

UNIVERSIDADE DA REGIÃO DE JOINVILLE – UNIVILLE
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO – PRPPG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

LODO TÊXTIL: UMA ANÁLISE DE VALORIZAÇÃO COM A SISTEMÁTICA CPQVA

WANEISSA ELEUSIS MIOTTO

Joinville – SC

2025

WANESSA ELEUSIS MIOTTO

LODO TÊXTIL: UMA ANÁLISE DE VALORIZAÇÃO COM A SISTEMÁTICA CPQVA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos da Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE – como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia de Processos.
Orientadora: Profa. Dra. Bianca Goulart de Oliveira Maia.
Coorientadora: Profa. Dra. Noeli Sellin.

Joinville – SC

2025

Catálogo na publicação pela Biblioteca Universitária da Univille

M669I

Miotto, Wanessa Eleusis

Lodo têxtil : uma análise de valorização com a sistemática CPQVA / Wanessa Eleusis Miotto; orientadora Dra. Bianca Goulart de Oliveira Maia, coorientadora Dra. Neoli Sellin. – Joinville: UNIVILLE, 2025.

75 p.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos – Universidade da Região de Joinville)

1. Indústria têxtil. 2. Resíduos industriais – aspectos ambientais. 3. Resíduos de tecido – reaproveitamento. I. Maia, Bianca Goulart de Oliveira (orient.). II. Sellin, Neoli (coorient.). III. Título.

CDD 338.47677

Termo de Aprovação

“Lodo Têxtil: Uma Análise de Valorização com a Metodologia CPQVA”

por

Wanessa Eleusis Miotto

Banca Examinadora:

Profª. Dra. Bianca Goulart de Oliveira Maia
Orientadora (UNIVILLE)

Profª. Dra. Noeli Sellin
Coorientadora (UNIVILLE)

Prof. Dr. Fabiano Raupp Pereira
(UNESC)

Profª. Dra. Elisabeth Wisbeck
(UNIVILLE)

Dissertação julgada para a obtenção do título de Mestra em Engenharia de Processos, área de concentração Desenvolvimento e Gestão de Processos e Produtos e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos.



Profª. Dra. Bianca Goulart de Oliveira Maia
Orientadora (UNIVILLE)

Profª. Dra. Ana Paula Testa Pezzin
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos

Joinville, 30 de maio de 2025.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE pela oportunidade de realizar este curso, aos professores pelos conhecimentos transmitidos e aos meus colegas de curso pelo conhecimento compartilhado.

Agradeço também a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela bolsa de estudos do Programa de Suporte à Pós-Graduação de Instituições Comunitárias de Educação Superior – PROSUC, pois graças a esta bolsa foi possível realizar este mestrado.

Às professoras Dra. Bianca Goulart de Oliveira Maia e Dra. Noeli Sellin, pelo apoio desde o início do mestrado, me incentivando a explorar um tema desafiador e extremamente interessante, pela orientação e conhecimentos transmitidos.

A Deus, por sempre me conceder sabedoria nas escolhas dos melhores caminhos e pela oportunidade de realizar mais este grande sonho.

Ao meu marido, Marlon Esser, que me amparou nesta jornada e incentivou a sempre fazer o meu melhor.

A todos que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

Aos membros da banca examinadora, agradeço por aceitarem avaliar este trabalho, certamente acrescentando valiosas contribuições.

RESUMO

Lodo têxtil: uma análise de valorização com a sistemática CPQVA

A indústria têxtil é uma das empresas pioneiras em inovação, buscando sempre estar à frente das atualidades do mercado e inovações tecnológicas, além da busca pela sustentabilidade em seus processos de fabricação. Durante a fabricação dos produtos têxteis é gerado na estação de tratamento de efluentes o lodo têxtil, que é um resíduo semissólido com características não definidas, pois sua composição varia de acordo com o produto fabricado e seu processo de tratamento de efluentes. Atualmente, no Brasil são geradas cerca de 73 mil toneladas de lodo têxtil por ano. Neste cenário, existe um problema ambiental crescente, pois a maior parte das indústrias têxteis do país e até mesmo ao redor do mundo enviam o lodo têxtil gerado para aterros sanitários e em alguns casos, acredita-se que as empresas os despejam em corpos hídricos de forma irregular. Dado esta problemática, o presente trabalho teve o objetivo de avaliar modos de valorização do lodo têxtil por meio da aplicação da sistemática CPQVA (Classificação, Potencialidade, Quantidade/Viabilidade e Aplicabilidade), sendo este um sistema para a tomada de decisão a respeito da valorização de resíduos sólidos industriais. Para a execução deste trabalho foi inicialmente realizada uma revisão sistêmica da literatura com o apoio de uma ferramenta de inteligência artificial, sobre pesquisas que aplicaram a sistemática CPQVA e valorizaram o lodo têxtil. A seleção de pesquisas que valorizaram o resíduo foi dividida entre as áreas de aplicação agrícola, construção civil e geração de energia, em que foram filtrados 4 trabalhos para cada área. Posteriormente, foram coletadas amostras de lodo têxtil de uma indústria têxtil localizada em Santa Catarina, com o objetivo de realizar sua caracterização, bem como a obtenção de dados sobre sua geração e quantificá-lo. A partir destes dados, a sistemática CPQVA foi aplicada considerando os interesses da empresa parceira geradora do resíduo. Para cada critério avaliado foram respondidos questionamentos, totalizando 12 questões. A cada uma foi atribuído um peso de 1 a 10, conforme seu nível de importância, e às respostas foram atribuídos pesos de 0, 5 ou 10, de acordo com o nível de dificuldade para estabelecer a valorização do resíduo. Ao final dos questionamentos, foram calculados os índices de criticidade para cada critério e, por fim, foi calculado o índice de criticidade total. Com base neste índice foram definidas as formas de valorização que apresentaram os menores valores, indicando condições mais viáveis para uma possível aplicação. Deste procedimento, foram obtidos os índices de criticidade iguais à 3,28 para os produtos de caráter cerâmico para a construção civil, como os blocos cerâmicos, concretos para aplicação não estrutural e concreto asfáltico; 3,37 para o produto na forma de biomassa utilizado na confecção de briquetes; e 3,08 para o produto na forma de substrato para codigestão anaeróbica. Desta forma, com base na sistemática CPQVA, constata-se que os produtos analisados apresentam os mais elevados potenciais de aplicação no contexto da valorização do lodo têxtil.

Palavras-chave: CPQVA, Lodo têxtil, Sustentabilidade industrial, Valorização de resíduos.

ABSTRACT

Textile sludge: a valorization analysis with CPQVA systematic

The textile industry is one of the pioneering companies in innovation, always seeking to be ahead of current market trends and technological innovations, in addition to seeking sustainability in its manufacturing processes. During the manufacturing of textile products, textile sludge is generated in the effluent treatment plant, which is a semi-solid residue with undefined characteristics, as its composition varies according to the product manufactured and its effluent treatment process. Currently, approximately 73 thousand tons of textile sludge are generated in Brazil each year. In this scenario, there is a growing environmental problem, as most textile industries in the country and even around the world send the generated textile sludge to landfills and in some cases, its believed that companies dump it into water bodies irregularly. Given this problem, the present study aimed to evaluate ways of valorizing textile sludge through the application of the CPQVA systematic (Classification, Potentiality, Quantity/Feasibility and Applicability), which is a sistem approach for decision-making regarding the valorization of industrial solid waste. To carry out this study, a systematic review of the literature was initially carried out with the support of an artificial intelligence tool, on research that applied the CPQVA systematic and valorized textile sludge. The selection of research studies that valued the waste was divided between the areas of agricultural application, civil construction and energy generation, in which 4 studies were filtered for each area. Subsequently, samples of textile sludge were collected from a textile industry located in Santa Catarina, with the aim of characterizing it, as well as obtaining data on its generation and quantifying it. Based on this data, the CPQVA systematic was applied considering the interests of the partner company that generated the waste. Questions were answered for each criterion evaluated, totaling 12 questions. Each question was assigned a weight from 1 to 10, according to its level of importance, and the answers were assigned weights of 0, 5 or 10, according to the level of difficulty in establishing the waste valorization. At the end of the questions, the criticality indexes were calculated for each criterion and, finally, the total criticality index was calculated. Based on this index, the forms of valorization that presented the lowest values were defined, indicating more viable conditions for a possible application. From this procedure, criticality indices equal to 3.28 were obtained for ceramic products for civil construction, such as ceramic blocks, concrete for non-structural application and asphalt concrete; 3.37 for the product in the form of biomass used in the production of briquettes; and 3.08 for the product in the form of substrate for anaerobic co-digestion. Thus, based on the CPQVA systematic, it is found that the products analyzed present the highest application potential in the context of valorization of textile sludge.

Keywords: CPQVA, Textile sludge, Industrial Sustainability, Waste valorization.

RESUMEN

Lodos textiles: análisis de valorización mediante el sistema CPQVA

La industria textil es pionera en innovación, siempre a la vanguardia de las tendencias del mercado y las innovaciones tecnológicas, a la vez que busca la sostenibilidad en sus procesos de fabricación. Durante la producción de productos textiles, se generan lodos textiles en la planta de tratamiento de aguas residuales. Estos residuos semisólidos tienen características inciertas, ya que su composición varía según el producto fabricado y su proceso de tratamiento. Actualmente, en Brasil se generan aproximadamente 73.000 toneladas de lodos textiles al año. En este contexto, existe un creciente problema ambiental, ya que la mayoría de las industrias textiles en Brasil, e incluso a nivel mundial, envían los lodos textiles generados a vertederos y, en algunos casos, se cree que las empresas los vierten ilegalmente en cuerpos de agua. Ante esta problemática, este estudio tuvo como objetivo evaluar maneras de valorizar los lodos textiles mediante la aplicación del sistema CPQVA (Clasificación, Potencial, Cantidad/Viabilidad y Aplicabilidad), un sistema para la toma de decisiones sobre la valorización de residuos sólidos industriales. Para llevar a cabo este trabajo, se realizó inicialmente una revisión sistemática de la literatura, con el apoyo de una herramienta de inteligencia artificial, sobre estudios que aplicaron el sistema CPQVA y evaluaron lodos textiles. La selección de estudios que evaluaron los residuos se dividió en las áreas de aplicación agrícola, construcción civil y generación de energía, con cuatro estudios filtrados por cada área. Posteriormente, se recolectaron muestras de lodos textiles de una industria textil ubicada en Santa Catarina para caracterizarlos, obtener datos sobre su generación y cuantificarlos. Con base en estos datos, se aplicó el sistema CPQVA, considerando los intereses de la empresa asociada que genera los residuos. Se respondieron preguntas para cada criterio evaluado, totalizando 12 preguntas. A cada criterio se le asignó un peso de 1 a 10, dependiendo de su nivel de importancia, y a las respuestas se les asignaron pesos de 0, 5 o 10, dependiendo del nivel de dificultad para determinar la valorización de los residuos. Al final de los cuestionarios, se calcularon los índices de criticidad para cada criterio y, finalmente, se calculó el índice de criticidad total. Con base en este índice, se definieron los métodos de valorización que presentaron los valores más bajos, indicando las condiciones más viables para su posible aplicación. Este procedimiento resultó en índices de criticidad de 3,28 para productos cerámicos para construcción civil, tales como bloques cerámicos, concreto para aplicaciones no estructurales y concreto asfáltico; 3,37 para el producto en forma de biomasa utilizada en la producción de briquetas; y 3,08 para el producto en forma de sustrato para codigestión anaeróbica. Así, con base en el sistema CPQVA, se puede observar que los productos analizados tienen el mayor potencial de aplicación en el contexto de la recuperación de lodos textiles.

Palabras clave: CPQVA, Lodos textiles, Sostenibilidad industrial, Valorización de residuos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura da cadeia produtiva e de distribuição têxtil e confecção.....	16
Figura 2 – Lodo gerado no tratamento dos efluentes do processo têxtil.	17
Figura 3 - Fluxograma de ETE de uma Indústria de Beneficiamento Têxtil (Biológico + Físico-Químico)	18
Figura 4 - Representação esquemática dos critérios sistemáticos para a valorização de resíduos, de forma abreviada – CPQVA.....	20
Figura 5 - Representação para a sistemática de valorização de RSI e critérios CPQVA	21
Figura 6 - Fluxograma das etapas da pesquisa	26
Figura 7 - Revisão sistêmica da literatura com a ferramenta de IA Research Rabbit	31
Figura 8 - Quantidade (toneladas) de lodo têxtil gerado na ETE de 2002 a 2022.....	35
Figura 9 - Comparativo entre a produção de produtos acabados e o lodo têxtil gerado na ETE	36
Figura 10 - Projeção de geração acumulada de lodo	36
Figura 11 - Mapa de distribuição geográfica das empresas geradora do LT e possíveis empresas receptoras.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores atribuídos aos níveis de dificuldade nas respostas aos questionamentos sistêmicos (Quadro 1).	23
Tabela 2 - Faixa de valores e escala qualitativa de cores para definição do Índice de Criticidade (Ic) de valorização do Resíduo Sólido Industrial (RSI).	24
Tabela 3 - Valores atribuídos aos níveis de dificuldade nas respostas aos questionamentos sistêmicos (Quadro 1).	30
Tabela 4 - Faixa de valores e escala qualitativa de cores para definição do Índice de Criticidade (Ic) de valorização do Resíduo Sólido Industrial (RSI).	30
Tabela 5 - Relação de artigos que aplicaram a sistemática CPQVA	32
Tabela 6 - Relação de artigos que valorizaram o lodo têxtil	33
Tabela 7 – Análises físico-químicas do lodo têxtil (presente trabalho) e de outros autores.	37
Tabela 8 - Espectrometria de Fluorescência de Raios-X do lodo têxtil.....	39
Tabela 9 - Questionamentos, respostas e índice de criticidade do Critério C.....	45
Tabela 10 – Espectroscopia de fluorescência de Raios-X (FRX) de lodo avaliados pela literatura.	47
Tabela 11 - Difração de Raios-X (DRX) de lodo avaliados pela literatura.....	48
Tabela 12 - Análise aproximada (umidade, sólidos voláteis e cinzas), análise elementar (O, C, S, H e N) e poder calorífico superior de lodos avaliados pela literatura.....	49
Tabela 13 - Produtos potenciais (PP) identificados a partir da composição física e química do LT.	49
Tabela 14 - Questionamentos, respostas e índice de criticidade do Critério P.	50
Tabela 15 - Alterações consideradas necessárias para adequação da empresa receptora para valorizar o LT.....	53
Tabela 16 - Questionamentos, respostas e índice de criticidade do critério QV.	59
Tabela 17 - Questionamentos, respostas e índice de criticidade do Critério A.	62
Tabela 18 - Índice de criticidade total dos critérios sistemáticos CPQVA	63

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
1 OBJETIVOS.....	15
1.1 Objetivo Geral.....	15
1.2 Objetivos Específicos	15
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	16
2.1 Processo de produção na indústria têxtil	16
2.2 Lodo Têxtil	17
2.3 Sistemática CPQVA	19
2.4 Guia sistêmico - CPQVA	20
2.5 Inteligência Artificial.....	24
3 METODOLOGIA	26
3.1 Revisão sistêmica com IA	27
3.2 Estado da arte: Sistemática CPQVA	27
3.3 Estado da arte: Aplicações de lodo têxtil.....	28
3.4 Quantificação e Caracterização do lodo	28
3.4.1 Análise Aproximada	28
3.4.2 Análise Elementar.....	29
3.4.3 Poder Calorífico.....	29
3.4.4 Espectrometria de Fluorescência de Raio X (FRX)	29
3.5 Aplicação da sistemática CPQVA.....	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
4.1 Revisão sistêmica com IA	31
4.2 Estado da arte: Sistemática CPQVA	32
4.3 Estado da arte: Aplicações de lodo têxtil.....	33
4.4 Quantificação e Caracterização do lodo	35
4.4.1 Análise Aproximada, Elementar e Poder Calorífico	37

4.4.2 Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX).....	39
4.5 Aplicação da sistemática CPQVA.....	41
4.5.1 Critério C - Classificação	41
4.5.2 Índice de criticidade: Critério C.....	45
4.5.3 Critério P - Potencialidade.....	46
4.5.4 Índice de criticidade: Critério P.....	50
4.5.5 Critério Qv – Quantidade/Viabilidade	51
4.5.6 Índice de criticidade: Critério Qv.....	58
4.5.7 Critério A - Aplicabilidade.....	60
4.5.8 Índice de criticidade: Critério A	62
4.5.9 Índice de criticidade: Total – Critérios CPQVA.....	63
CONCLUSÃO	66
REFERÊNCIAS.....	67
TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO DE TESES E DISSERTAÇÕES	75

INTRODUÇÃO

A indústria têxtil e de confecção brasileira representa uma parcela significativa da produção mundial, sendo classificada como a sexta maior produtora global (BNDES, 2009). Segundo dados da Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT, 2023), o setor reúne cerca de 22,5 mil empresas formais em todo país, empregando aproximadamente 1,34 milhões de trabalhadores. Em 2021, a produção têxtil nacional atingiu 2,16 milhões de toneladas. Destaca-se, neste cenário, o estado de Santa Catarina, que abriga um dos polos têxteis mais desenvolvidos da América Latina (BNDES, 2009).

Os processos de fabricação têxtil variam conforme o segmento da empresa e tecnologias empregadas. Contudo, entre as principais etapas estão o pré-tratamento, tingimento, estamparia e acabamento, caracterizadas por elevado consumo de água e insumos químicos (FIEMG, 2013).

