesmo nível trófico. De modo diferente, na teia

alimentar, há várias relações interligadas que se entrecruzam e extrapolam as possibilidades definidas pelo modelo unidirecional. A teia conecta, portanto, várias cadeias alimentares, resultando em múltiplas relações entre os organismos que compõem o ecossistema.

É a partir dessa metáfora que se idealizou um ecossistema de gestão de resíduos para o APL Polo Moda Praia de Cabo Frio/RJ, depois de reconhecer o campo, mapear os atores e compreender as dinâmicas do arranjo. Com base no diagnóstico, buscou-se esboçar o design do processo de gerenciamento de resíduos têxteis, oriundos da produção, fundamentado no conceito de simbiose industrial do tipo virtual, obtendo como resultado um fluxo de recuperação de *loop* aberto transetorial (Figura 50).

O modelo de ecossistema para a gestão do resíduo têxtil do arranjo, é constituído, inicialmente, por sete componentes: (1) empresas do arranjo; (2) companhia de serviço de limpeza; (3) artesãos; (4) ONGs; (5) empresa de serviço de logística reversa; (6) empresas de reciclagem têxtil; e (7) outros mercados.

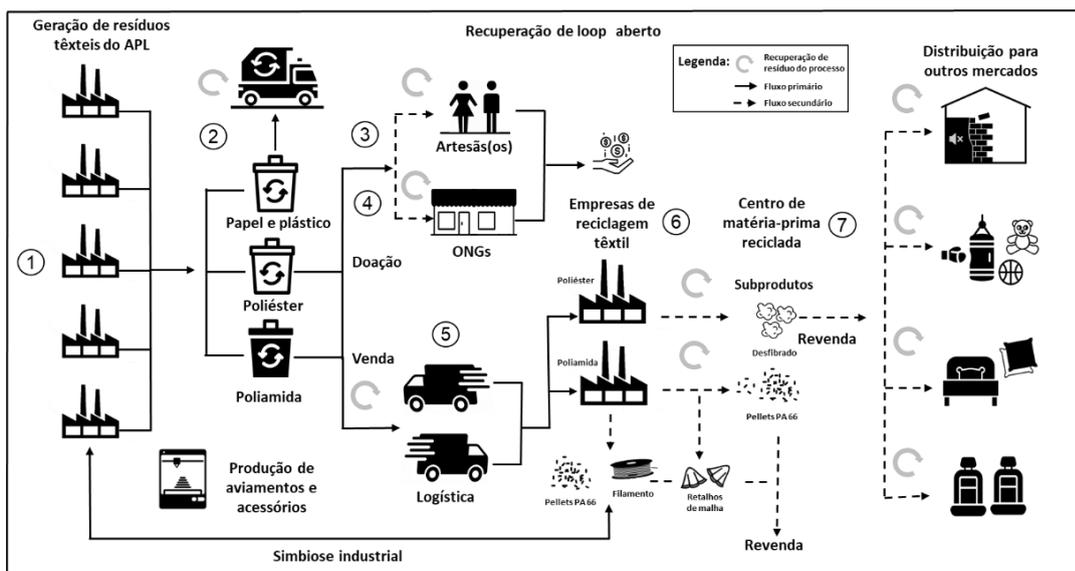


Figura 50 – Proposta de fluxo circular de *loop* aberto transetorial.

Mesmo sendo pensado para contemplar somente o resíduo têxtil do arranjo, julgou-se necessário pensar alternativas para o papel e o plástico que são utilizados na mesa de corte. Assim, propõe-se que as fábricas do arranjo (1) realizem a separação dos resíduos gerados, papel e plástico, poliéster e poliamida; o papel e o plásticos são recolhidos pela Companhia de Serviços de Cabo Frio – Comsercaf (2) através do programa de coleta seletiva; o poliéster, devido ao seu baixo valor de venda, é encaminhado para doação à artesãos (3) e

à ONG (4) “Comunidade dos Sinos” que mantém um projeto social com a comunidade local; a poliamida é recolhida por empresas de serviço de logística reversa (5); duas empresas de reciclagem têxtil (6), a empresa “A” (São Paulo), que transforma o resíduo têxtil em desfibrados, e a empresa “B” (Londrina), que recicla o material e converte em pellets e em filamento para impressora 3D; e, outros mercados (7), que adquirem os subprodutos do processo de reciclagem. Parte da produção da empresa “B” é reencaminhada para as empresas do arranjo, para que estas possam produzir os aviamentos e acessórios utilizados na produção utilizando uma impressora 3D.

Este é um modelo piloto desenvolvido, especificamente, para atender as necessidades do APL Polo Moda Praia de Cabo Frio/RJ, e permite identificar e conectar novos parceiros de acordo com as necessidades do arranjo. Como foi discutido no capítulo 2 desta tese, as empresas de reciclagem têxtil estão concentradas na região sul e sudeste (majoritariamente em São Paulo) do Brasil e este poderia ser um aspecto negativo do ecossistema, considerando a distância percorrida pelos resíduos. No entanto, já existe uma rede de contatos entre empresas e transportadores de cargas, para que ao invés de retornarem aos seus pontos de origem com o caminhão vazio, aproveitam para transportar outras cargas cujo destino esteja no trajeto de retorno.

Considerando que a preservação ambiental não é um objetivo motivador no modelo econômico vigente, Weetman (2019), a partir de Stahel, sugere focar num conceito de “rendimento total” em substituição do conceito de “resíduo zero”, tendo em vista as expectativas da empresa. Assim, a partir do momento que o empresário começa a entender que pode obter lucro com o resíduo têxtil, antes descartado, ele se torna mais engajado em destinar adequadamente os resíduos gerados pela sua produção.

Com base no depoimento da funcionária de uma das empresas do arranjo, em 2021, a fábrica em que trabalha acumulou sete toneladas de resíduo de malha poliamida. Segundo ela, esse valor representa 50% da produção habitual, impactada no último biênio pela pandemia da Covid-19. A partir dessa informação conjugada com dados de relatórios da EMI (2022), sobre estimativas de vendas para o ano de 2022, apresenta-se o gráfico com a estimativa de acúmulo de resíduos de uma das fábricas do arranjo (Figura 51) e um gráfico com a projeção da estimativa do acúmulo de resíduos de todas as fábricas do arranjo (Figura 52). Em um período de quatro anos são gerados mais de 3.300.000Kg de resíduo têxtil, somente de malha poliamida, que pode levar séculos para se decompor nos aterros sanitários.

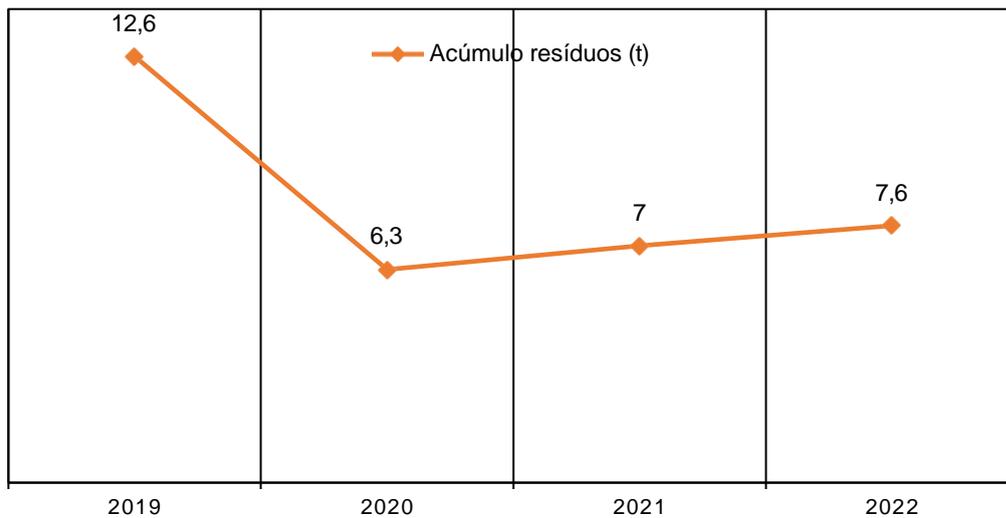


Figura 51 – Estimativa de acúmulo de resíduos de uma fábrica do arranjo.

