

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE**  
**MATERIAIS – PPGCEM**  
**MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**LUCIA ZANONI RAMOS**

**VALORIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO: UMA**  
**ANÁLISE COMPARATIVA GLOBAL PELA SISTEMÁTICA CPQvA.**

**CRICIÚMA**

**2026**

**LUCIA ZANONI RAMOS**

**VALORIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO: UMA  
ANÁLISE COMPARATIVA GLOBAL PELA SISTEMÁTICA CPQvA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM da Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestra em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Raupp Pereira  
Coorientação: Dr<sup>a</sup> Luyza Bortolotto Teixeira

**CRICIÚMA**

**2026**

## Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

R175v Ramos, Lucia Zanoni.

Valorização de resíduo de construção e demolição :  
uma análise comparativa global pela sistemática CPQvA  
/ Lucia Zanoni Ramos. - 2026.

97 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo  
Sul Catarinense, Programa em Ciência e Engenharia de  
Materiais, Criciúma, 2026.

Orientação: Fabiano Raupp-Pereira.

Coorientação: Luyza Bortolotto Teixeira.

1. Resíduos como material de construção. 2.  
Materiais de construção - Reaproveitamento. 3.  
Valorização de resíduos. 4. Economia circular. I.  
Título.

CDD 23. ed. 624

**LUCIA ZANONI RAMOS**

**VALORIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO: UMA  
ANÁLISE COMPARATIVA GLOBAL PELA SISTEMÁTICA CPQvA**

Esta dissertação foi julgada e aprovada para obtenção do Grau de Mestra em Ciência e Engenharia de Materiais na área de Cerâmica no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM da Universidade do Extremo Sul Catarinense.

Criciúma, 27 de fevereiro de 2026.

**BANCA EXAMINADORA**

Prof<sup>ª</sup>. Sabrina Arcaro -Doutora - (UNESC)

Prof. Manuel Joaquim Peixoto Marques Ribeiro - Doutor - (Instituto Politécnico Viana do  
Castelo – IPVC/Portugal)

Juliana Acordi - Doutora - (UNESC)

Dedico este trabalho aos meus mentores, minha família e amigos, por todo apoio recebido durante a confecção deste.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus por me conceder força e coragem para enfrentar os desafios.

Agradeço a financiadora do estudo CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) por meio do PROSUC/UNESC (Programa de Suporte à Pós-Graduação de Instituições de Ensino Particulares) pela oportunidade concedida.

Ao professor e meu orientador Dr. Fabiano Raupp Pereira, pelo incentivo, ensinamentos, conselhos, amizade, empatia e principalmente paciência, deixo expressa minha admiração por este profissional incrível.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais PPGCEM, da UNESC (Universidade do Extremo Sul Catarinense). Aos pesquisadores do Laboratório Valorização de Resíduos e de Economia Circular (Lab V@lor\_EC) pelos ensinamentos e trocas de experiências.

A Eng. Luyza Bortolotto Teixeira, minha coorientadora, por sua amizade, sábios conselhos, paciência, ensinamentos didáticos e parceria de laboratório. Aos professores do PPGCEM, dos quais eu aprendi muito além da ementa das disciplinas. Aos meus colegas de aulas e de laboratórios pelos quais eu passei, principalmente a Dr<sup>a</sup>. Juliana Acordi.

Gostaria de agradecer a minha família, as empresas parceiras e a todos que participaram direta e indiretamente desta jornada enriquecedora.

“ Somos sinônimos de tudo”

Metsapa Huni Kuin

## RESUMO

Considerando o constante crescimento na geração de resíduos de construção e demolição (RCD) em um nível global, sendo este responsável por 30% de todos os resíduos gerados mundialmente, faz-se necessário aprimorar os estudos e tecnologias disponíveis para um melhor gerenciamento destes resíduos. Com a crescente evolução da construção civil, como novas construções e ampliações, bem como a sua manutenção, que envolve demolições e reformas, ocorrendo assim um elevado descarte de materiais com potencial para uso como fontes minerais secundárias. Com este potencial inerente do RCD, é possível minimizar a extração de matérias primas (fontes primárias) retiradas do seu estado natural. Substituindo a economia linear empregada atualmente, por uma economia circular, focando a gestão do ciclo de vida do produto, com o intuito de acompanhar o produto do berço ao berço, buscando a otimização dos recursos e processos. Neste contexto, o diagnóstico para uma estimativa global, torna-se uma ferramenta muito importante nas possibilidades de reuso do RCD, como agregado reciclado (AR), auxiliando tomadas de decisões e pontos que necessitem de mais atenção no gerenciamento do resíduo. No Brasil a fração cerâmica do RCD, é responsável por 61% do resíduo gerado, este estudo se baseia nesta tipologia que engloba, cerâmica vermelha, concretos e materiais cimentícios em geral. Com o intuito de facilitar a valorização do resíduo em questão, fundamentado na economia circular, o trabalho expõe a similaridade composicional e de tipologia do RCD, em uma estimativa global. A região estudada foi o sul do estado de Santa Catarina, Brasil. Em um enquadramento teórico-prático da valorização sistêmica, com a aplicação da sistemática existente CPQvA, que considera critérios de classificação, potencialidade, quantidade e viabilidade, e por fim aplicação do resíduo como fonte mineral alternativa, em tijolos de solo-cimento, por serem produtos ecológicos, que dispensam tratamento término. Ao substituir em 50% do agregado natural por AR, o tijolo de solo-cimento se enquadrou nos parâmetros da norma vigente. Porém em um comparativo com a formulação padrão, a resistência à compressão simples sofreu uma redução em 40% e a absorção de água, teve um aumento de 23%. Em seguida, o trabalho fez uso de uma lista de produtos potenciais, baseados na bibliografia, sendo estes, argamassa, concreto sem função estrutural, concreto com função estrutural e geopolímeros, para a aplicação do método GUT, que considera obter, priorizar e avaliar informações, adaptada para a sistemática CPQvA, fazendo uso do índice de criticidade, tornando-se possível elencar em ordem de prioridade o nível de dificuldade para aplicação da proposta de valorização desenvolvida. O diagnóstico expôs a similaridade composicional do RCD, mostrando que é possível utilizar a sistemática CPQvA a nível mundial, tendo em vista que a tipologia do RCD se apresenta em sua maior quantidade na fração cerâmica, composta de forma geral, por concretos, argamassas, cerâmicas (tijolo, telhas, revestimentos, entre outros), gessos e solos. Tornando o RCD um material promissor na substituição de recursos naturais.

**Palavras-chave:** resíduo de construção e demolição (RCD); valorização de resíduos; sistemática CPQvA; economia circular.

## ABSTRACT

Considering the constant growth in the generation of construction and demolition waste (CDW) on a global level, which is responsible for 30% of all waste generated worldwide, it is necessary to improve the studies and technologies available for better management of this waste. Considering the increasing evolution of the construction industry, such as new constructions and expansions, as well as its maintenance, which involves demolitions and renovations, a high disposal of materials occurs with potential for use as secondary raw materials. With this inherent potential of CDW, it is possible to minimize the extraction of raw materials (primary source) taken from their natural state. Replacing the linear economy currently applied with a circular economy, focusing on product life cycle management, and aiming to follow the product from cradle to cradle, seeks the optimization of resources and processes. In this context, the diagnosis for a global estimate becomes a very important tool in the possibilities for reusing CDW as recycled aggregate (RA), aiding in decision-making and identifying points that require more attention in waste management. Considering that in Brazil the ceramic fraction of CDW is responsible for 61% of the waste generated, this study is based on this typology which encompasses red ceramics, concrete, and cementitious materials in general. With the intent of facilitating the recovery of the waste in question, based on the circular economy, this work exposes the compositional and typological similarity of CDW in a global estimate. The studied region was the south of the state of Santa Catarina, Brazil. Within a theoretical-practical framework of systemic valorization, with the application of the existing CPQvA systematic — which considers characterization, potentiality, quantity, and applicability criteria — and finally the possible application of the waste as a secondary raw material in soil-cement bricks, as they are ecological products that do not require thermal treatment. By replacing 50% of the natural aggregate with RA, the soil-cement brick met the parameters of the current technical standard. However, in a comparison with the standard formulation, the compressive strength underwent a reduction of 40% and the water absorption had an increase of 23%. Subsequently, the work made use of a list of potential products - such as, mortar, concrete with and without structural function, and geopolymers - for the application of the GUT method, which involves obtaining, prioritizing, and evaluating information. Adapted to the CPQvA systematic, using the criticality index, it was possible to list, in order of priority, the difficulty level for applying waste in potential products, thus facilitating its valorization. The diagnosis exposed the compositional similarity of the CDW, indicating that it is possible to use the CPQvA systematic on a global scale, considering that the typology in the CDW with the highest fraction is the ceramic, generally composed of concrete, mortar and ceramics (roof tiles, bricks and ceramic tiles), gypsum and soil, making CDW a promising material in natural resources replacement.

**Keywords:** construction and demolition waste (CDW); waste valorization; CPQvA systematic; circular economy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do ciclo de vida produtivo genérico baseado na economia circular. ....	21
Figura 2 - Relação dos 17 objetivos para o desenvolvimento sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização Das Nações Unidas. ....	22
Figura 3 - Classificação do RCD, definida pelo Conama 307/431. ....	25
Figura 4 - Fluxograma de caracterização e classificação de resíduos. ....	26
Figura 5 - Estimativa de geração de RCD para as regiões brasileiras no ano de 2020. ....	28
Figura 6 - Representação da sistemática multicritérios CPQvA. ....	37
Figura 7 - Exemplo dos aspectos do método GUt aplicado na gestão de uma usina de Reciclagem. ....	41
Figura 8 - Fluxograma das atividades desenvolvidas. ....	43
Figura 9 - Localização dos pontos de coleta das amostras, destacando as cidades de Criciúma, Forquilha e Balneário Rincão. ....	45
Figura 10 - Registros fotográficos dos tipos de materiais por ponto de coleta, conforme descrição do Quadro 3. ....	47
Figura 11 - Imagem fotográfica representativa de um tijolo de solo-cimento obtido por processamento industrial, na empresa parceira. ....	55
Figura 12 - Corpos de prova das formulações: a) Padrão, com o solo disponibilizado pelo fabricante e b) F1, com substituição de 50% de AR da Amostra C. ....	57
Figura 13 – Difração de Raios-X das frações residuais cerâmicas (de Classe A) Estudadas. ....	68
Figura 14 - Microscopia óptica das amostras. ....	69
Figura 15 - Distribuição granulométrica das amostras de AR, com identificação das Zonas Ótima (ZO) e Utilizável (ZU) e indicação dos Limites Inferior (Li) e Superior (Ls). ....	71
Figura 16 - Difração de Raios-X da areia utilizada como agregado pela empresa fabricante parceira. ....	75
Figura 17 - Separação do solo do fabricante: a) Retido na peneira #270 mesh (Areia) e b) Material passante na mesma peneira (Argila/Silte). ....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de representação de tipologia de Classe do RCD.....	27
Tabela 2 - Relação de RCD por tipologia e atividade nos Estados Unidos. ....	29
Tabela 3 - Dados de destino do RCD, em 2020, nos Estados Unidos.....	29
Tabela 4 - RCD destinado para reciclagem no Quebec - Canadá. ....	30
Tabela 5 - Classificação dos agregados em relação a granulometria. ....	33
Tabela 6 - Questionamentos que compõem a sistemática CPQvA adaptado para avaliação do RCD, de acordo com cada critério e seus respectivos pesos. ....	39
Tabela 7 - Tipologia do RCD do Brasil, Estados Unidos da América (EUA), Portugal, União Europeia (UE), Índia e China, dado em (%). ....	44
Tabela 8 - Conjunto de peneiras utilizadas para o ensaio de granulometria. ....	50
Tabela 9 - Descrição das informações de fabricação do bloco de solo-cimento da empresa parceira local.....	55
Tabela 10 - Estimativa diagnóstica dos principais constituintes de RCD por grupo de tipologia e local de origem.....	62
Tabela 11 - Resultados da composição química por Fluorescência de Raios-X, por tipologia De Amostra. ....	67
Tabela 12 - Área de superfície das partículas das amostras estudadas.....	69
Tabela 13 - Composição granulométrica das amostras de agregado reciclado miúdo, conforme NBR 7211 (2022). ....	70
Tabela 14 - Resultado de massa específica aparente, em g/cm <sup>3</sup> , das amostras de AR, conforme NBR 16972 (2021). ....	72
Tabela 15 - Comparativo da densidade real obtida experimentalmente pela NBR 16916 (2021) e picnometria, das amostras de Ar.....	73
Tabela 16 - Resultados de absorção de água das amostras de AR, conforme a NBR 16916 (2021). ....	74
Tabela 17 - Composição química do solo do fabricante, separado na fração retida na peneira #270 mesh.....	74
Tabela 18 - Granulometria do material do fabricante, retido em peneira #270 mesh. ....	78
Tabela 19 - Resistência mecânica à compressão da formulação padrão e formulação com 50% de AR (F1). ....	79

Tabela 20 - Resultados de absorção de água dos corpos de prova das formulações padrão e F1, seguindo a NBR 8492 (2012). .....	79
Tabela 21 - Ordem de prioridade para valorização de resíduos, pelo método GUT adaptado para CPQvA. ....	81

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Enquadramento da resolução N° 307 Conama com a NBR 10004 (2004). .....	26
Quadro 2 - Normas técnicas disponíveis para manuseio e utilização do RCD. ....	34
Quadro 3 - Identificação da origem dos resíduos e por tipologia das amostras coletadas. ....	46
Quadro 4 - Normas para estudo de aplicação de RCD em blocos e tijolos de solo-cimento. ....	54
Quadro 5 - Cálculo da ordem de prioridades (Pr) com adequação do Método GUT para o aprimoramento da sistemática CPQvA. ....	58
Quadro 6 - Produtos potenciais (PP) da literatura utilizados na listagem da Metodologia GUT para aprimoramento da sistemática CPQvA.....	59

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\mu\text{m}$  - micrometro

$\rho_{\text{ap}}$  - Massa específica aparente do agregado

$\rho_{\text{a}}$  - Densidade da água

$\rho_{\text{s}}$  - Densidade do agregado seco

$\rho_{\text{SS}}$  - Densidade do agregado na condição SSS

A - Aplicabilidade

Abs - Absorção de água

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRECON - Associação Brasileira de Reconstrução e Demolição

AN - Agregado natural

AR - Agregado reciclado

C - Classificação

CBIC - Câmara Brasileira da Indústria da Construção

CI - Material cimentício

CO - Concreto

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

CP - Cimento Portland

CPQvA - Classificação, Potencialidade, Quantidade/viabilidade e Aplicabilidade

CV - Cerâmica vermelha

DRX - Difração de Raio-X

EPA - *Environmental Protection Agency*

EPRS - *European Parliamentary Research Service*

FRX - Fluorescência de Raio-X

GUT - Gravidade, Urgência e Tendência

Ic - Índice de criticidade

$m_1$  - Massa da amostra seca

$m_2$  - Massa da amostra úmida

$m_{\text{ar}}$  - Massa do recipiente com o agregado

$m_{\text{A}}$  - Massa da amostra seca em SSS

$m_{\text{B}}$  - Massa da amostra em SSS

$m_{\text{C}}$  - Massa da amostra + massa do béquer em SSS

$m_{\text{D}}$  - Massa da amostra + massa do béquer + massa da água em SSS

MI - Material misto

$m_r$  - Massa do recipiente vazio,

Mton - Megatonelada

MPa - Megapascal

NBR - Norma brasileira

ODS - Objetivos para o desenvolvimento sustentável

ONU - Organização das Nações Unidas

P - Potencialidade

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

Pr - Prioridade

PP - Produtos potenciais

$q_n$  - Questionamentos

Qv – Quantidade/viabilidade

RCC - Resíduo de construção civil

RCD - Resíduo de construção e demolição

$R_n$  - Respostas

SINIR - Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos

SSS - Saturada superfície seca

USEPA - *United States Environmental Protect Agency*

V - Volume do recipiente

VA - Volume de água adicionada

WBG - *World Bank Group*

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>20</b>
2.1	OBJETIVO GERAL.....	20
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>21</b>
3.1	ECONOMIA CIRCULAR .....	21
3.2	RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) .....	23
<b>3.2.1</b>	<b>Classificação do RCD .....</b>	<b>24</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Estimativas de geração no Brasil e outros países .....</b>	<b>27</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Gestão do RCD .....</b>	<b>31</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Valorização do RCD.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Tipologia do RCD .....</b>	<b>34</b>
3.3	SISTEMÁTICA CPQvA .....	37
3.4	MÉTODO GUT .....	39
3.5	CASO DE ESTUDO: TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO .....	41
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>43</b>
4.1	DIAGNÓSTICO INFORMATIVO GLOBAL.....	43
4.2	COLETA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	45
4.3	SISTEMÁTICA CPQVA .....	48
<b>4.3.1</b>	<b>Classificação (C) .....</b>	<b>48</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Potencialidade (P).....</b>	<b>49</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Quantidade e viabilidade (Qv) .....</b>	<b>52</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Aplicabilidade (A).....</b>	<b>53</b>
4.4	MÉTODO GUT .....	58
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>61</b>
5.1	DIAGNÓSTICO GLOBAL.....	61
5.2	CPQvA.....	65
<b>5.2.1</b>	<b>Classificação .....</b>	<b>65</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Potencialidade .....</b>	<b>67</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Quantidade/Viabilidade .....</b>	<b>74</b>
<b>5.2.4</b>	<b>Aplicabilidade .....</b>	<b>77</b>
<b>5.2.5</b>	<b>Índice de criticidade (Ic) .....</b>	<b>80</b>

5.3	METODOLOGIA GUT .....	80
6	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em uma economia linear, a problemática dos resíduos da construção civil vem movendo a cadeia produtiva do setor. Sendo assim é crescente a necessidade da proposta de economia circular, onde buscam-se novas fontes de materiais para serem utilizados como matéria prima secundária. Seguindo os objetivos estabelecidos em 2015, pela Organização das Nações Unidas (ONU), para o desenvolvimento sustentável (ODS), esta pesquisa se enquadra principalmente objetivo 12 de consumo de produção responsável, mas também relacionada aos objetivos 8, 9, 11 e 15, dando ênfase no resíduo de construção e demolição.

Assim sendo, substituindo o modelo de economia linear, pela simbiose industrial gerada por uma economia circular, a qual considera o ciclo de vida do produto, fazendo o uso eficiente dos recursos disponíveis e reduzindo o impacto ambiental em cada processo; os resíduos de construção e demolição (RCD) podem ser utilizados como recurso mineral não extraído da natureza. Este modelo de circularidade pode ser obtido através dos produtos, processos e modelos de negócios de modo cíclico, em um sistema econômico e ambiental vantajoso.

O *World Bank Group* (WBG), aponta uma população mundial de cerca de 8,14 bilhões de pessoas para o ano de 2024. A Associação Brasileira de Reconstrução e Demolição - ABRECON (2020), estima uma geração de 500 kg/habitante ao ano, no Brasil. Para Chen *et al* (2021), o total de RCD gerado no mundo pode ultrapassar 10 bilhões de toneladas anualmente.

A indústria da construção gera resíduos na produção de materiais e componentes, na execução das obras, durante a manutenção, modernização e, finalmente, na demolição (John, 2000). Com isso, torna-se importante ressaltar que de forma geral, o RCD é todo e qualquer material oriundo das atividades de construção, seja ele de novas construções, reformas, demolições, solos ou vegetação presentes em limpezas de terreno (Angulo, 2000).

No Brasil, um importante marco na valorização do RCD está relacionado com a Resolução Nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002) e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a qual atribui responsabilidades compartilhadas quanto ao gerenciamento destes resíduos (Cabral; Moreira, 2011). O Art. 1º do CONAMA (2002) estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, por meio de ações disciplinares necessárias para a minimização de impactos ambientais. Com esta resolução, é dado início às primeiras normas técnicas desenvolvidas pela ABNT relacionadas ao destino e reuso do RCD no Brasil, em 2004.

Dando ênfase ao reuso do RCD, entrou em vigor em 2021 a NBR 15116, que define o agregado reciclado como material granular proveniente do beneficiamento da fração cerâmica de resíduos de construção, possuindo subdivisões: agregado reciclado cimentício, predominante de materiais cimentícios diversos; agregado reciclado de concreto, predominantemente resíduos de concreto; e agregado reciclado misto, composto por materiais cimentícios e materiais cerâmicos.