Estima-se que a indústria têxtil mundial consuma, anualmente, cerca de 93 trilhões de litros de água, o que representa 4% da captação global anual de água doce. Para ilustrar a magnitude deste consumo, verifica-se que a produção de uma camiseta de algodão pode demandar até 2.720 litros de água, desde o cultivo da matéria-prima (algodão) até a finalização do produto (BRASIL DE FATO, 2022).

O lodo têxtil é gerado nas estações de tratamento de efluentes (ETE), responsáveis pelos tratamentos do efluente líquido proveniente dos processos industriais. Devido à variedade de matérias-primas e às distintas etapas de processamento, esse resíduo não apresenta características físicas e químicas padronizadas. Em razão de sua elevada geração, o lodo têxtil representa um desafio ambiental relevante (FIEMG, 2013).

O descarte inadequado deste resíduo constitui-se um problema ambiental crescente. Embora o envio a aterros industriais seja a prática mais comum, alternativas vêm sendo estudadas, como sua valorização nos setores da construção civil, geração de energia e agricultura (ASRATIE, 2019).

A valorização de resíduos industriais é essencial para a promoção da sustentabilidade e a mitigação dos impactos ambientais. No entanto, para que um resíduo industrial possa ser de fato reaproveitado, é necessária uma abordagem sistemática e viável que correlacione aspectos técnicos, legais, econômicos e ambientais (OLIVEIRA, 2017).

Neste sentido, Rapp-Pereira (2006) desenvolveu a sistemática CPQVA, baseada em quatro critérios fundamentais: Classificação (C), Potencialidade (P), Quantidade/Viabilidade (Qv) e Aplicabilidade (A). Esse sistema visa embasar decisões sobre o reaproveitamento de resíduos sólidos industriais. Com base nela, um resíduo pode ser avaliado como fonte alternativa para o desenvolvimento de novos produtos, com base nos seguintes critérios: (i) classificação legal quanto à periculosidade (critério C); (ii) identificação do seu potencial de reaproveitamento (critério P); (iii) a avaliação da quantidade gerada, bem como sua disponibilidade e viabilidade técnica (critério Qv); (iv) a proposição de uma aplicação viável como novo produto (critério A).

Embora existam estudos sobre diversas formas de valorização do lodo têxtil, faltam análises críticas que permitam comparar essas alternativas de maneira estruturada. A aplicação de uma sistemática como a CPQVA pode oferecer uma base objetiva para essa comparação, facilitando a tomada de decisão nas empresas e reduzindo o volume de resíduos enviados a aterros.

Diante deste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de valorização do lodo têxtil tanto do ponto de vista industrial como ambiental. Para isso adotou-se a sistemática CPQVA, como ferramenta de análise criteriosa das possibilidades de aplicação do lodo têxtil, contribuindo para a tomada de decisão estratégica e a mitigação dos impactos ambientais decorrentes da atividade têxtil.

1 OBJETIVOS

1.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial de valorização do lodo têxtil, considerando seus impactos na indústria e no meio ambiente, por meio da aplicação da sistemática CPQVA.

1.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão sistemática da literatura com o auxílio do *software* de inteligência artificial *Research Rabbit*, por meio de análise bibliométrica, com o objetivo de identificar padrões recorrentes nas pesquisas e mapear lacunas existentes no conhecimento sobre valorização do lodo têxtil;
- Quantificar o lodo têxtil gerado por uma empresa parceira, com base em seus dados históricos, a fim de estabelecer a quantidade disponível para sua valorização;
- Caracterizar físico-quimicamente amostras de lodo têxtil, a fim de identificar suas propriedades e potenciais de reaproveitamento;
- Desenvolver uma sequência de processos de tomada de decisão multicritério com base na sistemática CPQVA, visando estabelecer índices qualitativos que reflitam o grau de dificuldade na valorização do lodo têxtil.

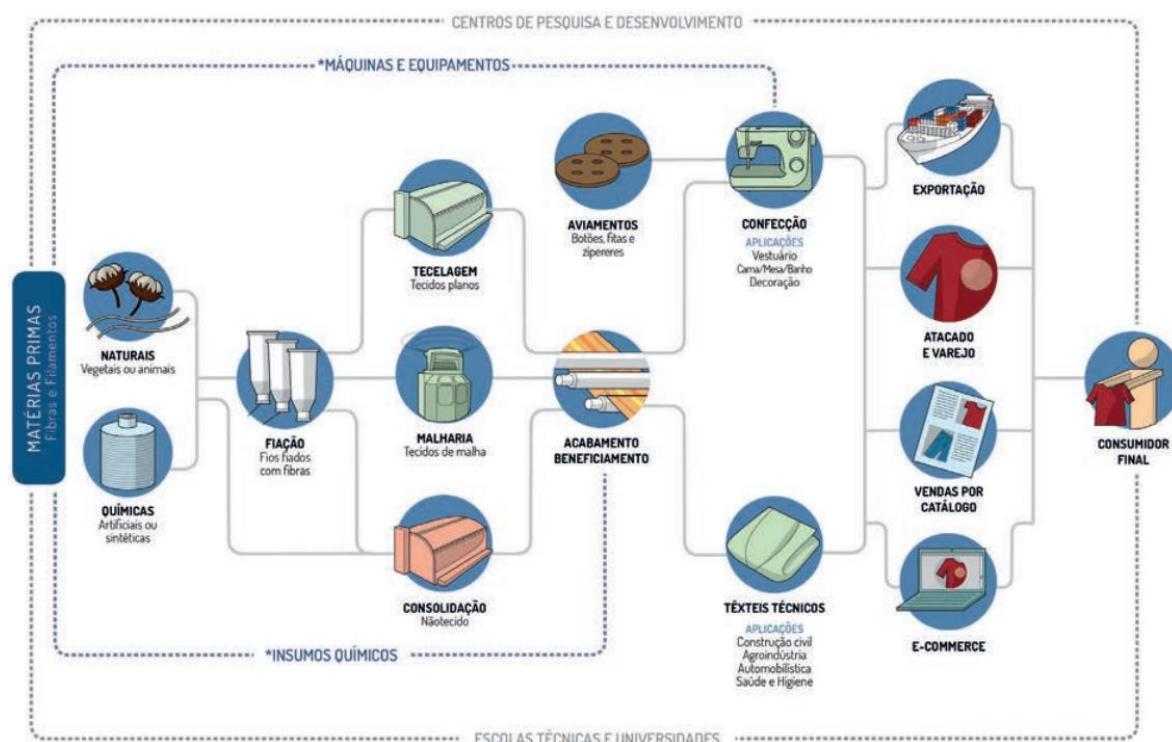
2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Processo de produção na indústria têxtil

A indústria têxtil foi uma das protagonistas da primeira revolução industrial, no século XVIII, ao adotar as tecnologias das máquinas movidas a vapor em substituição aos teares manuais, conforme destacado pela Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confeção (ABIT, 2017). Desde então, o setor tem mantido um histórico de investimentos contínuos em inovação, consolidando-se como uma referência na implementação de práticas da indústria 4.0.

Elaborada pela ABIT (2017), na Figura 1 está ilustrado a estrutura da cadeia produtiva e de distribuição do setor têxtil e de confecção no Brasil.

Figura 1 - Estrutura da cadeia produtiva e de distribuição têxtil e confecção



Fonte: ABIT (2017)

O processo produtivo inicia-se com as fibras têxteis e filamentos, que passam pela etapa fiação, na qual são transformados em fios. Esses fios podem ser entrelaçados em ângulos de 90° para formação de tecidos planos ou serem entrelaçados por meio do processo de tricô, resultando em tecidos de malha. Após

sua produção, os tecidos seguem para os acabamentos, que lhes conferem características específicas, sendo então encaminhados à confecção, onde são cortados e costurados, até serem transformados em peças de vestuário (ABIT, 2017).

Essa cadeia produtiva também demonstra forte interação com centros de pesquisa e instituições acadêmicas, contribuindo para o desenvolvimento de inovações tecnológicas em todas as suas etapas (ABIT, 2017).

A indústria do segmento têxtil tem direcionado esforços significativos para o investimento em inovações tecnológicas que tornem os seus processos mais sustentáveis, alinhando-se às metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Dentre as ações adotadas, destaca-se a redução na geração de resíduos e o reaproveitamento dos mesmos. No entanto, as iniciativas são majoritariamente voltadas aos resíduos sólidos, como retalhos de tecido, enquanto, os resíduos provenientes do tratamento de efluentes, como o lodo têxtil, continuam sendo pouco explorados (ABIT, 2017).

2.2 Lodo Têxtil

O lodo têxtil é um resíduo sólido gerado nas estações de tratamento de efluentes (ETE) das indústrias têxteis. Sua composição varia conforme o segmento industrial, os insumos utilizados e o tipo de tratamento empregado, o que resulta em um resíduo com características físicas e químicas não padronizadas (FIEMG, 2013).

Na Figura 2 está ilustrado o aspecto do lodo gerado em uma estação de tratamento de efluentes em uma indústria têxtil após o seu tratamento.

Figura 2 – Lodo gerado no tratamento dos efluentes do processo têxtil.

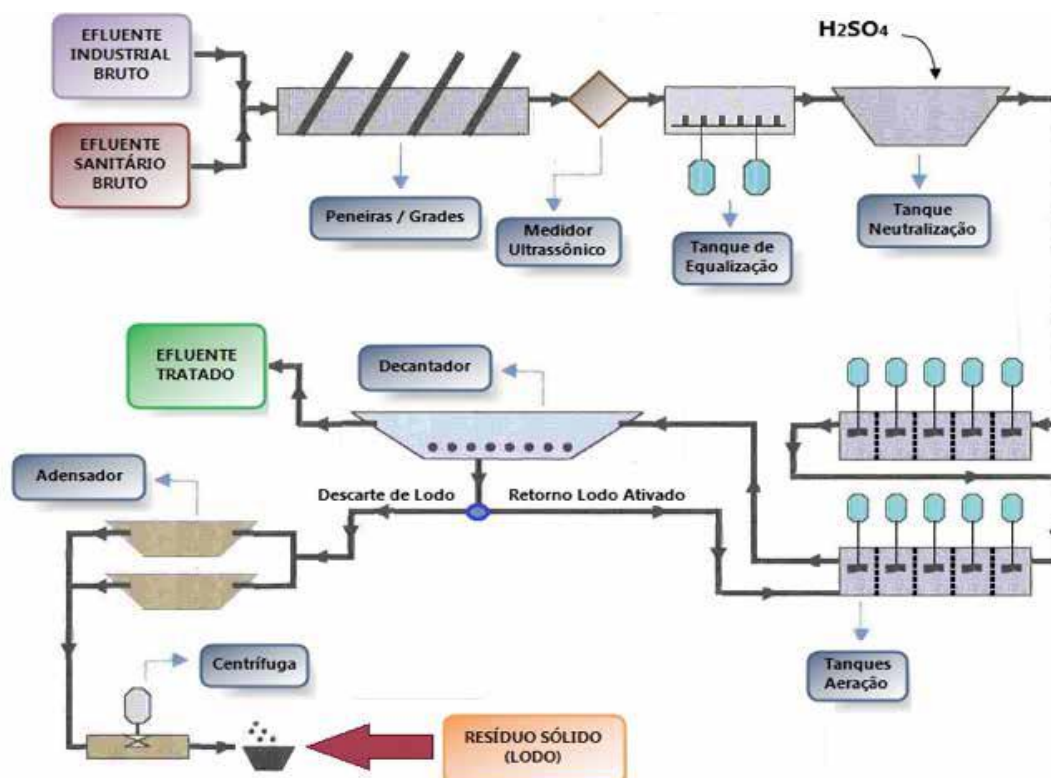


Fonte: FIEMG (2013)

De acordo com Premkumar *et al.* (2021), o lodo têxtil é formado na estação de tratamento de efluentes (ETE), após as etapas de tratamento biológico do efluente, como o uso de lodos ativados, e de tratamento físico-químico, que incluem a coagulação com sais de alumínio, ferro ou magnésio, além da adição de polímero (floculante) e de cal, seguidos da separação líquido/sólido por decantação. Antes de sua disposição final, o lodo geralmente costuma ser submetido a processos de estabilização e redução de volume.

Elaborada pela FIEMG (2013), na Figura 3 é apresentado o fluxograma típico de uma ETE aplicada em indústrias de beneficiamento têxtil (tais como, tinturaria e estamparia), nas quais são empregados tratamentos biológicos ou conjugados (biológicos e físico-químico), resultando na geração do lodo têxtil.

Figura 3 - Fluxograma de ETE de uma Indústria de Beneficiamento Têxtil (Biológico + Físico-Químico)



Fonte: FIEMG (2013)

Conforme apresentado na Figura 3, o tratamento de efluentes pode ser dividido nas seguintes etapas:

Pré-tratamento – Consiste na remoção de materiais sólidos grosseiros, como

fiapos, trapos e areia, que poderiam danificar os equipamentos subsequentes. São comumente utilizados nessa etapa peneiras e grades.

- **Tratamento Primário** – Envolve a equalização do efluente, com redução na temperatura e, se necessário, mistura efluentes sanitários. Inclui também a neutralização do efluente e a possível adição de produtos químicos para remover sólidos suspensos. A separação sólido-líquido pode ser realizada por filtração, reduzindo parte da matéria orgânica.
- **Tratamento Secundário** – Tem como objetivo a remoção da matéria orgânica em suspensão ou dissolvida, geralmente por meio de processos biológicos, realizados em tanques de aeração ou lagoas anaeróbias.
- **Tratamento Terciário** – Etapa destinada à remoção dos sólidos remanescentes por tanques de decantação ou flotação. Após isso, ocorre o adensamento do lodo gerado, que é então desaguado por filtro prensa, centrífuga ou leitos de secagem.

Diversos estudos (BESHAH *et al.*, 2021; DEMEKE *et al.*, 2023; DEUS *et al.*, 2021; GADHI *et al.*, 2023; KASAW *et al.*, 2021; LINS *et al.*, 2023; ZAMAN *et al.*, 2023) apontam que o destino predominante para o lodo têxtil ainda é em aterros sanitários, contudo, acredita-se que também seja uma prática comum o despejo irregular em corpos hídricos. Essa prática representa um desafio ambiental, especialmente diante da escassez de espaços nos aterros.

No que se refere às possibilidades de aproveitamento do lodo têxtil, Balota *et al.* (2019) realizaram uma revisão sistêmica com o objetivo de identificar métodos de tratamentos e formas de aplicação do resíduo. Foram analisados 60 estudos publicados entre os anos de 2000 e 2018, sendo que 25 deles abordaram aplicações práticas do lodo têxtil. Entre as alternativas propostas, a construção civil foi a mais explorada (59%), seguida da utilização como biossólido (30%) e como fonte de biocombustível (11%), indicando essas áreas como os principais caminhos de valorização para esse resíduo.

2.3 Sistemática CPQVA

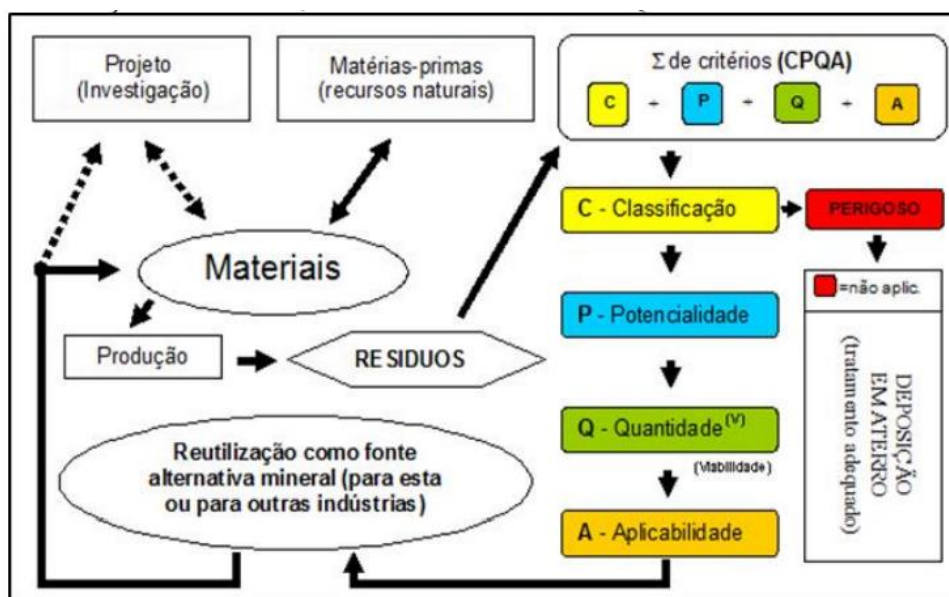
A sistemática CPQVA desenvolvida por Raupp-Pereira (2006) propõe uma estrutura de tomada de decisão para valorização de resíduos sólidos industriais (RSI).

Essa sistemática se baseia em quatro critérios principais:

- **C – Classificação:** avaliação legislativa quanto à periculosidade do resíduo;
- **P – Potencialidade:** análise da composição química e mineralógica, e identificação de potenciais restrições ou oportunidades de aplicação;
- **Qv – Quantidade/Viabilidade:** verificação da constância na geração do resíduo, sua viabilidade logística e legal, e a existência de mercado consumidor;
- **A – Aplicabilidade:** desempenho do produto final frente às exigências do mercado.

Na Figura 4 é apresentado um resumo visual da sistemática CPQVA e seus critérios interrelacionados.