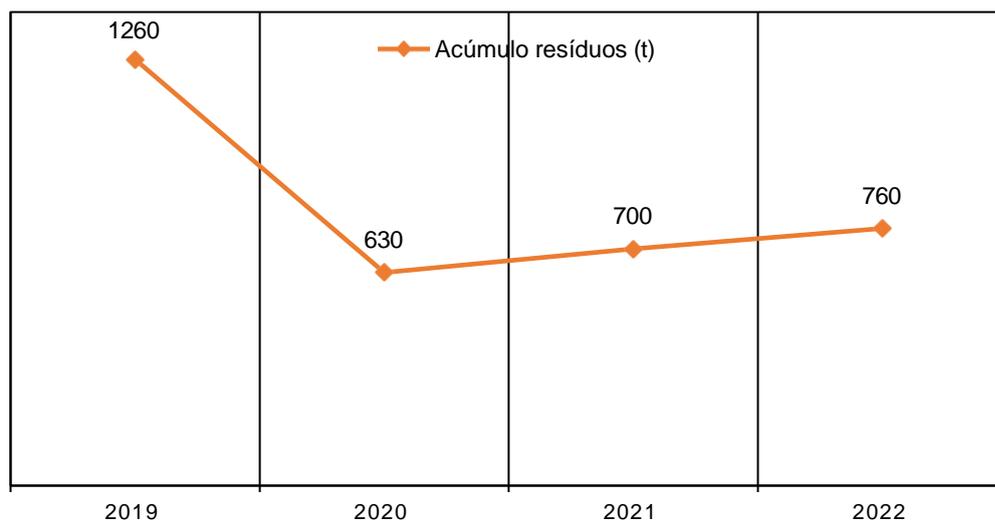


Figura 52– Estimativa de acúmulo de resíduos de todas as fábricas do arranjo.

Esta pode ser considerada uma projeção otimista, já que a fábrica tomada como referência não é a que apresenta maior volume de produção do arranjo. Os benefícios da adoção deste modelo de gestão podem ser observados no aspecto econômico, gerando uma fonte de renda adicional, sobretudo, para o período de baixa estação (de maio a setembro), quando há grande impacto na redução das vendas; social, com a geração de renda e a inclusão de pessoas em situação de vulnerabilidade social, através do aprendizado de técnicas criativas e do

reaproveitamento de resíduos descartados por empresas privadas; e ambiental, criando novas rotas para o resíduo têxtil que teria como destino o aterro sanitário.

Propõe-se que a própria governança do arranjo, após a implantação e validação dos resultados, seja capaz de conduzir o gerenciamento do ecossistema.

Considerando que a estratégia de saída de um território é tão importante como a de entrada, o que se deixa como contribuição para o arranjo é o piloto do design do processo de gestão de resíduos, com a articulação dos atores parceiros que não fazem parte do arranjo, na sua origem. Outra contribuição, é a possibilidade de fabricar de forma distribuída os aviamentos e acessórios, sob demanda e ou customizados, utilizando a tecnologia de manufatura aditiva FDM, com material produzido a partir dos retalhos da própria produção. Na figura 53 ilustra-se a proposta de fluxo circular de *loop* aberto transetorial na forma de teia.

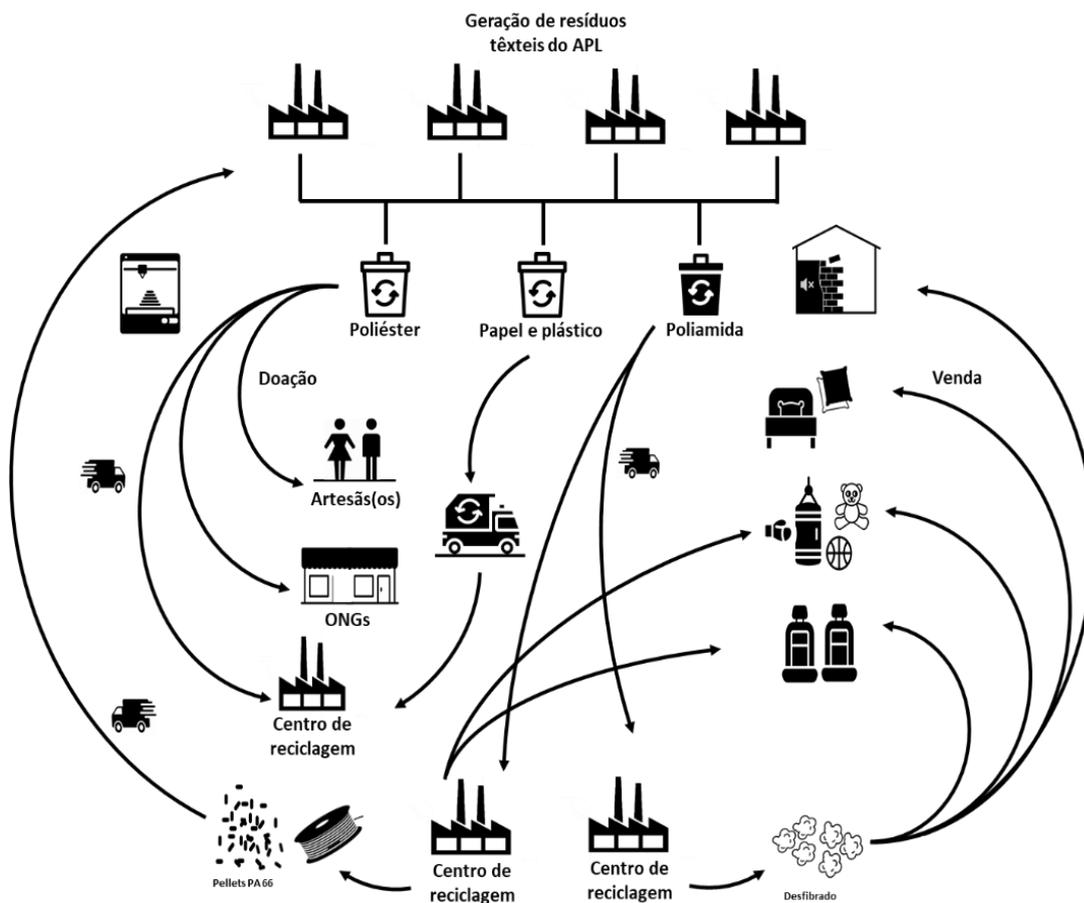


Figura 53 – Proposta de design do processo de gestão de resíduo.

8

Conclusão

“O que se descarta nos aterros sanitários não são apenas roupas, oportunidades de design e de negócio também terminam enterradas em um buraco no chão” (Fletcher e Grose, 2011, p. 63, tradução livre). A reciclagem têxtil, sobretudo no Brasil ainda está em fase embrionária e carece de estratégias para a criação de novas rotas, nessa perspectiva, a economia circular aponta para caminhos alternativos que podem remediar o impacto causado pelo descarte.

Como ferramenta capacitadora, a tecnologia de manufatura aditiva gera melhorias na eficiência de recursos com sistemas de fabricação mais eficientes, produção sob demanda, integração de novos materiais e implementação de novos processos, estabelecendo um novo paradigma para a produção através da flexibilidade, e da capacidade de resposta rápida, que é o foco de controle para romper com a cadeia produtiva linear.