A tipologia do RCD a nível mundial, se resume a concreto, argamassas, materiais cerâmicos (tijolos, telhas, revestimentos cerâmicos entre outros), gessos e solos, ou seja, basicamente a fração cerâmica do resíduo, estabelecendo uma base em fração cerâmica. Em uma análise nas fases cristalinas encontradas no RCD de forma geral, predominam silicatos como quartzo, e carbonato como calcita, devido à grande quantidade de areia e cimento nos materiais (Marín-Cortés *et al.*, 2024; Brasileiro; Matos, 2015).

De acordo com a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC), em 2022, o Brasil apresentou um crescimento de 6,9% no setor de construção civil, estando este setor em constante crescimento, não apenas no Brasil, mas a nível mundial. Inerente ao setor da construção civil está o uso de recursos naturais, onde segundo Fraser *et al.* (2023), nos últimos 50 anos, a população mundial duplicou, mas a extração de materiais mais do que triplicou.

No Brasil, segundo a ABRECON, no ano de 2020, a estimativa de RCD gerado no país foi de 100 milhões de toneladas, aproximadamente. Já nos Estados Unidos, os últimos dados divulgados pela EPA (*Environmental Protection Agency*), apontam que cerca de 600 milhões de toneladas de RCD foram geradas no ano de 2018. Na União Europeia, a Eurostat divulgou que 27 países da UE geraram um total de 305 milhões de toneladas de RCD em 2020.

O relatório expedido pela SINIR (Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos) em 2019, informa as porcentagens das diferentes classes de resíduos no Brasil, sendo: resíduos classe A, que representam a fração cerâmica (componente cerâmicos, argamassa e concreto) e solos, representando 61%, e as classes B (plástico, papel, metal, vidro, gesso entre outros), C (materiais sem viabilidade para reciclagem) e D (resíduos perigosos), com 25%, 9% e 2%, respectivamente. Os 3% restantes são de classificação não especificada.

Face ao exposto, este trabalho objetiva valorizar a fração cerâmica Classe A, utilizando cerâmica vermelha, concreto e materiais cimentícios em geral, como agregado reciclado do Resíduos de Construção e Demolição (RCD) da região sul de Santa Catarina, por meio de análise sistêmica multicritério CPQvA (Classificação, Potencialidade, Quantidade/viabilidade e Aplicabilidade), criada por Raupp-Pereira (2006). Far-se-á uso de uma relação comparativa do Brasil para com o mundo, elaborando um diagnóstico global,

gerando assim uma associação de uma fonte alternativa secundária mineral, com base em um material de geração característica global. Foi proposta uma lista de produtos potenciais, dentre eles, tijolo de solo cimento (PP1), argamassa (PP2), concreto sem função estrutural (PP3), concreto com função estrutural (PP4) e geopolímero (PP5). O produto potencial para estudo aprofundado foi o tijolo de solo cimento dado ao fato de ser um produto conhecido como eco bloco, por não necessitar de tratamento térmico, com composição usual de solo, cimento e água.

Desta forma, busca-se aprimorar com o desenvolvimento da sistemática CPQvA de valorização de resíduos, a exemplo de Oliveira (2017), com a inclusão da metodologia GUT, proposta por Kepner-Tregoe (1986), utilizada em análise de processos, na perspectiva da relação multicritério para a tomada de decisões no processo de valorização da fração cerâmica do RCD de classe A como um subproduto da construção civil.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Aprimorar a sistemática multicritério CPQvA de valorização de resíduos, por meio de análise de priorização metodológica GUT (Gravidade, Urgência e Tendência) aplicada a uma fração cerâmica de Resíduos de Construção e Demolição (RCD de classe A) da região sul catarinense, numa relação representativa local voltada para uma perspectiva global de uso de características potenciais deste subproduto industrial da construção civil.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Diagnosticar os resíduos sólidos da construção e demolição (RCD) da região sul de Santa Catarina, com base em uma estimativa global dos seus diferentes materiais cerâmicos constituintes, para o enquadramento teórico-prático da valorização sistêmica deste resíduo;
- b) Integrar o guia sistêmico do CPQvA e estabelecer através do método GUT, uma listagem da classificação final referente ao nível de dificuldade para a valorização de um resíduo gerado de forma global;
- c) Demonstrar por meio da análise sistêmica multicritério CPQvA, a potencialidade destes materiais em ações de circularidade mineral, por meio dos resultados experimentais do RCD local e possíveis correlações globais identificadas por levantamento bibliográfico.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são definidos e explicados os principais tópicos estudados ao longo da pesquisa, iniciando com uma breve discussão sobre economia circular (3.1). Em seguida, são apresentados os conceitos de resíduo de construção e demolição (3.2), com apresentação de sua classificação (3.2.1), estimativa de geração (3.2.2), procedimentos de gestão e valorização dos resíduos (3.2.3 e 3.2.4, respectivamente), bem como as diferentes tipologias destes resíduos (3.2.5). A sistemática CPQvA e o método GUT, utilizados como base no desenvolvimento da pesquisa, estão apresentados nas seções 3.3 e 3.4, respectivamente. Para finalizar, um breve detalhamento teórico sobre uma possível aplicação destes resíduos na obtenção dos materiais chamados de solo-cimento (3.5).

#### 3.1 ECONOMIA CIRCULAR

Atualmente o mundo vive uma economia linear, onde se produz, usa e descartam os materiais e com isso, o conceito de economia circular tem sido discutido na busca pela sustentabilidade. A economia circular é o oposto da economia linear, focando a gestão do ciclo de vida do produto, ferramenta indispensável para a circularidade, com o intuito de acompanhar o produto do berço ao berço, utilizando-se desde o design ao reuso do material e buscando a otimização dos recursos e processos. Entre as suas maiores preocupações está a redução do consumo de matérias-primas naturais, protegendo assim, o meio ambiente (Ribeiro, 2023). A Figura 1 apresenta o conceito de circularidade do ciclo de vida de um produto.

Figura 1 - Representação do ciclo de vida produtivo genérico baseado na Economia Circular.



Fonte: Serviço de Estudo do Parlamento Europeu (EPRS) (2023).

Xavier *et al.* (2023) exploram o assunto afirmando que, além do cumprimento de requisitos sociais, encontrar novas fontes e novas aplicações para materiais primários e secundários é um dos principais desafios da economia circular.

Em 2015 a Organização das Nações Unidas (ONU), definiu 17 objetivos para o desenvolvimento sustentável (ODS), sendo estes estruturados na Figura 2.

Figura 2 - Relação dos 17 objetivos para o desenvolvimento sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas.



Fonte: Organização das Nações Unidas (2015).

Como é possível observar, o objetivo número 12 está diretamente relacionado com a economia circular, buscando assegurar padrões de produção e consumo sustentável, considerando a capacidade de cada país com previsão para 2030 abranger uma gestão sustentável mundial. A valorização do resíduo de construção e demolição ainda pode ser relacionada com outros objetivos, como o número 8, trabalho decente e crescimento econômico, que define a dissociação do desenvolvimento econômico da degradação ambiental, e incentiva a modernização tecnológica e inovação em um crescimento sustentável; o objetivo número 9, indústria, inovação e infraestrutura, para promover uma industrialização sustentável; o objetivo número 11, cidades e comunidades sustentáveis, para reduzir o impacto ambiental, no que tange a gestão de resíduos em geral; e o objetivo número 15, vida terrestre, que busca assegurar a conservação e uso sustentável do ecossistema (ONU, 2015).

Para Vilaça (2020) a abordagem de transformação de resíduos em coprodutos está alinhada com os princípios da economia circular. Ao transformar resíduos em novos produtos

úteis, o meio ambiente está sendo preservado e aumentando o capital natural ao reutilizar recursos que de outra forma seriam descartados. Isso também promove a eficácia do sistema ao reduzir a quantidade de resíduos produzidos e otimizar a produção de recursos, pois gera valor a partir de materiais que seriam descartados. Além disso, essa abordagem pode resultar na mitigação de passivos ambientais, reduzindo a necessidade de aterros sanitários e a poluição associada a eles. Os benefícios econômicos e sociais também são significativos, pois a criação de novos produtos a partir de resíduos pode gerar novas oportunidades de negócios, empregos e benefícios para a sociedade em geral.

Nandal *et al.* (2022) também cita que a utilização de resíduos de demolição reduz a extração de agregados naturais e incentiva a geração atual e futura a buscar novas alternativas para preservação dos agregados, voltando a atenção para a reciclagem. Portanto, torna-se fundamental aplicar os conceitos de economia circular, valorizando estes recursos minerais secundários, caracterizados pelas particularidades de cada processo e de geolocalização, a partir de conceitos inovadores para o gerenciamento de fluxos de materiais e energia (Monsani, 2022).

Lara (2024) cita que diversas pesquisas ressaltam a relevância de implementar estratégias para prevenir e reduzir resíduos, baseadas nos princípios da circularidade e nos conceitos de produção limpa. Porém, sendo inevitável a produção do resíduo em demolições e no canteiro de obras, é crescente a necessidade na valorização deste, incluindo-o em uma circularidade mineral, fazendo uso destes resíduos como matérias-primas secundárias nesta grande indústria da construção civil.

Ferreira *et al.* (2021) indicam que várias estratégias vêm sendo estudadas para reduzir, reutilizar e reciclar os resíduos de construção e demolição evitando assim, sua disposição em aterros. Uma delas é a utilização de agregados reciclados obtidos a partir desses resíduos em materiais cimentícios, em substituição aos agregados naturais.

### 3.2 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

Os impactos ambientais estão diretamente relacionados com o desenvolvimento socioeconômico da humanidade. Embora a taxa crescente de urbanização seja uma preocupação crítica por razões socioambientais, isto também leva a uma maior extração de matérias-primas naturais e à geração de quantidades significativas de resíduos de construção e demolição (Shooshtarian *et al.*, 2020). Neste contexto é necessária a produção de produtos duráveis e a utilização, não apenas de matéria-prima primária, e sim uma gestão estruturada na utilização de matéria-prima secundária.

O rápido adensamento das cidades com a urbanização acelerada, o crescimento das atividades do setor construtivo, além da larga exploração dos recursos naturais, fez com que a geração de resíduos da construção e demolição (RCD) alcançasse índices elevados (Brasileiro; Matos, 2015). O RCD é responsável por 25 a 40% dos resíduos sólidos gerados no mundo, e apesar de apresentarem um potencial de reciclagem de 91,25%, apenas 22,44% destes são reciclados (Sakthibala, 2025).

Neste contexto, são gerados dois tipos de resíduos, o Resíduo de Construção Civil (RCC) e o resíduo de demolição. Quanto à definição de RCC, tanto a NBR 15112 (2004), quanto a Lei 12305 (2010), incluem o resíduo de demolição em sua definição, como descrito a seguir.

A NBR 15112 (2004) define RCC como:

Resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassas, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidro, plástico, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulho de obras, caliça ou metralha.

Já a Lei 12305 (2010) apresenta como definição de RCC os “resíduos gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis.”

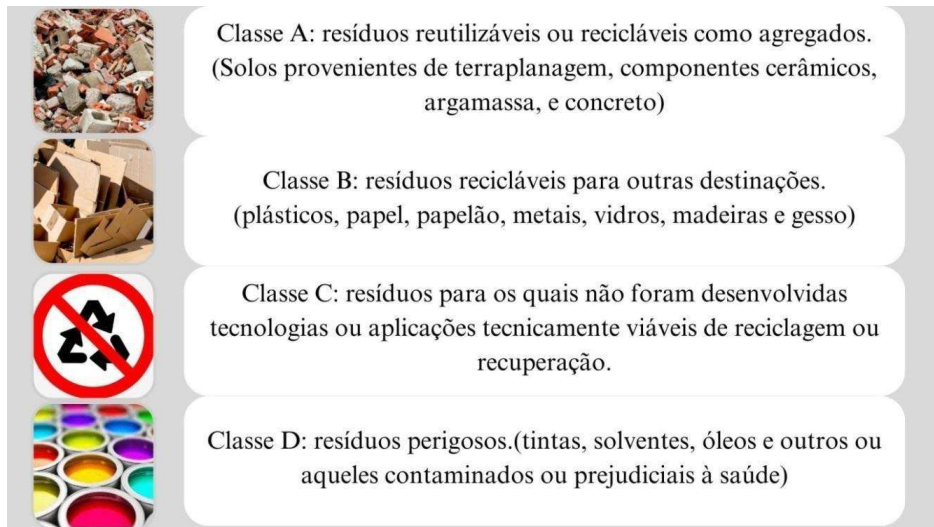
Apesar destas definições incluírem o resíduo de demolição junto ao RCC, há uma diferenciação na reciclagem, onde os resíduos de construção são geralmente mais limpos facilitando sua reciclagem. Por outro lado, os resíduos de construção e demolição (RCD) são mais heterogêneos, o que dificulta a segregação e valorização dos mesmos (Rodriguez-Morales *et al.*, 2024).

### **3.2.1 Classificação do RCD**

Quanto à classificação do RCD, no Brasil entrou em vigor, em 2002, a Resolução nº 307 do CONAMA (2002) que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão

dos resíduos da construção civil. Em 2011 a Resolução nº 431 altera o art. 3º, quanto à classificação do gesso, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Classificação do RCD, definida pelo CONAMA 307/431.



Fonte: Adaptado de CONAMA (2011).

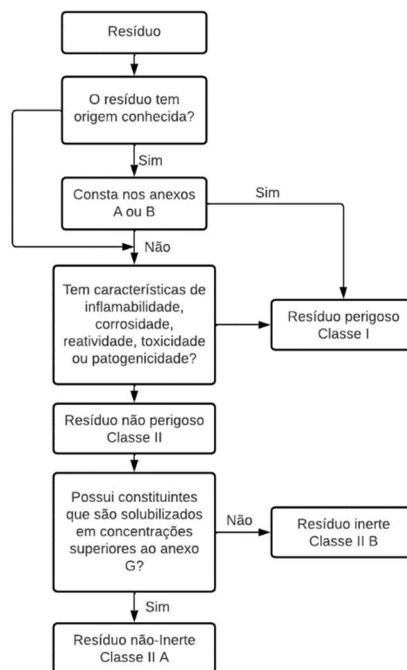
Na Figura 3 encontra-se a classificação do RCD, segundo a Resolução do CONAMA, no qual a Classe A são solos provenientes de terraplanagem, componentes cerâmicos, argamassa e concreto, resíduos estes que podem ser reutilizáveis ou recicláveis como agregados. Na classe B encontram-se os plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso, que são resíduos recicláveis para outras destinações. A classe C é composta por resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações tecnicamente viáveis de reciclagem ou recuperação até o momento. E por fim, os resíduos Classe D incluem tintas, solventes, óleos e outros, ou seja, materiais contaminados ou prejudiciais à saúde.

Em 2010 foi sancionada a Lei nº12305, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, classificando os resíduos quanto à origem e à periculosidade. O art. 13 define resíduos da construção civil como aqueles gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis.

A classificação dos resíduos sólidos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias, cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido (NBR 10004, 2004).

A Figura 4 mostra o fluxograma quanto à periculosidade, definido pela NBR 10004 (2004) que classifica em Classe I os resíduos perigosos e Classe II os resíduos não perigosos, sendo este último subdividido em Classe IIA, para não inertes, e Classe IIB, para resíduos inertes.

Figura 4 - Fluxograma de caracterização e classificação de resíduos.



Fonte: NBR 10004 (2004).

Em um enquadramento da Resolução nº 307 do CONAMA (2002), com a NBR 10004 (2004), o Quadro 1 apresenta o comparativo.

Quadro 1 - Enquadramento da resolução nº 307 CONAMA com a NBR 10004 (2004).

CONAMA	NBR
Classe A	Classe II B
Classe B	Classe II A e B
Classe C	Classe II
Classe D	Classe I

Fonte: Adaptado de CONAMA (2011) e NBR 10004 (2004).

Os resíduos da Classe A são aqueles não inertes, nas Classe B e C, encontram-se resíduos não perigosos, podendo estes serem inertes ou não. Estes resíduos são considerados não perigosos, possibilitando a sua reciclagem. Já os resíduos de Classe D, são considerados pela NBR 10004 (2004) como resíduos perigosos.

No Brasil, o último relatório expedido pelo SINIR (Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos), em 2019, informa as porcentagens das diferentes classes de resíduos, definidas na Resolução do CONAMA nº 307/431. Sendo apresentadas na Tabela 1, resíduos classe A, B, C e D representados por 61%, 25%, 9% e 2%, respectivamente. Os 3% restantes são de classificação não especificada pelo SINIR.

Tabela 1 - Dados de representação de tipologia de classe do RCD.

<b>Classificação CONAMA</b>	<b>%</b>
Classe A	61
Classe B	25
Classe C	9
Classe D	2

Fonte: Adaptado de SINIR (2019).

### 3.2.2 Estimativas de geração no Brasil e outros países

Indicadores socioeconômicos podem ser utilizados como meio de previsão da geração de resíduos de construção. No Brasil, levantamentos realizados em diferentes municípios brasileiros indicam que a geração de resíduos de construção per capita varia de 168 a 760 kg/hab.ano, o que resulta em valor médio próximo a 500 kg/hab.ano (ABRECON, 2020).

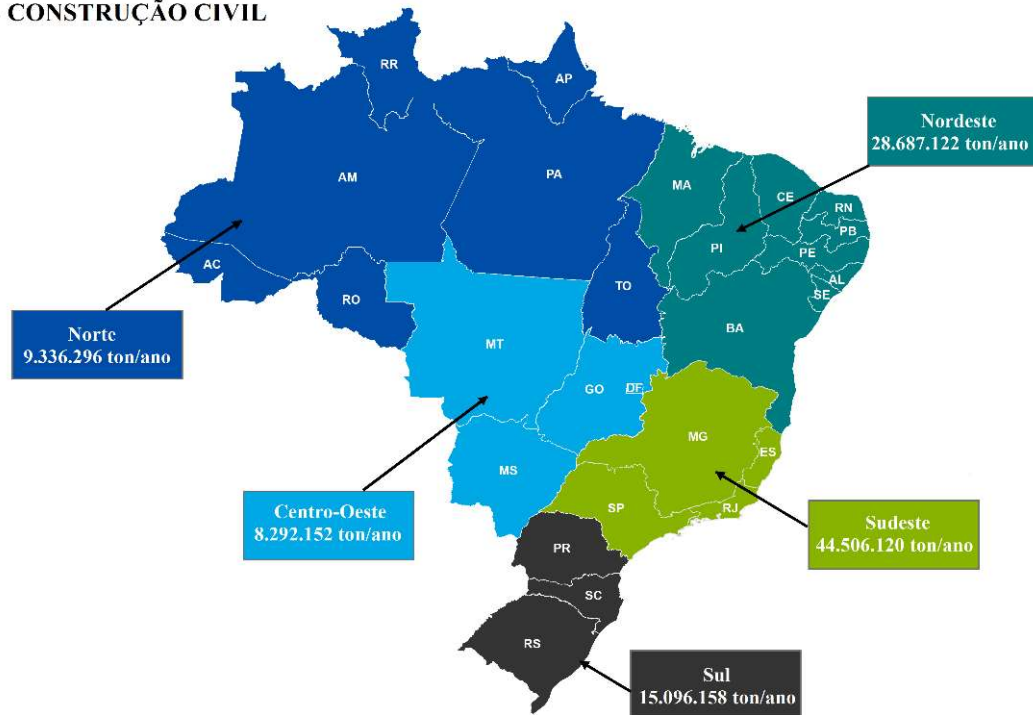
A ABRECON divulgou em 2020 a estimativa de RCD gerado no país em 100 milhões de toneladas ao ano, aproximadamente. Estes dados foram estimados por regiões do país (Figura 5), em ordem decrescente: 44,5 Mt/ano, 29 Mt/ano, 15,1 Mton/ano, 9,3 Mt/ano e 8,3 Mt/ano, correspondendo às regiões sudeste, nordeste, sul, norte e centro-oeste, respectivamente. O mesmo estudo também aponta que desde 2013, início da pesquisa, até 2020, não houve aumento significativo na geração de RCD.