Figura 4 - Representação esquemática dos critérios sistemáticos para a valorização de resíduos, de forma abreviada – CPQVA



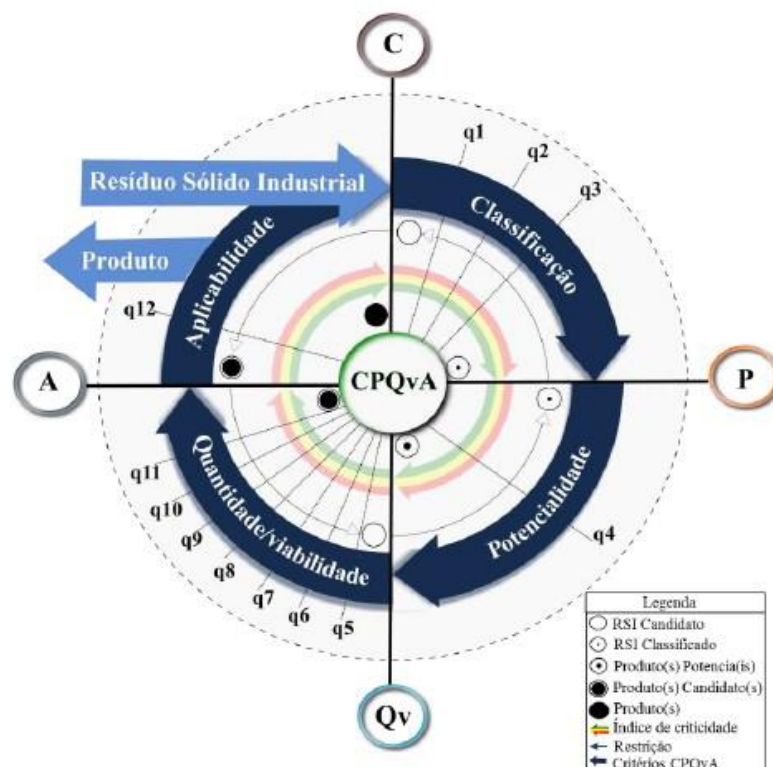
Fonte: Raupp-Pereira (2006)

2.4 Guia sistêmico - CPQVA

Com base na sistemática original, Oliveira (2017) desenvolveu um guia prático de aplicação da metodologia CPQVA, estruturando cada critério em forma de perguntas e atribuindo pesos conforme a importância relativa de cada aspecto. A estrutura

metodológica foi organizada em um fluxograma circular que representa a interdependência entre os critérios, onde a saída em um torna-se a entrada para o próximo, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Representação para a sistemática de valorização de RSI e critérios CPQvA



Fonte: Oliveira (2017)

De acordo com Oliveira (2017), as definições e ações referentes a cada critério são as seguintes:

- C – Classificação: consiste na classificação e categorização do resíduo a ser avaliado. Inicialmente, verifica-se a existência de restrições legais para a sua valorização. Em seguida, realiza-se a caracterização do resíduo culminando-se na sua classificação conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004), que trata da classificação de resíduos conforme seu potencial de periculosidade.
- P – Potencialidade: abrange análise da composição química e mineralógica do resíduo, com o objetivo de avaliar seu potencial de valorização. Elementos químicos prejudiciais ou proibidos em processos produtivos podem limitar a aplicabilidade do resíduo. Este critério também contempla

a avaliação do interesse econômico relacionado à sua composição, pois um baixo potencial técnico pode reduzir a atratividade de sua valorização.

- Qv - Quantidade/Viabilidade: envolve variabilidade composicional do resíduo ao longo do processo produtivo e a análise das possíveis restrições à solução proposta. A partir disto, avalia-se a necessidade de adequações no gerenciamento dos resíduos, tanto na empresa geradora, quanto na potencial receptora. Caso tais adequações sejam viáveis, devem ser examinadas legislações e normas pertinentes à utilização do resíduo e à comercialização do produto resultante. Por fim, realiza-se um estudo de mercado para avaliar a produção potencial e a demanda do produto a ser desenvolvido.
- A – Aplicabilidade: refere-se à avaliação do desempenho da solução proposta, que pode ser realizada por meio da comparação com produtos comerciais, testes de qualidade, aceitação do consumidor e outros indicadores de desempenho técnico e econômico. A aplicabilidade é essencial para confirmar a viabilidade prática da valorização do produto.

Com base nessas ações, os critérios destas foram transformados em um conjunto de questionamentos (q1-q12), aos quais foram atribuídos pesos arbitrários, com o valor máximo de 10 (dez), de acordo com o grau de relevância de cada um. A distribuição dos questionamentos e os pesos correspondentes estão apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Questionamentos (q1 - q12) e seus respectivos pesos de cada critério CPQVA

Critério	Questionamento (q)		Pesos
C	q1	Há legislação que restrinja a valorização do RSI?	10
	q2	Qual a dificuldade em estabelecer uma amostra representativa do RSI?	8
	q3	Qual a classe ambiental - legislativa do RSI?	10
Somatório das questões da Classificação ($\sum qC$)			28
P	q4	A composição do RSI classificado restringe a potencialidade das aplicações?	10
Somatório das questões da Potencialidade ($\sum qP$)			10

Qv	q5	A variabilidade composicional compromete possíveis produtos(s) potencial(is)?	6
	q6	Há algum elemento que configure limite de tolerância no produto(s) potencial(is)?	8
	q7	Há necessidade de adequação do gerenciamento para geradora do RSI?	6
	q8	Há necessidade de adequação do gerenciamento para receptora do RSI?	6
	q9	Há legislação que regulamenta o produto(s) ou restrinja o uso do RSI?	10
	q10	A quantidade de geração do RSI atende a necessidade do produto(s) candidato(s)?	10
	q11	Há mercado consumidor para a valorização do RSI conforme o produto(s) candidato(s)?	6
Somatório das questões da Quantidade/viabilidade ($\sum q_{Qv}$)			52
A	q12	O desempenho do produto(s) atende as exigências do mercado?	10
Somatório das questões da Aplicabilidade ($\sum q_A$)			10

Fonte: Oliveira (2017)

Ao responder aos questionamentos apresentados, atribui-se um peso qualitativo a cada resposta, com base em um julgamento subjetivo. Esses pesos estão distribuídos em três níveis, correspondentes ao grau de dificuldade para se estabelecer a valorização do resíduo, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores atribuídos aos níveis de dificuldade nas respostas aos questionamentos sistêmicos (Quadro 1).

Valores	Julgamento Qualitativo
0	Baixo
5	Médio
10	Alto

Fonte: Oliveira (2017)

O resultado desta avaliação consiste na determinação de um Índice de Criticidade (Ic) para cada critério analisado, além de um índice global representativo de todo o sistema. O cálculo do Ic é realizado por meio da razão entre a soma do produto dos pesos atribuídos aos questionamentos (qn) e às respectivas respostas (Rn), e a soma total dos questionamentos (q), conforme a equação 1.

$$Ic = \frac{\sum (qn \times Rn)}{\sum q} \quad (1)$$

Os valores dos Índices de Criticidade (Ic) variam de 0 a 10. Com base nessa escala, é possível classificar qualitativamente o grau de dificuldade associado à valorização do resíduo, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Faixa de valores e escala qualitativa de cores para definição do Índice de Criticidade (Ic) de valorização do Resíduo Sólido Industrial (RSI).

Faixa de Índice de Criticidade (Ic)	Escala de cores
0 a 3,3	Fácil
3,4 a 6,6	Moderado
6,7 a 10	Difícil

Fonte: Oliveira (2017)

2.5 Inteligência Artificial

A utilização de ferramentas de inteligência artificial (IA) no meio acadêmico tem sido cada vez mais comum, sobretudo em atividades de revisão bibliográfica. O uso de *softwares* com capacidade de análise bibliométrica contribui para acelerar o processo de mapeamento de literatura e identificação de lacunas científicas (TORRE-LÓPEZ *et al.*, 2023).

Um exemplo clássico dessa aplicação ocorre na fase inicial de investigação científica, que geralmente demanda uma análise minuciosa da literatura existente. Essa etapa é essencial para compreender o estado da arte e identificar estudos que abordem problemas semelhantes ou complementares. No entanto, a tarefa de

localizar, filtrar e extrair informações de um vasto volume de publicações pode ser extremamente complexa e morosa (BOOTH *et al.*, 2016).

Nesse contexto destaca-se a bibliometria, uma abordagem que sintetiza esse processo, por meio da análise de variáveis como o número de publicações, frequência de citações, redes de colaboração entre pesquisadores e as tendências emergentes entre diferentes áreas do conhecimento (KARIM e SOEBAGYO, 2021).

Com o avanço da IA, surgiram diversas ferramentas que automatizam análises bibliométricas, como os softwares: *Connected Papers*; *Inciteful*; *Litmaps* e *Research Rabbit*, facilitando significativamente o trabalho dos pesquisadores. Entre essas ferramentas, destaca-se o *Research Rabbit* (SINGAPORE, 2021).

O *Research Rabbit*, desenvolvido em 2021, é uma ferramenta inovadora de mapeamento da literatura científica, desenvolvida para facilitar a análise e a visualização de dados bibliométricos de forma eficiente, que permite explorar redes de citação, visualizar tendências e identificar conexões entre autores e temas. Projetado especificamente para apoiar pesquisadores, este software oferece recursos que tornam o gerenciamento e a interpretação de dados bibliométricos mais acessíveis e intuitivos. Com o *Research Rabbit*, os usuários podem explorar, analisar e criar visualizações dinâmicas de diversos tipos de informações relacionadas à pesquisa científica, como publicações, citações, conexões entre pesquisadores e tendências emergentes em áreas específicas. Essa abordagem amplia a compreensão do cenário científico, contribuindo para o avanço da pesquisa e a identificação de novas oportunidades investigativas (FETRINA e MURNI, 2024).

A eficácia do *Research Rabbit* foi demonstrada, por exemplo, em um estudo conduzido por Fetrina e Murni (2024), que utilizou a ferramenta para realizar um mapeamento bibliométrico de publicações científicas produzidas por professores do Departamento de Sistemas de Informação da *University Syarif Hidayatullah Jakarta*. A análise permitiu identificar temas emergentes, quantificar a produção científica ao longo dos anos e revelar potenciais colaborações entre docentes. Tais informações fornecem subsídios valiosos para a formulação de estratégias institucionais, apoio à pesquisa em áreas específicas e monitoramento das dinâmicas de publicação acadêmica.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido a partir de duas frentes principais: revisão sistêmica da literatura com apoio de uma ferramenta de Inteligência Artificial (IA) e uma investigação experimental com amostras de lodo têxtil fornecidas por uma empresa parceira.

Para a revisão bibliográfica, foi utilizada a ferramenta de IA *Research Rabbit*, recomendada por instituições como a Universidade de Gestão de Singapura (SINGAPORE, 2021) e Universidade Federal de Uberlândia (BRASIL, 2023). Essa escolha se justifica pela interface intuitiva da plataforma e sua capacidade de organizar, visualizar e sugerir estudos relevantes com base em palavras-chave e conexões entre autores.

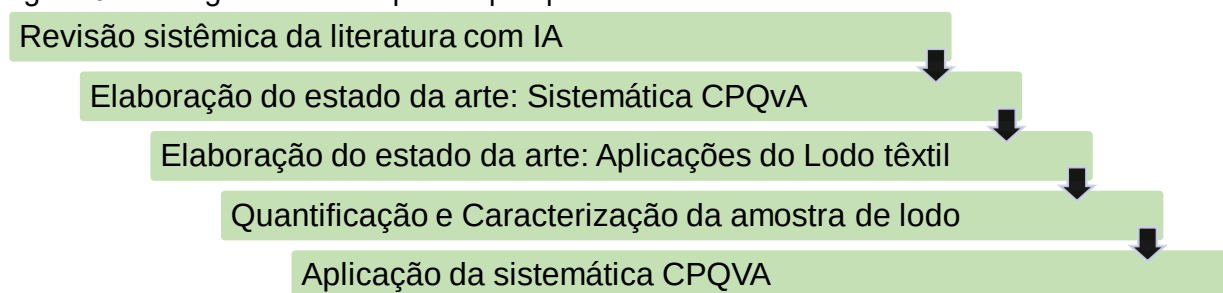
Com o uso da ferramenta, foram coletadas publicações relacionadas à aplicação da sistemática CPQVA e às possíveis formas de aproveitamento do lodo têxtil.

A avaliação da viabilidade do resíduo considerou três áreas principais de aplicação: agrícola, construção civil e geração de energia, conforme abordagem proposta por Balota *et al.* (2019).

Paralelamente à revisão teórica, foram realizadas análises laboratoriais para caracterizar o lodo têxtil e quantificar sua geração. A empresa parceira, localizada no estado de Santa Catarina forneceu tanto as amostras do resíduo quanto os dados históricos de produção de lodo.

A sistemática CPQVA foi aplicada com base nas informações obtidas, buscando-se identificar quais formas de reaproveitamento do lodo têxtil apresentam maior viabilidade técnico-econômica. Na Figura 6 é apresentado o fluxograma com as etapas metodológicas desta pesquisa.

Figura 6 - Fluxograma das etapas da pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

3.1 Revisão sistêmica com IA

A revisão sistêmica da literatura foi conduzida com o apoio da ferramenta de inteligência artificial *Research Rabbit*, seguindo o processo estruturado em quatro etapas principais:

1. Criação de uma categoria geral intitulada “Dissertação” na plataforma *Research Rabbit*;
2. Organização de coleções temáticas correspondentes às áreas de estudo relacionadas à pesquisa;
3. Realização de buscas por artigos científicos utilizando palavras-chave pertinentes, tais como: agricultura; *agriculture*; biossólido; *civil construction*; construção civil; CPQVA; energia; *energy*; lodo têxtil; *textile sludge*; *textile wastewater*; valorização de resíduos e *waste valorization*;
4. Seleção criteriosa dos artigos científicos mais relevantes ao tema da pesquisa.

À medida que os artigos foram incluídos nas coleções, a ferramenta gerou automaticamente conexões entre os trabalhos, representadas por meio de um mapa mental iterativo. Esse recurso permite visualizar as relações entre os estudos, a linha temporal das publicações e a recorrência de autores em diferentes pesquisas.

Além disso, a plataforma oferece sugestões de artigos relacionados, anteriores e posteriores aos selecionados, bem como acesso à produção de cada autor. Também são indicados pesquisadores que atuam em temáticas similares, ampliando significativamente o escopo da revisão (FETRINA e MURNI, 2024).

Como etapa final da revisão, foi realizada uma análise crítica das sugestões oferecidas pela ferramenta. Quando identificados estudos com potencial de contribuição para a pesquisa, estes foram incorporados às coleções existentes.

3.2 Estado da arte: Sistemática CPQVA

A construção do estado da arte referente à sistemática CPQVA foi realizada com base nos artigos incluídos nas coleções organizadas na ferramenta IA para a revisão da literatura, bem como em teses e dissertações que originaram esses artigos

nos últimos cinco anos (2020 – 2024). A seleção focou em trabalhos que aplicaram a sistemática CPQVA na valorização de diferentes tipos resíduos, proporcionando uma visão abrangente de sua aplicabilidade em distintos contextos e finalidades.

3.3 Estado da arte: Aplicações de lodo têxtil

A análise do estado da arte sobre as possíveis aplicações do lodo têxtil foi realizada a partir dos artigos científicos identificados na plataforma de IA seguindo o mesmo recorte temporal utilizado na subseção anterior. A seleção concentrou-se em estudos que abordaram a valorização do resíduo nas três áreas principais: agricultura, construção civil e geração de energia, alinhando-se nas possibilidades analisadas na presente pesquisa.

3.4 Quantificação e Caracterização do lodo

Com os dados fornecidos pela empresa parceira, foi feito um levantamento da quantidade de lodo gerado entre os anos de 2002 e 2022. Com base nessa série histórica, foi calculada a média anual lodo gerado e multiplicou-se o valor obtido pela quantidade de anos que se desejou projetar a geração futura. Neste caso, projetou-se a geração do resíduo para os próximos 20 anos.

As amostras de lodo fornecidas pela empresa parceira foram submetidas a análises laboratoriais específicas para a caracterização física e química do material, com o objetivo de avaliar sua aptidão para diferentes formas de aproveitamento. As análises realizadas foram: análise aproximada; análise elementar; poder calorífico e espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX).

3.4.1 Análise Aproximada

A análise aproximada, destinada à determinação dos teores de umidade, sólidos voláteis e cinzas foi realizada no Laboratório de Materiais da Univille, com base nos procedimentos estabelecidos nas normas ASTM E1756-08 (2012) e ASTM E1755-1 (2012).

3.4.2 Análise Elementar

A análise elementar foi realizada para quantificar os elementos carbono (C); hidrogênio (H); nitrogênio (N); enxofre (S) e oxigênio (O). Os ensaios foram realizados no laboratório LABSATC (da Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina – SATC), seguindo as metodologias estabelecidas nas normas PO-197; ASTM D 4239/18 E¹ Método A / PO-064 e PO-347.

3.4.3 Poder Calorífico

A determinação do poder calorífico, que se refere à quantidade de energia interna existente numa determinada substância, foi conduzida no laboratório LABSATC, conforme procedimentos estabelecidos na norma ASTM D 5865-13 / PO-063.

3.4.4 Espectrometria de Fluorescência de Raio X (FRX)

A composição química do lodo foi determinada por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (FRX), utilizando o equipamento EDX 7000 da marca Shimadzu, no laboratório LABSATC, conforme a norma ASTM D7348-07.