Em uma cadeia de suprimentos circular, a manufatura aditiva reduzi, consideravelmente, a necessidade de transporte de matérias-primas e de produtos acabados, e a necessidade de embalagens primárias, secundárias e terciárias. Além disso, pode ser considerada uma tecnologia ecologicamente correta, já que no processo de impressão, quase não há resíduo.

Na maioria das vezes o processo de reciclagem têxtil transforma os resíduos em um material de menor valor como, por exemplo, desfibrados e enchimento utilizado em produtos ou componentes da indústria esportiva, automobilística e de construção civil. O protótipo do filamento obtido no pré-experimento amplia o valor dos resíduos têxteis que são transformados em uma matéria-prima de alto valor agregado e que pode ser usado para imprimir diferentes objetos.

Como disse Benyus (2016), quanto mais o nosso mundo se parecer com a natureza e funcionar como ela, mais probabilidade teremos de ser aceitos nesse lar que é nosso, mas não exclusivamente nosso. A ecologia industrial propõe sistemas industriais que funcionem como ecossistemas naturais. As relações simbióticas que podem ser proporcionadas entre as empresas envolvem a criação de uma cultura de cooperação entre os diferentes atores.

A partir dessa perspectiva, esboçou-se um modelo piloto de *ecossistema de gestão de resíduos têxteis* para o APL Polo de Moda Praia Cabo Frio por meio de um processo de *loop* aberto, caracterizado como uma simbiose industrial do tipo

virtual, entre o APL Polo de Moda Praia de Cabo Frio e empresas de reciclagem têxtil, para a comercialização dos resíduos de malha poliamida. A formação do ecossistema se embasou em estabelecer a comunicação com empresas que tinham potencial de participação para discutir possíveis soluções para os resíduos gerados. Inicialmente, esse contato tratou do problema de destinação do resíduo de forma específica e dos fatores logísticos, tal como a possibilidade de destinação dos subprodutos.

Foi levantada a hipótese de que a criação de um fluxo circular de *loop* aberto, fundamentado na simbiose industrial poderia criar um modelo de gestão de resíduos têxteis para o arranjo produtivo escolhido como amostra, e esta pesquisa validou essa suposição.

Assim como destaca Pacheco (2013), a centralidade da simbiose industrial formada advém da operacionalidade do ciclo, tornando possível reaproveitar os fluxos do metabolismo industrial através de uma relação de mutualismo.

Como limitações do estudo, pode-se destacar a necessidade de estabelecer parcerias com outras áreas de conhecimento como a química industrial, a engenharia química e de materiais, para avançar no processo de reciclagem termomecânica, e a engenharia mecânica, para o desenvolvimento de equipamentos, sobretudo, para operar com grandes volumes. A contribuição do campo do design aqui apresentada, ao mesmo tempo que oferece uma solução cria novos desafios. A designer, autora desta tese, atuou como facilitadora da articulação entre as empresas, intermediando e estabelecendo as conexões entre os diferentes atores.

A economia circular é um instrumental necessário para conceber modos de produção mais responsáveis e sustentáveis, e funciona como integradora de ações a partir de práticas apoiadas em seus princípios, captando as oportunidades que surgem desse contexto. Os desafios são diversos, mas as práticas coletivas podem implementar vínculos inovadores, com a coordenação de ações que permitam a criação de um ambiente propício para a simbiose e o avanço da transição para uma economia circular. Em oposição ao sistema linear vigente, o modelo de produção circular tem benefícios que podem ser notados em três dimensões, *econômica*, com o aumento da eficiência no uso de recursos; *social*, com a geração de novos empregos em setores como o de reciclagem; e *ambiental*, com a redução do uso de matéria-prima inexplorada, e, por consequência, a redução das emissões de gases de efeito estufa.

A indústria têxtil e de vestuário está diante de um momento de mudança de paradigmas. Assim como foi exposto no capítulo 5, o conceito de cadeia de

suprimentos estar associado a uma lógica linear, onde os elementos constituintes ocupam sempre o mesmo nível trófico. Deste modo, propõe-se nesta tese o conceito de *Teia de suprimentos*, definida como um conjunto de diferentes cadeias de suprimentos conectadas que se entrecruzam buscando novas relações, tendo como fundamento base a cooperação para criar um fluxo de nutrientes e energia.

Na *teia de suprimentos* cada empresa pode ocupar diferentes posições no ecossistema, ora no nível de consumidor, ora no nível de “decompositor”, por exemplo, articulando-se simultaneamente com diferentes empresas. A ideia de cadeia de suprimentos não se relaciona com a proposta de uma economia circular e regenerativa.

Os resultados do pré-experimento se mostraram promissores, e o resíduo têxtil é um passivo ambiental gerado em enorme quantidade. Em vista disso, com relação ao desenvolvimento de um novo material a partir da reciclagem desses resíduos, pretende-se realizar testes de impressão com amostras do material na forma de pellets e com adição de poliamida virgem como carga, e avaliar as propriedades mecânicas dos objetos produzidos. Ainda como desdobramentos futuros, intenta-se aprimorar o modelo de ecossistema de gestão de resíduos para o formato digital, de forma a garantir que o sistema se torne mais dinâmico, facilitando a localização, adição ou substituição de atores do ecossistema.

O ineditismo desta tese se configura no fato de que apesar de haver muitas pesquisas sobre a constituição do APL Polo Moda de Cabo Frio, não foi encontrado nenhum estudo que se debruçasse sobre o problema dos resíduos gerados pelas confecções deste aglomerado. Sobre os processos utilizados no experimento, a inovação está em tratar o resíduo têxtil sintético como um plástico, tendo como base o grande número de pesquisas dedicadas ao estudo da reciclagem de polímeros. Posiciona-se este trabalho como um passo para entender melhor os desafios da circularidade na indústria de vestuário, colaborando com a busca de novas rotas para a reciclagem têxtil através da experimentação desacoplada de um produto ou aplicação específica.

Referências Bibliográficas

ABNT NBR ISO 14004:2018. Sistemas de gestão ambiental — Diretrizes gerais para a implementação. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 3ed. 26 fev. 2018. ISO 2016 – ABNT 2018.73p. Relatório Técnico.

ALGHAMDI, H.; NAIR, S. & NEITHALATH, N. Insights into material design, extrusion rheology, and properties of 3D-printable alkali-activated fly ash-based binders. **Materials & Design**, v. 167, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107634>>. Acesso em: 10 jul. 2021.

AMARAL, M. **Reaproveitamento e Reciclagem Têxtil no Brasil: ações e prospecto de triagem de resíduos para pequenos geradores**. Monografia (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Têxtil e Moda, Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.

ANGAKTRINA, K. **Recycling of HDPE from MSW waste to 3D printing filaments**. Monografia (Doutorado) – Materials Processing Technology da Arcada University of Applied Sciences, Helsinque, 2018.

ARAUJO, E. et al. Ecologia Industrial: um Pouco de História. Disponível em: <<http://www.hottopos.com/regeg12/art2.htm>>. Acesso em: 2 jul. 2022.

BAUMI, J. **Utilização de glicerina da produção de biodiesel na reciclagem de retraço têxtil**. Monografia (Mestrado). Programa de Bioenergia da Faculdade Estadual de Londrina, 2015.

BAUMI, et al. Utilização de glicerina da produção de biodiesel na reciclagem de retraço têxtil. *Rev. Virtual Quim.*, 2017, 9:4. Disponível em: <<http://static.sites.sbg.org.br/rvq.sbg.org.br/pdf/BaumiNoPrelo.pdf>>. Acesso em: 30 jun. 2022.

BENYUS, J. **Biomimética: inovação inspirada pela natureza**. 10ed. São Paulo: Cultrix, 2016. 303p.