O setor da construção civil representa cerca de 30% de todos os resíduos gerados no mundo (Lopes *et al.*, 2023). Ao mesmo tempo, quantificar a geração RCD no Brasil é uma

tarefa difícil, considerando que uma grande quantidade tem origem de obras informais, não sendo quantificada.

Figura 5 - Estimativa de geração de RCD para as regiões brasileiras no ano de 2020.

**QUANTIDADE DE RESÍDUOS  
DE CONSTRUÇÃO CIVIL**



Fonte: Adaptado de ABRECON 2020.

Os últimos dados divulgados pela EPA (*Environmental Protection Agency*), dos Estados Unidos, apontam que cerca de 600 milhões de toneladas de RCD foram geradas no ano de 2018. A EPA ainda cita que em 2020, os principais compostos do RCD foram concretos, madeira, *drywall* de gesso, metal, tijolo e telha de barro, telhas asfálticas e pavimento asfáltico. O relatório separa por tipologia de cada material (construção ou demolição), o resíduo de acordo com seu gerador (conforme apresenta a Tabela 2), podendo-se observar que o setor de demolição é responsável por mais de 94% dos resíduos gerados. Na Tabela 2 está incluída a fração por tipologia dos materiais estudados.

Tabela 2 - Relação de RCD por tipologia e atividade nos Estados Unidos.

<b>Material</b>	<b>Construção</b>	<b>Demolição</b>	<b>Total RCD</b>	<b>Fração Material (%)</b>
Concreto (Mton)	24,2	381	405,2	67,50
Madeira (Mton)	3,4	37,4	40,8	6,80
<i>Drywall</i> de gesso (Mton)	3,9	11,3	15,2	2,53
Metal (Mton)	0	4,7	4,7	0,78
Tijolo e telhas de barro (Mton)	0,3	12	12,3	2,05
Telha asfáltica (Mton)	1,2	13,9	15,1	2,52
Pavimento asfáltico (Mton)	0	107	107	17,82
<b>Total (Mton)</b>	<b>33</b>	<b>567,3</b>	<b>600,3</b>	<b>100</b>

Fonte: Adaptado de EPA (2020).

O mesmo relatório emitido pela EPA divide os materiais por destinação, onde 143,7 milhões de toneladas (Mton) de RCD foram dispostos em aterro e 456,6 Mton foram direcionadas para reciclagem, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados de destino do RCD, em 2020, nos Estados Unidos.

<b>Material</b>	<b>Aterro</b>	<b>Reciclagem</b>
Concreto (Mton)	71,2	334
Madeira (Mton)	29,6	11,2
<i>Drywall</i> de gesso (Mton)	13,2	2,1
Metal (Mton)	1,1	3,6
Tijolo e telhas de barro (Mton)	10,8	1,5
Telha asfáltica (Mton)	13	2,1
Pavimento asfáltico (Mton)	4,8	102,1
<b>Total (Mton)</b>	<b>143,7</b>	<b>456,6</b>

Fonte: Adaptado de EPA (2020).

Laadila (2021), em um estudo realizado em Quebec, no Canadá, aponta que cerca de 70% do RCD são reaproveitados a partir da separação na origem ou enviados para um centro de triagem. As porcentagens, por tipologia, são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - RCD destinado para reciclagem no Quebec - Canadá.

<b>Material</b>	<b>RCD em % para reciclagem</b>
Madeira	55,9
Concreto	21,8
Metal	6,6
Gesso	1,2
Outros	14,5

Fonte: Adaptado de Laadila (2021).

Na Europa, a Comissão Europeia deu prioridade ao RCD, estabelecendo uma diretiva quadro-resíduos (DQA 2008/98/EC), em que apresentou a meta de recuperação para atingir 70% de reciclagem do RCD até 2020 (Taboada *et al.*, 2020). Segundo dados divulgados pela Eurostat (2023), 27 países da União Europeia (UE) geraram, em 2020, um total de 305 Mton de RCD, em que Alemanha, França e Itália foram os países com os maiores valores de produção, com 89 Mton, 61 Mton, e 46 Mton, respectivamente. Neste cálculo ficou excluído o Reino Unido, por não possuir dados de 2020, porém em 2018 o país produziu 68 Mton de RCD. Nestes dados foram contabilizados apenas resíduos minerais provenientes de construção e demolição, não inclusos solos. Quanto à produção per capita de RCD, Zhang *et al.* (2022), define este com um nível médio de 0,7 ton/capita. Quanto ao cumprimento da meta estabelecida, em um estudo realizado por Antunes *et al.* (2025), a UE submeteu cerca de 40% do RCD a reciclagem, com a informação de vários países da EU relatando a recuperação de 70% do resíduo, porém a autora aponta a contabilização das informações como inconsistentes, sendo necessária uma avaliação mais precisa dos dados de reciclagem para análise da meta estabelecida pela Comissão Europeia.

Na Austrália, conforme publicado pela *National Waste Report* (2018), a produção foi de 20,4 milhões de toneladas/ano, com uma estimativa de 0,84 toneladas *per capita*. O mesmo relatório aponta um crescimento de 18% na produção do RCD, porém um aumento de 61% para 72% na taxa de reciclagem do material, que é utilizado habitualmente em pavimentação de rodovias e em construções como agregado reciclado.

### 3.2.3 Gestão do RCD

Ressaltando a importância na gestão de resíduos, a valorização do RCD tem seu início na origem, onde o material pode ser segregado com mais facilidade (ABRECON, 2020). O foco do setor de construção na gestão de resíduos aumentou devido às preocupações ambientais, paralelamente à maior conscientização e implementação de regulamentações (Ayalp, 2024). Ma e Hao (2024) afirmam que as melhorias trazidas pelas estratégias convencionais de gerenciamento de resíduos de RCD não minimizam de maneira expressiva os impactos causados por estes resíduos, fazendo assim, com que a indústria da construção se interesse por novas estratégias de gestão.

Soto-Paz e colaboradores (2023) realizaram uma análise comparativa entre países emergentes e desenvolvidos, e apontam que os países emergentes asiáticos, como a China, Malásia, Índia e Indonésia, possuem maiores avanços relacionados à gestão e reutilização do RCD. Já na América do Sul e África os avanços estão relacionados à regulamentação. Ma (2024) complementa que a gestão governamental impacta diretamente no gerenciamento dos resíduos, quando aplicadas penalidades e incentivos, reduzindo, assim, o destino ilegal destes.

Kabirifar *et al.* (2020) concluíram que existe uma relação direta entre o tamanho da população e as atividades relacionadas com a economia, com a quantidade de RCD gerados, uma vez que os principais geradores a nível mundial estão entre as grandes economias. Para Santos e Tubino (2021), a geração de RCD varia muito entre os países, dependendo diretamente das condições econômicas favoráveis à construção civil, do clima, estágio de construção, além do grau de incentivo à construção civil.

### 3.2.4 Valorização do RCD

Marín-Cortés *et al.* (2024) citam que o RCD é subvalorizado devido à falta de conhecimento a respeito de suas propriedades químicas e mineralógicas. Considerando a magnitude do impacto da construção civil, torna-se imprescindível incluir esta grande indústria no processo de sustentabilidade. Por meio da simbiose industrial, é possível verificar impactos positivos alcançados pela valorização dos resíduos. Também deve-se ressaltar a energia utilizada na produção dos insumos e na execução das obras de construção civil. Segundo Wang (2024), a construção civil é responsável por cerca de 37% das emissões globais de gases de efeito estufa, relacionados ao consumo de energia, com uso final de energia representados por mais de 33% a nível global.

John (2000) retrata o problema gerado pelo volume de resíduos e afirma que o caminho para uma construção civil sustentável está embasado em leis e resoluções estipuladas pelas políticas públicas. O atraso no desenvolvimento de políticas públicas específicas para resíduos gerados pelo setor da construção civil tem forte impacto na valorização do RCD.

Para Geus e Garcias (2016), em quase todas as cidades, as quantidades geradas de RCD superam em volume e massa (peso) os demais tipos de resíduos urbanos. Por este motivo, a preocupação com a destinação adequada destes resíduos tem sido o foco de atenção das autoridades públicas.

Neste sentido, a valorização de resíduos da construção civil, torna-se a melhor alternativa para conservação do meio ambiente, promovendo a redução do consumo de recursos naturais e de custos para disposição em aterros industriais. Com isto, reduz-se também o número de depósitos clandestinos de entulho, gerando uma significativa diminuição no consumo de energia na produção e na aplicação de materiais de construção civil (Lopes *et al.*, 2023).

Segundo Ding (2024), a abordagem mais difundida na reciclagem do RCD é a fragmentação e beneficiamento, transformando-o em novos materiais ou produtos. Entretanto, Ma (2024) aponta que geralmente, os produtos secundários reciclados do RCD são normalmente utilizados como base para pavimentos rodoviários e terraplanagens, diminuindo significativamente o valor técnico e econômico deste subproduto, sem resolver efetivamente o problema deste resíduo.

Segundo Hafez (2020), a nível mundial mais de 30 bilhões de toneladas de agregados naturais são consumidos anualmente apenas para a produção de concreto. Hosseinnezhad e colaboradores (2023) apontam que o concreto é o material mais utilizado na construção civil com um consumo anual, que ultrapassa 12 bilhões de toneladas em todo o mundo, com volumes de 60% a 75% de agregado. Deste volume, 60% a 67% correspondem aos agregados graúdos e 33% a 40% aos agregados miúdos.

Considerando estes dados, uma das possibilidades de valorização do RCD é a utilização deste como agregado reciclado. Nesta lógica, Brasileiro e Matos (2015), apontam a utilização do RCD como agregado para confecção de tijolos, blocos pré-moldados, meio-fio, calçadas, argamassa de revestimento, além de camadas de base e sub-base, pavimentos, entre outros.

Em um estudo feito pela ABRECON (2020), no Brasil até 2019 existiam mais de 300 usinas de reciclagem de RCD. Porém a capacidade de produção das usinas de reciclagem de RCD é inferior à de agregados naturais, não ultrapassando 50 Mton/ano, com a necessidade de grandes áreas de estoque, tanto para armazenamento do RCD recebido, quanto para obtenção

de agregados reciclados. O RCD geralmente recebido nas usinas de reciclagem é o resíduo misto, composto por materiais cimentícios diversos (concretos e argamassas) e cerâmica vermelha, podendo conter teores variados de solos argilosos.

Devido à alta quantidade, em nível global, de agregados naturais consumidos e o alto volume de RCD gerado, este trabalho utilizou o resíduo na condição de agregado reciclado, classificando sua fração cerâmica composta por concreto, argamassa, tijolos, telhas e revestimentos cerâmicos, aplicando a sistemática CPQvA.

Para fazer uso do agregado reciclado, primeiramente é preciso conhecer detalhadamente as principais características do mineral de fonte primária normalmente utilizado. O agregado natural (AN), por exemplo, é composto por areia e pedregulhos, que possuem massa específica aparente de 1520 e 1680 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. A areia de sílica é muito utilizada como agregado miúdo, sendo as rochas carbonáticas o material mais utilizado para agregados graúdos, também conhecidos como britados (Mehta; Monteiro, 2008). Para Frazão (2002), os agregados naturais são encontrados na natureza, e podem ser utilizados na granulometria como encontrada ou fragmentados mecanicamente.

As propriedades do concreto, como porosidade, distribuição granulométrica, absorção de água, trabalhabilidade, forma e textura superficial dos grãos entre outras, são influenciadas pelas características do agregado (Neto *et al.*, 2005). Para a produção de concretos à base de cimento Portland, a NBR 7211 (2022), especifica os requisitos para agregados miúdos e graúdos, estabelecendo limites de distribuição granulométrica. A Tabela 5 relaciona os agregados de origem natural quanto a classificação conforme a NBR 7211 (2022), classificando-os em miúdos e graúdos.

Tabela 5 - Classificação dos agregados em relação a granulometria.

<b>Classificação</b>	<b>Abertura mínima</b>	<b>Abertura máxima</b>
Agregado miúdo	150 µm	4,75 mm
Agregado graúdo	4,75 mm	75 mm

Fonte: NBR 7211 (2022).

O agregado miúdo comumente utilizado é proveniente de leito de rio (Azevedo *et al.*, 2020). Já os agregados graúdos partem da cominuição de rochas (Bauer, 2016).

O agregado reciclado é definido pela NBR 15116 (2021), como material granular proveniente do beneficiamento da fração cerâmica de resíduos de construção, sendo este

subdividido em agregado reciclado cimentício, predominante de materiais cimentícios diversos; agregado reciclado de concreto, predominantemente resíduos de concreto; e agregado reciclado misto, composto por materiais cimentícios e materiais cerâmicos.

No que diz respeito à quantidade, a ABRECON (2020) estima uma produção de agregados reciclados comercializada pelas usinas de reciclagem na região sul do Brasil, em 1.058.400 de toneladas cúbicas ao ano.

Quanto às normas brasileiras disponíveis para o manuseio e utilização do RCD, estas estão especificadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Normas técnicas disponíveis para manuseio e utilização do RCD.

<b>NBR</b>	<b>Descrição</b>
15112:2004	Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação
15113:2004	Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação
15114:2004	Resíduos sólidos da Construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação
15115:2004	Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos
15116:2021	Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

### 3.2.5 Tipologia do RCD

Quanto à tipologia do RCD, para produção de agregados reciclados, esta dependerá da tecnologia utilizada na construção, aliado a localização geográfica do resíduo. O estudo engloba a fração cerâmica do RCD, em que materiais cerâmicos são normalmente compostos por combinações de metais com elementos não metálicos, principalmente óxidos, nitretos e carbonetos, sendo tipicamente materiais isolantes térmicos e elétricos (Padilha, 2007).

Lederer e colaboradores (2020) separam os principais componentes do RCD na Áustria em concreto, alvenaria (incluindo argamassa e gesso), asfalto, areia e brita. Já Aslam,

Huang e Cui (2020) citam os principais componentes do RCD na China, como concreto, tijolos, argamassa, madeira, embalagens, aço e outros materiais de construção.

Em um estudo feito em Hong Kong, Bao e Lu (2023), citam a tipologia do RCD divulgada pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA (USEPA - *United States Environmental Protect Agency*), formada por concreto, gesso, tijolos e telhas de barro, concreto asfáltico, telhas asfálticas, produtos de madeira e aço. Na Índia, em demolições de estruturas antigas, os principais componentes encontrados são: solos, cascalho e areia, com uma proporção de 28% de tijolos e 30% de alvenaria, 30% de concretos, 5% de metal, 3% de madeira e 4% de outros materiais (Nandal *et al.*, 2022). Para Ittyeipe (2023), na Índia, apesar das diferentes estruturas onde há uma variação na composição do concreto e da alvenaria, tais materiais juntamente com a argamassa, constituem mais de 95% dos materiais de construção, com maior percentual para a fração cerâmica no RCD.

Face ao exposto, torna-se possível observar a semelhança da tipologia do RCD a nível mundial, possibilitando a realização de um estudo de valorização a partir da sistemática multicritérios CPQvA, integrada com a metodologia GUT, com base em informações de diferentes países. Assim, nesta pesquisa de dissertação foram estabelecidas algumas frações cerâmicas do resíduo de construção e demolição (RCD): (i) composta por materiais de cerâmica vermelha (CV), sendo estes, não cimentícios; (ii) materiais cimentícios (CI); (iii) concretos (CO) com ou sem função estrutural e (iv) materiais mistos (MI), uma mistura de dois ou três dos materiais citados anteriormente.

(i) Cerâmica Vermelha (CV): As cerâmicas vermelhas têm como principal característica sua coloração avermelhada, com diversas aplicações no ramo da construção civil. Os exemplos mais comuns são tijolos e telhas, em que sua qualidade final vai depender da qualidade da matéria-prima aplicada (Bauer, 2016). Esses materiais tem como principal constituinte a argila, que, segundo Yazigi (2013), são moldadas por extrusão e queimadas em uma temperatura específica para cada utilização final. As cerâmicas vermelhas são constituídas principalmente de silicatos hidratados de alumínio, sendo que sua cor avermelhada é proveniente do óxido de ferro (Santos, 1992).

Para Kazmierczak (2007), uma formulação à base de argila submetida a processos de secagem lenta e exposta a altas temperaturas dá origem às cerâmicas vermelhas. Sua coloração tem origem em argilas sedimentares, com significativos teores de ferro em sua composição. O autor ainda aponta que a presença de determinados elementos, como silicatos e

fosfatos, que podem aumentar a resistência mecânica da cerâmica e sais solúveis que propiciam o aparecimento de eflorescências nos componentes cerâmicos.

(ii) Materiais cimentícios (CI): A base dos materiais cimentícios é o cimento Portland, utilizado na fabricação de argamassas e concreto. Este é obtido a partir do clínquer, constituído essencialmente de silicatos hidráulicos de cálcio, que possui propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação da água (Yazigi, 2013; Leonhardt; Monnig, 2008).

Para este trabalho a nomenclatura será baseada na NBR 15116 (2021), no qual considera materiais cimentícios os resíduos provenientes de materiais cimentícios diversos, neste caso, as argamassas, e para concreto os materiais compostos predominantemente de concreto.

A argamassa é definida pela NBR 7200 (1998), como mistura(s) homogênea(s) de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento. A aplicação das argamassas determina o tipo de aglomerante ou a mistura de tipos diferentes de aglomerantes a ser(em) utilizado(s) (Fiorito, 1994).

As argamassas podem se diferenciar em argamassa de assentamento e argamassa de revestimento. Para Cavalheiro (1995), a função da argamassa de assentamento é unir os blocos da alvenaria, para garantir uma estrutura monolítica, mantendo-os separados, no intuito de absorver deformações e compensar irregularidades da forma dos blocos. Já a argamassa de revestimento tem a finalidade de regularizar superfícies, dar acabamento e proteção da estrutura revestida (Yazigi, 2013).

(iii) Concreto (CO): É composto de elementos estruturais e artefatos de concreto sem a função estrutural. Possui em sua composição argamassa, agregado graúdo e pode conter aditivos diversos, a depender de sua solicitação (Carvalho; Filho, 2010)

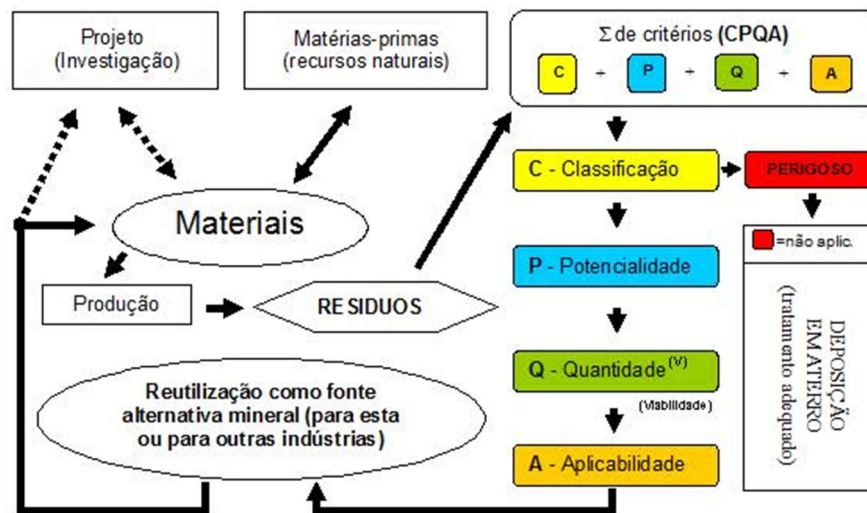
O *America's Cement Manufacturers* (2023), indica que as características de esmagamento do concreto endurecido são semelhantes às da rocha natural. Os agregados de concreto reciclado contêm não apenas os agregados originais, mas também a pasta de cimento hidratada, reduzindo a densidade específica e aumentando sua porosidade. Das tecnologias de tratamento de minérios que são aplicadas na reciclagem de RCD não existe qualquer alteração da estrutura interna do mineral (Chaves, 1996).

(iv): Materiais mistos (MI): Conforme a NBR 15116 (2021), os materiais mistos são uma mistura não quantificada dos materiais em estudo, podendo conter cerâmica vermelha, materiais cimentícios e/ou concreto.