3.5 Aplicação da sistemática CPQVA

Com base nas ações propostas por Oliveira (2017), cada um dos critérios da sistemática CPQVA foi analisado por meio de questionamentos objetivos (q1 a q12), conforme apresentado no Quadro 1, aos quais foram atribuídos pesos de importância de (1 a 10), sendo o peso 1 o nível mais baixo de importância e o 10 o nível mais alto. Ao responder tais questões, foi atribuído um peso qualitativo a cada resposta, com base em um julgamento subjetivo em relação à dificuldade de valorização do resíduo, conforme apresentado na Tabela 3, a qual é reapresentada nesta seção para facilitar a análise.

Tabela 3 - Valores atribuídos aos níveis de dificuldade nas respostas aos questionamentos sistêmicos (Quadro 1).

Valores	Julgamento Qualitativo
0	Baixo
5	Médio
10	Alto

Fonte: Oliveira (2017)

A combinação desses fatores gerou os Índices de Criticidade (Ic) individuais para cada critério e um índice total, permitindo comparar opções de valorização do lodo têxtil e indicar as mais viáveis técnica e economicamente. O cálculo do Ic é realizado por meio da razão entre a soma do produto dos pesos atribuídos aos questionamentos (qn) e às respectivas respostas (Rn), e a soma total dos questionamentos (q), conforme a equação 1.

$$Ic = \frac{\sum (qn \times Rn)}{\sum q} \quad (1)$$

Os valores dos Índices de Criticidade (Ic) variam de 0 a 10. Com base nessa escala, foi possível classificar qualitativamente o grau de dificuldade associado à valorização do resíduo, conforme mostrado na Tabela 4, a qual é reapresentada nesta seção para facilitar a análise.

Tabela 4 - Faixa de valores e escala qualitativa de cores para definição do Índice de Criticidade (Ic) de valorização do Resíduo Sólido Industrial (RSI).

Faixa de Índice de Criticidade (Ic)	Escala de cores
0 a 3,3	Fácil
3,4 a 6,6	Moderado
6,7 a 10	Difícil

Fonte: Oliveira (2017)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Revisão sistêmica com IA

Com o uso da ferramenta *Research Rabbit*, foram conduzidas as etapas descritas na metodologia. Inicialmente, criou-se uma categoria denominada “Dissertação”, e posteriormente foram formadas coleções específicas para os seguintes temas: Inteligência Artificial, CPQVA, Lodo Têxtil – Agricultura, Lodo Têxtil – Construção Civil e Lodo Têxtil – Energia.

A pesquisa foi realizada por meio de palavras-chave previamente selecionadas, garantindo a identificação de artigos atualizados e pertinentes. Os artigos relevantes foram adicionados às coleções correspondentes. A ferramenta também sugeriu trabalhos similares, anteriores e posteriores aos já selecionados, assim como pesquisadores com linhas de estudo semelhantes. Tais sugestões foram cuidadosamente analisadas e, quando adequadas ao escopo, incluídas na base da pesquisa.

Na Figura 7 é exibida a visualização gráfica das conexões entre os artigos por meio do mapa mental gerado pela plataforma.

Figura 7 - Revisão sistêmica da literatura com a ferramenta de IA Research Rabbit



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O uso da IA se mostrou uma tendência crescente na elaboração de revisões bibliográficas, proporcionando maior assertividade na seleção de estudos e eficiência na construção do estado da arte, conforme também observado por Torre-López *et al.* (2023).

4.2 Estado da arte: Sistemática CPQVA

A construção do estado da arte sobre a sistemática CPQVA foi baseada na seleção de pesquisas que aplicaram esse sistema ou utilizaram o guia de aplicação correspondente. Para essa seleção, foram considerados artigos publicados nos últimos cinco anos (2020 – 2024) conforme apresentado na Tabela 5.

O artigo de Oliveira, *et al.*, 2023 foi desenvolvido com base no guia de aplicação da sistemática CPQVA, sendo ambos de autoria da mesma pesquisadora. Por esse motivo, o trabalho é considerado fundamental para o desenvolvimento desta dissertação.

Tabela 5 - Relação de artigos que aplicaram a sistemática CPQVA

Referência	Resíduo	Aplicação
Vilaça (2020)	Mineração de ferro	Camadas de pavimentos asfálticos; Agregado para blocos de concreto; Agregado miúdo para argamassa; Agregado para artefatos cerâmicos
Simão <i>et al.</i> (2021)	Pedra (indústria de rochas ornamentais)	Matéria-prima em materiais à base de cimento e formulações cerâmicas
Prates <i>et al.</i> (2022)	Cloreto de magnésio	Nanofertilizante
Faraco (2023)	Rejeitos de carvão	Argamassa, fertilizante, zeólitas, geopolímeros e concreto asfáltico
Oliveira <i>et al.</i> (2023)	Casca cerâmica	Filtro e agregado para argamassa refratária
Machado <i>et al.</i> (2023)	Areia de fundição	Massa asfáltica, blocos de concreto para construção civil e blocos de

		concreto hexagonais para pavimentos intertravados
Rebello <i>et al.</i> (2024)	Rejeitos de carvão	Argila cerâmica
Sulista (2024)	Areia de quartzo	Células solares; moldes de fundição; tijolos refratários; vidro e cerâmica

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Esses trabalhos foram fundamentais para compreender as adaptações da CPQVA conforme o tipo de resíduo e área de aplicação. A sistemática, ainda que aplicada a diferentes resíduos, mantém como objetivo central a análise crítica da viabilidade de valorização.

4.3 Estado da arte: Aplicações de lodo têxtil

O estado da arte sobre aplicações de lodo têxtil foi construído com base em estudos que abordam sua valorização nas áreas de agricultura, construção civil e geração de energia. Os trabalhos selecionados apresentaram procedimentos experimentais que comprovaram a viabilidade do uso do lodo têxtil nessas aplicações, conforme apresentado na Tabela 6. Para garantir a atualidade das publicações, foram considerados os artigos publicados nos últimos cinco anos (2020 – 2024).

Tabela 6 - Relação de artigos que valorizaram o lodo têxtil

Identificação	Referência	Área de aplicação	Aplicação
LT1	Deus <i>et al.</i> (2020)	Agricultura	Fertilizante para produção de cana de açúcar
LT2	Stamford <i>et al.</i> (2020)		Fertilizante para produção de feijão-caupi
LT3	Lins <i>et al.</i> (2020)		Fertilizante
LT4	Zaman <i>et al.</i> (2023)		Vermicompostagem

LT5	Oliveira <i>et al.</i> (2020)	Construção civil	Pavimentos
LT6	Beshah <i>et al.</i> (2021)		Blocos cerâmicos
LT7	Kasaw <i>et al.</i> (2021)		Concreto para aplicações não estruturais
LT8	Moura <i>et al.</i> (2024)		Concreto asfáltico
LT9	Draeger <i>et al.</i> (2021)	Energia	Briquetes
LT10	Demeke <i>et al.</i> (2023)		
LT11	Gadhi <i>et al.</i> (2023)		
LT12	Temel e Yangin-gomec (2023)		Substrato para codigestão anaeróbica

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Conforme apresentado na Tabela 4, foram selecionados 12 artigos, com quatro estudos representando cada um das três áreas de aplicação. Esta quantidade foi definida com base nos trabalhos de Oliveira (2023) e Vilaça (2020), que também elaboraram o estado da arte com 13 e 12 artigos, respectivamente, ao desenvolverem a sistemática CPQVA a partir da revisão das potenciais aplicações dos resíduos avaliados.

Observa-se que algumas pesquisas apresentaram aplicações semelhantes para o lodo têxtil, porém, com abordagens experimentais, materiais e metodologias distintas, que serão discutidas com maior profundidade na seção de aplicação da sistemática CPQVA.

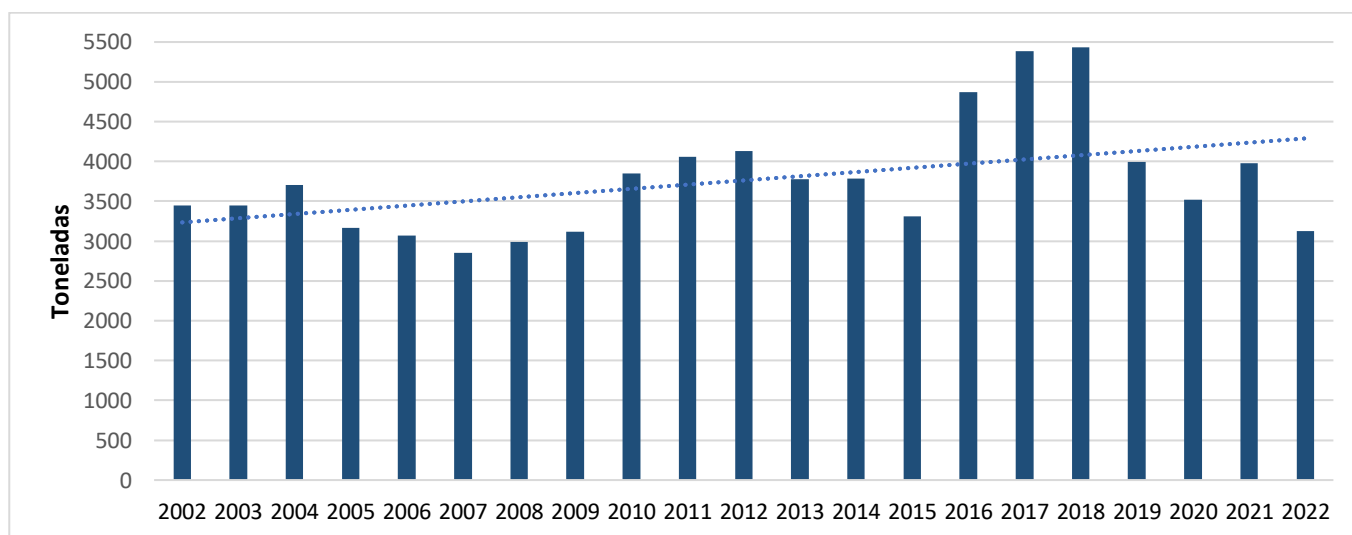
Durante a revisão da literatura, verificou-se que a construção civil é a área que concentra maior número de estudos sobre a valorização do lodo têxtil, isso evidencia uma lacuna investigativa quanto aos motivos pelos quais essa área recebe mais atenção em comparação com os setores agrícolas e energético. Neste sentido, destaca-se a importância de aplicar uma metodologia sistemática como a CPQVA, que

permite avaliar de forma criteriosa qual tipo de aplicação é mais viável para o lodo têxtil, considerando aspectos técnicos, econômicos e ambientais.

4.4 Quantificação e Caracterização do lodo

Com base em relatórios da empresa parceira, foi possível levantar os dados de geração de lodo entre os anos de 2002 e 2022. Esses resíduos, atualmente, são dispostos em aterro sanitário interno. Na Figura 8 está ilustrado a variação anual da geração de lodo nesse período.

Figura 8 - Quantidade (toneladas) de lodo têxtil gerado na ETE de 2002 a 2022.

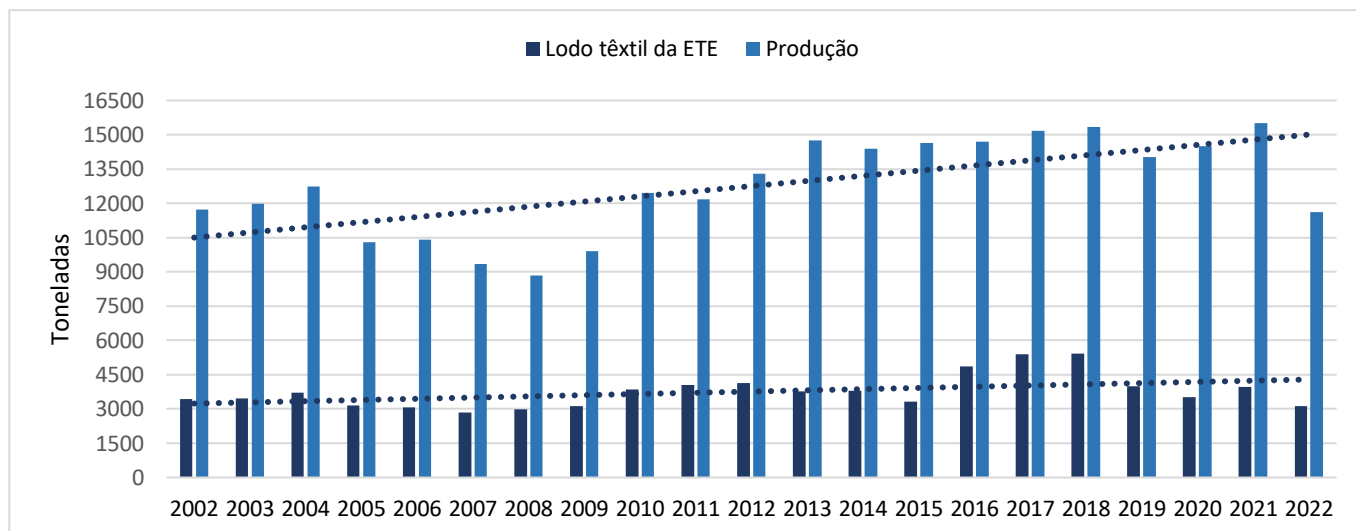


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Segundo Pinto (2009), o Brasil gera anualmente cerca de 73 mil toneladas de lodo têxtil. A geração anual de lodo têxtil, somente na empresa avaliada (Figura 8), apresenta uma variação considerável, oscilando entre 2.850 toneladas e 5.430 toneladas, com uma média de 3.760 toneladas, o que representa aproximadamente 3,9% e 7,4% da produção nacional. Ainda que existam oscilações ao longo dos anos, observa-se uma tendência crescente na geração do resíduo.

Para investigar as causas dessas oscilações, foram analisados também os relatórios de produção anual de produtos acabados no mesmo período. A comparação entre a quantidade de lodo gerado e a produção resultou na elaboração da Figura 9.

Figura 9 - Comparativo entre a produção de produtos acabados e o lodo têxtil gerado na ETE

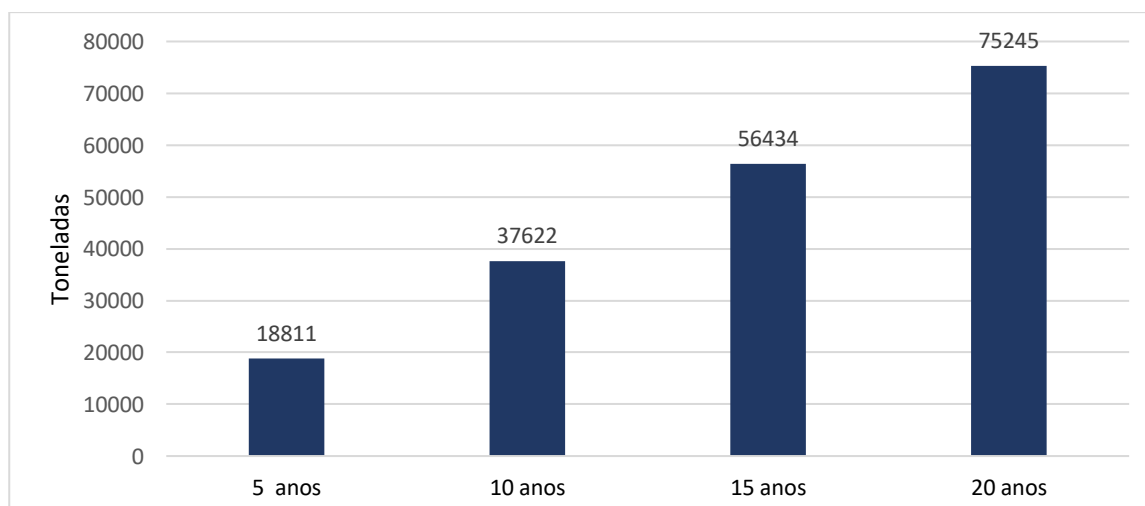


Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Na Figura 9 é evidenciado variações consideráveis na produção anual, que variam entre 8.825 toneladas e 15.515 toneladas, com uma média de 12.750 toneladas. A linha de tendência da produção aponta para um crescimento gradual ao longo do tempo, o que permite inferir que há relação direta entre a quantidade de produtos fabricados (volume de produção) e a geração de lodo.

Com base nas informações históricas, foi realizada uma projeção da quantidade de lodo gerado para os próximos 20 anos, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Projeção de geração acumulada de lodo



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A análise da quantificação do lodo foi utilizada, em conjunto com os resultados da sua caracterização físico-química nos itens 4.5.3 e 4.5.5, para avaliar as alternativas mais eficazes e viáveis de reaproveitamento.

4.4.1 Análise Aproximada, Elementar e Poder Calorífico

Os resultados das análises aproximada, elementar e poder calorífico foram reunidos na Tabela 7, juntamente com dados de estudos de outros autores da literatura, com o objetivo de permitir uma comparação mais ampla e embasada.

Tabela 7 – Análises físico-químicas do lodo têxtil (presente trabalho) e de outros autores.