BORSCHIVER et al. A simbiose industrial além das fronteiras. **Núcleo de Estudos Industriais e Tecnológicos da UFRJ**. Publicado em 18 de outubro de 2018. Disponível em: <<http://www.neitec.eq.ufrj.br/blog/a-simbiose-industrial-alem-das-fronteiras/>>. Acesso em: 14 de jan. 2022.

BRASIL. Lei nº.12305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 8 jan. 2021.

BRASIL. Decreto nº.13.936, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.936-de-12-de-janeiro-de-2022-373573578>>. Acesso em: 5 ago. 2022.

BRAUNGART, M. **Conversa com o professor Michael Braungart** [ago.2020]. Entrevistadores: L. Gejer e C.Tennenbaum. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=c2aOq8Yd6DQ&ab_channel=IdeiaCircular>. Acesso em: 4 ago. 2020.

BUCELLA, M. et al. Thermo-mechanical properties of Polyamide 6 chemically modified by chain extension with polyamide / Polycarbonate blend. **Journal of Polymer Research**, v.19, p. 9935, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10965-012-9935-0>>. Acesso em: 10 jul. 2021.

BULL, J.W. et. al. Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats: A SWOT analysis of the ecosystem services framework. **Journal Ecosystem**

- Services.** Fev. 2016, Pages 99-111. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.11.012>>. Acesso em: 02 jul. 2021.
- BUYA, R.; DASTJERDI, A. (ed.). **Internet of things: principles and paradigms.** Massachusetts: Morgan Kaufmann Publishers, 2016. 378p.
- CARDOSO, F. **A influência da exportação no desenvolvimento de arranjos produtivos locais de moda no estado do Rio de Janeiro.** Monografia (Mestrado). Fundação Getúlio Vargas. Rio de Janeiro, 2006.
- CARDOSO, U. **APL: arranjo produtivo local.** Brasília: Sebrae, 2014.
- CASSIOLATO, J.; LASTRES, H. **O foco dos arranjos produtivos locais de micro e pequenas empresas.** Rio de Janeiro: Relume & Dumará, 2003.
- CHERTOW, M. Industrial Symbiosis: literature and taxonomy. **Annual Review of Energy and the Environment**, v. 25:313-337, 2000. Disponível em: <<https://doi.org/10.1146/annurev.energy.25.1.313>>. Acesso em: 13 abr. 2020.
- CHERTOW, M.; EHRENFELD, J. Organizing self-organizing systems:toward a theory of industrial symbiosis. **Journal of Industrial Ecology**, v.16: 1 p. 13-27, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00450.x>>. Acesso em: 13 abr. 2020.
- CHERTOW, M.; PARK, J. Scholarship and Practice in Industrial Symbiosis: 1989–2014. In: __ **Taking Stock of Industrial Ecology.** Springer, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-20571-7_5>. Acesso em: 13 abr. 2020.
- CHONG, S. et al. Physical characterization and pre-assessment of recycled high-density polyethylene as 3d printing material. **Journal Polym Environ**, 25, p.136–145, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10924-016-0793-4>>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- CODONI, F.; MARTINELLI, C. Mass customization. **Seminar in Customer Relationship Management.** 2006.
- CONCEIÇÃO, M.E. **Fabricação digital no design de vestuário: digitalização 3D, modelagem paramétrica e manufatura aditiva.** Monografia (Dissertação). Departamento de Artes & Design da Pontifícia Universidade Católica do rio de Janeiro – PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2018.
- CONCEIÇÃO, M. E.; SANTOS, J. (2017). Remodelando o Design do Vestuário com tecnologias digitais de produção. **Revista Triades**, v.6:1. Disponível em: <<https://triades.emnuvens.com.br/triades/article/view/95>>. Acesso em: 3 ago. 2021.
- CONCEIÇÃO, M.E.; MAGALHÃES, C. SANTOS, J. Economia circular e simbiose industrial como estratégia para o gerenciamento de resíduos têxteis no APL Polo de Moda Praia de Cabo Frio/RJ. In: 14° P&D – Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design. Outubro, Rio de Janeiro, 2022.
- CNI – Confederação Nacional da Indústria. Economia circular: caminho estratégico. Brasília: CNI, 2019, 76p. Relatório Técnico.
- CARVALHO, A. **A utilização dos resíduos sólidos do setor de manufatura do vestuário de moda na reciclagem em anel fechado e em anel aberto.** Monografia (Mestrado). Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo – USP. 2016.
- DAVE, H.; DAVIM, P. (Ed.). **Fused deposition modeling based 3D printing.** [S.l.: Springer Nature], 2021. Disponível em: [[Google Scholar](#)]. Acesso em: 11 jul. 2022.
- DAVIS, S. M. **Future Perfect.** New York: Addison-Wesley, 1987.

DESPEISSE, M.; FORD, S. The Role of Additive Manufacturing in Improving Resource Efficiency and Sustainability. **International Conference on Advances in Production Management Systems**, p. 129-136, 2015. Springer. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-22759-7_15.

Acesso em: 9 abr. 2021.

DUARTE, A.; SANCHES, R. Proposta de fabricação de cabedal de malha utilizando o modelo de economia circular. **Revista de Ensino em Artes, Moda e Design**, Florianópolis, v. 6, n. 1, p. 1-23, 2022. Disponível em: <https://www.revistas.udesc.br/index.php/ensinarmode/article/view/21223>.

Acesso em: 23 jul. 2022.

DUBEUX, C; CAMPOS, M. Economia circular: os desafios do Brasil. Centro Brasileiro de Relações Internacionais (CEBRI), 2020, 70p. Relatório Técnico.

DURÃO, L. et al. Additive manufacturing scenarios for distributed production of spare parts. **International Journal Adv Manuf Technol**, v.93, p. 869–880, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0555-z>. 11 jul. 2021.

DUTY et al. What makes a material printable? A viscoelastic model for extrusion-based 3D printing of polymers. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 35, p. 526-537, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.008>. Acesso em: 9 jul. 2022.

EMF – Ellen MacArthur Foundation. Circular design for fashion. United Kingdom: Ellen MacArthur Foundation Publishing, 2021. 207p. Relatório Técnico.

FACTORI, I.M. **Processamento e propriedades de compósitos de poliamida 6.6 reforçada com partículas de vidro reciclado**. Monografia (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

FERRÃO, P. **Ecologia industrial: princípios e ferramentas**. Lisboa: IST Press, 2009. 398p.

FERRÃO, P.; JORDÃO, M.; MENDES, A. Uma bolsa de resíduos para Portugal. In: Congresso sobre tecnologias de valorização de resíduos. Lisboa, 6-7 de novembro. Expo Ambiente, 2003.

FRAGOMENI, A.L. **Parques industriais ecológicos como instrumento de planejamento e gestão ambiental cooperativa**. Monografia (Tese). 2005. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

FRIEDRICH, K.; WALTER, R. (Ed.). **Structure and properties of additive manufactures polymer components**. [S.l.: Woodhead Publishing], 2020.

FOONG, L. Understanding of SWOT Analysis. TQMCaseStudies. Disponível em: <http://effecta.com.au/wp-content/uploads/2010/07/Understanding-of-SWOT-Analysis.pdf>. Acesso em: 02 jul. 2021.

FORD, S.; MINSHALL, T. Defining the Research Agenda for 3D Printing-Enabled Re-distributed Manufacturing. In: **Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth**. APMS 2015. IFIP **Advances in Information and Communication Technology**, v. 460. Springer. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-22759-7_18. Acesso em: 3 jul. 2020.