### 3.3 SISTEMÁTICA CPQvA

Baseado na economia circular, o desenvolvimento sustentável tem sido estudado ao longo dos anos, sendo uma das ferramentas viáveis à valorização dos resíduos gerados, através de uma decisão multicritérios, denominada CPQvA, desenvolvida por Raupp-Pereira, em 2006 (Figura 6). A sistemática é dividida em quatro critérios: classificação (C), enquadramento legislativo quanto à periculosidade; potencialidade (P), definição do potencial do resíduo; quantidade e viabilidade (Qv), quantidade disponível na fonte geradora; e aplicabilidade (A), possíveis aplicações para o resíduo a ser avaliado. Nesta pesquisa, esta foi adotada como estratégia metodológica fundamental para a valorização do RCD.

Figura 6 - Representação da sistemática multicritérios CPQvA.



Fonte: Raupp-Pereira (2006).

Vilaça (2020) utilizou desta sistemática para a valorização de resíduos da mineração de ferro do quadrilátero ferrífero. Da mesma forma, Monsani (2022) aplicou a sistemática para o desenvolvimento de argamassas cimentícias a partir da valorização de minerais contidos em rejeitos de carvão catarinense. Faraco (2022) fez uso da mesma abordagem na valorização de frações residuais geradas no beneficiamento de carvão mineral da região sul de Santa Catarina.

Em 2017, Oliveira elaborou um guia para a tomada de decisões considerando a sistemática CPQvA, com implantação de um questionário contendo 12 perguntas, determinando pesos arbitrários para cada pergunta, conforme apresenta a Tabela 6.

Oliveira (2017) também definiu o índice de criticidade (Ic) para cada critério, determinado pela Equação 1, sendo esta a razão entre o somatório do produto dos pesos dos questionamentos ( $q_n$ ) e o valor atribuído às respostas ( $R_n$ ), pelo somatório dos pesos dos questionamentos de cada critério.

$$Ic = \frac{\sum(q_n \times R_n)}{\sum q} \quad (01)$$

No guia elaborado por Oliveira (2017) são atribuídos valores de respostas aos questionamentos, conforme o nível de dificuldade, determinados pelo decisor, sendo 0 para baixa, 5 para média e 10 para alto nível de dificuldade, conforme apresentado na Tabela 6.

Após o cálculo de Ic de cada critério, é obtido o Ic total e avaliado o nível de dificuldade da análise, a partir da nota máxima 10 dividida em três níveis, sendo de 0 a 3,3 fácil, 3,4 a 6,6 médio, e 6,7 a 10 difícil. A métrica de nível de dificuldade utilizando o Ic total aplicado por Oliveira (2017) será substituída no presente trabalho por uma listagem baseada na metodologia GUT explicada a seguir.

Tabela 6 - Questionamentos que compõem a sistemática CPQvA adaptado para avaliação do RCD, de acordo com cada critério e seus respectivos pesos.

<b>Critério</b>	<b>Questionamento (q)</b>	<b>Pesos</b>
C	q1 Há legislação que restrinja a valorização do RCD?	10
	q2 Qual a dificuldade em estabelecer uma amostra representativa?	8
	q3 Qual a classe ambiental – legislativa do RCD	10
Somatório das questões da Classificação ( $\Sigma qC$ )		28
P	q4 A composição do RCD classificado restringe a potencialidade das aplicações?	10
Somatório das questões da Potencialidade ( $\Sigma qP$ )		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 a geradora do RCD?	6
	q8 Há necessidade de adequação do gerenciamento para a receptora do RCD?	6
	q9 Há legislação que regulamenta o produto ou restrinja o uso do RCD?	10
	q10 A quantidade de produção do RCD atende a necessidade do(s) produto(s) candidato(s)?	10
q11 Há mercado consumidor para a valorização do RCD conforme o produto(s) candidato(s)?	6	
Somatório das questões da Quantidade e viabilidade ( $\Sigma qQv$ )		52
A	q12 O desempenho do produto(s) atende às exigências de mercado?	10
Somatório das questões da Aplicabilidade ( $\Sigma qA$ )		10

Fonte: Adaptado de Oliveira (2017).

### 3.4 MÉTODO GUT

O método GUT permite elaborar um diagnóstico do problema a ser estudado, sendo que a análise de decisão é um processo sistemático baseado em um padrão de raciocínio, onde o processo de tomada de decisões torna-se menos tendencioso (Kepner; Tregoe, 1986). O método é utilizado para obter, priorizar e avaliar informações. Neste estudo, a metodologia será adaptada para a sistemática CPQvA, de forma a responder os questionamentos propostos por Oliveira (2017) por meio de uma escala pré-determinada (apresentada na Tabela 6), para

posterior geração de nível de dificuldade de valorização do resíduo em estudo, para cada produto potencial (PP).

A abordagem se dá como o processo de pensamento aplicado para coletar, organizar, analisar, confirmar e comunicar dados e informações para solucionar problemas e questões de forma prática, imparcial e autorreflexiva, sendo determinante para ações eficazes e eficientes (Markopoulos *et al.*, 2022).

Esta metodologia é muito utilizada na inspeção predial, onde é possível colocar em ordem de prioridade a gravidade, urgência e tendência das manifestações patológicas de uma edificação. Utilizada como ferramenta de gerenciamento, também conhecida como Matriz de Prioridades, esta metodologia auxilia na análise dos problemas e tomadas de decisões (Monteiro *et al.*, 2020). É utilizada sempre que for necessário priorizar ações dentro de um conjunto de alternativas e com a matriz é possível classificar, em ordem de prioridade, os eventos conforme cada nível de ocorrência (Costa *et al.*, 2017).

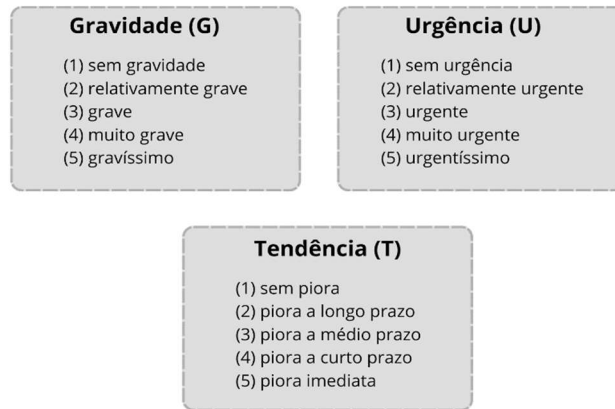
Markopoulos *et al.* (2022) aplicou o método para avaliar o desempenho dos funcionários de uma determinada empresa, categorizadas em cinco áreas: compreensão da situação, causa do desvio, seleção de alternativas, redução de riscos e aumento de chances.

Sembiring (2024) analisou alguns estudos de casos com o uso de Kepner-Tregoe onde o método conseguiu identificar com eficácia a possível causa do atraso em projetos e identificou a possível causa do aumento do estoque de peças ociosas de uma fábrica, afirmando que o método é usado para determinar o problema em questão.

Manipura (2025) fez uso do método para uma produção mais viável de composto a partir de resíduos sólidos urbanos no Sri Lanka, aplicando um questionário específico em 22 estações de compostagem, baseados em quatro parâmetros, Índice Geral de Gestão de Instalações, Índice de Gestão do Processo de Compostagem, Índice de Qualidade do Composto e Índice de Recuperação de Custos, para assim definir a prioridade no planejamento de ações a serem tomadas.

O método analisa três aspectos: gravidade, urgência e tendência, sendo que em cada aspecto, deve-se atribuir uma pontuação de 1 a 5 de acordo com a questão analisada (Cevada; Damy-Benedetty, 2021). Um exemplo da aplicação é demonstrado na Figura 7, onde Simões e Fornari (2023), aplicaram na gestão de uma usina de reciclagem.

Figura 7 - Exemplo dos aspectos do método GUT aplicado na gestão de uma usina de reciclagem.



Fonte: Adaptado de Simões e Fornari (2023).

Simões e Fornari (2023) denominam gravidade onde o quão ameaçador o problema pode se tornar, urgência está relacionado com o tempo, onde o problema não resolvido pode se agravar, e tendência remete ao futuro próximo, à possibilidade de o problema piorar caso não tenha uma ação.

A priorização, enfim, é a multiplicação entre os três valores aplicados (variando de 1 a 5) de cada item (gravidade, urgência e tendência) (Cevada; Damy-Benedetty, 2021).

A relevância deste método para o estudo, tende a minimizar subjetividades, gerando uma listagem conforme o nível de dificuldade na valorização de resíduos auxiliando na tomada de decisões, aliada a sistemática CPQvA, tornando a análise mais objetiva.

### 3.5 CASO DE ESTUDO: TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

Com o objetivo de examinar potenciais aplicações em materiais de construção sustentáveis, para aplicação do RCD estudado, selecionou-se o material tijolo de solo-cimento, também conhecido como tijolo ecológico.

A técnica do solo-cimento aplicada em tijolos é utilizada de misturas de solo e cimento, compactados ou prensados na umidade ótima. Devido às pressões elevadas de prensagem, o consumo de cimento é baixo, da ordem de 5%, e o tijolo obtido é de excelente qualidade (ABCP, 1984). Cabe ressaltar a ausência de tratamento térmico no processo de produção dos tijolos, o que o torna ainda mais atrativo, considerando a sustentabilidade, para o uso do RCD. A fabricação tradicional de blocos cerâmicos depende da queima de argila em

fornos a altas temperaturas, muitas vezes alimentados por combustíveis fósseis não renováveis, como carvão ou gás natural (Souza, 2024).

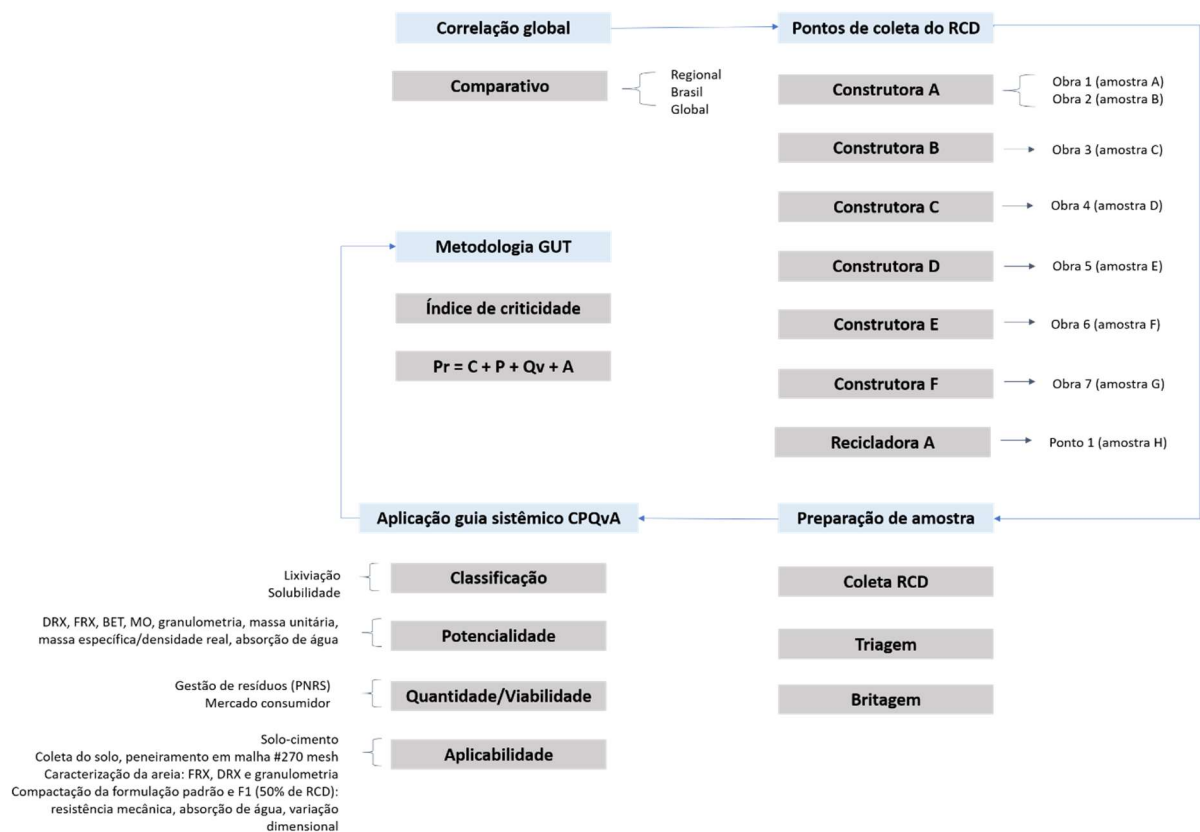
Após 25 anos de muita pesquisa, estudos e testes, o tijolo ecológico provou ser muito mais resistente, seguro e prático do que o tijolo comum (Eco Produção, 2022). Para Grande (2003), a evolução na fabricação de blocos e tijolos de solo-cimento, deu-se devido a criação de prensas para sua produção a partir de 1961. Grande (2003) ainda cita a diferença entre o tijolo cozido convencional com o bloco prensado, onde o tijolo convencional, durante o tratamento térmico sofre uma redução na área específica das partículas, ocasionando redução do volume aparente bem como aumento da resistência mecânica. Porém a qualidade do tijolo prensado é dada em função do empacotamento dos grãos do solo, gerando um material com baixa porosidade e alta densidade.

A NBR 10833 (2012) determina que o solo a ser utilizado seja 100% passante em peneira 4,75 mm e de 10% a 50% passante em peneira 75  $\mu$ m, sendo estas características do resíduo em estudo, o que indica a potencialidade da aplicação.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo está apresentado o procedimento experimental desenvolvido durante a pesquisa de dissertação de mestrado. Inicialmente foi realizado um diagnóstico para verificação das quantidades de RCD obtidas na região sul catarinense e em outras regiões do mundo (seção 4.1). Desta forma, foram selecionados os materiais de estudo (seção 4.2). Para a caracterização dos RCD coletados, foi aplicada a sistemática multicritério CPQvA (seção 4.3), composta pelos critérios Classificação (seção 4.3.1.), Potencialidade (seção 4.3.2), Quantidade/Viabilidade (seção 4.3.3) e Aplicabilidade (seção 4.3.4). Para finalizar, foi feita também a análise comparativa utilizando o método GUT, detalhado na seção 4.4. Este fluxo de atividade é apresentado resumidamente na Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma das atividades desenvolvidas.



Fonte: Autora (2026).

### 4.1 DIAGNÓSTICO INFORMATIVO GLOBAL

Com base em artigos científicos publicados entre 2013 e 2025, estruturou-se o procedimento experimental desta pesquisa a partir do diagnóstico, baseado nas estimativas já

mencionadas, de uma possível tipologia global de RCD.

Em uma busca a nível de materiais de construção por tipologia com características comparáveis, entre Brasil, Estados Unidos da América (EUA), Portugal, União Europeia (UE), Índia e China, a Tabela 7 mostra de forma comparativa, em porcentagem, os principais materiais que compõem o RCD. Contudo, salienta-se que nos dados divulgados pelos EUA, está inserida a quantidade de solo na composição, diferenciando dos demais.

Tabela 7 - Tipologia do RCD do Brasil, Estados Unidos da América (EUA), Portugal, União Europeia (UE), Índia e China, dado em (%).

<b>Tipologia</b>	<b>Brasil (SP)</b>	<b>EUA</b>	<b>Portugal</b>	<b>UE</b>	<b>Índia</b>	<b>China</b>
Concreto	14	67,50	85,6-99,0	Nd	30	71,20
Argamassa	38	Nd	nd	Nd	nd	nd
Cerâmica vermelha	13	2,05	0,7-13,5	Nd	28	28,46
Gesso	3	2,53	nd	0,2 - 0,4	nd	Nd
Concreto e alvenaria	nd	Nd	nd	40 – 84	30	Nd
Outros	32	27,92	0,1-0,8	10,3 - 81	12	0,34
Fonte	Paz (2020)	EPA (2020)	Rodrigues <i>et al.</i> (2013)	Marques (2017)	Nandal <i>et al.</i> (2022)	Zhu <i>et al.</i> (2012)

\*nd – não definido.

A Tabela 7 mostra a predominância de frações cerâmicas, como concreto, argamassa e cerâmica vermelha, no RCD, motivo pelo qual o material é comumente utilizado como agregado em sua reciclagem. Materiais cerâmicos são inorgânicos, isolantes e inertes, a depender de sua condição, o que ajuda no seu uso como fração de preenchimento em compostos cimentícios. Antunes *et al.* (2025) citam tijolos, telhas, materiais cerâmicos e concretos como os resíduos frequentemente gerados na indústria da construção civil.

Face ao exposto, considerando o somatório da fração cerâmica, em porcentagens entre 62 e 99,66 (em média), esta é a fração com a maior abrangência global. Desta forma este trabalho foi embasado nesta tipologia do resíduo de construção e demolição. Na Austrália, os principais resíduos de RCD inclui materiais, como concreto, tijolos e entulho (Governo Australiano, 2024)

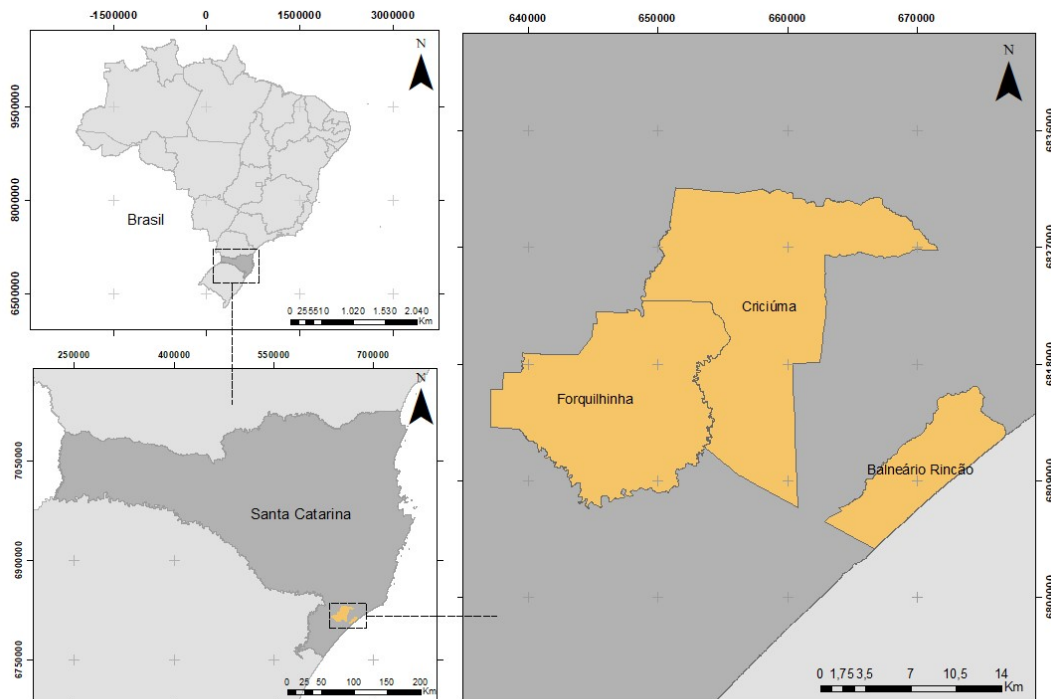
O diagnóstico seguiu com a pesquisa dos materiais constituintes do resíduo, possibilitando melhor entendimento da tipologia para sua valorização. Para a pesquisa foi necessário identificar as frações cerâmicas a serem estudadas, como sendo cerâmica vermelha,

concreto, argamassa ou material cimentício e materiais mistos (mistura dos demais materiais citados em diferentes proporções). A composição do agregado natural também foi coletada para a obtenção do diagnóstico.

#### 4.2 COLETA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para a coleta das amostras, foi realizada uma solicitação em um grupo formado por engenheiros civis da região, no qual sete engenheiros disponibilizaram acesso a oito pontos para coleta do RCD, distribuídos entre Criciúma, Balneário Rincão e Forquilha, em um raio máximo de 22 quilômetros de distância do centro de Criciúma (cidade polo da região sul catarinense), conforme apontado na Figura 9.

Figura 9 - Localização dos pontos de coleta das amostras, destacando as cidades de Criciúma, Forquilha e Balneário Rincão.