Parâmetro	Amostra de Lodo têxtil (presente trabalho)	Lodo Têxtil Biológico (Draeger <i>et al.</i> , 2021)	Lodo Têxtil Físico-químico (Draeger <i>et al.</i> , 2021)	Lodo Têxtil (Gadhi <i>et al.</i> , 2023)
Umidade (%)	61,808 ± 0,723	83,29 ± 0,49	78,90 ± 0,49	13,5
S. V. (%)	63,227 ± 0,504	63,68 ± 0,26	22,70 ± 0,37	40,4
Cinzas (%)	41,251 ± 0,027	20,89 ± 0,28	76,21 ± 0,27	43,4
O (%)	10,79	16,15 ± 0,20	9,62 ± 0,20	25,65
C (%)	3,63	48,14 ± 11	9,35 ± 0,16	17,4
S (%)	0,98	1,06 ± 0,06	1,27 ± 0,02	-
H (%)	0,97	7,82 ± 0,05	2,86 ± 0,098	4,6
N (%)	0,14	5,94 ± 0,04	0,69 ± 0,04	1,4
PCS (cal/g)	3.253,00	4.077,10	833,57	2.063,63

S. V.: sólidos voláteis; O: oxigênio; C: carbono; S: enxofre; H: hidrogênio e N: nitrogênio; PCS: poder calorífico superior.

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A análise comparativa revela que o lodo têxtil avaliado no presente trabalho apresenta um teor de umidade relativamente baixo em relação aos lodos analisados por Draeger *et al.* (2021), especialmente ao lodo tratado por processo biológico. De acordo com informações da empresa, é utilizado cal virgem no adensamento do lodo antes do filtro prensa, portanto, supõe-se que um dos motivos para a divergência de teores de umidade é devido à utilização desta substância química. Essa característica

é vantajosa tanto para aplicações do resíduo na construção civil quanto para a geração de energia, pois reduz a necessidade de processos adicionais de secagem, otimizando os custos e a eficiência do reaproveitamento.

Em relação aos sólidos voláteis, que representam a fração orgânica responsável pela liberação de energia durante a combustão, o percentual observado foi alto, o que favorece o uso energético do lodo. Por outro lado, o teor de cinzas, que corresponde à fração inorgânica e não combustível, apresenta-se relativamente alto, o que pode impactar negativamente o desempenho térmico (DRAEGER *et al.*, 2021). Como comentado anteriormente, a empresa parceira utiliza cal virgem em seu tratamento de efluentes, o que além de reduzir a umidade, contribui para o alto teor de cinzas no material.

Quanto à análise elementar, observa-se que o lodo tratado por processo biológico por Draeger *et al.* (2021) apresentou teores significativamente mais elevados de carbono, hidrogênio e nitrogênio em comparação com o lodo deste estudo. Já o lodo têxtil tratado pelo processo físico-químico por Draeger *et al.* (2021) apresentou valores mais próximos aos encontrados neste trabalho, embora com teores ligeiramente inferiores para a maioria dos elementos, com exceção do oxigênio.

No contexto energético, elementos como carbono, hidrogênio e enxofre contribuem positivamente para o poder calorífico, pois participam diretamente das reações de combustão. O oxigênio, apesar de ser essencial como agente oxidante, atua como diluente quando presente na composição do combustível, podendo reduzir seu potencial energético (AVELAR, 2012). No entanto, para aplicações voltadas à construção civil, a presença de oxigênio e carbono pode ser vantajosa, pois possibilita correlação com a composição da argila, permitindo a sua substituição parcial em produtos cerâmicos (BESHAH *et al.*, 2021).

Em relação ao poder calorífico superior (PCS), o valor obtido neste estudo (3.253 cal/g) está acima do valor registrado por Gadhi *et al.* (2023) e do valor encontrado por Draeger *et al.* (2021) para lodo têxtil físico-químico, embora inferior ao lodo tratado biologicamente pelo mesmo autor. Comparando com outras biomassas frequentemente utilizadas em caldeiras como serragem de eucalipto - 4.638,39 cal/g (DRAEGER *et al.*, 2021); casca de arroz - 3.508,35 cal/g (DEMEKE *et al.*, 2023) e palha da cana-de-açúcar - 4.105,76 cal/g (DEMEKE *et al.*, 2023), percebe-se que o lodo deste presente trabalho mostra-se competitivo, oferecendo uma alternativa viável e atrativa para o mercado consumidor. Dessa forma, o poder calorífico elevado

evidencia o potencial energético do lodo têxtil, não apenas para a geração de energia, mas também como alternativa para reduzir o consumo energético em fornos utilizados na produção de materiais de construção, como no caso de blocos cerâmicos (BESHAH *et al.*, 2021).

Com base nos resultados apresentados, conclui-se que o lodo têxtil analisado possui características promissoras para aplicações tanto na construção civil quanto na geração de energia, reforçando sua viabilidade como insumo alternativo em processos sustentáveis.

4.4.2 Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX)

Os resultados da análise de espectrometria de fluorescência de Raios-X do lodo têxtil estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Espectrometria de Fluorescência de Raios-X do lodo têxtil

Elementos (%)	Amostra de Lodo têxtil
Ca	35,27
Mg	10,82
Si	6,109
Fe	4,976
K	3,691
Al	2,779
P	2,409
S	1,472
Mn	1,113
Ti	0,39
Sr	0,359
Zn	0,12
Cu	0,059
Rb	0,015
Perda ao Fogo	30,42
Total (%)	100

Fonte: Laboratório LABSATC (2023).

Os resultados indicam predominância de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e silício (Si), em concordância com os reagentes utilizados na empresa parceira. Elementos como alumínio (Al), fósforo (P) e potássio (K) também se destacam e contribuem para a análise de potencial agrícola e de construção civil (DEUS *et al.*, 2020; MOURA *et al.*, 2024).

Conforme foi apresentado anteriormente, a empresa parceira utiliza óxido de cálcio no adensamento do lodo. Desta forma, é esperado que o elemento em maior concentração na amostra analisada seja o cálcio. Resultado semelhante foi relatado por Zaman *et al.* (2023), cujo estudo também identificou o Ca como principal constituinte, seguido por Fe e Mg.

Por outro lado, a presença de metais pesados como manganês (Mn), zinco (Zn) e cobre (Cu) requer atenção quanto ao uso agrícola e aos limites legais de emissão. Ainda assim, os teores observados são semelhantes aos de estudos que consideraram o lodo adequando para a valorização (STAMFORD *et al.*, 2020)

A presença de metais leves, como Ca, Mg e K, bem como de P e S, pode favorecer aplicações do lodo na área agrícola, uma vez que esses elementos atuam como nutrientes essenciais ao solo, contribuindo, inclusive o um aumento da atividade biológica, como o crescimento populacional de minhocas (ZAMAN *et al.*, 2023). Por outro lado, elementos como Al e Si, também detectados em concentrações consideráveis, são componentes comuns da argila, o que sugere a possibilidade de substituição parcial da argila pelo lodo na construção civil, especialmente na fabricação de tijolos e blocos cerâmicos (BESHAH *et al.*, 2021). Entretanto, a presença de metais pesados, como Mn, Zn e Cu, deve ser cuidadosamente avaliada, pois em concentrações elevadas podem causar impactos ambientais, provocando contaminação do solo e até poluição atmosférica durante a queima em processos industriais de fabricação destes produtos (ZAMAN *et al.*, 2023; MOURA *et al.*, 2024).

A composição observada na amostra de lodo reflete a variação nos processos produtivos da indústria têxtil, nos quais diferentes matérias-primas e insumos são utilizados, dependendo do produto a ser produzido, o que justifica a presença de diversos elementos na análise de FRX. É comum, por exemplo, a utilização de metais Fe, Mn, Zn, Pb, Cu e Cd na formulação de corantes e pigmentos têxteis, que justifica a presença destes no lodo têxtil (TEMEL e YANGIN-GOMEZ, 2023).

Desta forma, os resultados de FRX indicam que a composição do lodo têxtil avaliado nesta pesquisa, apresenta maiores teores de metais leves em relação aos

metais pesados, característica que pode ser explorada de forma estratégica em aplicações na área agrícola e na construção civil, desde que os teores de metais potencialmente tóxicos sejam monitorados e controlados.

Esses dados indicam que, dependendo da aplicação, o lodo pode ser tecnicamente viável e seguro para uso, reforçando a necessidade de análise sistêmica como a proposta pela sistemática CPQVA.

4.5 Aplicação da sistemática CPQVA

Com base nas análises anteriores e na revisão da literatura, foi aplicada a sistemática CPQVA utilizando os 12 questionamentos definidos por Oliveira (2017), com atribuição de pesos, conforme a dificuldade percebida em cada critério. As respostas foram embasadas tanto nos dados laboratoriais quanto nos estudos selecionados.

As subseções a seguir apresentam os resultados detalhados por critério, seguidos do Índice de criticidade individual e total.

4.5.1 Critério C - Classificação

O resíduo sólido industrial avaliado (LT0), referente ao lodo fornecido pela empresa parceira, foi analisado com base na legislação brasileira vigente NBR 10004 (ABNT, 2004). Os questionamentos estabelecidos pela sistemática CPQVA foram aplicados sequencialmente para calcular o Índice de Criticidade (Ic) do critério Classificação.

Questão (q1): Há legislação que restrinja a valorização do Resíduo Sólido Industrial? (Peso 10).

Existem diferentes dispositivos legais que tratam da valorização do lodo têxtil, variando conforme a aplicação pretendida.

Na área agrícola, a Resolução nº 498/2020 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2020) estabelece os critérios e procedimentos para produção e aplicação de lodo em solos.

Os principais aspectos são:

- Elaboração do plano da unidade de gerenciamento de lodo (UGL) e seu licenciamento ambiental;
- Caracterização do lodo, incluindo seu potencial agronômico, redução de atratividade de vetores, presença de substâncias químicas e qualidade microbiológica;
- Monitoramento e caracterização do lote de biossólido a ser aplicado em solos;
- Restrições do uso de lodo em solos;
- Restrições locacionais para aplicação de lodos;
- Projeto para as áreas de aplicação;
- Determinação da dosagem adequada de aplicação de lodo em solos;
- Monitoramento das áreas de aplicação do lodo.

A respeito da valorização do lodo têxtil para geração de energia, em 2008, a CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental), aprovou o “Procedimento para Utilização de Resíduos Não Perigosos da Indústria Têxtil em Caldeiras no Estado de São Paulo”. O documento estabelece diretrizes técnicas, limites de emissão, critérios de desempenho e práticas para minimizar os impactos ambientais (CETESB, 2008). Segundo esse procedimento: Apenas resíduos classificados como não perigosos Classe I, conforme NBR 10004 (ABNT, 2004) podem ser utilizados, como por exemplo, o lodo de sistemas de tratamento biológico de águas residuárias de indústrias têxteis, desde que não contaminados com solventes. Esse resíduo pode ser utilizado em caldeiras de biomassa e a óleo combustível.

Para aproveitamento energético, os resíduos ou misturas devem apresentar poder calorífico inferior (PCI) seco acima de 2775 kcal/kg (ou 11,2 MJ/kg) e assegurar a qualidade ambiental, evitando riscos à saúde humana e atendendo aos padrões de emissão estabelecidos no Procedimento. Essa prática é aplicável a caldeiras que operem com um combustível principal e fornalhas com excesso de ar suficiente para garantir a combustão dos resíduos a uma temperatura mínima de 750 °C (CETESB, 2008).

No setor da construção civil, embora não haja legislação específica que proíba a utilização do lodo têxtil, a norma NBR 15270 (ABNT, 2007), pode ser considerada como referência técnica. Essa norma, especifica os requisitos dimensionais, bem

como as propriedades físicas e mecânicas de blocos e tijolos cerâmicos destinados a obras de alvenaria, com ou sem função estrutural e executadas de forma racionalizada ou não.

De forma geral, independentemente da área de aplicação, é obrigatória realizar a classificação do resíduo quanto à periculosidade, conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004) (ver q3), a qual orienta as estratégias de tratamento e gerenciamento do resíduo.

Dessa forma, o valor de dificuldade atribuído à essa questão foi considerado moderado ($R = 5$), uma vez que, embora existam legislações específicas para determinadas aplicações, como agricultura e energia, não há regulamentação clara ou consolidada para o uso do lodo têxtil na construção civil, o que torna a identificação e aplicação normativa uma tarefa de complexidade intermediária.

Questão (q2): Qual a dificuldade em estabelecer uma amostra representativa do lodo têxtil? (Peso 8)

A norma NBR 10007 (ABNT, 2004) estabelece diretrizes para a elaboração de um plano de amostragem de resíduos sólidos, com o objetivo de assegurar que as análises realizadas sejam representativas do material em questão. Esta norma estabelece procedimentos como: método de amostragem; número e tipo de amostras; os equipamentos de coleta; local de amostragem; os recipientes adequados e os métodos de preservação da amostra.

No caso do lodo têxtil, a representatividade da amostra é um desafio, pois trata-se de um resíduo com composição altamente heterogênea. Esta variação está diretamente relacionada ao tipo de produto que está sendo fabricado, bem como às características do seu processo de tratamento empregado na ETE da indústria. Por essa razão, torna-se necessário realizar coletas periódicas para captar essa variabilidade e obter dados confiáveis.

Diante dessa complexidade, o grau de dificuldade para a obtenção de uma amostra verdadeiramente representativa do lodo têxtil é considerado alto, atribuindo-se à questão o valor $R = 10$.

Questão (q3): Qual a classe ambiental – legislativa do Lodo têxtil? (Peso 10).

A classificação de resíduos sólidos é essencial para a sua gestão e possível reaproveitamento. A ABNT NRB 10004:2004 estabelece critérios para essa classificação, incluindo lodos, considerando sua origem, composição e características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

Sendo essa norma, os resíduos são classificados como:

- Classe I – Perigosos;
- Classe II A – Não perigosos e não inertes;
- Classe II B – Não perigosos e inertes.

Em 2024, foi publicada a nova versão da norma ABNT 10004:2024, com o objetivo de simplificar o processo classificatório. O período de transição vai até 01/01/2026. As principais alterações incluem:

- Redução da nomenclatura para apenas Classe I (Perigosos) e Classe II (Não Perigosos);
- Estabelecimento de um processo em quatro etapas:
 1. Enquadramento conforme a Lista Geral de Resíduos (LGR);
 2. Verificação da presença de Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs);
 3. Avaliação das propriedades físico-químicas que conferem periculosidade;
 4. Avaliação da toxicidade.

A norma NBR 10005 (ABNT, 2004) trata da obtenção de extrato lixiviado, avaliando a capacidade do resíduo de liberar substâncias em meio extrator. Já a NBR 10006 (ABNT, 2004) regula o extrato solubilizado, usado para distinguir entre resíduos não inertes (Classe II A) e inertes (Classe II B). Ambas as normas deixarão de vigorar ao fim do período de transição da nova versão da NBR 10004 (ABNT, 2004).

No contexto desta pesquisa, a empresa parceira realiza regularmente análises de caracterização por meio de um laboratório especializado, que classifica o lodo têxtil de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004). O resultado obtido para o LT0 é Classe II A – resíduo não perigoso e não inerte.

Entre os estudos revisados, apenas o LT5 e LT9 (Tabela 6) realizaram a classificação do lodo têxtil, de acordo com a norma mencionada, sendo classificados como resíduo Classe II A (não perigoso e não inerte) e Classe II, respectivamente.

As demais pesquisas, por serem majoritariamente internacionais, não utilizaram os critérios ABNT. No entanto, com base nas caracterizações do resíduo apresentadas nos artigos, foi possível classificá-los como não perigosos (Classe II) por não apresentarem propriedades de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade.

Os resíduos apresentados na Tabela 6 (LT1, LT2, LT6 e LT9) não excederam os limites estabelecidos pelas normas NBR 10005 (ABNT, 2004) e 10006 (ABNT, 2004), sendo, portanto, classificados como inertes (Classe II B). Por outro lado, os resíduos LT3, LT4, LT7, LT8, LT10, LT11 e LT12 apresentaram concentrações de metais no extrato solubilizado superiores aos limites normativos, sendo assim, classificados como não inertes (Classe II A).

Dessa forma, considerando a existência de métodos e normas bem estabelecidas, e o fato de que a empresa parceira já realiza essa classificação rotineiramente, atribui-se um nível baixo de dificuldade ($R = 0$) à definição da classe ambiental.

4.5.2 Índice de criticidade: Critério C

O índice de criticidade (Ic) do critério Classificação foi calculado a partir das respostas aos questionamentos q1, q2 e q3, associando os pesos e níveis de dificuldade atribuídos, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Questionamentos, respostas e índice de criticidade do Critério C.

Questionamentos (q)		Pesos	Respostas
q1	Há legislação que restrinja a valorização do RSI?	10	5
q2	Qual a dificuldade em estabelecer uma amostra representativa do lodo têxtil?	8	10
q3	Qual a classe ambiental – legislativa do Lodo têxtil?	10	0
Índice de Criticidade (Ic) para Classificação			
4,64			

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Nota: Dentro da escala de cores para o índice de criticidade, as cores verde, amarela e vermelha representam um grau de dificuldade de valorização fácil, moderado e difícil, respectivamente.

Com base nos resultados obtidos, o Índice de Criticidade para o critério Classificação foi 4,64, o que representa um nível moderado de criticidade para a valorização do lodo têxtil. O aspecto de maior dificuldade identificado nesta etapa refere-se à coleta de amostras representativas do lodo têxtil, devido à sua natureza heterogênea e variabilidade de composição, o que exige procedimentos rigorosos e recorrentes para assegurar a representatividade.

4.5.3 Critério P - Potencialidade

Este critério visa analisar a viabilidade de valorização do resíduo a partir de suas propriedades físicas e químicas, associando os resultados laboratoriais às possíveis aplicações do lodo têxtil, considerando os requisitos específicos de cada área de interesse, como agricultura, construção civil e geração de energia.