- FUINI, L. L. Os arranjos produtivos locais (APLs): uma breve explanação sobre o tema. **GeoTextos**, v. 9: 2, p. 57-83. 2013.
- GEISSDOERFER, M. et al. The circular economy – a new sustainability paradigm. **J. Clean. Prod.**, v.143, p. 757-768. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>>. Acesso em: 3 ago. 2020.
- GHAZINOORY, S.; ABDI, M.; AZADEGAN-MEHR, M. SWOT Methodology: A State-of-the-Art Review for the Past, A Framework for the Future. **Journal of Business Economics and Management**, v.12, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.3846/16111699.2011.555358>>. Acesso em: 02 jul. 2021.
- GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. Generalized Additive Manufacturing Process Chain. In: **Additive Manufacturing Technologies**. New York: Springer, p. 46-61, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3_3>. Acesso em: 3 jul. 2020.
- GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. Extrusion-Based Systems. In: **Additive Manufacturing Technologies**. New York: Springer, 2015, p. 147-173. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3_6>. Acesso em: 3 jul. 2020.
- GIL, A. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- GLORIA, M. **Modelos de negócio de la economía circular**. Monografia (Trabaho de Conclusão de Curso). Escuela de Ingenierias Industriales da Universidad de Valladolid, 2020.
- GRIGORE, M. Methods of Recycling, Properties and Applications of Recycled Thermoplastic Polymers. **Thermoplastic Polymers. Recycling**, v.2:24, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/recycling2040024>>. Acesso em: 11 jul. 2022.
- GUAJARDO-TREVINO et al. Effects of deposition - strategy - induced raster gaps and infill voids on the compressive strength of 3D printed isogrid structures. **Manufacturing Letters**, v. 31, p.15-19, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2021.12.001>>. Acesso em: 3 jul. 2022.
- GUIMARÃES, K.; BARUQUE-RAMOS, J. Potencial de reciclagem têxtil no Brasil em âmbito de gestão ambiental. In: 2º CONTEXMOD. Disponível em: <<http://contexmod.net.br/index.php/segundo/article/view/76>>. Acesso em: 3 ago. 2021.
- GUPTA, M. Unravel: the final resting place of your cast-off clothing. Documentário. Dirigido por Meghna Gupta. Produzido por Meghna Gupta e Gigi Berardi. Índia, 2016. Documentário. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=bOOI5LbQ9B8&ab_channel=AeonVideo>. Acesso em: 3 dez. 2020.
- GVCES – Centro de Estudos em Sustentabilidade. Resíduos e pós-consumo. Inovação e sustentabilidade na cadeia de valor. 2013. 74p. Relatório Técnico. Disponível em: <https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/arquivos.gvces.com.br/arquivos_gvces/arquivos/250/publicacao_ie2013_iscv.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2021.
- HAKKENS, D. **Precious Plastic**. 2021. Disponível em: <https://preciousplastic.com>. Acesso em: 1 abr. 2021.
- HOPKINSON, N.; HAGUE, R.; DICKENS, P. (Ed.). **Rapid manufacturing: an industrial revolution for the digital age**. London: John Wiley, 2005.
- HUNT, E. Polymer recycling codes for distributed manufacturing with 3-D printers. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 97, p. 24-30, 2015.

Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.02.004>>. Acesso em: 3 jul. 2022.

ISO/ASTM. 52900: 2021 (en): **Additive manufacturing – General principles – Fundamentals and vocabulary**. International Organization for Standardization. 2021. Disponível em: <<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en>>. Acesso em: 3 jul. 2022.

JENSEN, P. et al. Quantifying ‘geographic proximity’: Experiences from the United Kingdom's National Industrial Symbiosis Programme. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55: 7, 2011, p. 703-712. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.02.003>>. Acesso em: 12 abr. 2021.

KIM, S. et al. Continuously varied infill pattern (ConVIP): improvement of mechanical properties and printing speed of fused filament fabrication (FFF) 3D printing. **Journal of Materials Research and Technology**. V18, p1055-1069, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.133>>. Acesso em: 14 jul. 2022.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation & Recycling**, v.127, p. 221–232, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/320074659_Conceptualizing_the_Circular_Economy_An_Analysis_of_114_Definitions. Acesso em: 3 ago. 2020.

KONIETZKO, J., BOCKEN, N., HULTINK, E.J. Online Platforms and the Circular Economy. In: **Innovation for Sustainability**. Palgrave Studies in Sustainable Business in Association with Future Earth. Palgrave Macmillan, Cham, 2019. Disponível em: <>https://doi.org/10.1007/978-3-319-97385-2_23. Acesso em: 3 ago. 2020.

KOVAN, V.; ALTAN, G.; TOPAL. Effect of layer thickness and print orientation on strength of 3D printed and adhesively bonded single lap joints. **Journal Mech Sci Technol**, v.31, 2197-2201, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12206-017-0415-7>>. Acesso em: 3 jul. 2020.

KREIGER, M. et al. Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3-D printing filament. **Journal of Cleaner Production**, v.70, p. 90 – 96, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.009>> . Acesso em: 3 jul. 2020.

KRUCKEN, L. **Design e território: valorização das identidades e produtos locais**. São Paulo: Studio Nobel, 2009.

LAKATOS, E.; MARCONI, M. **Fundamentos da metodologia científica**. 5ed. São Paulo: Atlas, 2003.310p.

LANCASTER, M. **Green Chemistry: an introductory text**. 3ed. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2016. 392p.

LASTRES, H.; CASSIOLATO, J. **Novas políticas na era do conhecimento: o foco em Arranjos Produtivos e Inovativos locais**. RedeSist. Instituto de economia – UFRJ, 2000. Disponível em: <<http://www.redesist.ie.ufrj.br/nt/nt.php?projeto=ar1>>. Acesso em: 12 abr. 2021.

LEWANDOWSKI, M. Designing the business models for circular economy towards the conceptual framework. **Sustainability**, v. 8(1), 43. 2016.

Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su8010043>>. Acesso em: 3 ago. 2020.

LOGA – Logística Ambiental de São Paulo. Operação Brás - Loga estabelece coleta com hora marcada. Disponível em: <www.loga.com.br>. Acesso em: 26 fev. 2021.

LUSSENBURG, K. et al. Designing with 3D Printed Textiles: A case study of Material Driven Design. **Materials Science**, out. 2014. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/Designing-with-3D-Printed-Textiles%3A-A-case-study-of-Lussenburg-Velden/ab537e585d4fb014bd577c45ebf000f7aa2b69a9>>. Acesso em: 26 nov. 2021.

MAI, J. et al. Customized production based on distributed 3D printing services in cloud manufacturing. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, volume 84, p.71–83, 2016.

MARTELI, A. **Análise do gerenciamento de resíduos de tecidos sintéticos nas empresas de confecções do município de Cianorte**. Monografia (Mestrado). Programa de Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná em parceria com o Senai-PR e a Universität Stuttgart, Alemanha. Curitiba, 2011.

MEADOWS, D. **Thinking in systems: a primer**. Vermont: Chelsea Green Publishing, 2008.

MENDES, F. O resíduo têxtil não tinha nem que sair da indústria. **Revista Com Ciência**. Dossiê 202. 10 out. 2018. Entrevista. Disponível em: <<https://www.comciencia.br/francisca-mendes-dantas-o-residuo-textil-nao-tinha-nem-que-sair-da-industria/>>. Acesso em: 3 ago. 2020.

MENDONÇA, F. M. **Formação, desenvolvimento e estruturação de arranjos produtivos locais da indústria tradicional do Estado de Minas Gerais**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2008.

MENEGUCCI, F. et al. Resíduos têxteis: Análise sobre descarte e reaproveitamento nas indústrias de confecção. In: **XI Congresso Nacional de Excelência em Gestão**. 13-14 de agosto, 2015. Disponível em: <https://www.inovarse.org/sites/default/files/T_15_325.pdf>. Acesso em: 3 ago. 2020.