Fonte: Autora (2026).

As coletas foram realizadas nos meses de abril a agosto de 2024, em um montante de cerca de 25 kg cada coleta. Para identificar esses pontos de coleta, no intuito de preservar a construtora e seus clientes, foram atribuídas letras de A a H para identificação, de acordo com a origem e tipologia do RCD coletado em cada ponto, conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 - Identificação da origem dos resíduos e por tipologia das amostras coletadas.

<b>Identificação</b>	<b>Origem</b>	<b>Resíduo</b>	<b>Local</b>
A	Construção	Argamassa/cerâmica vermelha	Criciúma
B	Construção	Argamassa/cerâmica vermelha	Criciúma
C	Construção	Argamassa	Baln. Rincão
D	Construção	Argamassa	Forquilha
E	Construção	Concreto	Criciúma
F	Construção	Concreto	Forquilha
G	Demolição	Argamassa/cerâmica vermelha	Criciúma
H	Demolição	Concreto/argamassa/cerâmica vermelha	Criciúma

Fonte: Autora (2026).

No Quadro 3 foram identificados a origem do RCD quanto à construção ou demolição, a fração cerâmica coletada, bem como sua localização. Os materiais para coleta disponíveis variaram de acordo com a etapa de construção da obra, bem como os elementos construtivos que passaram por demolição. Nas obras das quais foram coletados concreto, estas haviam passado recentemente pelo processo de concretagem de elementos estruturais. Na coleta de argamassas juntamente com a cerâmica vermelha, haviam passado em processo de vedação com levantamento de paredes em alvenaria. Nas obras onde havia apenas argamassa, estas estavam passando por um processo de execução de emboço e reboco das paredes de vedação.

As amostras de RCD provenientes de obras e demolições executadas nesta região, foram utilizadas para caracterização do produto regional. Esta caracterização foi comparada aos resultados já publicados em âmbito mundial. Cabe ressaltar que a nível global comparado ao Brasil, para os materiais de construção, o gesso é amplamente utilizado, estando presente na tipologia do RCD. No entanto, no Brasil, o gesso pertence a classe B do CONAMA sendo utilizado para outras destinações, não sendo considerado neste trabalho a sua valorização como agregado reciclado.

Nos seis pontos de coleta de resíduos de construção, foram encontrados resíduos de madeiras, provenientes de formas e escoras, que já são reaproveitadas no decorrer da obra; resíduos de ferro, provenientes de armação de elementos estruturais e resíduos de plásticos e papel, resultantes do uso de insumos, como cimento, argamassa, aditivos entre outros. Tendo em vista que o montante do resíduo em estudo se trata da fração cerâmica e que as obras visitadas se encontravam em estágio de execução de estrutura, vedação e acabamento de reboco, etapas onde há uma maior produção da fração cerâmica do resíduo em estudo, foram recolhidos materiais apenas da fração cerâmica, sendo este, alvenarias, argamassas e concretos.

Quanto à coleta de resíduo de demolição, ocorreu em dois pontos: uma reforma de

residência, com demolição de parede interna, contendo argamassa de revestimento/assentamento e cerâmica vermelha; e a outra coleta foi realizada em um ponto de descarte de entulho de obra, com a presença de concreto, argamassa e cerâmica vermelha, todos de origem desconhecida.

Para esta pesquisa foi separada e estudada apenas a fração cerâmica, contemplando cerâmica vermelha, argamassas e concretos, tendo em vista que se trata do montante classe A determinado pela resolução CONAMA para o reuso como agregado reciclado. A resolução também contempla solos provenientes de terraplanagem, porém esta fração não foi utilizada neste trabalho, devido à NBR 15116 (2021) determinar que para a aplicação do resíduo como agregado reciclado para aplicação em materiais cimentícios, apenas materiais cimentícios e cerâmicas vermelhas são permitidos, classificando estes agregados em agregados reciclados de concreto, cimento e mistos, conforme já detalhado. A mesma norma sugere um limite de porcentagens de cerâmica vermelha para cada classe de agregado, sendo 0%, 10% e 40%, para agregado reciclado de concreto, cimento e misto, respectivamente.

Em um segundo momento, foi necessário preparar as amostras, em uma triagem manual, onde foram retirados resíduos não pertencentes à fração cerâmica estudada, como plásticos, papéis e demais materiais como ferros e madeiras. Na sequência, foram selecionados, por tipo de fração cerâmica de cada ponto de coleta, seguindo o exposto no Quadro 3, ou seja, cerâmica vermelha, argamassa e concreto, conforme apresentado na Figura 10, para posterior caracterização de cada tipologia separadamente.

Figura 10 - Registros fotográficos dos tipos de materiais por ponto de coleta, conforme descrição do Quadro 3.



Fonte: Autora (2026).

### 4.3 SISTEMÁTICA CPQvA

Dado início a aplicação do guia sistêmico CPQvA, elaborado por Raupp-Pereira (2006), para a tomada de decisão, no sentido de valorizar o RCD, buscou-se classificar o resíduo de construção e demolição (RCD), identificar a potencialidade, a quantidade e viabilidade do material, para determinar a aplicabilidade do RCD gerado na região sul catarinense. Sendo possível uma aplicação representativa do material de forma global considerando suas características comparáveis, seguindo o exposto no fluxograma apresentado na Figura 8.

Em cada critério do processo da sistemática CPQvA, foi calculado o Índice de Criticidade (Ic) baseado nas respostas de cada questionamento, mencionado na Tabela 6, para posterior listagem de classificação conforme o nível de dificuldade determinado pelo tomador de decisão.

#### 4.3.1 Classificação (C)

Para o enquadramento de Classificação do RCD em estudo, foi analisada a legislação vigente no país a que se refere o questionamento q1. No Brasil, é vigente a Resolução nº 307 do CONAMA (2002) que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Com uma alteração quanto à classificação do gesso, na Resolução nº 431 altera o art. 3º, no qual o gesso passa a ser um resíduo com outras destinações, descartando o seu uso como agregado reciclado.

Em seguida, baseado na coleta do resíduo, foi estudada a resposta ao questionamento q2, quanto à dificuldade em estabelecer uma amostra representativa do resíduo, considerando as etapas de obra, o número de obras existentes e a variação dos resíduos encontrados.

Realizada uma análise de Lixiviação e Solubilidade baseado em estudos já publicados, fazendo uso da NBR 10005 (2004) e NBR 10006 (2004), não havendo restrições para a valorização do RCD, foi possível classificar o RCD pela normativa NBR 10004 (2004), conforme sua indicação referente à periculosidade, respondendo ao questionamento q3 da Classificação.

Para Tam, Somro e Evangelista (2018) alguns materiais de construção podem conter substâncias nocivas à saúde e meio ambiente, por serem utilizadas juntamente com o concreto, alguns exemplos, amianto, tintas à base de chumbos, fenóis e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos.

### 4.3.2 Potencialidade (P)

O estudo da Potencialidade (P) do material foi iniciado com a sua caracterização, sendo que para utilização do material como agregado, Mehta e Monterio (2008) estabelecem massa específica, composição mineralógica e granulométrica, forma e aspecto superficial e teor de umidade, como características fundamentais.

Ressalta-se a importância desta etapa para o conhecimento do RCD em questão, no intuito de utilizar o material como fonte alternativa ao agregado natural. Considerando os resultados da caracterização, o critério de potencialidade pode indicar diversos produtos que são possíveis de serem obtidos (Oliveira, 2017).

No quesito de potencialidade, foram aplicados métodos de caracterização química, física, mineralógica e microestrutural dos resíduos em estudo, determinando, assim, se as suas composições restringem a potencialidade de aplicação do material, conforme questionamento q4 da Tabela 8.

Para as análises de Fluorescência de Raios-X (FRX) e Difração de Raio-X (DRX), as amostras utilizadas na identificação da Figura 10, são os resíduos de cada ponto de coleta (localidade) especificados no Quadro 3, cada tipo de material foi misturado e cominuído até estarem passantes na peneira #200 para os ensaios. A análise química da amostra estudada foi realizada por espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX) utilizando o equipamento Espectrômetro Epsilon 3<sup>XLE</sup> Panalytical, pelo método da pastilha fundida (pérola). Os óxidos dos elementos químicos, em sua forma mais estável estão presentes nas fases cristalinas, que foram identificadas por difração de Raios-X (DRX), em um difratômetro marca Siemens (BRUKER AXS, modelo D-5000) equipado com tubo de ânodo fixo de Cu ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ), operando a 40 kV e 30 mA no feixe primário e monocromador curvado de grafite no feixe secundário. A análise foi realizada no intervalo angular de 10 a 72° 2 $\theta$  em passo de 0.05°/1s utilizando-se fendas de divergência e anti-espalhamento de 1° e 0,6 mm no detector. A identificação das fases foi realizada com o banco de dados COD 24.

O desempenho do produto potencial, considerando a reatividade do material, pode ser afetado pela área superficial da partícula, sendo assim, em uma análise física do RCD, a superfície específica foi obtida por adsorção de gás acoplado com a teoria de Brunauer, Emmett e Teller (BET), equipamento modelo NOVA 1200e, fabricado pela Quantachrome Instruments. As amostras passaram por um processo de degaseificação para eliminar possíveis obstruções ou umidade adsorvida na superfície da partícula. Após essa etapa, foram conduzidas à condição de temperatura constante em banho com nitrogênio líquido e submetidas à pressão com

nitrogênio gasoso, no qual as moléculas de nitrogênio são adsorvidas pela superfície da partícula.

Para avaliação da morfologia do RCD, o material foi observado por microscópio óptico (Bioptika, modelo 12Mp), no intuito de obter um melhor entendimento da forma e textura da superfície das partículas.

A distribuição granulométrica da amostra foi determinada baseada nas normas NBR 17054 (2022) e NBR NM ISO 3310-1 (2010), utilizando as peneiras com aberturas entre 4,75 mm a 150  $\mu\text{m}$ . O material selecionado de cada ponto de coleta, foi fragmentado até atingir a granulometria de agregado miúdo (entre 150  $\mu\text{m}$  a 4,50 mm). A cominuição do material foi executada por moinho martelo Furlan, modelo MM Manchester, 7,5 CV, 1650 rpm, malha 5 mm. A potência do equipamento foi aprimorada conforme a dificuldade da moagem e por tipo de material, ficando entre 800 e 1100 rpm. Utilizando potências abaixo de 800 rpm, o material prendia entre os martelos e com potências acima de 1100 rpm, reduziam visivelmente a granulometria do resíduo.

Foram coletadas duas amostras de 300 g cada, pesadas na balança de marca Marte (modelo AD3300, capacidade de 0,5 g a 3310 g). As amostras passaram por secagem em estufa (Ethiktechnology, 100 L 220 v Ethik 430-4d), por 24 h, na temperatura de 100 °C. Na sequência a amostra passou por peneiramento manual, por no mínimo dois minutos em cada peneira, sendo estas de malhas de série normal definida pela NBR 17054 (2022), descritas na Tabela 8.

Tabela 8 - Conjunto de peneiras utilizadas para o ensaio de granulometria.

<b>Série normal</b>
4,75 mm
2,36 mm
1,18 mm
600 $\mu\text{m}$
300 $\mu\text{m}$
150 $\mu\text{m}$

Fonte: NBR 17054 (2022).

A determinação da massa específica aparente foi realizada segundo a NBR 16972 (2021), com adaptação devido ao volume e equipamentos disponíveis no laboratório para a análise. Foi coletado 50% a mais da quantidade de material necessário para preencher um recipiente com volume de 100  $\text{cm}^3$ . O ensaio é subdividido em três métodos, A, B e C, no qual foram aplicados os métodos A e C, que se enquadram, conforme tamanho de partículas, no material em estudo. O procedimento foi realizado três vezes em cada método, sendo utilizado

a média de cada amostra. O método A é utilizado para determinar a massa específica aparente do material compactado, em que o recipiente é preenchido até um terço e aplicado cinco golpes para adensamento. Em seguida, o recipiente é preenchido até dois terços, efetuando os mesmos golpes, finalizando com o enchimento completo, aplicação dos golpes e nivelamento do volume de amostra. Em seguida, foi aplicado o método C, para determinar a massa específica aparente do material no estado solto. Foi determinada a massa do recipiente vazio, sendo este o mesmo recipiente utilizado no método A. Em seguida, com o auxílio de colher, foi adicionado o material até acima da borda do recipiente, feito o nivelamento do RCD com uma espátula reta, e determinado a massa do recipiente cheio. Por fim, foi utilizada a Equação 02 para determinação da massa específica aparente.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (02)$$

Em que:

$\rho_{ap}$  é a massa específica aparente do agregado, em gramas por centímetros cúbicos ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$m_{ar}$  é a massa do recipiente com o agregado, expressa em gramas (g);

$m_r$  é a massa do recipiente vazio, expressa em gramas (g);

$V$  é o volume do recipiente, expresso em centímetros cúbicos ( $\text{cm}^3$ ).

Os ensaios para determinação da massa específica e a absorção de água foram adaptados da NBR 16916 (2021), quanto ao volume da amostra utilizada e equipamentos disponíveis para o estudo. Os ensaios foram realizados em duplicata, em que as amostras foram previamente secas em estufa (Ethiktechnology, 100 L 220 v Ethik 430-4d), por 24 h, na temperatura de 100 °C. Após a secagem, o material foi coberto com água onde ficou imerso por 24 h. Em seguida o material passou por um filtro de papel da marca Unfil, C40 faixa branca (filtração média com papel de 12,5 cm de diâmetro). As amostras foram espalhadas em uma bandeja, e submetidas a uma corrente de ar para assegurar uma secagem uniforme da superfície do agregado. Para assegurar a condição de saturada superfície seca (SSS), durante o processo de secagem, a amostra foi inserida em um molde tronco de cone, permanecendo no mesmo até o desmoldamento da amostra. Na condição de SSS, realizou-se sua pesagem para a verificação do valor da massa  $m_B$  a ser utilizada para cálculo conforme a norma. O material foi inserido em um becker de vidro, no qual obteve-se a massa  $m_C$  do recipiente junto da amostra. Foi acrescentada água potável a 23 °C até a proximidade da superfície, removidas as bolhas de ar e

após 1 h foi completando o volume do frasco com água potável. O frasco foi submetido a pesagem, sendo conhecido o somatório da massa do frasco, amostra e água, sendo esta a massa  $m_D$ . O material foi novamente seco em estufa por 24 h a 100 °C, sendo conhecida sua massa  $m_A$ . O volume de água adicionado ao frasco  $V_A$ , foi calculado pela equação 03, onde  $\rho_a$  é a densidade da água, considerada 1 g/cm<sup>3</sup>.

$$V_A = \frac{m_D - m_C}{\rho_A} \quad (03)$$

Para cálculo da densidade do agregado na condição seca ( $\rho_S$ ) foi utilizada a equação 04 e a densidade do agregado saturado com superfície seca ( $\rho_{SS}$ ) deu-se pela equação 05. Em seguida, foi realizado o cálculo da absorção de água ( $Abs$ ), dada pela equação 06.

$$\rho_S = \frac{m_A}{V - V_A} \quad (04)$$

$$\rho_{SS} = \frac{m_B}{V - V_A} \quad (05)$$

$$Abs = \frac{m_B - m_A}{m_A} \times 100 \quad (06)$$

Por ser um procedimento manual, suscetível a falhas, e por haver a possibilidade de comparativo entre resultados, foi utilizado a picnometria com gás hélio (Quantachrome Instruments, 120 volts, 60 Hz) para determinar e comparar a densidade do material com os resultados obtidos pelo procedimento anterior. O procedimento define a densidade real por intrusão de gás hélio, utilizando pressão entre 20 a 23 psi, temperatura de medição de 22,8 °C e célula Small.

### 4.3.3 Quantidade e viabilidade (Qv)

Para auxiliar na análise de Qv, se fez uma pesquisa inicial para estimativas quanto as quantidades de RCD geradas a nível mundial e regional. No Brasil, a ABRECON (2020) informa que a geração de resíduos de construção per capita varia de 168 a 760 kg/hab.ano, o que resulta em um valor mediano de 500 kg/hab.ano, ou 0,5 ton/hab.ano. Chen *et al*, 2021, estima que esta produção mundial de RCD ultrapasse 10 bilhões de toneladas anualmente. Neste contexto, buscou-se a informação do *World Bank Group* (WBG) (2024), que possui um banco

de dados populacional em 8,14 bilhões de pessoas no mundo, resultando em 1,22 toneladas por habitante, aproximadamente.

Na cidade de Criciúma, no ano de 2024, foram emitidos um total de 309.374,99 m<sup>2</sup> em licenças para construção. Com uma população de 214.493 (IBGE, 2022), multiplicando o número de habitantes pela quantidade média de RCD gerada no Brasil, tem-se uma quantidade estimada de 107 mil toneladas de RCD ao ano.

#### 4.3.4 Aplicabilidade (A)

A aplicabilidade do RCD em estudo foi determinada pelo desempenho do produto em relação aos requisitos exigidos pelo mercado e a sua utilização como agregado reciclado, seja ele na produção de concreto, ou na aplicação em determinados produtos, como *pavers*, tijolos, pavimentação, entre outros.

Este critério foi baseado em experimentos já utilizados e testados para potencial(is) produto(s), embasado em desempenho similar aos produtos de mercado que utilizam matéria prima primária.

Ferreira *et al.* (2021), citam que as aplicações do agregado reciclado podem ser bem diversificadas, que vão desde a camada de sub-base de pavimentação até à produção de concreto e argamassas. Santos e Tubino (2021) citam testes para a viabilidade ambiental do uso de RCD em projetos para a recuperação de solos degradados pela mineração.

O anexo A4 NBR 171001 (2023), define as tecnologias de destinação de resíduos como RU 01 e RU 02, sendo utilizadas como insumos ou matéria-prima, e a reutilização direta como produto, respectivamente. Para os casos de utilização do RCD como agregado de pavimentação, este pode ser enquadrado como RU 02. Já na sua utilização em argamassas, concretos e outros, se enquadram como RU 01.

No caso de utilização do resíduo em concretos, a presença de Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O na composição do resíduo apresentam a possibilidade de reagir com outros agregados, podendo apresentar desagregação, manifestação conhecida como álcalis. O CaO é um dos responsáveis pela expansão do concreto antes e após sua hidratação, ocasionando efeitos danosos ao produto potencial (Silva; Borges; Barañano, 2021).

Dentre as possibilidades de uso, este resíduo é forte candidato para aplicação em blocos de solo-cimento, definido pela NBR 10834 (2012), como uma mistura compactada e endurecida de solo, cimento e água. Além de ser um produto conhecido como eco bloco, por não necessitar de tratamento térmico e sua simples composição. Para aplicação em blocos de

solo-cimento, a NBR 10833 (2012) determina que o solo utilizado dever ser 100% passante em peneira de abertura 4,75 mm, e entre 10% e 50% do material passante na peneira 0,75 mm. Para a aplicação em tijolos de solo-cimento, este trabalho baseou-se nas normas disponíveis conforme mostrado no Quadro 4.

Quadro 4 - Normas para estudo de aplicação de RCD em blocos e tijolos de solo-cimento.

<b>Norma</b>	<b>Descrição</b>
8491:2012	Tijolo de solo-cimento - Requisitos
8492:2012	Tijolo de solo-cimento - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio
10833:2013	Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento
10834:2013	Bloco de solo-cimento sem função estrutural - Requisitos
10836:2013	Bloco de solo-cimento sem função estrutural - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio

Fonte: Autora (2026).

O tijolo de solo cimento é amplamente utilizado como vedação na construção civil, e teve seu uso intensificado no Brasil a partir de 1960 (CHICOLI, 2020). Segundo Portela e Amaral (2019), a alvenaria de solo-cimento dispensa revestimento, não se utiliza argamassa de assentamento, pois os blocos são encaixados. Não há uso de formas para vigas e pilares, e ainda são de fácil manuseio.

Para melhor conhecimento do processo, foi realizada uma visita a uma fábrica local, a fim de utilizar como base os métodos utilizados pelo fabricante, para uma possível comparação entre o produto obtido pelo fabricante e o testado com RCD. Inicialmente, foi coletado um montante do solo utilizado na fábrica e informações de formulação para adaptação do procedimento em laboratório, sendo estas descritas na Tabela 9.