Dessa forma, a classificação do lodo têxtil sob a ótica do critério Potencialidade requer uma abordagem multifacetada, uma vez que diferentes propriedades são relevantes dependendo da destinação pretendida. Para embasar essa análise, foram reunidos estudos e pesquisas que apresentam as caracterizações físicas e químicas de lodo têxteis de diversas origens e contextos produtivos.

Questão (q4): A composição do LT classificado restringe a potencialidade das aplicações? (Peso 10).

As caracterizações disponíveis na literatura abrangem diferentes métodos analíticos, como a espectroscopia de fluorescência de Raios-X (FRX), difração de Raios-X (DRX), análise aproximada, análise elementar e poder calorífico. Estas informações estão organizadas nas Tabelas 10, 11 e 12.

Tabela 10 – Espectroscopia de fluorescência de Raios-X (FRX) de lodo avaliados pela literatura.

Elemento	LT1	LT2	LT3	LT4	LT6	LT12
Ca (mg/kg)	-	4.200	10.750	2.365	12.000	-
Cu (mg/kg)	275	110	487	0,264	50	6,1
P (mg/kg)	1.780	9.900	9.300	-	-	-
Al (mg/kg)	-	-	-	-	-	21
K (mg/kg)	3.450	2.200	4.060	3.700	3.000	-
Zn (mg/kg)	34,5	121	800	1.868	272	0,59
Fe (mg/kg)	-	3.200	-	809,2	8.000	14,6
Mg (mg/kg)	-	2.800	2.390	90,97	8.000	-
Mn (mg/kg)	-	300	-	5.168	-	0,3
Na (mg/kg)	-	34.500	2.380	-	7.000	-
Cr (mg/kg)	-	28	13,09	0,035	27	0,1
N (mg/kg)	7.320	-	2.490	-	7.900	-
S (mg/kg)	-	-	3.100	-	1.100	-
Matéria Orgânica (%)	-	49,3	77,98	-	-	-

Fonte: Adaptado de Deus *et al.* (2020); Stamford *et al.* (2020); Lins *et al.* (2020); Zaman *et al.* (2023); Beshah *et al.* (2021); Temel e Yangin-gomec (2023).

A composição química e física do lodo têxtil (LT) apresenta significativa variabilidade, o que impacta diretamente nas possibilidades e restrições de sua valorização. Essa variabilidade decorre de fatores como o tipo e a concentração de corantes e insumos químicos utilizados nos processos industriais, bem como as tecnologias e níveis de tratamento de efluentes adotados em cada unidade fabril, como o uso de agentes de adensamento, coagulantes e floculantes (KASAW *et al.*, 2021).

Os dados da Tabela 10 revelam que os resíduos que foram avaliados para aplicações na área agrícola (LT1, LT2, LT3 e LT4) apresentam teores relevantes de N, P, K, Ca, Mg, S e matéria orgânica. Esses elementos são essenciais para a fertilidade do solo, fornecendo nutrientes para as plantas e para o desenvolvimento da fauna edáfica, como minhocas (DEUS *et al.*, 2020; STAMFORD *et al.*, 2020; LINS *et al.*, 2020; ZAMAN *et al.*, 2023).

Além disso, resíduos como o LT12 foram analisados com foco na presença de metais como ferro, zinco, alumínio, cobre, cromo e manganês (ver Tabela 10). O objetivo foi avaliar a redução desses elementos por meio da codigestão e verificar seu potencial tóxico ao meio ambiente (TEMEL e YANGIN-GOMEC, 2023).

Conforme a Tabela 11, os resíduos destinados a aplicações voltadas à construção civil (LT5, LT6 e LT7) destacam-se pela presença de óxidos, como SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , SO_3 , MgO e Na_2O , que podem contribuir para a coesão, resistência mecânica e estabilidade química de materiais como blocos cerâmicos e concreto asfáltico (KASAW *et al.*, 2021). Entre os óxidos encontrados, o óxido de cálcio pode contribuir como estabilizante químico e melhorar as propriedades mecânicas de pavimentos (OLIVEIRA, 2020).

Tabela 11 - Difração de Raios-X (DRX) de lodo avaliados pela literatura.

Parâmetros	LT5	LT6	LT7
SiO_2 (%)	60	15	18,51
Al_2O_3 (%)	2,51	36,2	12,73
Fe_2O_3 (%)	1,28	12,10	3,19
CaO (%)	-	3,50	23,87
SO_3 (%)	-	13,40	9,33
MgO (%)	-	2,80	1,79
Na_2O (%)	-	-	2,36
Outros óxidos (%)	21,79	-	0,31

Fonte: Adaptado de Oliveira (2020); Beshah *et al.* (2021); Kasaw *et al.* (2021).

Dado que foram discutidas anteriormente as vantagens e limitações das análises aproximada, elemental e poder calorífico no item 4.4.1 (Tabela 7), evita-se aqui a repetição dos mesmos argumentos. No entanto, reforça-se a importância destes parâmetros para fins energéticos, dado que os resíduos LT9, LT10 e LT11 também foram submetidos a estes ensaios, conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 - Análise aproximada (umidade, sólidos voláteis e cinzas), análise elementar (O, C, S, H e N) e poder calorífico superior de lodos avaliados pela literatura.

Parâmetro	LT9 (Lodo biológico e físico-químico)	LT10	LT11	
Umidade (%)	83,29 ± 0,49	78,90 ± 0,49	10	13,5
S. V. (%)	63,68 ± 0,26	22,70 ± 0,37	34	40,4
Cinzas (%)	20,89 ± 0,28	76,21 ± 0,27	40	43,4
O (%)	16,15 ± 0,20	9,62 ± 0,20	-	25,65
C (%)	48,14 ± 11	9,35 ± 0,16	15,67	17,4
S (%)	1,06 ± 0,06	1,27 ± 0,02	-	-
H (%)	7,82 ± 0,05	2,86 ± 0,098	3,77	4,6
N (%)	5,94 ± 0,04	0,69 ± 0,04	-	1,4
PCS (cal/g)	4.077,10	833,57	1.609,82	2.063,63

Fonte: Adaptado de Draeger *et al.* (2021); Demeke *et al.* (2021); Gadhi *et al.* (2023).

Com base nessas análises, foram identificados produtos potenciais (PP) que podem ser desenvolvidos a partir do lodo têxtil, conforme está apresentado na Tabela 11. Entre os 12 trabalhos estudados, seis apresentaram abordagens semelhantes: três como fertilizantes e três como briquetes. Esses foram agrupados como PP1 e PP7, respectivamente. Além destes produtos potenciais, foram eleitos os demais trabalhos por conta da potencialidade identificada ao LT. Estabeleceu-se, portanto 8 produtos potenciais que saem deste critério sistêmico para entrada no critério Qv (Tabela 13).

Tabela 13 - Produtos potenciais (PP) identificados a partir da composição física e química do LT.

Produto	Descrição dos Produtos Potenciais
PP 1	Fertilizante
PP 2	Vermicomposto
PP 3	Pavimentos
PP 4	Blocos cerâmicos
PP 5	Concreto para aplicações não estruturais
PP 6	Concreto asfáltico
PP 7	Briquete

PP 8**Substrato para codigestão anaeróbica**

Fonte: Autora, 2025.

De acordo com Oliveira (2017), cada decisor pode propor diferentes produtos potenciais com base na interpretação das análises e em objetivos específicos, sendo, portanto, possível que outros produtos não mencionados sejam viáveis, podendo ser avaliados pelo critério (Qv) descrito a seguir.

Em virtude da variabilidade composicional do lodo e a ausência de elementos altamente tóxicos conforme identificado no critério C, o nível de dificuldade para estabelecer o potencial do lodo têxtil é classificado como médio ($R = 5$).

4.5.4 Índice de criticidade: Critério P

Com base na resposta atribuída à única questão desse critério (q4), o Ic para o critério P foi calculado conforme representado na Tabela 14.

Tabela 14 - Questionamentos, respostas e índice de criticidade do Critério P.

Questionamentos (q)		Pesos	Respostas
q4	A composição do LT classificado restringe a potencialidade das aplicações?	10	5
Índice de Criticidade (Ic) para Potencialidade			
5,0			

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Nota: Dentro da escala de cores para o índice de criticidade, as cores verde, amarela e vermelha representam um grau de dificuldade de valorização fácil, moderado e difícil, respectivamente.

Com um índice de criticidade igual a cinco, o critério de potencialidade para o lodo têxtil é classificado como moderado. O lodo têxtil avaliado demonstra viabilidade para aplicações em diversas áreas, incluindo agrícola, construção civil e energia. Contudo, a presença de elementos potencialmente tóxicos, como metais pesados, deve ser monitorada e controlada no produto final, de modo a garantir a segurança ambiental e humana.

4.5.5 Critério Qv – Quantidade/Viabilidade

Os Produtos Potenciais, identificados na Tabela 13 são submetidos à análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental no âmbito do critério Qv. Aqueles que atenderem aos requisitos estabelecidos nesta etapa tornam-se Produtos Candidatos (PC), aptos para serem avaliados no critério de aplicabilidade.

Questão (q5): A variabilidade composicional compromete possíveis produto(s) potencial(is)? (Peso 6).

Com base na análise apresentada na q2, que identificou e quantificou a variabilidade composicional do LT, esta questão avalia como tal variabilidade pode influenciar os Produtos Potenciais (PP). Assim como ocorre com matérias-primas convencionais, ajustes composicionais são esperados a cada novo lote. Quando essa variabilidade é bem compreendida, seu impacto sobre novos produtos é reduzido.

Os produtos PP1 (fertilizante) e PP2 (vermicomposto) foram apontados como viáveis devido aos teores de nutrientes, como cálcio, nitrogênio e fósforo. Caso haja necessidade de ajustes, o lodo têxtil pode ser suplementado com fertilizantes minerais comerciais (para o PP1) ou resíduos orgânicos (para o PP2), conforme indicado por Deus *et al.* (2020) e Zaman *et al.* (2023). Dessa forma, o nível de dificuldade para esses casos foi considerado baixo ($R = 0$).

Da mesma forma, os produtos PP3 (pavimentos), PP4 (blocos cerâmicos), PP5 (concreto para aplicações não estruturais) e PP6 (concreto asfáltico) também apresentaram nível de dificuldade baixo ($R = 0$), uma vez que os estudos analisados indicam que a variabilidade composicional não compromete significativamente essas aplicações (OLIVEIRA, 2020; BESHAN *et al.*, 2021; KASAW *et al.*, 2021 e MOURA *et al.*, 2024).

O PP7 (briquete) foi classificado com o nível de dificuldade médio ($R = 5$). Isso se deve à necessidade de controle mais rigoroso de parâmetros como umidade e poder calorífico, os quais são essenciais para garantir a eficiência energética do produto (DEMEKE *et al.*, 2021).

Por fim, o PP8 (substrato para codigestão anaeróbica) também recebeu a classificação de dificuldade média ($R = 5$), considerando que a presença de metais

pesados pode interferir negativamente na eficiência da produção de biogás, exigindo adequações na composição do LT (TEMEL e YANGIN-GOMEZ, 2023).

Questão (q6): Há algum elemento que supere o limite de tolerância no produto(s) potencia(is)? (Peso 8).

Diversos estudos indicam que os metais pesados são os elementos que mais exigem atenção quanto ao cumprimento dos limites legais para uso do lodo têxtil, especialmente em aplicações agrícolas, onde existe risco de contaminação do solo e impactos à saúde humana e ambiental.

Dentre as aplicações avaliadas, observou-se que os produtos voltados à área agrícola (PP1 – fertilizante e PP2 – vermicomposto) demandam monitoramento mais rigoroso, uma vez que o uso contínuo pode resultar na acumulação dos metais pesados no solo, comprometendo a sua fertilidade e segurança. Nesses casos, recomenda-se a realização periódica de análises químicas e adequações conforme os limites estabelecidos por normativas, como a Resolução nº 498/2020 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2020).

Nas demais aplicações, como na construção civil e geração de energia, o risco de contaminação é reduzido, os metais podem ser quimicamente estabilizados ou retidos na matriz sólida dos produtos, diminuindo sua mobilidade e toxicidade. Desta forma, para o PP1 e PP2 foi atribuído o nível de dificuldade médio ($R = 5$) e para os demais PPs, foi atribuído o nível de dificuldade baixo ($R = 0$), por apresentarem menor risco de extrapolação dos limites legais de elementos nocivos.

Questão (q7): Há necessidade de adequação ao gerenciamento para a geradora do LT? (Peso 6).

Atualmente, a empresa parceira destina integralmente o seu lodo têxtil para o aterro industrial próprio, prática comum em diversas indústrias.

Essa destinação está associada tanto ao volume gerado quanto à ausência de infraestrutura adequada para o acondicionamento e o aproveitamento do lodo têxtil, uma vez que, até o momento da realização desta pesquisa, não há uma aplicação previamente estabelecida para esse resíduo produzido pela empresa.

Para que o LT seja efetivamente utilizado como matéria-prima em processos de valorização, é indispensável a implantação de uma estrutura específica para o seu armazenamento, triagem e acondicionamento, de modo a garantir a qualidade do material destinado às etapas subsequentes. Essa estrutura deve ser planejada com base nas diretrizes legais destacadas na questão q1, além de considerar eventuais exigências técnicas e operacionais da empresa receptora, a qual será responsável pelo recebimento e valorização do resíduo.

Considerando o porte das mudanças estruturais e operacionais exigidas, atribui-se à questão um nível de dificuldade alto ($R=10$). Essas adequações, por sua vez, influenciam diretamente as exigências da empresa receptora, tornando essencial que o planejamento do pré-tratamento do lodo seja realizado em conjunto entre ambas as partes.

Questão (q8): Há necessidade de adequação ao processamento para a receptora do LT? (Peso 6).

Com o objetivo de esclarecer as adequações consideradas necessárias para a valorização do lodo têxtil na empresa receptora, na Tabela 15 é apresentado um resumo das exigências identificadas, categorizadas por tipo de pré-tratamento, requisitos logísticos, tecnológicos e operacionais.

Tabela 15 - Alterações consideradas necessárias para adequação da empresa receptora para valorizar o LT

PP	Pré-tratamento			Transporte (logística)	Tecnologia e Equipamentos	Mão de obra
	Secagem	Moagem	Estabilização			
PP1			X	X		
PP2				X		
PP3	X			X		
PP4	X	X		X		
PP5	X	X		X		
PP6	X	X		X		
PP7	X	X			X	X

PP8

X

PP1: Vermicomposto; PP2: Fertilizante; PP3: Pavimentos; PP4: Blocos cerâmicos; PP5: Concreto para aplicações não estruturais; PP6: Concreto asfáltico; PP7: Briquetes e PP8: Substrato para codigestão anaeróbica.

Fonte: Autora, 2025.

Com base na quantidade e no tipo de adequações exigidas para cada Produto Potencial (PP), definiu-se o nível de dificuldade correspondente para essa questão.

A aquisição de tecnologias, equipamentos e mão de obra especializada é dispensável para todos os PPs, exceto o PP7, pois as possíveis empresas receptoras já dispõem de tais recursos para a produção destes produtos.

Para o PP1 (fertilizante), é necessária a estabilização alcalina do lodo têxtil, processo que consiste na elevação do pH com a adição de cal hidratada, reduzindo a presença de patógenos e a atração de vetores (DEUS *et al.*, 2020). Considerando que para este produto potencial existe a necessidade de um pré-tratamento, o nível de dificuldade foi classificado como médio ($R = 5$).

O PP2 (vermicomposto), pode utilizar o lodo têxtil *in natura*, que é posteriormente misturado e compostado junto com outra biomassa (ZAMAN *et al.*, 2023). O mesmo se aplica ao PP8 (substrato para codigestão anaeróbica), que não requer pré-tratamento antes de ser utilizado (TEMEL e YANGIN-GOMEÇ, 2023). Desta forma, ambos foram classificados com nível de dificuldade baixo ($R = 0$).

Quanto aos produtos aplicados na construção civil (PP3 - pavimentos, PP4 – blocos cerâmicos, PP5 – concreto para aplicações não estruturais e PP6 – concreto asfáltico), requerem secagem e moagem, com exceção do PP3, que dispensa a moagem para de reduzir custos (OLIVEIRA, 2020). Considerando essas exigências de pré-tratamento, o nível de dificuldade para esta questão também foi classificado como mediano ($R = 5$).

O PP7 (briquete) apresenta maiores exigências, embora não dependa de logística externa, pois a empresa parceira já possui caldeiras para queima dos briquetes, requer secagem e moagem do resíduo, aquisição de uma briquetadeira e contratação de mão de obra especializada para operação do equipamento. Portanto, foi atribuído um nível de dificuldade alto para este quesito ($R = 10$).

Questão (q9): Há legislação que regulamenta o(s) produto(s) ou restrinja o uso do LT? (Peso 10).

Os Produtos Potenciais estão sujeitos a regulamentações específicas, estabelecidas por normas técnicas, instruções normativas legislações vigentes.

Para os PPs 1 e 2 (fertilizante e vermicomposto), aplicáveis na área agrícola, devem ser seguidas diretrizes do Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA), que regulamenta a produção, fiscalização e comercialização desses insumos (GOV, 2024).

Os PPs 3 e 6 (pavimento e concreto asfáltico) são regulados pela norma DNIT 031/2024 – ES do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT, 2024), que estabelece especificações técnicas e diretrizes para a produção e aplicação dos produtos mencionados em obras viárias.

Além disso, como apresentado anteriormente na questão 1 no item 4.5.1., a norma NBR 15270 (ABNT, 2007), especifica os requisitos dimensionais e as propriedades físicas e mecânicas de diversos materiais da construção civil, incluindo o bloco cerâmico (PP4) e o concreto para aplicação não estrutural (PP5).