MIRATA, M. Experiences from early stages of a national industrial symbiosis programme in the UK: determinants and coordination challenges. **Journal of Cleaner Production**, v.12, p. 967-983,2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.02.031>. Acesso em: 16 abr. 2020.

MOHAMMED, M. et al. EcoPrinting: Investigating the Use of 100% Recycled Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) for Additive Manufacturing. **International Solid Freeform Fabrication Symposium**, Texas, 2017a. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/2152/89859>>. Acesso em: 10 jul. 2021.

MOHAMMED, M. et al. A Low Carbon Footprint Approach to the Reconstitution of Plastics into 3D-Printer Filament for Enhanced Waste Reduction. In: **The International Conference on Design and Technology**, KEG, p. 234–241. Geelong, 2017b. Disponível em: <<http://www.dx.doi.org/10.18502/keg.v2i2.621>>. Acesso em: 10 jul. 2021.

MOREIRA, A. Reciclagem de Polímeros IPRJ. TV UERJ – Repórter Ciência. 2019. Entrevista. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=heDpzFirYRE&ab_channel=TVUERJ>. Acesso em: 2 mar. 2021.

- MORTENSEN, L.; KORNOV, L. Critical factors for industrial symbiosis emergence process. **Journal of Cleaner Production**, v.212, 2019, p. 56-69. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.222>>. Acesso em: 26 jul. 2022.
- MOURA, R. **Do outro lado das pontes: história, etnografia e planejamento urbano numa cidade média do interior fluminense**. 2012. Monografia (Mestrado) - Universidade Federal Fluminense. Niterói.
- MURRAY, A.; SKENE, K.; HAYNES, K. The circular economy: an interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. **J Bus Ethics** 140, p. 369–380, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>>. Acesso em: 16 abr. 2020.
- MWEMA, F.; AKINLAB, E. Print resolution and orientation strategy. In: ____ **Fused Deposition Modeling**. 30 may 2020, p. 17-32. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-48259-6_2>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- NETO, G et. al. Assessment of the Eco-Efficiency of the Circular Economy in the Recovery of Cellulose from the Shredding of Textile Waste. **Polymers**, v. 14(7) Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/polym14071317>>. Acesso em: 23 jul. 2022.
- NETO, J.; BARROS, M. & CAMPOS-SILVA, W. **Economia circular, sistemas locais de produção e ecoparques industriais: Princípios, modelos e casos (aplicações)**. São Paulo: Blucher, 2021. 200p.
- OLIVEIRA, C. et al. (Org.). **Arranjos produtivos locais e desenvolvimento**. Rio de Janeiro: Ipea, 2017.
- OLIVEIRA, F.; FRANÇA, S.; RANGEL, L. Princípios de economia circular para o desenvolvimento de produtos em arranjos produtivos locais. **Revista Interações (Campo Grande)**, v.20:4, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.20435/inter.v20i4.1921>>. Acesso em: 16 abr. 2021.
- OSTERWALDER, A.; PIGNEUR, Y. **Business model canvas**. Self published, 2010.
- OZBOLAT, I; HOSPODIUK, M. Current advances and future perspectives in extrusion-based bioprinting. **Biomaterials**, v. 76, p. 321-343, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2015.10.076>>. Acesso em: 9 jul 2022.
- PACHECO, J. M. **Ecossistemas Industriais: proposição de estrutura analítica e avaliação do complexo sucroalcooleiro do Triângulo Mineiro**. 2013. 210 p. Monografia (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- PACHECO, A.; LUGON, R.; MOREIRA, A. Reciclagem de retalhos - desafios para o APL de Nova Friburgo. In: **4° CONTEXMOD**, 2016, Blumenau. Disponível em: <<https://www.dropbox.com/s/z0ws71tlent3509/411-1434-2-CE.pdf?dl=0>>. Acesso em: 2 mar. 2021.
- PATADIYA, N.; DAVE, H; RAJPUROHIT, S. Effect of Build Orientation on Mechanical Strength of FDM Printed PLA. In: _ **Advances in Additive Manufacturing and Joining**. Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering. Singapore: Springer, p. 301-307, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-981-32-9433-2_262019>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- PAULA, E.; ABREU, M.; SOUSA, C. Motivações e barreiras para a simbiose industrial: a experiência no estado de minas gerais. In: **XVI Congresso**

- Latino-Ibero-americano de Gestão da Tecnologia - ALTEC**. 19-22 de outubro. Porto Alegre, 2015. Disponível em: <<http://altec2015.nitec.co/altec/papers/146.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2022.
- PEARCE, D.; TURNER R. **Economics of Natural Resources and the Environment**. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1990. 392p.
- PEIXOTO, F. **O local e os sistemas de inovações em países subdesenvolvidos: o caso do arranjo produtivo de moda praia de Cabo Frio/RJ**. 2005. Monografia (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.
- PILLIN, I. et al. Effect of thermo-mechanical cycles on the physico-chemical properties of poly (lactic acid). **Polymer Degradation and Stability**, v. 93:2, p. 321-328, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.12.005>>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- PINE II, B. **Mass Customisation: The New Frontier in Business Competition**. Massachusetts: Harvard Business School Press, 1993.
- PINHEIRO, L. **Fibra de bananeira (Musa sp.): processo de extração, beneficiamento e sua aplicabilidade em produtos têxteis**. Monografia (Mestrado). Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo – USP, 2021.
- PIRES, G; MENEZES, M. O CAD 3D aplicado na validação de protótipos na indústria do vestuário. *Educação Gráfica*, v. 24:2., p. 330 – 346. Bauru. Agosto de 2020. Disponível em: <http://www.educacaografica.inf.br/wp-content/uploads/2020/10/23_O-CAD-3D-APLICADO-330-346.pdf>. Acesso em: 3 ago. 2021.
- POSCH, A. "Industrial Recycling Networks as Starting Points for Broader Sustainability-Oriented Cooperation?", **Journal of Industrial Ecology**, v.14:2, 2010, p. 242-257. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2010.00231.x>>. Acesso em: 18 mar. 2022.
- QUEIROZ, C; SOUZA, M. Um olhar brasileiro sobre os aglomerados: o arranjo produtivo local. In: **Arranjos produtivos locais e desenvolvimento**. Rio de Janeiro: Ipea, 2017.
- RETT, J; TRAORE, Y.; HO, E. Sustainable Materials for Fused Deposition Modeling 3D Printing applications. **Advanced Engineering Materials**. 24 março 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/adem.202001472>>. Acesso em: 10 dez. 2021.
- RIBUL et al. "Mechanical, chemical, biological: moving towards closed-loop bio-based recycling in a circular economy of sustainable textiles", **Journal of Cleaner Production**, v. 326, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129325>>. Acesso em: 30 jan. 2022.
- SANCHEZ, F. et al. Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 264, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121602>>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- SANDIN, G.; PETERS, G. Environmental impact of textile reuse and recycling – A review. **Journal of Cleaner Production**, v.184:20, p.353-365. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.266>>. Acesso em: 2 mar. 2020.
- SANTOS, I. **Impactos ambientais gerados pelos resíduos têxteis no Brasil e alternativas para o futuro: uma revisão sistemática**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso). Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos. Sorocaba, 2020.