Tabela 9 - Descrição das informações de fabricação do bloco de solo-cimento da empresa parceira local.

<b>Característica do fabricante</b>	<b>Descrição</b>
Tipo de cimento	Cimento Portland V
Pressão compactação blocos	5 toneladas
Traço formulação	1(cimento):5,5(solo)
Umidade	De 15 a 18%

Fonte: Autora (2026).

A Figura 11 ilustra um tijolo de solo-cimento coletado na empresa em que foi realizada a visita, sendo que o mesmo possui dimensões de 25x12,5x7 cm (base x largura x altura).

Figura 11 - Imagem fotográfica representativa de um tijolo de solo-cimento obtido por processamento industrial, na empresa parceira.



Fonte: Autora (2026)

Após a coleta do solo utilizado pela empresa, foi necessário obter informações de quantidade de areia e argila/silte, presentes no solo coletado para posterior substituição da areia pelo RCD. Esta separação se deu por peneiramento a úmido em malha #270, pois por definição a NBR 6502 (2022) determina que a argila é a fração com partículas de dimensões menores que 0,002 mm e silte com partículas entre 0,002 mm e 0,06 mm; e a areia com partículas maiores que 0,06 mm.

Com uma peneira #270 mesh, foi acrescentado o material coletado no fabricante do tijolo, abaixo da peneira foi colocado um recipiente metálico para coleta da fração passante

(argila). O peneiramento foi feito a úmido, ficando retido na peneira o material com granulometria de areia. Após secagem em estufa (Ethiktechnology, 100 L 220 v Ethik 430-4d), a 100 °C durante 48 h até eliminação total da água, foi realizada a pesagem para verificação da massa.

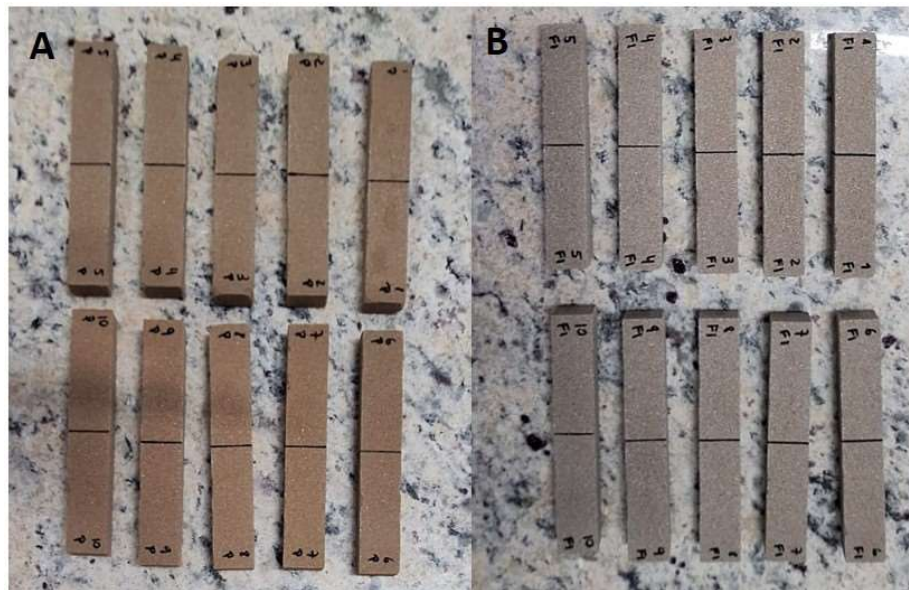
No intuito de conhecer melhor o material coletado na fábrica, o solo passou por alguns ensaios de caracterização após a separação. A areia passou por verificação da granulometria, DRX e FRX, e a argila/silte por DRX e FRX, ambos com os mesmos procedimentos realizados para o RCD para cada ensaio, já descritos anteriormente.

Com a areia do fabricante separada do restante do material, foi possível determinar a quantidade de RCD que poderia ser utilizada como substituto da areia utilizada na formulação industrial. Com esta informação, para um primeiro teste, foi fixado uma substituição de 50% da areia utilizada na formulação padrão industrial por um dos resíduos de RCD caracterizados, em aplicação como agregado reciclado (AR). Esta formulação teste foi nomeada como F1 por se tratar da primeira formulação estudada. O principal critério utilizado para selecionar o RCD utilizado na F1 foi a similaridade da granulometria deste com a areia utilizada pelo fabricante.

Na obtenção dos corpos de prova, para os ensaios de compressão simples, absorção de água e variação dimensional, foi utilizado o padrão do fabricante, com traço 1:5,5, cimento CP-V, e pressão de 5 toneladas. O tamanho do corpo de prova foi conforme estampo de prensa disponível, com dimensões de 12 cm por 2 cm. A NBR 8491 (2012) define a dimensão do tijolo onde a altura seja menor que a largura, podendo este ser maciço ou vazado. Quanto à umidade da formulação, foram testadas 12%, 10% e 8%, conforme ajuste para a trabalhabilidade na moldagem dos corpos de prova.

No ensaio de análise dimensional, compressão simples e absorção de água, foram seguidas as instruções da NBR 8492 (2012), que solicitada 10 corpos de prova para a análise dimensional (Figura 12), obtendo-se três determinações de medidas em pontos distintos, como base, largura e espessura das peças. Conforme a NBR 8491 (2012) as tolerâncias permitidas de dimensões nominais não podem ultrapassar 1 mm.

Figura 12 - Corpos de prova das formulações: a) padrão, com o solo disponibilizado pelo fabricante e b) F1, com substituição de 50% de AR da amostra C.



Fonte: Autora (2026)

No ensaio de compressão simples, foram analisados 7 corpos de prova e, para adequar a norma 8492 (2012), os mesmos foram cortados ao meio (conforme marcação ilustrada na Figura 12), sendo que as duas partes obtidas foram coladas nas superfícies maiores com uma pasta de cimento. Após o endurecimento da pasta de cimento, os corpos de prova foram imersos em água por no mínimo 6 horas. Os mesmos foram removidos da água em até 3 minutos antes da análise, enxugando-se levemente a superfície com pano umedecido. O corpo de prova foi colocado, centralizado, diretamente no prato inferior da máquina Emic DL10000, e aplicada carga uniforme a razão de 500 N/s até a ruptura. Foi utilizado o programa Tesc versão 3.04 para a coleta dos resultados. A NBR 8491 (2012) determina que o valor médio da amostra ensaiada não pode ser menor do que 2,0 MPa, nem valor individual inferior a 1,7 MPa, aos sete dias de idade. As amostras foram ensaiadas aos 29 dias de idade, devido a disponibilidade do laboratório para a execução do ensaio.

Para a absorção de água (Abs), foram utilizados 3 corpos de prova, secos em estufa da marca SolidSteel, modelo SSDcd – 180 L, 2000 W a 105 °C por 24 h, verificando-se, com uma balança UW6200H da marca Shimadzu, a massa ( $m_1$ ), em gramas do corpo de prova, após atingirem temperatura ambiente. Em seguida, os corpos de prova foram imersos em água, por 24 h, secos superficialmente com pano úmido, e verificada a massa ( $m_2$ ), dos corpos de prova saturados. O cálculo para determinar os valores individuais de absorção de água é dado pela Equação 07.

$$Abs = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (07)$$

Conforme a NBR 8491 (2012), a amostra ensaiada não pode apresentar média de valor de absorção de água maior que 20% e valores individuais de 22% aos 7 dias de idade.

#### 4.4 MÉTODO GUT

Para a aplicação do método, inicialmente foram definidos os parâmetros a serem analisados neste estudo, substituindo gravidade, urgência e tendência, por aqueles da sistemática CPQvA (apresentados na Tabela 6), atribuindo uma nota para cada questionamento baseado nos produtos potenciais. Ao final da atribuição de valores, seguindo os aspectos do método proposto por Kepner-Tregoe, fez-se necessário produzir um número representativo do resultado de toda a análise e que determinou qual o grau de prioridade daquele problema (Santos e Tubino, 2021). A obtenção deste número foi dada pelo cálculo do índice de criticidade (Ic) de cada critério, fazendo-se uma listagem em ordem crescente de prioridade (Pr), em relação ao nível de dificuldade na valorização do resíduo em estudo.

Seguindo a sistemática CPQvA, foi dado uma nota para cada questionamento pré-estabelecido por Oliveira (2017), na Tabela 6. Para obter o resultado de cada parâmetro, foi multiplicado o resultado da soma de cada critério definido, sendo que quanto maior o resultado numérico final da equação proposta, maior a dificuldade em valorizar o resíduo. Sendo assim, a substituição dos parâmetros de GUT para CPQvA, seguiram conforme apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 - Cálculo da ordem de prioridades (Pr) com adequação do método GUT para o aprimoramento da sistemática CPQvA.

<b>Método/Sistemática</b>	<b>Fórmula</b>
GUT	$P_r = G + U + T$
CPQvA	$P_r = C + P + Q_v + A$

Fonte: Adaptado de Knapp e Oliván (2021).

Para Costa *et al.* (2017), essa ferramenta pode ser utilizada em diversas situações como auxílio para a tomada de decisão, sendo aplicada muitas vezes como instrumento complementar às outras ferramentas da gestão da qualidade.

Sendo assim, ao invés de definirmos a classificação final do resíduo em fácil, moderado e difícil, obteve-se uma listagem dos produtos em potencial que podem ser aplicados, em ordem de dificuldade, conforme a pontuação obtida no cálculo de prioridades (Pr), tendo seu topo, ou sua maior pontuação, a maior dificuldade na classificação da sistemática CPQvA.

Para além do tijolo de solo cimento (PP1), selecionado para o estudo aprofundado, por se tratar de um tijolo ecológico, para aplicação do método GUT, fez necessário apontar outros produtos potenciais para a listagem de prioridades, a partir de levantamento bibliográfico exposto no Quadro 6. Para estes produtos potenciais, o agregado reciclado foi obtido a partir da casca cerâmica.

Quadro 6 - Produtos potenciais (PP) da literatura utilizados na listagem da metodologia GUT para aprimoramento da sistemática CPQvA.

<b>Identificação</b>	<b>Produto potencial</b>	<b>Referências</b>
PP2	Base cimentícia (argamassa)	Ferreira (2017)
PP3	Concreto sem função estrutural	Frotté <i>et al</i> (2017)
PP4	Concreto com função estrutural	Lima <i>et al</i> (2019)
PP5	Geopolímero	Grigoletto (2023)

Fonte: Autora (2026).

Ferreira (2017), estudou os efeitos da incorporação de areia reciclada proveniente de RCD em argamassas de revestimentos (PP2). O uso de AR na argamassa apresentou uma melhora no desempenho quanto a resistência a compressão e tração na flexão em incorporações acima de 50% de substituição do AN. O autor também aponta o ganho na rigidez, porém uma maior absorção de água devido a maior quantidade de poros do AR, também apresentou um aumento nas fissuras da argamassa em seu estado endurecido, devido a presença de finos.

Frotté *et al* (2017), realizou estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto (PP3) com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado de RCD. Foi realizada a análise de substituição em 0%, 25% e 50%, e apontou que o aumento do teor de substituição de agregado natural por agregado reciclado levou a uma diminuição nas resistências à compressão e tração, na trabalhabilidade, da massa específica, do módulo de elasticidade do concreto, bem como a um aumento da absorção e do índice de vazios.

Lima *et al* (2019), realizou estudo experimental de vigas de concreto armado (PP4) com agregado de RCD. Os resultados das substituições apresentaram ligeira inferioridade na

resistência ao esforço cortante quando comparadas à viga referência. Pela redução de desempenho das vigas de RCD serem pequenas e as cargas de ruptura alcançadas por todas as vigas serem próximas entre si, o trabalho concluiu que o uso de agregados reciclados de RCD nesses elementos estruturais é tecnicamente viável.

Grigolet (2023), analisou o comportamento de resíduos de construção e demolição em materiais álcali-ativados (PP5). Fazendo uso de pasta com pó de tijolos e pó de cimentícios juntamente com pó de tijolos, o autor comprovou a viabilidade da substituição.

Após o cálculo de  $I_c$  de cada critério para cada produto potencial, foi aplicada a adaptação do método GUT proposto e, posteriormente, estabelecida uma ordem de prioridade para a valorização do resíduo.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos com o diagnóstico global para quantificação do RCD (seção 5.1). Em seguida, os questionamentos sistêmicos CPQvA são apresentados na seção 5.2, separados pelos critérios de Classificação (seção 5.2.1), Potencialidade (seção 5.2.2), Quantidade/Viabilidade (seção 5.2.3), Aplicabilidade (seção 5.2.4) e determinação do índice de criticidade (seção 5.2.5). Por fim, a seção 5.3 apresenta a integração do processo de valorização de resíduos realizada pela metodologia GUT.

### 5.1 DIAGNÓSTICO GLOBAL

Para a estimativa do diagnóstico global foram levantados dados de 9 países diferentes, em um total de 14 trabalhos científicos publicados, apresentados na Tabela 10. O diagnóstico inclui os resultados obtidos na caracterização regional do RCD.

Os materiais em análise foram separados por grupos de tipologia, sendo o primeiro formado por agregado natural (AN), a fim de realizar um comparativo com o RCD. Os demais grupos foram separados, conforme encontrado na literatura: cerâmica vermelha (CV), concreto (CO), argamassa ou material cimentício (CI) e materiais mistos (MI). Em seguida foram distribuídos os locais de origem de cada resíduo, com apresentação das porcentagens dos principais constituintes, incluindo a perda ao fogo.

Tabela 10 - Estimativa diagnóstica dos principais constituintes de RCD por grupo de tipologia e local de origem.

Grupo	Local	Óxidos (%)										PF	Ref.**
		SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Demais*		
AN	Brasil/RN	95,81	-	2,38	-	-	-	0,13	-	0,94	0,74	-	1
	Brasil/RJ	79,97	6,04	4,56	0,13	0,03	-	-	8,87	0,22	-	-	2
	Turquia/ Bartın	64,56	7,6	8,38	3,52	0,96	1,17	0,01	3,08	0,29	0,12	8,19	3
CV	UE	61,1 a 62,4	1 a 3	17,4 a 17,5	6,1 a 7,2	5 a 5,4	2 a 4,5	0 a 0,1	0,3 a 1	0,7 a 0,9	0 a 0,1	1,1 a 2,3	4
	Espanha/ Madrid	45,5	15,70	10,10	2,44	2,31	1,81	3,12	0,95	0,32	0,12	16,50	5
	Vietnã/ Hanoi	62,76 a 66,30	0,58 a 1,97	16,99 a 23,38	6,16 a 7,83	2,49 a 3,63	1,17 a 1,56	0,05 a 0,25	0,40 a 0,68	1,01 a 1,14	0,06 a 0,29	-	10
	Turquia/ Ankara	53,4 a 61,6	3,31 a 7,42	15,9 a 20,5	6,70 a 8,93	2,30 a 3,42	2,66 a 4,84	0,38 a 1,16	1,41 a 1,61	0,81 a 1,19	0,32 a 0,43	1,99 a 2,18	11
	Turquia/ Ankaca	42,1 a 59,9	2,78 a 7,81	13,5 a 18,3	7,40 a 11,9	1,55 a 2,88	2,24 a 6,45	0,42 a 1,93	0 a 1,45	-	-	0,73 a 3,90	12
	<b>Regional</b>	<b>70,79</b>	<b>0,23</b>	<b>17,76</b>	<b>6,08</b>	<b>1,52</b>	<b>0,62</b>	<b>0,05</b>	<b>0,28</b>	<b>1,34</b>	<b>0,16</b>	<b>1,20</b>	
CO	UE	30,5	36,10	4,20	0,70	1,60	0,50	0,40	0,30	-	-	22,8 a 25,6	4
	México / Coahuila	5,98 a 15,97	68,93 a 87,11	1,93 a 3,53	0,81 a 3,61	0,57 a 1,54	1,17 a 1,70	1,20 a 4,95	0,30 a 0,71	-	-	-	6
	Espanha/ Madrid	67,70	10,67	6,48	1,22	2,16	0,54	1,43	0,22	0,15	0,12	8,6	5
	Brasil/RJ	81,65	8,92	3,87	2,54	0,32	0,69	0,54	0,17	0,45	0,04	-	2
	Turquia/ Bartın	49,41	12,95	7,08	2,76	0,83	1,18	0,17	2,11	0,25	0,13	22,13	3
	Turquia/ Ankara	34,8 a 56,9	11,5 a 27,2	4,36 a 10,70	3,45 a 4,23	0,79 a 2,22	1,29 a 4,46	0,54 a 1,32	0,19 a 2,02	-	-	8,84 a 22,00	12
	Austrália/ Melbourne	65,21	13,74	4,78	2,33	0,78	2,19	-	1,19	0,15	0,23	8,39	13
<b>Regional</b>	<b>65,02</b>	<b>8,39</b>	<b>8,35</b>	<b>8,49</b>	<b>0,96</b>	<b>2,44</b>	<b>0,28</b>	<b>1,28</b>	<b>0,87</b>	<b>0,27</b>	<b>3,66</b>		
CI	UE	42,40	25,40	3,70	1,30	1,30	2,50	0,30	0,30	-	-	-	4
	Vietnã/ Hanoi	41,40 a 76,40	10,92 a 44,00	4,43 a 8,48	1,60 a 5,15	1,13 a 2,38	0,26 a 6,84	0,34 a 1,44	0,38 a 1,36	0,19 a 0,59	0,03 a 0,17	-	10
	<b>Regional</b>	<b>82,36</b>	<b>5,17</b>	<b>4,34</b>	<b>0,70</b>	<b>1,19</b>	<b>0,41</b>	<b>0,14</b>	<b>0,25</b>	<b>0,18</b>	<b>0,12</b>	<b>5,12</b>	

Continuação da Tabela 16

	Brasil/RN	40,40	29,83	10,18	8,91	1,57	-	5,03	-	0,76	3,32	-	1
	Brasil/SP	75,53	6,10	9,76	4,18	0,99	1,68	0,17	0,38	1,11	0,09	-	7
	Espanha/ Madrid	63,50	11,58	6,57	1,57	2,17	0,61	2,44	0,35	0,17	0,10	9,50	5
MI	Brasil/SP	65 a 75	7 a 11	6 a 10	2,50	1,50 a 3,0	1 a 2	-	0,5 a 2	-	-	6 a 9	8
	Brasil/RS	39,3 a 64,9	9,4 a 26,1	6,2 a 9,9	3,1 a 6,4	1,3 a 1,7	3,2	0,3 a 0,7	0,3 a 0,4	0,7 a 0,8	0,13 a 0,7	6,37 a 14,94	9
	China/ Wuran	49,04	14,75	12,64	5,72	2,5	2,25	0,7	1,02	0,73	0,58	39,87	14
	Intervalo	5,98 a 95,81	0,58 a 87,11	2,38 a 23,38	0,13 a 8,93	0 a 5,40	0 a 6,84	0 a 5,03	0 a 8,87	0 a 1,34	0 a 3,32	0 a 39,87	-

\* Demais: ZrO<sub>2</sub>, ZnO, SrO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO e outros não mencionados na literatura.

\*\* Referências bibliográficas: (1) Ferreira *et al.* (2020); (2) Azevedo *et al.* (2020); (3) Gencel *et al.* (2021); (4) Marín-Cortés *et al.* (2024); (5) Martínez *et al.* (2016); (6) Rodriguez-Morales *et al.* (2024); (7) Contreras-Llanes *et al.* (2016); (8) Ulsen *et al.* (2013); (9) Andrade (2018); (10) Nguyen (2021); (11) Ulugol (2021); (12) Kul *et al.* (2024); (13) Saberian e Li (2018); (14) Zhu *et al.* (2012).

Em uma análise geral da composição de cada grupo pode-se observar a predominância de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Na}_2\text{O}$  da composição do agregado natural (AN) constituindo de 87,14 a 99,57% do material, sendo o  $\text{SiO}_2$  responsável por 64,56 a 95,81%. Essa elevada concentração de  $\text{SiO}_2$  dá-se pela presença de sílica na constituição da areia de rio (Azevedo *et al.*, 2020).