No que se refere ao PP7 (briquetes), atualmente, não há, no Brasil, legislações ou normas técnicas específicas que regulamentem diretamente este produto. Contudo, para fins de referência e padronização, são comumente adotadas algumas normas aplicáveis a materiais similares, como o carvão vegetal. Neste caso, destaca-se a norma NBR 8112 (ABNT, 1983), que estabelece os métodos de análise imediata do carvão vegetal, abrangendo a determinação dos seguintes parâmetros: umidade, materiais voláteis, carbono fixo e cinzas. Embora não seja voltada especificamente aos briquetes, essa norma pode ser utilizada como base técnica para a avaliação e controle de qualidade do produto.

Já o PP8 (substrato para codigestão anaeróbica) está sujeito a legislações estaduais. Em Santa Catarina, por exemplo, aplica-se a Lei nº 17.542, de 12 de julho de 2018 (SAN, que estabelece diretrizes para o aproveitamento energético de resíduos orgânicos).

Dessa forma, embora existam normas regulatórias aplicáveis à maioria dos produtos, a necessidade de controle ambiental contínuo justifica a atribuição de nível de dificuldade moderado (R = 5) para esta questão.

Questão (q10): A quantidade de geração do LT atende a necessidade do produto(s) candidato(s)? (Peso 10).

No Brasil são geradas anualmente cerca de 73 mil toneladas de lodo têxtil (PINTO, 2009). Conforme apresentado na etapa de quantificação, a empresa parceira gera anualmente entre 2.850 toneladas e 5.430 toneladas, com média de 3.760 toneladas por ano (Figura 8), portanto, o volume deste resíduo representa aproximadamente a 3,9% e 7,4% da geração nacional do lodo têxtil.

A geração de LT está diretamente relacionada ao volume de produção têxtil da empresa. Assim, conforme demonstrado na Figura 9, a tendência de aumento gradual do setor implica em aumento proporcional na geração do resíduo.

Considerando que o LT será utilizado como substituto parcial das matérias-primas convencionais nos produtos candidatos, e que o volume gerado é significativamente superior à demanda prevista para qualquer uma das aplicações, conclui-se que a quantidade gerada é mais do que suficiente. Assim, atribui-se nível de dificuldade baixo ($R = 0$) para esta questão.

Adicionalmente, o excedente de LT disponível abre oportunidades para a ampliação da cadeia de valorização, seja pela diversificação de produtos candidatos, seja pela expansão da capacidade produtiva das aplicações existentes. Essa disponibilidade favorece o desenvolvimento das soluções de maior escala e reforça a viabilidade técnica e logística da valorização do resíduo a longo prazo.

Questão (q11): Há mercado consumidor para a valorização do LT conforme o(s) produto(s) candidato(s)? (Peso 6).

A avaliação do mercado consumidor considerou tanto a disposição geográfica da empresa parceira geradora do resíduo, quanto a localização de possíveis empresas receptoras, com base na viabilidade logística de fornecimento. Na Figura 11 está ilustrado o mapeamento espacial de empresas dos setores associados aos seguintes Produtos Potenciais (PP):

- PP1 (fertilizantes);
- PP2 (vermicompostos);
- PP3 (pavimentos);
- PP4 (blocos cerâmicos);

- PP5 (concretos para aplicação não estrutural);
- PP6 (concreto asfáltico)
- PP8 (substrato para codigestão anaeróbica).

O PP7 (briquete), por sua vez, seria consumido internamente pela própria empresa geradora de resíduo, e por isso, não consta no mapeamento da Figura 11.

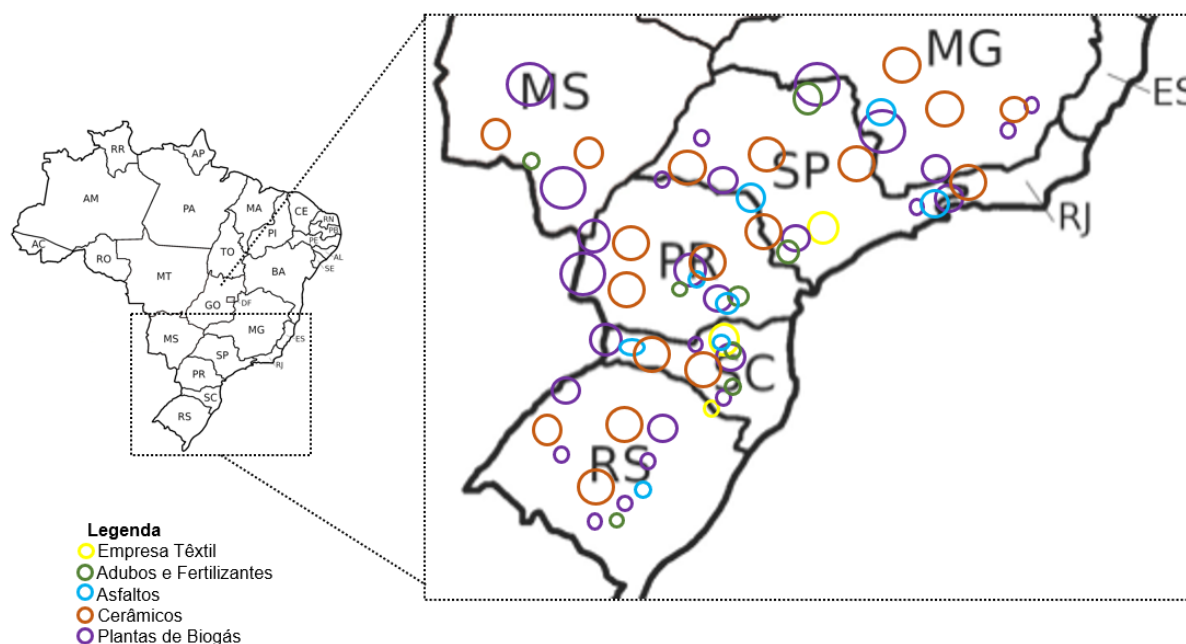
Com relação aos PPs 1 e 2, o Brasil conta com aproximadamente 820 fabricantes de adubos e fertilizantes, embora parte dessas empresas possuam unidades produtivas fora do país. A análise, portanto, concentrou-se nas fábricas localizadas próximas à empresa geradora do lodo têxtil, conforme destacado na Figura 11 (ECONODATA, 2025).

Para os PPs 3 e 6, identificaram-se 636 empresas no território nacional, sendo a maior concentração (30 unidades) localizada na cidade de São Paulo (ECONODATA, 2025).

No caso dos PPs 4 e 5, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) contabilizou 5.578 fabricantes em 2021, onde cerca de 30% destas empresas está nas regiões Sul e Sudeste (SIDRA, 2021).

O mercado consumidor para o PP8 está diretamente vinculado às plantas de produção de biogás, que totalizam atualmente 1.365 unidades, das quais 391 estão localizadas no estado do Paraná (CIBIOGÁS, 2023).

Figura 11 - Mapa de distribuição geográfica das empresas geradora do LT e possíveis empresas receptoras.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Com base nesses dados, o nível de dificuldade para a inserção dos PPs no mercado foi definido a partir da disponibilidade e proximidade geográfica das empresas receptoras. O PP7 recebeu nível baixo de dificuldade ($R = 0$), uma vez que sua produção e consumo ocorreriam internamente, sem necessidade de transporte ou articulação externa. Os PPs 3, 4, 5, 6 e 8 também foram avaliados com nível baixo de dificuldade ($R = 0$), dado o número expressivo de possíveis empresas receptoras próximas à empresa geradora, que poderiam utilizar o lodo têxtil. Por sua vez, os PPs 1 e 2 obtiveram nível de dificuldade médio ($R = 5$), pois, embora existam fabricantes dos produtos no país, a densidade dessas unidades é inferior à dos demais setores, o que implica em articulação operacional mais complexa.

4.5.6 Índice de criticidade: Critério Qv

O resultado da avaliação do critério Qv – Quantidade/viabilidade é aplicado individualmente a cada um dos Produtos Potenciais, representando a saída dessa etapa final de análise. Os pesos atribuídos a cada questão, os valores das respostas conforme avaliação da autora e os respectivos índices de criticidade calculados para cada PP, estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Questionamentos, respostas e índice de criticidade do critério QV.

Questionamentos (q)		Pesos	Respostas							
			PP1	PP2	PP3	PP4	PP5	PP6	PP7	PP8
q5	A variabilidade composicional compromete possíveis produto(s) potencial(is)?	6	0	0	0	0	0	0	5	5
q6	Há algum elemento que supere o limite de tolerância no produto(s) potencia(is)?	8	5	5	0	0	0	0	0	0
q7	Há necessidade de adequação ao gerenciamento para a geradora do LT?	6	10	10	10	10	10	10	10	10
q8	Há necessidade de adequação ao processamento para a receptora do LT?	6	5	5	5	5	5	5	10	0
q9	Há legislação que regulamenta o(s) produto(s) ou restrinja o uso do LT?	10	5	5	5	5	5	5	5	5

q10	A quantidade de geração do LT atende a necessidade do produto(s) candidato(s)?	10	0	0	0	0	0	0	0	0
q11	Há mercado consumidor para a valorização do LT conforme o(s) produto(s) candidato(s)?	6	5	5	0	0	0	0	0	0
Índice de Criticidade (Ic) para Quantidade/viabilidade			4,04	4,04	3,46	3,46	3,46	3,46	3,85	2,69

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Nota: Dentro da escala de cores para o índice de criticidade, as cores verde, amarela e vermelha representam um grau de dificuldade de valorização fácil, moderado e difícil, respectivamente.

Com base nesta análise qualitativa, observa-se que todos os produtos potenciais apresentam viabilidade técnica e operacional para implementação, embora em níveis distintos de adequações e exigências. Sendo assim, todos os PPs avançam para a próxima etapa da avaliação, correspondente ao critério de aplicabilidade e passam a ser Produtos Candidatos (PCs).

4.5.7 Critério A - Aplicabilidade

O critério aplicabilidade é a etapa final da sistemática CPQVA. Ele avalia se os Produtos Candidatos (PCs), previamente selecionados, atendem aos requisitos técnicos necessários para gerar materiais com viabilidade tecnológica e aceitação no mercado.

A análise foi realizada com base nos resultados técnicos reportados na literatura científica, os quais subsidiaram a avaliação dos demais critérios da sistemática CPQVA (ver Tabela 6), aplicando-se aos PCs 1 ao 8.

Questão (q12) O desempenho do(s) produto(s) atende às exigências de mercado? (Peso 10).

Para o PC 1 (fertilizante), estudos indicam que o bio sólido apresenta viabilidade como insumo agrícola. Segundo Deus *et al.* (2020), ele contribui significativamente para o desenvolvimento da produção de cana-de-açúcar em solos com baixa fertilidade, ao fornecer como nitrogênio e fósforo. Stamford *et al.* (2020) demonstrou que o LT possui efeitos positivos no cultivo do feijão caupi, desde que seja realizado o monitoramento de metais pesados, para evitar a contaminação do solo. Lins *et al.* (2020) também identificou potencial agrônomo do LT como fertilizante e condicionador do solo, reforçando a necessidade de atenção em relação à composição química do lodo. Desta forma, considerando o desempenho técnico e a viabilidade de aplicação, foi atribuído o nível de dificuldade baixo ($R = 0$) para esta questão.

Para o PC 2 (vermicomposto), Zaman *et al.* (2023) obteve resultados promissores ao associar o lodo têxtil ao esterco bovino, observando crescimento de minhocas e aumento do teor de nitrogênio. Contudo, ressalta-se a necessidade de estudos adicionais para aplicação em larga escala, principalmente em relação ao tempo de estabilização do produto e os riscos potenciais de sua redução. Portanto, o nível de dificuldade para esta aplicação foi considerado moderado ($R = 5$).

Em relação ao PC 3 (pavimentação de vias de baixo volume), Oliveira (2020) observou resultados positivos com o uso de solo misturado ao lodo têxtil estabilizado. Entretanto, a alta adição de aditivos pode elevar os custos, e ainda são necessários ensaios em campo para validar a performance da aplicação. Por esse motivo, o desempenho do PC 3 foi considerado ainda incipiente para uso prático, sendo atribuído nível de dificuldade alto ($R = 10$).

Quanto ao PC 4 (bloco cerâmico), Beshah *et al.* (2021) demonstrou que os blocos cerâmicos produzidos com adição parcial de lodo apresentaram propriedades mecânicas semelhantes aos blocos cerâmicos convencionais, redução de peso, menor impacto ambiental e economia no processo de fabricação. Com isso, o nível de dificuldade foi considerado é baixo ($R = 0$).

De forma semelhante, o PC 5 (concreto para aplicações não estruturais) apresentou propriedades mecânicas compatíveis com os concretos comerciais, sem

apresentar riscos ambientais (KASAW *et al.*, 2021). Do mesmo modo, o peso atribuído para a dificuldade desta aplicação foi baixo ($R = 0$).

Segundo Moura *et al.* (2024), o PC 6 (concreto asfáltico) demonstrou desempenho semelhante ao material convencional, com vantagem ambiental devido à imobilização dos metais pesados e custo inferior ao descarte em aterro industrial. Assim, o nível de dificuldade para este quesito foi avaliado como baixo ($R = 0$).

Para o PC 7 (briquetes), diversos estudos reforçam a sua viabilidade. Draeger *et al.* (2021) mostrou que a mistura de lodo têxtil com serragem de *Pinus* resulta em briquetes com características similares às biomassas convencionais usadas para geração de energia. Demeke *et al.* (2023), avaliou a produção de briquetes compostos de lodo têxtil com algodão e casca de abacate como aglutinante e suas propriedades foram adequadas para geração de energia em pequena escala, ou seja, para uso em residências e pequenas empresas. Já Gadhi *et al.* (2023) destacou o potencial produção de briquetes a partir da mistura de lodo têxtil com esterco bovino para uso doméstico ou industrial. Considerando o desempenho técnico e a segurança ambiental, o nível de dificuldade atribuído para esta aplicação foi baixo ($R = 0$).

Por fim, o PC 8 (substrato para codigestão anaeróbica) também demonstrou viabilidade. Temel e Yangin-gomec (2023) indicou que a mistura de lodo têxtil com o lodo orgânico proveniente de indústrias alimentícias possibilita a produção de biogás de forma segura e ambientalmente adequada. Assim, também foi atribuído o nível baixo de dificuldade ($R = 0$) para este critério.

4.5.8 Índice de criticidade: Critério A

O resultado da avaliação do critério A - Aplicabilidade, para cada um dos produtos candidatos (PCs) selecionados, como foco na viabilidade de aplicação, é apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 - Questionamentos, respostas e índice de criticidade do Critério A.

Questionamentos (q)		Pesos	Respostas							
			PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
q12	O desempenho do(s)	10	0	5	10	0	0	0	0	0

produto(s) atende às exigências de mercado?										
Índice de Criticidade (Ic) para Aplicabilidade	0	5	10	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Nota: Dentro da escala de cores para o índice de criticidade, as cores verde, amarelo e vermelho representam um grau de dificuldade de valorização fácil, moderado e difícil, respectivamente.

Os PCs, em sua maioria, apresentaram desempenho técnico compatível com os produtos convencionais disponíveis no mercado, com exceção do PC3, que ainda apresenta algumas limitações para aplicação prática e requer estudos complementares.

4.5.9 Índice de criticidade: Total – Critérios CPQVA

O valor do Índice de criticidade total (Ic) corresponde à média dos índices obtidos em cada um dos critérios CPQVA para os produtos avaliados. Na Tabela 18 são apresentados os resultados consolidados.

Tabela 18 - Índice de criticidade total dos critérios sistemáticos CPQVA

Aplicações	Índice de Criticidade (Ic) Total para o CPQVA
Fertilizante	3,42
Vermicompostagem	4,67
Pavimentos	5,78
Blocos cerâmicos	3,28
Concreto para aplicações não estruturais	3,28
Concreto asfáltico	3,28
Briquetes	3,37
Substrato para codigestão anaeróbica	3,08

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Nota: Dentro da escala de cores para o índice de criticidade, as cores verde, amarela e vermelha representam um grau de dificuldade de valorização fácil, moderado e difícil, respectivamente.

De acordo com Índices de Criticidade Total, as aplicações foram avaliadas de forma qualitativa como de viabilidade fácil e moderada. Os produtos classificados com viabilidade fácil, são os produtos com menor Ic, ou seja, os blocos cerâmicos, concreto para aplicações não estruturais, concreto asfáltico, briquetes e substrato para codigestão anaeróbica, pois apresentaram as melhores condições para viabilizar a valorização do LT, sendo, portanto, as alternativas mais promissoras para desenvolvimento futuro.

O LT é um resíduo classificado como não perigoso e possui grande potencial para valorização, devido à diversidade de materiais em sua composição. Essa versatilidade torna o LT um insumo atrativo para setores como agricultura, construção civil e de geração de energia.

As propriedades físico-químicas do lodo têxtil possibilitam sua utilização como substituto parcial de matérias-primas convencionais na fabricação dos produtos listados na Tabela 16, o que resultar em benefícios ambientais, econômicos e sociais para as empresas geradoras e receptoras do LT.

Por meio de uma abordagem de simbiose industrial, a utilização do LT como insumo em outros setores industriais pode reduzir significativamente o volume destinado a aterros sanitários, além de minimizar a extração de recursos naturais, como a argila, no caso dos blocos cerâmicos. A empresa geradora do resíduo pode minimizar os custos com disposição em aterros e, caso opte por aplicações como a produção de briquetes, ainda pode reduzir despesas com energia. Para as empresas receptoras, o uso do LT representa uma alternativa de matéria-prima mais acessível.