- SANTOS, J. A manufatura aditiva no *design* de produtos. In: **__Manufatura aditiva tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017, p. 143-179.
- SANTOS, J. et al. Confronting COVID-19 - The case of PPE and Medical Devices production using Digital Fabrication at PUC-Rio. **Strategic Design Research Journal**, vol. 13:3, 2020. Disponível em: <http://revistas.unisinos.br/index.php/sdrj/article/view/sdrj.2020.133.15>. Acesso em: 23 mar. 2021.
- SANTANDER, P. et al. Closed loop supply chain network for local and distributed plastic recycling for 3D printing: a MILP-based optimization approach. **Resources, Conservation and Recycling**, v 154, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104531>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- SANTOS, A.; FERREIRA, G.; DUARTE, L. Experimento. In: **__Seleção do método de pesquisa: guia para pós-graduando em design e áreas afins**. Curitiba: Insight, 2018. p. 200-10.
- SCHIRMEISTER, C. et al. 3D printing of high-density polyethylene by fused filament fabrication. **Journal Additive Manufacturing**, v. 28, p. 152-159, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.003>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- SARAIVA, C. **Modelagem: Zero-waste**. Monografia (Mestrado) – Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior. Covilhã, 2014.
- SUSTEXMODA. Residômetro têxtil. Disponível em: <https://www.sustexmoda.org/resid%C3%B4metro>. Acesso em: 03 ago. 2022.
- SENAI-SP – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. **Design e economia circular**. São Paulo: SENAI-SP Editora, 2020.
- SHIBO, MA. Et al. Design of 3D printing feeding system and extrusion system based on fused deposition modeling (FDM) technology with. **Journal Hebei University of Science and Technology**, v. 40: 5, p. 438-445, 2019.
- SILVA, C. **O arranjo produtivo de confecções e desenvolvimento local em Feira de Santana, Bahia**. In: V Jornada Internacional de Políticas Públicas. 23-16 de agosto, São Luís do Maranhão, 2011.
- SIMONETTI, E.; KAMIMURA, Q. As políticas públicas direcionadas ao desenvolvimento de arranjos produtivos locais. In: **__Arranjos produtivos locais e desenvolvimento**. Rio de Janeiro: Ipea, 2017. 304p.
- STAHEL, W. **The circular economy: a user's guide**. New York: Routledge, 2019. 118p.
- STEVENS, M.; COVAS, J. **Extruder principals and operation**. 2ed. New Delhi, Chapman & Hall, 1995. Disponível em: [\[Scholar Google\]](#). Acesso em: 9 jul. 2020.
- SOARES, E. Poliamida 6 (PA 6). **Revista Plástico Industrial**. Publicada em 07 dez. 2021. Disponível em: [https://www.arandanet.com.br/revista/pi/noticia/278-Poliamida-6-\(PA-6\).html](https://www.arandanet.com.br/revista/pi/noticia/278-Poliamida-6-(PA-6).html). Acesso em: 24 jan. de 2022.
- _____. Poliamida 66 (PA 66). **Revista Plástico Industrial**. Publicada em 07 dez. 2021. Disponível em: [https://www.arandanet.com.br/revista/pi/noticia/2638-Poliamida-66-\(PA-66\).html](https://www.arandanet.com.br/revista/pi/noticia/2638-Poliamida-66-(PA-66).html). Acesso em: 24 jan. de 2022.
- SPINACÉ, M.; DE PAOLI, M. A tecnologia de reciclagem de polímeros. **Quim. Nova**, Vol. 28: 1, p. 65-72, 2005. Disponível em:

- <https://www.scielo.br/j/qn/a/bTLkNHWGnpsj4SWWjgLB49L/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 23 jun. de 2021.
- SUN, Q. et al. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. **Rapid Prototyping Journal**, vol. 14 No. 2, pp. 72-80, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/13552540810862028>>. Acesso em: 11 jul. 2020.
- TANIMOTO, A. **Proposta de simbiose industrial para minimizar os resíduos sólidos no Polo Petroquímico de Camaçari**. 2004. Monografia (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- TASÉ VELÁZQUEZ et al. Implications of additive manufacturing on supply chain and logistics. *Independent Journal of Management & Production*, v.11:4, 2020. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7528718>>. Acesso em: 24 jul. 2021.
- TAVARES, A. **A cadeia produtiva da indústria química no contexto da economia circular**. Monografia (Dissertação). Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.
- THOME, C. **Soldagem por termofusão aplicada em tubos fabricados de poliamida 12**. Monografia (Mestrado) - Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- THOMPSON, R. **Materiais sustentáveis, processos e produção**. São Paulo: Editora Senac, 2015.223p.
- THRIMURTHULU, K.; PANDEY, P.; REDDY, N. Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v.44:6, p. 585-594, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2003.12.004>>. Acesso em: 11 jul. 2020.
- TIBBS, H. **Industrial ecology: na environmental agenda for industry**. Global Business Network, 1993.
- TRINDADE, B. **Renascendo das cinzas: experimentação com resíduos do incêndio no Museu Nacional na recriação de peças do acervo através de manufatura aditiva**. 2020. 121p. Monografia (Mestrado) – Departamento de Artes & Design, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.
- TURNER et al. Sustainable Production in a Circular Economy: A Business Model for Re-Distributed Manufacturing. **Sustainability**, v.11(16), 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su11164291>>. Acesso em: 11 jul. 2020.
- VALERIO, O; MUTHURAJ, R.; AMANDINE, C. Strategies for polymer-to-polymer recycling from waste: Current trends and opportunities for improving the circular economy of polymers in South America. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 25, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.100381>. Acesso em: 23 jul. 2022
- VEIGA, L.; MAGRINI; A. Eco-industrial park development in Rio de Janeiro, Brazil: a tool for sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, V.17: 7, 2009, p. 653-661. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.11.009>>. Acesso em: 18 mar. 2022.

- VENERI, G.; CAPASSO, A. **Hands-on industrial internet of things: create a powerful industrial IOT infrastructure using industry 4.0**. Birmingham: Packt, 2018. 556p.
- VEZZOLI, C. **Design de sistemas para a sustentabilidade: teoria, métodos e ferramentas para o design sustentável de “sistemas de satisfação”**. Salvador: EDUFBA, 2010. 342p.
- VIDAKIS, N. Sustainable Additive Manufacturing: Mechanical Response of Polyamide 12 over Multiple Recycling Processes. **Materials**, v. 14(2):466, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma14020466>>. Acesso em: 9 jul. 2022.
- VIEIRA, A. **Determinação do percentual de desperdício de matéria-prima (tecido) entre encaixe manual e com Computer Aided Design – CAD**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso). Curso de Engenharia de Produção da Universidade Estadual de Maringá. Paraná, 2007.
- VOLPATO, N. Processos de AM por extrusão de material. In: **Manufatura aditiva tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017, p. 145-179.
- VOLPATO, N.; CARVALHO, J. Introdução à manufatura aditiva. In: **Manufatura aditiva tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017, p. 15-30.
- WEBER, S. A Circular Economy Approach in the Luxury Fashion Industry: A Case Study of Eileen Fisher. In: _Gardetti, M., Muthu, S. (eds) **Sustainable Luxury. Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes**. Singapura: Springer, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-0623-5_7>. Acesso em: 23 jul. 2022.
- WEETMAN, C. **Economia circular: conceitos e estratégias para fazer negócios de forma mais inteligente sustentável e lucrativa**. São Paulo: Autêntica Business, 2019. 501p.
- WOERN, A.; PEARCE, J. 3-D Printable Polymer Pelletizer Chopper for Fused Granular Fabrication-Based Additive Manufacturing. **Inventions**, v. 3(4), 78, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/inventions3040078>>. Acesso em: 9 jul. 2022
- ZHONG, S; PEARCE, J. Tightening the loop on the circular economy: Coupled distributed recycling and manufacturing with recyclebot and RepRap 3-D printing. **Recycling**. V128, p 48-58, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.023>>. Acesso em: 9 jul. 2021
- ZONATTI, W. **Geração de resíduos sólidos da indústria brasileira têxtil e de confecção: materiais e processos para reuso e reciclagem**. Monografia (Doutorado). Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo – USP. 2016.
- ZONATTI, W. et al. Reciclagem de resíduos do setor têxtil e confeccionista no Brasil: panorama e ações relacionadas. **Sustentabilidade em Debate**, v. 6: 3, p. 50-69, Brasília, 2015. Disponível em: <<https://silo.tips/download/reciclagem-de-residuos-do-setor-textil-e-confeccionista-no-brasil-panorama-e-aoe>>. Acesso em: 2 mar. 2020.
- ZONATTI, W. et al. Levantamento das atividades de reuso e reciclagem têxtil na região metropolitana do Rio de Janeiro. **Ciência e Sustentabilidade**, v. 2:2, p. 7-27, Juazeiro do Norte, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.33809/2447-4606.22201607-27>>. Acesso em: 5 ago. 2021.