O grupo de cerâmica vermelha (CV) se destaca pela presença de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , com 42,10 a 70,79% e 10,10 a 23,38%, seguido de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  com 2,44 a 11,90%, respectivamente. Marín-Cortés *et al.* (2024), ressaltam que a presença predominante destes constituintes em produtos de cerâmica vermelha é maior do que qualquer outro material, pelo elevado teor de hematita e outros minerais portadores de Fe.

No grupo do concreto (CO), existe uma grande variação na composição, por exemplo o  $\text{SiO}_2$ , de 5,98 a 81,65%, em que a alta concentração deste está associada com a presença de areia de rio como matéria prima do concreto. O  $\text{CaO}$  possui uma diferença entre 8,39 e 87,11%, e o teor deste constituinte se destaca dos demais grupos, que tem como origem o cimento. Por também possuir areia e cimento em sua composição, o grupo dos materiais cimentícios (CI), também apresenta um destaque em  $\text{SiO}_2$  e  $\text{CaO}$ , 41,40 a 76,40% e 10,92 a 44,00%, respectivamente.

Por fim o grupo dos materiais mistos (MI), composto pela mistura de cerâmica vermelha, concreto e argamassa, apresenta uma variação de 39,30 a 75,53% de  $\text{SiO}_2$ , 6,10 a 29,83% de  $\text{CaO}$ , 6 a 12,64% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 1,57 a 8,91% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Em uma análise da fração cerâmica constituinte nos materiais de classe A, em regiões metropolitanas do estado de São Paulo, Contreras-Llanes *et al.* (2016), resalta a vasta gama de elementos constituintes no RCD, porém com destaque nos seguintes materiais,  $\text{SiO}_2$  (40–70% em peso),  $\text{CaO}$  (10–25% em peso),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (5–20% em peso),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0,5–8% em peso) e  $\text{K}_2\text{O}$  (1–4% em peso).

Segundo Ferreira *et al.* (2019), a origem do  $\text{SiO}_2$  se relaciona com diferentes tipos de silicatos que são derivados da pasta de cimento endurecida e de agregados naturais, rochas naturais, cerâmica vermelha, entre outros. Em caso de utilização do agregado em matriz cimentícia, foi detectado o composto de  $\text{SO}_3$  em até 5,03%, sendo que a presença deste, mesmo baixa, no caso de aplicação em produtos cimentícios, pode causar a perda gradual da resistência mecânica e afetar a durabilidade de argamassas e concretos com RCD em sua composição, provocado pela formação de etringita secundária.

No caso de utilização do resíduo em concretos, a presença de  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$  na composição do resíduo apresentam a possibilidade de reagir com outros agregados, podendo

apresentar desagregação, manifestação conhecida como álcalis. O CaO é um dos responsáveis pela expansão do concreto antes e após sua hidratação, ocasionando efeitos danosos ao produto a que se destina, devido a recarbonatação nos materiais a base de cimento (Silva; Borges; Barañano, 2021).

Marín-Cortés *et al.* (2024), analisaram materiais cerâmicos e cimentícios da Europa, separadamente, identificando o quartzo como principal fase cristalina em materiais cerâmicos, com menores proporções de feldspato, anortita e albita. Hematita, e outras fases cristalinas contendo Fe, como siderita, magnetita e outros minerais à base de ferro, devido às rochas sedimentares utilizadas como matéria-prima também foram verificadas. Na análise feita pelo autor em materiais cimentícios, foi encontrada calcita como carbonato principal, além de quartzo e feldspato, ambos em menor quantidade.

Diante do exposto, observa-se que apesar de quantificações variadas, há uma composição similar nos resíduos pesquisados, sendo em grande parte composta por SiO<sub>2</sub>, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, mostrando a semelhança do RCD gerado a nível global.

## 5.2 CPQ<sub>v</sub>A

### 5.2.1 Classificação

Considerando a legislação e normas vigentes, o critério C, que define a classificação do material em estudo, deu-se pela literatura, por estudos já publicados, referente ao RCD, utilizado como AR. A revisão da NBR 10004 feita em 2024 cita a classificação dos resíduos de acordo com suas características de periculosidade, as quais foram definidas a partir de critérios de perigo mundialmente adotados, dando suporte para responder à primeira questão do questionário da Tabela 6.

*Q1: Há legislação que restrinja a valorização do RCD?*

Sim, o RCD para uso como AR segue a resolução nº 307 do CONAMA (2002), seguida Resolução nº 431 de 2011, que define a fração cerâmica como reutilizável ou reciclável como agregado. Além disso, a Lei nº12.305/10, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, indica que para a possibilidade da valorização do resíduo é necessário classificá-lo quanto à origem e periculosidade; fazendo uso das normas, NBR 10005 (2004) e NBR 10006 (2004), classificando o RCD quanto à lixiviação e solubilidade, respectivamente.

Para Pinto (1999), é relativamente baixa, na composição dos RCD, a presença de resíduos perigosos (produtos ácidos, inflamáveis e outros), mas esse aspecto não deve ser ignorado, realizando-se nesta parcela os procedimentos e tratamento adequado.

Substâncias perigosas geralmente estão presentes em materiais de construção porque são usadas juntamente com o concreto, para completar a estrutura e realizar os acabamentos. Resíduos perigosos devem ser separados na fonte, pois mesmo em pequenas quantidades podem representar riscos específicos para os trabalhadores e o meio ambiente, além de dificultar a reciclagem (Tam; Somro; Evangelista, 2018).

Em uma análise de lixiviados de argamassa, com substituição dos agregados miúdos em 25%, 50% e 100%, Azevedo *et al.* (2020) obtiveram resultados dos principais constituintes abaixo dos limites máximos permitidos pela norma supracitada. Quanto à solubilidade, o mesmo estudo apontou que a substituição em 100% do agregado miúdo ultrapassou os limites máximos de cloreto e sulfato.

Com isto, para o quesito 1 a nota atribuída quanto ao nível de dificuldade é 0 (zero).

*Q2: Qual a dificuldade em estabelecer uma amostra representativa?*

Neste quesito, considera-se que o gerador do resíduo, o canteiro de obra/demolição, não se trata de um local fixo, como uma fábrica/indústria física. A amostra depende da demanda de obras e demolições, bem como a tipologia do resíduo da construção depende da etapa da obra, como já mencionado no item de coleta e preparação das amostras. Neste contexto, há uma dificuldade em estabelecer uma amostra representativa. Além de que conforme a ABRECON (2020), os municípios deveriam propor uma rede de pontos de entrega voluntária para captar os resíduos descartados para os pequenos geradores e para os grandes geradores, licenciar áreas de triagem e de reciclagem para uma operação adequada dos resíduos.

No entanto o número de obras e demolições, conforme já mencionado, é elevado, sendo assim a nota atribuída para este quesito é 5 (cinco).

*Q3: Qual classe ambiental – legislativa do RCD?*

A classe ambiental do RCD vai depender de sua origem. Nas amostras coletadas, o conhecimento da fonte ajuda na determinação dessa classificação conforme a NBR 10004 (2004), por ter sido segregado no ponto de coleta e não apresentar gesso nesse processo. Porém apenas a caracterização laboratorial vai definir com exatidão a classificação de cada material. Para o caso em estudo, não foram realizados ensaios de lixiviação e solubilidade, sendo baseado em estudos já executados em RCD já segregados na fonte geradora, livres de características

como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, determinados como Classe II, podendo ser inerte ou não, a depender da composição. Quanto à classificação CONAMA n 307 de 2002, esta define o RCD na classe A, dos quais são resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, estando o resíduo em estudo de acordo com esta classificação. Sendo assim, para este quesito, foi atribuído a nota 0 (zero), por não ser um resíduo perigoso.

## 5.2.2 Potencialidade

O quesito 4 aborda a composição dos materiais, no qual sua análise foi baseada nos resultados dos ensaios de caracterização física, química, mineralógica e microestrutural.

*Q4: A composição do RCD classificado restringe a potencialidade das aplicações?*

Não, por possuir composição semelhante ao solo fornecido pelo fabricante, a composição do RCD não restringe seu uso. Variados tipos de silicatos derivados das partículas da pasta de cimento hidratado e dos agregados naturais, dão origem aos diferentes óxidos presentes na composição do material em estudo (Ferreira *et al.*, 2020). Na análise composicional apresentada na Tabela 11, verifica-se a composição química das amostras do RCD por tipologia, cerâmica vermelha, concreto e argamassa.

Tabela 11 - Resultados da composição química por fluorescência de Raios-X, por tipologia de amostra.

Fração residual	Teor de óxidos (%)									
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Outros	PF
Cerâmica Vermelha	70,79	17,76	1,52	0,28	6,08	1,34	0,23	0,62	0,21	1,20
Concreto	65,02	8,35	0,96	1,28	8,49	0,87	8,39	2,44	0,55	3,66
Argamassa	82,36	4,34	1,19	0,25	0,70	0,18	5,17	0,41	0,26	5,12

\*PF: Perda ao fogo. Fonte: Autora (2026).

Dos principais constituintes do RCD estudado, foram encontrados, entre 65,02 e 82,36% de SiO<sub>2</sub>, entre 4,34 e 17,76% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, entre 0,70 e 8,49 de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, e entre 0,23 a 8,39% de CaO. Os valores apresentados nos outros óxidos correspondem ao Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e SO<sub>3</sub>, com teores individuais inferiores a 0,3% cada.

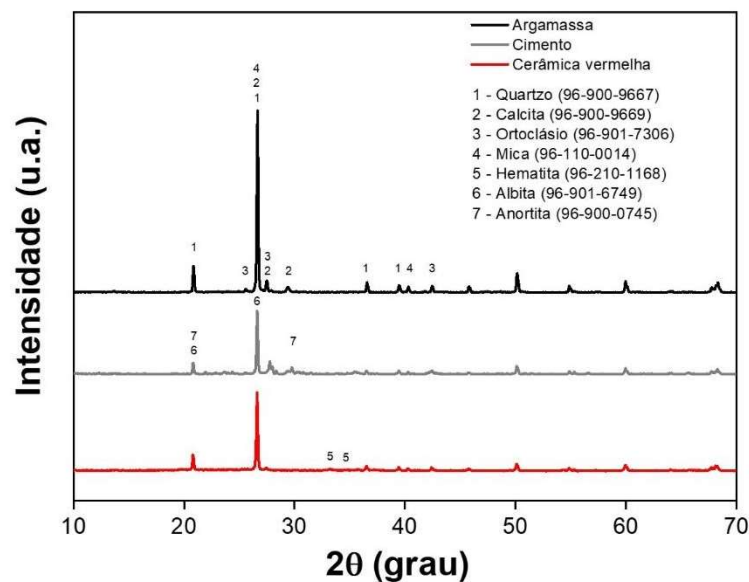
Na caracterização mineralógica, apresentada na Figura 13 verificam-se as fases cristalinas presentes das amostras. O mineral com maior porcentagem identificado, com base

no ensaio de DRX aliado à análise de FRX, foi o quartzo apresentando também calcita, ortoclásio, mica, hematita e albíta e anortita.

Para Ulsen *et al.* (2013), os teores de sílica, alumina e óxido de ferro podem estar correlacionada ao teor de silicatos das fases rochosas naturais, areia e cerâmica, já os teores de óxido de cálcio e a perda ao fogo estão diretamente relacionadas ao teor de ligante.

Em uma análise de DRX, Contreras- Llanes *et al.* (2016), confirmou a presença de quartzo e carbonatos como calcita e hidróxidos como principais fases cristalinas.

Figura 13 - Difração de Raios-X das frações residuais cerâmicas (de classe A) estudadas.



Fonte: Autora (2026).

Ozel *et al.* (2025), em caracterização na Turquia, também identificaram quartzo, cristobalita, tridimita, calcita, diopsídio e lazurita, com picos no quartzo para os materiais de cerâmica vermelha e picos de quartzo e calcita para materiais cimentícios.

A Tabela 12 apresenta os resultados da análise de área de superfície específica das partículas das amostras, realizados pelo método Brunauer, Emmett e Teller.

Pelo material britado possuir uma área de superfície específica maior, mais irregulares serão suas partículas. Santos (2016) aponta que uma área de superfície específica para um agregado miúdo é de 0,60 m<sup>2</sup>/g, e que normalmente um material rugoso possui uma área de superfície específica maior que um material liso. Neste quesito a área de superfície específica de agregados reciclados apresentam valores superiores do que os agregados naturais, variando entre 4 m<sup>2</sup>/g e 8,584 m<sup>2</sup>/g.

Tabela 12 - Área de superfície das partículas das amostras estudadas.

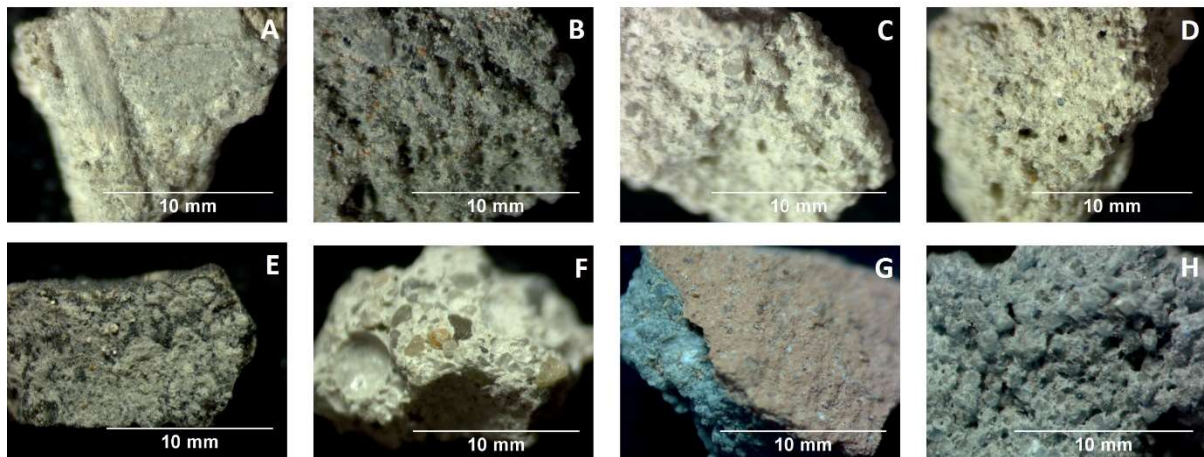
Amostra	Área de superfície específica (m <sup>2</sup> /g)
A	4,98
B	7,48
C	5,94
D	5,76
E	3,00
F	6,49
G	8,58
H	4,00

Fonte: Autora (2026).

Para Bai *et al.* (2020), o processo de produção do agregado de RCD, pode interferir na variação do tamanho de partículas. Azevedo *et al.* (2020), apontam esta variação em relação ao agregado natural devido ao formato dos grãos, que em geral são mais homogêneos e circulares.

Quanto à morfologia do material observada em microscópio óptico e ilustrada na Figura 14, é possível verificar a textura áspera e porosa e o formato irregular das partículas.

Figura 14 - Microscopia óptica das amostras.



Fonte: Autora (2026).

Comparada com a morfologia densa da superfície do agregado de calcário natural, observou-se que a morfologia da superfície dos resíduos de concreto, tijolo e cimentício é porosa. A estrutura porosa causa alta absorção desses materiais residuais, prejudicando a relação água/cimento, gerando um aumento na porosidade dos produtos candidatos (Zhu *et al.*, 2012).

A distribuição granulométrica das amostras está apresentada na Tabela 13, em que se verificam porcentagens que variam entre 1,67 e 17,34% de retidos na peneira com abertura de 4,75 mm, e a presença de finos entre 1,95 e 15,16% (passante na peneira 0,150 mm). Esta diferença varia de acordo com a composição do resíduo de cada amostra, bem como a tipologia da obra de origem.

Em um comparativo de variabilidade em relação a tipologia das amostras, observa-se que entre os diferentes materiais estudados, as amostras E e F, compostas por concretos, possuem menor diferença entre os percentuais de amostras retidas em cada peneira. Pode-se observar que as amostras que possuem argamassa e cerâmica vermelha na tipologia apresentam maior diferença entre percentuais de passante em cada peneira.

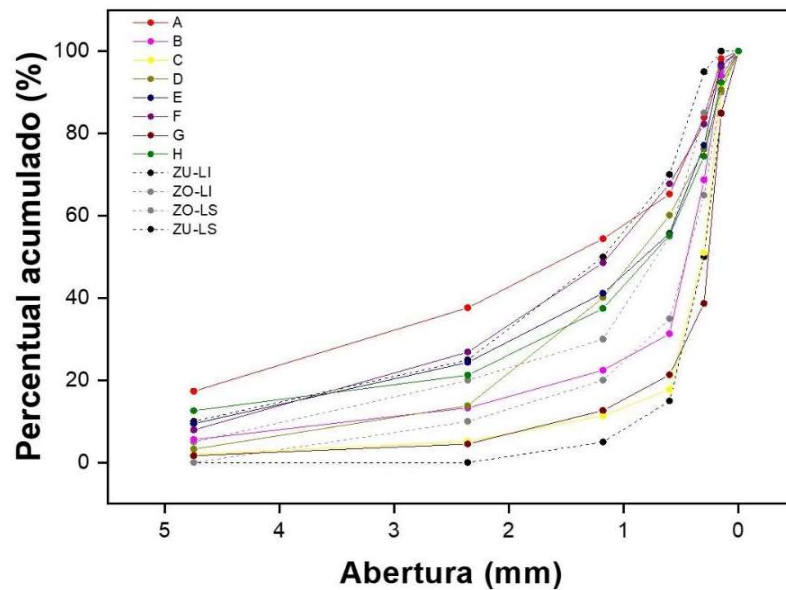
Tabela 13 - Composição granulométrica das amostras de agregado reciclado miúdo, conforme NBR 7211 (2022).

Peneira Abertura (mm)	% Retido							
	A	B	C	D	E	F	G	H
<b>4,75</b>	17,34	5,62	1,99	3,27	9,42	7,92	1,67	12,57
<b>2,36</b>	20,29	7,65	3,17	10,57	14,96	18,67	2,84	8,69
<b>1,18</b>	16,75	9,13	6,22	26,29	16,76	21,69	8,17	16,17
<b>0,60</b>	10,87	8,90	6,36	19,98	14,59	19,18	8,64	17,87
<b>0,30</b>	18,61	37,41	33,20	16,08	21,40	14,48	17,33	19,14
<b>0,15</b>	14,27	25,35	40,92	14,46	19,60	14,02	46,19	17,94
<b>Fundo</b>	1,95	5,94	8,12	9,35	3,27	3,73	15,16	7,60
% Acumulado								
<b>4,75</b>	17,34	5,62	1,99	3,27	9,42	7,92	1,67	12,58
<b>2,36</b>	37,63	13,27	5,16	13,84	24,38	26,89	4,51	21,27
<b>1,18</b>	54,38	22,40	11,39	40,13	41,14	48,58	12,67	37,44
<b>0,60</b>	65,25	31,30	17,76	60,12	55,73	67,76	21,32	55,32
<b>0,30</b>	83,87	68,72	50,96	76,18	77,13	82,25	38,65	74,46
<b>0,15</b>	98,12	94,07	91,88	90,65	96,73	96,27	84,84	92,40
<b>Fundo</b>	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Fonte: Autora (2026).

A Figura 15 mostra os resultados dispostos em um gráfico para melhor visualização em uma análise considerando as exigências da NBR 7211 (2022) para distribuição granulométrica para uso em matrizes cimentícias. A norma determina os limites inferiores e superiores da zona ótima (ZO) e zona utilizável (ZU).

Figura 15 - Distribuição granulométrica das amostras de AR, com identificação das zonas ótima (ZO) e utilizável (ZU) e indicação dos limites inferior (LI) e superior (LS).



Fonte: Autora (2026).

Para utilização do agregado em argamassas e concretos, com base na NBR 7211 (2022), as amostras A, F e H extrapolam o limite superior da zona utilizável, exigido pela norma; já a amostra G excede o limite inferior da mesma zona. Dentro dos limites da zona ótima, nenhuma das amostras se mantiveram nos limites. Contudo, este não é um fator impeditivo para o uso dos materiais em bases cimentícias, sendo que os limites máximos e mínimos encontram-se na zona utilizável. Ressalta-se o aumento da variabilidade por se tratar de amostras coletadas em diferentes pontos, oriundos de obras e demolições de diferentes composições. As demais amostras podem ser utilizadas, como base cimentícia para produção de concretos e argamassas.