Com exceção do substrato para codigestão anaeróbica, todos os produtos potenciais apresentaram avaliação moderada no critério Quantidade/viabilidade (QV). A partir dessa avaliação qualitativa, algumas condições podem ser implementadas para superar as dificuldades associadas à valorização do resíduo.

Uma dessas condições seria a substituição ou adição de coagulantes e floculantes mais eficazes na retirada de umidade do lodo, o que influenciaria no tempo de secagem do mesmo. Outra condição seria a inclusão de uma etapa trituração do

resíduo ao final do processo de tratamento do efluente, com o objetivo de reduzir o tempo de moagem para as aplicações que demandam esta etapa.

Observa-se também que a literatura revisada carece de avaliações quantitativas robustas sobre os impactos ambientais e econômicos das propostas de valorização. Essa lacuna pode justificar a escassez de exemplos práticos de aplicação industrial para os produtos analisados.

Por fim, a ausência de políticas públicas específicas representa uma barreira importante à valorização do LT. Incentivos fiscais, regulamentações claras sobre o uso de resíduos em novos produtos e benefícios às empresas que adotarem práticas de reaproveitamento poderiam impulsionar a economia circular, estimular a inovação e ampliar os investimentos em soluções sustentáveis para o setor industrial.

CONCLUSÃO

Este trabalho aplicou a sistemática CPQvA como ferramenta de apoio à tomada de decisão multicritério para avaliar a viabilidade de valorização do resíduo lodo têxtil (LT). A sistemática permitiu uma análise integrada de critérios técnicos, quantitativos e de aplicabilidade, resultando na identificação de produtos com maior potencial de desenvolvimento.

Os resultados indicaram que o LT apresenta viabilidade para substituição parcial de matérias-primas convencionais na fabricação de blocos cerâmicos, concreto para aplicações não estruturais, concreto asfáltico, além de seu uso como biomassa para briquetes e como substrato para codigestão anaeróbica. Esses produtos foram classificados com baixos índices de criticidade, refletindo condições técnicas favoráveis à valorização do resíduo.

A possibilidade de aproveitamento do LT está associada à adoção de estratégias como a simbiose industrial, que favorece o estabelecimento de fluxos produtivos intersetoriais entre empresas geradoras e receptoras. A valorização interna do resíduo, como no caso da produção e consumo de briquetes pela própria empresa geradora, também se mostrou tecnicamente viável.

Entretanto, a ausência de uma avaliação conjunta entre os agentes envolvidos, observada tanto nesta pesquisa quanto na literatura revisada, representa uma limitação relevante para a implementação de modelos eficientes de valorização. A abordagem unilateral compromete a análise das interações reais entre empresas geradoras e receptoras, dificultando a adoção de soluções sistêmicas.

Diante disso, recomenda-se a incorporação da sistemática CPQvA nos sistemas de gestão de resíduos sólidos industriais, especialmente no setor de engenharia industrial de transformação. Sua aplicação estratégica pode impulsionar a inovação tecnológica, fortalecer a economia circular e subsidiar a formulação de políticas públicas e instrumentos de fomento voltados à inserção de produtos derivados de resíduos no mercado.

Sugere-se, para trabalhos futuros, a realização de análises de viabilidade econômica e testes-piloto em escala industrial para validar, na prática, as alternativas de valorização identificadas neste estudo.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM **D4239-18**: Standard Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High Temperature Tube Furnace Combustion. West Conshohocken: ASTM International, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM **D5865-13**: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. West Conshohocken: ASTM International, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM **D7348-07**: Standard Test Methods for Loss on Ignition (LOI) of Solid Combustion Residues. West Conshohocken: ASTM International, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM **E1755-01**: Standard Test Method for Ash in Biomass. West Conshohocken: ASTM International, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM **E.1756-08**. Standard method determination of total solids in biomass. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials, 2020.

ASRATIE, Demlie. **Reuse of Textile Sludge for Hollow Concrete Block Manufacturing**. 1st ed. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. Web. 15 Oct. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO – ABIT, CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI. **O setor têxtil e de confecção e os desafios da sustentabilidade**. Brasília: CNI, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO – ABIT, Têxtil e Confecção. Perfil do setor. **ABIT**, fevereiro 2023. Disponível em: <https://www.abit.org.br/cont/perfil-dosetor#:~:text=Dados%20gerais%20do%20setor%20atualizados,de%20m%C3%A3o%20de%20obra%20feminina>. Acesso em: 08 junho 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT **NBR 8112**: Cavrão vegetal – Análise imediata. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT **NBR 10004**: resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT **NBR 10004**: resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT **NBR 15270**: Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria. Rio de Janeiro, 2017.

AVELAR, Nayara Vilela. **Potencial dos resíduos sólidos da indústria têxtil para fins energéticos**. 2012. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

BALOTA, M. M. M.; TEIXEIRA, C. E.; ZANELLA, L.; RUIZ, M. S. Lodo têxtil: revisão sistemática de métodos de tratamento e potencial uso como insumo combustível de caldeira. **30º. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES**, Natal, RN, 2019.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL - BNDES. **Panorama da Cadeia Produtiva Têxtil e de Confecções e a Questão da Inovação**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 29, p. 159-202, mar. 2009.

BESHAH, D. A., TIRUYE, G. A., MEKONNEN, Y. S. Characterization and recycling of textile sludge for energy-efficient brick production in Ethiopia. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 16272–16281, 2021.

BRASIL. Universidade Federal de Uberlândia (UFU). **Litmaps e Researchrabbits**: Ferramentas para ajudar no desenvolvimento do referencial teórico de um artigo científico. Uberlândia, 2023. Disponível em: <https://bibliotecas.ufu.br/acontece/2023/06/litmaps-e-researchrabbits>. Acesso em: 01 dez. 2024.

BOOTH, Andrew; SUTTON, Anthea; PAPAIOANNOU, Diana. **Systematic approaches to a successful literature review**. 2. ed. SAGE Publications, 2016. 336 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Legislações**: Legislação fertilizantes. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacoes>. Acesso em: 01 mar. 2025.

CIBIOGÁS. Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás. **Panorama do Biogás no Brasil 2023**. Relatório Técnico nº 001/2024 – Foz do Iguaçu, CIBiogás, 2024.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. **Decisão de Diretoria nº 027/2008/P**, de 04 de março de 2008: Dispõe sobre a aprovação do Procedimento para utilização de resíduos não perigosos da indústria têxtil em caldeiras, no Estado de São Paulo. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://cetesb.sp.gov.br/camaras-ambientais/wp-content/uploads/sites/21/2015/05/DD-027-08-P.pdf>, acesso em dezembro/2024.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução Nº 498** de 19 de Agosto de 2020.

DEMEKE, E. D.; DESTA, M. A.; MEKONNEN, Y. S. The potential of industrial sludge and textile solid wastes for biomass briquettes with avocado peels as a binder. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, p. 86155–86164, 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT.
031/2024 – ES: Pavimentação – Concreto asfáltico – Especificação de serviço.
 Brasília, 2024.

DEUS, A.; ABRAHÃO, R.; SANTOS, R.; ARAÚJO, L.; NEVES, T.; SILVA, C.; FELIX, M. Effect of textile industry biosolids for soil fertility and sugar cane production. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n.5, p.30152-30169, 2020.

DRAEGER, A.; KAUFMANN, V.; LIMA, E. A.; MELO, M. N. V.; SILVA, J. D. APROVEITAMENTO DO LODO TÊXTIL NA PRODUÇÃO DE BRIQUETES PARA GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 23(1), p. 46–56, 2021.

ECONODATA. **Empresas de Asfalto no Brasil**. Disponível em: <https://www.econodata.com.br/empresas/todo-brasil/busca-asfalto>. Acesso em: 28 fev. 2025.

ECONODATA. **Empresas de Fabricação de Adubos e Fertilizantes (C-2013-4/02) no Brasil**. Disponível em: <https://www.econodata.com.br/empresas/todo-brasil/fabricacao-de-adubos-e-fertilizantes-c-2013402>. Acesso em: 26 fev. 2025.

FARACO, M. N. S. **Valorização de frações residuais geradas no beneficiamento de carvão mineral da região sul de Santa Catarina**. 2023. 136f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Florianópolis, 2023.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS - FIEMG. **Guia Técnico Ambiental da Indústria Têxtil**. Minas Gerais, 2013. Disponível em: <https://pnla.mma.gov.br/publicacoes-diversas?search=textil>. Acesso em: 15 jun. 2024.

FETRINA, E.; MURNI, D. Bibliometric mapping publications of scientific work of information systems lecturer at uin syarif hidayatullah jakarta on google scholar systematic review using research rabbit. **JURNAL PERANGKAT LUNAK**, v. 6, n. 1, p. 12-24, 2024.

GADHI, T.; MAHAR, R.; QURESHI, T.; BAWANI, M.; KHOKHAR, D.; PINJARO, M.; ANSARI, I.; BONELLI, B. Valorization of Textile Sludge and Cattle Manure Wastes into Fuel Pellets and the Assessment of Their Combustion Characteristics. **ACS omega**, v. 9, n. 1 p. 456-463, 2023.

KARIM, A.; SOEBAGYO, J. Bibliometric Analysis Using Vosviewer On Applied Mathematics Research Trends On Google Scholar. **Jakarta Mathematics Education Research Journal**, p. 25 -27, 2021.

KASAW, E.; ADANE, Z.; GEBINO, G.; ASSEFA, N.; KECHI, A.; ALEMU, K. Incineration of Textile Sludge for Partial Replacement of Cement in Concrete Production: A Case of Ethiopian Textile Industries. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9984598>

LIMA, Camilla. Pequenos negócios procuram diminuir os impactos ambientais gerados pela indústria da moda. **Brasil de Fato**. Fortaleza, 27 mai. 2022. Disponível em: <https://www.brasildefatoce.com.br/2022/05/27/pequenos-negocios-procuram-diminuir-os-impactos-ambientais-gerados-pela-industria-da-moda>. Acesso em: 01 dez. 2024.

LINS, E. A. M.; SILVA, J. S. S.; MOTA, A. M. V.; OLIVEIRA, F. C.; BARROS, A. C. B. **REUTILIZAÇÃO DO BIOSSÓLIDO GERADO EM TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO E DE INDÚSTRIA TÊXTIL**. Anais do 19 Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – SILUBESA, 2020, p. 114-120, 2020.

MACHADO, D. M.; GAMBALONGA, B. J.; SIMÃO, L.; RIBEIRO, M. J.; MONTEDO, O. R. K.; RAUPP-PEREIRA, F.; ARCARO, S. Valorization of Brazilian waste foundry sand from circular economy perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 407, p. 137046, 2023.

MOURA, L. S.; SILVA, C. L.; NÓBREGA, A. C. V.; CARNEIRO, A. M. P. **IMPACTOS AMBIENTAIS DA UTILIZAÇÃO LODO TÊXTIL EM CONCRETO ASFÁLTICO AO SER EXPOSTO À ÁGUA**. Anais da 49a Reunião Anual de Pavimentação - RAPv, 2024, p. 614–621, 2024.

OLIVEIRA, A. G.; BARROS, A. D.; LUCENA, L. C. F. L.; LUCENA, A. E. F. L.; PATRICIO, J. D. Evaluation of calcined textile sludge as a stabilizing material for highway soil. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, v. 7, n. 5, p. 688-699, 2020.

OLIVEIRA, K. A.; SIMÃO, L.; REBOUÇAS, L. B.; HOTZA, D.; MONTEDO, O.; R. K.; NOVAES, A. P. O.; RAUPP-PEREIRA, F. **Ceramic shell waste valorization: A new approach to increase the sustainability of the precision casting industry from a circular economy perspective**. Waste management (New York, N.Y.) v. 157, p. 269-278, 2023.

OLIVEIRA Kamila Almeida. **Sistemática CPQVA para a valorização de resíduos sólidos industriais: um guia para tomada de decisão**. 2017. 133f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

PINTO, Carolina Portugal Bastos. **Estudo de caso: Reaproveitamento do lodo da estação de tratamento de efluentes da indústria têxtil**. 2009, 59 p. Monografia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de química, 2009

PRATES, P. B.; MORAES, E. G. de; CESCNETO, F. R.; VICENTE, F. A.; BOCA, R. A. A. S.; SCHABBACH, L. M.; RIELLA, H. G.; FREDEL, M. C. Evaluation of magnesium chloride waste recovery: A case study in nanofertilizers. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 9(21), p. 419–437, 2022.

PREMKUMAR, R.; MOHIDEEN, J. K.; KUMAR, M. M.; MOORTHY, T. S.; CELESTIN, X. Properties and Environmental Features of Bricks Made From Textile Waste Sludge. **Journal of Physics. Conference Series**, vol. 2070, no. 1, p. 12185, 2021.

RAUPP-PEREIRA, Fabiano. **Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral: composições cerâmicas e cimentíceas**. 2006. 256 p. Tese (Doutorado) – Ciência em Engenharia de Materiais. Universidade de Aveiro, Portugal, 2006.

REBELO, W. B.; ZACCARON, A.; SAVIATTO, E.; OLIVO, E. F.; ACORDI, J.; RAUPP-PEREIRA, F.; RIBEIRO, M. J. Valorization of the Residual Fraction of Coal Tailings: A

Mineral Circularity Strategy for the Clay Ceramic Industry in the Carboniferous Region of Santa Catarina, Southern Brazil. **Materials**, v. 17(9), p. 2131, 2024.

SANTA CATARINA. **Lei nº 17.542, de 12 de julho de 2018**. Institui a Política Estadual do Biogás e estabelece outras providências. Santa Catarina, 2018. Disponível em: http://leis.alesc.sc.gov.br/html/2018/17542_2018_lei.html. Acesso em: 23 fev. 2025.

SIDRA. Sistema IBGE de Recuperação Automática. **Cadastro Central de Empresas: Tabela 6449 - Empresas e outras organizações, pessoal ocupado total, pessoal ocupado assalariado, salários e outras remunerações, por seção, divisão, grupo e classe da classificação de atividades (CNAE 2.0) – série encerrada em 2021**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6449#notas-tabela>. Acesso em: 23 fev. 2025.

SIMÃO, L.; SOUZA, M. T.; RIBEIRO, M. J.; MONTEDO, O. R. K.; HOTZA, D.; NOVAIS, R. M.; RAUPP-PEREIRA, F. **Assessment of the recycling potential of stone processing plant wastes based on physicochemical features and market opportunities**. Journal of Cleaner Production, v. 319, 2021.

SINGAPORE. Singapore Management University (SMU). **A new literature mapping tool – ResearchRabbit**. Singapore, 2021. Disponível em: <https://library.smu.edu.sg/topics-insights/new-literature-mapping-tool-researchrabbit>. Acessado em 20 de ago. de 2024

SOUTO, T. J. M. P. **Estudo do comportamento químico e ambiental de efluentes industriais e resíduos sólidos oriundos de lavanderias do polo têxtil no agreste pernambucano**. Recife, 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Departamento de Tecnologia Rural, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2017.

STAMFORD, N. P.; SILVA, E. V. N.; OLIVEIRA, W. S.; MARTINS, M. S.; MORAES, A. S.; BARROS, J. A.; FREITAS, M. I. Benefits of microbial fertilizer in interspecific interaction with textile sludges on cowpea in a Brazilian Ultisol and on wastes toxicity, **Environmental Technology & Innovation**, v. 18, p. 100756, 2020.

SULISTA, S. From waste to an added-value commodity: challenges in valorization opportunity of tin-residual sand for silica-based industry. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 1388(1), p. 012031, 2024.

TEMEL, M. Ş.; YANGIN-GOMEÇ, C. Co-digestion potential of different industrial sludge sources and impact on energy recovery. **Environmental Research and Technology**, v. 6(4), p. 317–325, 2023.

TORRE-LÓPEZ, J.; RAMÍREZ, A.; ROMERO, J.R. Artificial intelligence to automate the systematic review of scientific literature. **Computing** v. 105, p. 2171–2194, 2023.

VILAÇA, A. S. I. **Valorização de resíduos da mineração de ferro do quadrilátero ferrífero: métricas de avaliação na perspectiva da economia circular**. 2020. 89f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

ZAMAN, A. B.; RAHMAN, A.; MAHMUD, I.; ROY, H.; HOQUE, S.; UDDIN, J.; RAHMAN, M. Vermicomposting of solid textile sludge spiked with cow dung by epigeic earthworm *Eisenia fetida* in variable population density. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 42(5), 2023.

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO DE TESES E DISSERTAÇÕES

Na qualidade de titular dos direitos de autor da publicação, autorizo a Universidade da Região de Joinville (UNIVILLE) a disponibilizar em ambiente digital institucional, Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/IBICT) e/ou outras bases de dados científicas, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o texto integral da obra abaixo citada, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data 28/07/2025.

1. Identificação do material bibliográfico: () Tese (X) Dissertação () Trabalho de Conclusão

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

Autora: Wanessa Eleusis Miotto

Orientadora: Bianca Goulart de Oliveira Maia.

Coorientadora: Dra. Noeli Sellin

Data de Defesa: 30/05/2025

Título: Lodo têxtil: uma análise de valorização com a sistemática CPQVA

Instituição de Defesa: Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE

3. Informação de acesso ao documento:

Pode ser liberado para publicação integral (X) Sim () Não

Havendo concordância com a publicação eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese, dissertação ou relatório técnico.

Assinatura da autora

Joinville, 28 de julho de 2025

Local/Data