Glossário

Aterro sanitário

Espaço destinado à deposição final dos restos de materiais gerados pela atividade humana e que, quando cheio, sofre um processo de monitoramento específico para se verificar se deve ser apenas fechado ou fechado e reaproveitado para criação de outros espaços.

Avaliação do ciclo de vida

Avaliação mensurável das entradas e saídas de um produto (materiais e recursos) ao longo de todas as etapas do ciclo de vida, que fornece uma visão abrangente de todos os aspectos ambientais do produto ou processo.

Biomimética

Abordagem à inovação que busca soluções sustentáveis para os desafios humanos, imitando padrões e estratégias da natureza, de eficácia comprovada pelo tempo. É o desenho que funciona como a natureza, em vez de simplesmente parecer com a natureza e seu objetivo é criar novas maneiras de viver, inclusive produtos, processos e sistemas sustentáveis.

Cadeia de suprimentos da indústria da moda

Consiste numa rede de fornecedores e prestadores de serviços necessários à manufatura, distribuição e venda de roupas de moda.

Cadeia de valor

Todo o conjunto de atividades executadas para criar um produto ou serviço, da concepção ao uso final, e além.

Ciclo de vida do produto

Série de etapas que envolvem o desenvolvimento do produto, a obtenção da matéria-prima e insumo, o processo produtivo, o consumo e a disposição final.

Ciclo aberto

Quando materiais ou produtos fluem para um ou mais setores diferentes.

Ciclo fechado

Quando os produtos ou materiais são retidos e recuperados para serem usados novamente na mesma empresa - no mesmo produto ou processo ou em diferentes produtos ou processos.

Coleta seletiva

Coleta de resíduos sólidos previamente segregados conforme sua constituição ou composição.

Customização em massa

Criação de produtos individualizados para um grande número de pessoas.

Destinação final ambientalmente adequada

Destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sinama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando as normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.

Ecologia industrial

Ecossistema econômico em que os consumos de energia e materiais são otimizados e integrados em diferentes indústrias, e os resíduos de um processo servem de matéria-prima para outros. Implica na concepção de infraestruturas industriais específicas, de modo a que os diversos ecossistemas industriais interajam entre si.

Economia circular

Alternativa à economia linear tradicional, e que são mantidos os recursos em uso durante tanto tempo quanto possível, extraindo o valor máximo deles quando estão em uso, e, então, recuperar e regenerar os produtos e materiais no fim de cada ciclo de vida.

Estratégia de design sustentável

Abordagem estruturada que pode ser aplicada pelo designer na redução de impactos ambientais e/ou associados à produção, ao uso e ao descarte do produto.

Fabricação distribuída

Forma de fabricação descentralizada local, usando uma rede de instalações fabris com dispersão geográfica e coordenadas via tecnologia de informação.

Fim de vida

Momento em que o produto é destruído no fim de sua vida útil. O termo é usado para enfatizar as oportunidades perdidas de reutilização, conserto, remanufatura, reciclagem etc.

Fluxos circulares

Estabelecimento de recuperação de saída que pode se dá através da reutilização, quando um produto é revendido ou compartilhado; remanufatura, para que o

desempenho do produto seja compatível com o outro “novo”, numa segunda vida; ou reciclagem, para que os materiais ou componentes sejam usados em outro produto.

Gerenciamento de resíduos sólidos

Conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, de acordo com o plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos ou com plano de gerenciamento de resíduos sólidos, exigidos na forma da Lei 12.305 de agosto de 2010.

Gestão integrada de resíduos sólidos

Conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos sólidos, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável.

Impacto ambiental

Efeitos positivos e negativos no meio ambiente que surgem como resultado das atividades de produção e/ou consumo.

Loop aberto

Produtos e materiais usados que são reutilizados por outra empresa que não o produtor original – no mesmo tipo de produto ou processo ou em outro produto ou processo.

Loop aberto transetorial

Materiais e produtos usados que fluem através de um ou mais setores, lida com o processamento de diferentes tipos de resíduos vindos de fluxos diversos.

Manufatura aditiva

Designa vários processos usados para sintetizar objetos tridimensionais a partir da deposição de sucessivas camadas de material, sob controle computadorizado para construir objetos de qualquer forma ou geometria.

Material virgem

Material que ainda não foi usado ou consumido, nem processado, além de suas funções originais.

Moda rápida

Processo de converter os modelos de passarela em peças baratas, para serem usadas em poucas ocasiões antes de ser descartadas para dar lugar a novos itens.

Modelos de negócio circulares

Modo como as empresas projetam estruturas e estratégias a fim de promover a mudança para a economia circular, através de modelos de serviços para substituir a propriedade, como *pay-per-use*, aluguel, compartilhamento e sistemas de troca, reparos, remanufatura, reciclagem ou revenda.

Nutrientes técnicos

Materiais extraídos da crosta terrestre (metais, minerais, combustíveis fósseis), ou artificiais (polímeros, ligas etc.).

Padrões sustentáveis de produção e consumo

Produção e consumo de bens e serviços de forma a atender as necessidades das atuais e gerações e de todos os seres vivos da Terra, e permitir melhores condições de vida, sem comprometer a qualidade ambiental e o atendimento das gerações futuras.

Pegada de carbono

Volume de emissões de gases, medido em consequência das atividades de produção e consumo.

Pensamento sistêmico

Processo de compreender como as coisas influenciam umas às outras dentro de uma entidade completa, ou sistema mais amplo.

Resíduo sólido

material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe a proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

Reciclagem

Processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológica, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes Sinama, do SNVS e do Suasa.

Reciclagem distribuída

Uma “rede inteligente” composta por pequenas unidades de reciclagem coordenadas.

Reciclagem mecânica

É um processo estabelecido para têxteis e pode acontecer através da reciclagem das fibras, quando o tecido é desfibrado e a fibra é preservada, ou da reciclagem termomecânica, quando as fibras sintéticas são fusionadas antes de serem refiadas em novas fibras ou remodeladas em outras formas.

Reciclagem química

Pode ocorrer através da reciclagem de monômeros, quando a cadeia polimérica é dividida para obter monômeros intactos, ou da reciclagem de polímeros, quando ocorre a desfibragem através de processamento mecânico seguido de um método de dissolução química com solventes específicos, geralmente tóxicos.

Rejeitos

Resíduo sólidos que, depois de esgotada todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada.

Reutilização

Processo de aproveitamento dos resíduos sólidos em sua transformação biológica, física ou físico-química, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes, ou seja, compra e venda de produtos ou ativos já usados.

Simbiose industrial

Troca de materiais ou fluxo de resíduos entre empresas, para que os resíduos de uma empresa se tornem matérias-primas de outras empresas.

Stewardship do produto

Processo de minimizar os impactos sobre a saúde, a segurança, o meio ambiente e o contexto social de um produto e de sua embalagem, durante todos os estágios de ciclo de vida, ao mesmo tempo que maximiza os benefícios econômicos.

Subproduto

Produto incidental ou secundário, que surge na manufatura ou na síntese de algo mais.

Valor compartilhado

Estratégia de gestão focada em empresas que criam valor mensurável ao identificar e manejar problemas sociais que imbricam com seus negócios.