Para aplicação em tijolos de solo-cimento, a NBR 11798 (2012), indica que, no máximo, 40% do material deve ficar retido na peneira 4,75 mm, não informando o tamanho mínimo de partícula. Neste contexto, as amostras apresentaram entre 1,67 e 17,34% atendendo aos requisitos da norma.

A Tabela 14 apresenta os resultados de massa específica aparente obtidos pelos métodos A e C da NBR 16972 (2021) para o agregado reciclado (AR). Sendo conhecida a massa específica aparente do agregado natural miúdo, com valor de 1,520 g/cm<sup>3</sup> (Mehta; Monteiro, 2008), é possível realizar um comparativo.

Tabela 14 - Resultado de massa específica aparente, em  $\text{g/cm}^3$ , das amostras de AR, conforme NBR 16972 (2021).

<b>Amostra</b>	<b>Método A</b>	<b>Método C</b>
A	1,475	1,408
B	1,288	1,229
C	1,416	1,330
D	1,382	1,301
E	1,632	1,543
F	1,542	1,461
G	1,310	1,230
H	1,406	1,333

Fonte: Autora (2026).

Cada amostra de AR produzido com RCD, mostra os valores de massa específica aparente que variam de  $1,229 \text{ g/cm}^3$  a  $1,632 \text{ g/cm}^3$ , evidenciando resultados próximos ao AN não apresentando variações excessivas. Em uma diferença considerável, pode influenciar na dosagem e resistência do produto candidato. Porém não há restrições para o tijolo de solo cimento.

Para os resultados de densidade das amostras, conforme Tabela 15, a NBR 16916 (2021), define que a diferença entre a repetitividade dos ensaios não pode ultrapassar  $0,02 \text{ g/cm}^3$ . Como o procedimento foi realizado manualmente e com escala menor, adaptada pelas condições do laboratório, por não haver picnômetro suficiente e serem utilizados béqueres e quantidade de amostra disponível, essa diferença ultrapassou o limite imposto pela norma. Foram utilizados picnômetro e becker, devido ao ensaio possuir várias etapas, já descritas anteriormente, sendo inviável a execução de uma amostra por vez. O uso do becker reduz a precisão do ensaio. Sendo assim, foi realizado o ensaio por picnometria, para fins comparativos e determinação deste resultado, apresentados na Tabela 15.

Analisando os resultados obtidos seguindo os parâmetros adaptados da NBR 16916 (2021), apenas as amostras B, D e G, atendem a variação exigida de  $0,02 \text{ g/cm}^3$ , sendo as demais com uma diferença de até  $0,39 \text{ g/cm}^3$  na repetitividade do ensaio. Sendo assim, optou-se por um ensaio de picnometria para obtenção dos valores de densidade real do material em estudo, considerando estes valores como resultado conclusivo para a densidade real.

Tabela 15 - Comparativo da densidade real obtida experimentalmente pela NBR 16916 (2021) e picnometria, das amostras de AR.

Amostra	NBR 16916 (g/cm <sup>3</sup> )	Diferença repetitividade (NBR 16916)	Picnometria (g/cm <sup>3</sup> )
A	2,06	0,27	2,62
	1,79		
B	1,96	0,01	2,60
	1,97		
C	1,90	0,09	2,64
	1,99		
D	1,84	0,00	2,59
	1,84		
E	2,04	0,17	2,74
	2,21		
F	2,02	0,12	2,72
	2,14		
G	1,87	0,00	2,66
	1,87		
H	1,93	0,39	2,65
	2,31		

Fonte: Autora (2026).

Ferreira *et al.* (2021) realizou uma caracterização de agregados miúdos proveniente de RCD, em que o material apresentou uma densidade específica de 2,52 g/cm<sup>3</sup>. Se comparado à densidade real por picnometria do AR estudado, com valores entre 2,59 g/cm<sup>3</sup> a 2,74 g/cm<sup>3</sup>, estes não apresentaram grande variação em relação a amostra do estudo citado anteriormente. Porém a variação entre as amostras se dá pelo fato de possuírem tipologias diferenciadas, como concretos cerâmica vermelha, cimentício, possuindo variações composicionais entre si.

Carasek *et al.* (2016) em um estudo com agregado natural caracterizaram a densidade real do AN em 2,73 g/cm<sup>3</sup>. A densidade real do AN fica mais próxima do maior resultado do AR apresentado por Chaves (1996), que cita que a pasta de cimento presente no AR, reduz a densidade e aumenta a porosidade do agregado.

Os resultados da determinação da absorção de água estão indicados na Tabela 16. Em uma caracterização de AN, Barbosa, Coura e Mendes (2008), informa a absorção de água em 3,16%. Os resultados do AR em estudo, variam de 7,09% e 11,14%, apresentando uma grande diferença se comparado ao AN. A alta absorção de água ligada a alta porosidade e a alta densidade do agregado reciclado resulta na redução do desempenho mecânico, quando aplicado em concretos (Antunes *et al.*, 2025).

Tabela 16 - Resultados de absorção de água das amostras de AR, conforme a NBR 16916 (2021).

Amostra	Absorção de água (%)
A	7,87
B	7,36
C	8,10
D	11,14
E	7,09
F	6,23
G	9,28
H	9,59

Fonte: Autora (2026).

Sendo assim, para o quesito 4, foi atribuída a nota 5 (cinco).

### 5.2.3 Quantidade/Viabilidade

*Q5: A variabilidade composicional compromete possíveis produtos potenciais?*

A variabilidade composicional pode comprometer o produto potencial escolhido, se comparado com o material retido, pois como mostra a Tabela 17, a porcentagem de 99,10, dominante de sílica no material retido na peneira #270 mesh é superior à sílica encontrada no RCD de concreto estudado, disponível na Tabela 11, no qual a cerâmica vermelha, concreto e argamassa, apresentam porcentagens de 70,79, 65,02 e 82,36 respectivamente, com considerável presença de alumina, sendo estes 17,76, 8,35 e 4,34. Porém a variação vai depender da origem e posterior mistura do RCD para uso final como agregado.

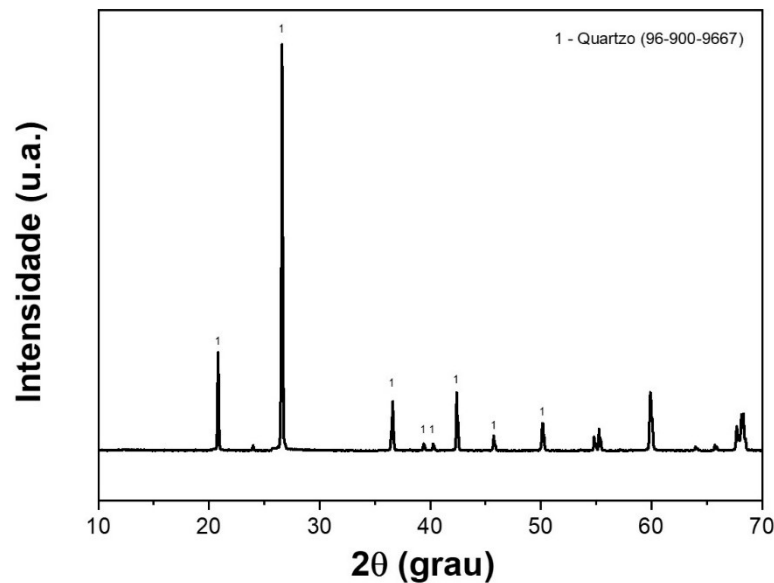
Tabela 17 - Composição química do solo do fabricante, separado na fração retida na peneira #270 mesh.

Resíduo	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	PF
Retido (areia)	99,10	<0,40	<0,05	0,11	0,19	0,05	0,03	<0,02	<0,01	0,06	<0,05	0,46

\*PF: Perda ao fogo. Fonte: Autora (2026).

Na análise mineralógica do material a ser substituído (areia, fração retida na peneira #270 mesh), a Figura 16 indica a predominância de silicatos na forma de quartzo.

Figura 16 - Difração de Raios-X da areia utilizada como agregado pela empresa fabricante parceira.



Fonte: Autora (2026).

Devido a esta presença de quartzo, comparada ao agregado reciclado proveniente do RCD, a nota atribuída para este quesito é 5.

*Q6: Há algum elemento que configure limite de tolerância no produto potencial?*

No processo de construção e/ou demolição, faz-se uso de inúmeros componentes contaminantes, dentre eles tintas, solventes, vernizes, óleos, gessos, betume, silicone, poliuretano, entre outros. Neste contexto, é imprescindível a segregação do RCD na origem geradora, para evitar contaminações no processo de reciclagem do material.

Devido à segregação durante a coleta do RCD para execução deste trabalho, foi possível eliminar a presença destes possíveis materiais contaminantes, considerados resíduos perigosos na resolução CONAMA, 2002.

Portanto, por não haver elementos que configurem limite de tolerância, foi atribuída nota 0 para este quesito.

*Q7: Há necessidade de adequação do gerenciamento para a geradora do RCD?*

Sim, para garantir a viabilidade do uso do RCD, a NBR 10004 (2004), recomenda que o resíduo passe por segregação e identificação na fonte geradora para um eficiente processo de classificação dos resíduos.

Para este procedimento é necessário a definição de local para triagem e armazenamento, assim como destinação de funcionários para a execução do processo. O custo deste procedimento varia de acordo com a localização e tamanho da obra a ser construída e/ou demolida. Como não foram encontrados os resíduos segregados nos pontos de coleta, porém ainda não haviam sido misturados com resíduos de classificação diferentes, como latas, madeiras e outros, foi atribuída a nota 5 (cinco) para este quesito.

*Q8: Há necessidade de adequação do gerenciamento para a receptora do RCD?*

Sim. Para utilização para o produto potencial em estudo, o agregado reciclado precisa passar por um processo de britagem e peneiramento para ajustar as características granulométricas para aplicação como agregado reciclado miúdo, permitido por norma. Cabe ressaltar que a granulometria do AR irá depender do produto potencial a qual está destinado.

Com a necessidade do pré-tratamento de britagem e peneiramento, é imprescindível o uso de equipamentos específicos, sendo assim, para este quesito foi atribuída a nota 5 (cinco).

*Q9: Há legislação que regulamenta o produto ou restrinja o uso do RCD?*

Sim, o anexo A4 NBR 171001 (2023), define as tecnologias de destinação de resíduos como RU 01 e RU 02, sendo utilizadas como insumos ou matéria-prima, e reutilização direta como produto, respectivamente. Para os casos de utilização do RCD como agregado de pavimentação, este pode ser enquadrado como RU 02. Já na sua utilização em argamassas, concretos e outros, se enquadram como RU 01. O RCD não apresenta restrições específicas para o uso em tijolos de solo-cimento. Além do exposto, o RCD se enquadra como resíduo reciclável pela resolução CONAMA nº 307 de 2002. Neste contexto, não havendo restrições e havendo legislação para o uso do resíduo em estudo, para o quesito 9 foi atribuída a nota 0 (zero).

*Q10: A quantidade de produção do RCD atende a necessidade do produto candidato?*

Sim. O RCD é gerado no âmbito mundial, disponível em toda a obra de construção e demolição. Com uma estimativa global acima de 10 bilhões de toneladas ao ano e 107 mil toneladas ao ano na cidade de Criciúma. No Brasil 61% do RCD gerado pertence à classe A, para uso como agregado reciclado.

Para o quesito 10, a nota atribuída foi 0 (zero).

*Q11: Há mercado consumidor para a valorização do RCD conforme o produto candidato?*

Sim. De acordo com um grupo informativo de rede social, existem mais de 1000 produtores de bloco/tijolos de solo-cimento em todo Brasil. Sendo um número expressivo para o consumo do RCD. Além disso, o AR pode ser utilizado para outros fins, como artefatos cimentícios, com alto uso no país. Porém o uso do AR também depende da decisão do fabricante na sua utilização, existindo ainda dificuldade de aceitação desta modificação na formulação.

Sendo assim, a nota atribuída para este quesito foi 5 (cinco).

#### 5.2.4 Aplicabilidade

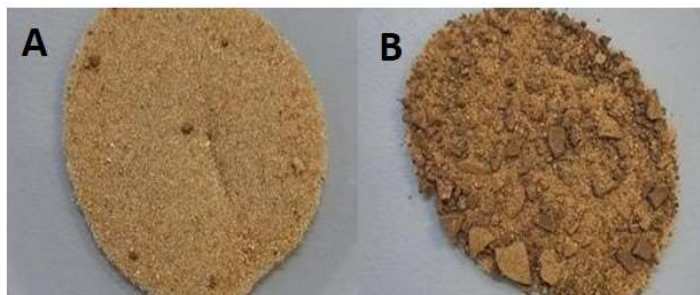
Para a aplicabilidade, o quesito 12 trata-se do desempenho do produto potencial. Sendo realizada em tijolo de solo-cimento e analisadas as características de desempenho do produto com a aplicação de 50% de AR em substituição do AN para produção do tijolo.

*Q12: O desempenho do produto atende às exigências de mercado?*

Sim, o tijolo de solo-cimento com substituição parcial em 50% de AR, atende as exigências do mercado, conforme caracterização apresentada a seguir.

Para substituição do solo pelo AR, foram separados por peneiramento via úmida os materiais com dimensões acima e abaixo de 0,06 mm, conforme definição da NBR 6502 (2022), denominados como areia, agregado este que é utilizado pela empresa parceira, fabricante de solo-cimento. A Figura 17 mostra o solo separado, em que a Figura 17a indica o material retido na peneira #270 mesh (areia) e a Figura 17b ilustra o material passante na mesma peneira (argila/silte).

Figura 17 - Separação do solo do fabricante: a) retido na peneira #270 mesh (areia) e b) material passante na mesma peneira (argila/silte).



Fonte: Autora (2026).

Para determinar a amostra de RCD que seria utilizada na aplicação da formulação do tijolo de solo-cimento, foi realizado um comparativo entre os ensaios de granulometria obtidos. Com base na granulometria da areia (material retido em peneira #270 mesh) apresentado na Tabela 18, utilizada pelo fabricante na formulação, a amostra de RCD mais compatível para uso foi a amostra C, sendo esta utilizada na formulação para teste.

Tabela 18 - Granulometria do material do fabricante, retido em peneira #270 mesh.

<b>Peneira Abertura (mm)</b>	<b>% Retida</b>	<b>% Acumulada</b>
4,75	0	0
2,36	0	0
1,18	0	0
0,60	1,90	1,90
0,30	24,41	26,31
0,15	70,61	96,91
Fundo	3,09	100

Fonte: Autora (2026).

Ao desenvolver a formulação com 12% de umidade, não foi possível remover o corpo de prova do estampo sem danificá-lo, pois devido as ranhuras do estampo da prensa, somado a umidade do corpo de prova ele se quebrava ao ser removido da prensa. Para solução deste problema, foi realizado teste com 10% e 8%, definiu-se 8% de umidade, devido ao manuseio, sem danos ao corpo de prova.

Foram moldados 10 corpos de prova conforme determina a NBR 10833 (2012), sendo realizada análise dimensional nos 10 corpos de prova. Desse total, 7 corpos de prova foram para ensaio de compressão simples e 3 para ensaio de absorção de água.

Na análise dimensional foi realizada a medição dos 10 corpos de provas, seguindo a determinação da NBR 8492 (2012), não ultrapassando 1 mm das dimensões nominais. Considerando-se que os corpos de prova possuem dimensões menores que as nominais, foi necessário adaptar o tamanho das amostras. Sendo assim, utilizou-se comprimento nominal de 240 mm e largura de 120 mm, resultando em uma proporção 0,5. Os corpos de prova da formulação padrão do fabricante apresentaram uma diferença dimensional entre 0,08 e 0,21 mm. Para a formulação com RCD, os corpos de prova apresentaram uma diferença entre 0,15 e 0,22 mm. Ambas condições atendem ao exigido pela norma.

Cunha *et al.* (2023), sugere a utilização de agregado miúdo em argamassas de vedação de alvenaria, contrapisos, solo-cimento, blocos e tijolos de vedação. Porém a aplicabilidade do RCD será determinada pelos resultados dos conjuntos de critérios CPQvA.

Quanto à resistência dos corpos de prova, a Tabela 19 apresenta os resultados quanto à compressão simples, definido pela NBR 8491 (2012), em MPa.

Tabela 19 - Resistência mecânica à compressão da formulação padrão e formulação com 50% de AR (F1).

Corpo de prova	Padrão (MPa)	F1 (MPa)
1	13,90	8,82
2	11,83	7,67
3	18,14	6,23
4	18,04	11,64
5	16,32	12,48
6	17,29	10,85
7	19,51	11,68

Fonte: Autora (2026)

Pode-se observar uma redução na resistência dos corpos de prova da formulação teste, porém, considerando as exigências da norma, a F1 apresenta uma média 9,91 MPa, que atende ao valor 2,00 MPa determinado. Ainda, atende ao valor individual para cada corpo de prova de 1,70 MPa da norma, sendo que os resultados obtidos ficaram entre 6,23 MPa e 12,48 MPa.

Na Tabela 20 apresenta-se os resultados do ensaio de absorção de água das formulações padrão e F1.

Tabela 20 - Resultados de absorção de água dos corpos de prova das formulações padrão e F1, seguindo a NBR 8492 (2012).

Corpo de prova	Seca ( $m_1$ )		Úmida ( $m_2$ )		Absorção (%)	
	Padrão (g)	F1 (g)	Padrão (g)	F1 (g)	Padrão (%)	F1 (%)
1	42,20	42,04	46,47	47,19	10,12	12,25
2	42,31	42,40	46,63	47,74	10,21	12,59
3	42,35	42,61	46,51	47,87	9,82	12,34

Fonte: Autora (2026)

Para as formulações, os resultados foram satisfatórios, onde para resultados individuais, a formulação padrão resultou entre 9,82 % e 10,21% e F1 com resultados entre

12,25% e 12,59%. As médias da formulação padrão e F1, foram de 10,05 % e 12,39 %, respectivamente, atendendo à norma em que o valor médio não deve ser maior que 20%, e valores individuais maiores que 22%.

Estes resultados indicaram que não há restrições graves que impedem o uso em tijolos de solo-cimento. Sendo assim, a nota atribuída para o quesito 12 é de 0 (zero).

### **5.2.5 Índice de criticidade (Ic)**

Relacionando o índice de criticidade de cada critério do RCD para uso no produto potencial escolhido, com os pesos dos questionamentos e notas atribuídas para cada quesito, o produto obteve os índices de criticidades para CPQvA, em 1,43, 5, 2,31 e 0 respectivamente, com um somatório dos Ic em 8,74.

## **5.3 METODOLOGIA GUT**

Por meio da metodologia GUT, adaptada para a aplicação do índice de criticidade (Ic), proposto por Oliveira (2017), foi calculada a listagem por ordem de prioridades, levando em consideração o nível de dificuldade na valorização do resíduo, facilitando a tomada de decisão do avaliador. Com isto, foi inserindo este nível de dificuldade em um método já existente e consolidado, proposto por Kepner-Tregoe.

Foram calculados os índices de criticidades de cada critério CPQvA, em seguida somados e listados em ordem crescente sendo quanto maior a soma dos Ic, maior o nível de dificuldade, determinando assim, a ordem de prioridades de valorização, conforme listados na Tabela 21.

Para o critério classificação (C), ficaram estabelecidas as mesmas notas atribuídas anteriormente, por se tratar de um critério referente ao resíduo. No critério potencialidade (P), manteve-se a nota 5 (cinco), tendo em vista que foram pesquisados produtos em potencial, levando em consideração as possíveis aplicações baseadas na literatura.

Tabela 21 - Ordem de prioridade para valorização de resíduos, pelo método GUT adaptado para CPQvA.

<b>Produto Potencial</b>	<b>C</b>	<b>P</b>	<b>Qv</b>	<b>A</b>	<b>Soma</b>	<b>Prioridade</b>
PP1	1,43	5	2,31	0	8,74	1º
PP2	2,86	5	2,31	5	15,16	2º
PP3	2,86	5	2,31	5	15,16	2º
PP4	2,86	5	4,04	5	16,90	3º
PP5	2,86	5	5,58	5	18,43	4º

Fonte: Autora (2026).

Dando início na análise do critério quantidade e viabilidade (Qv), para o quesito 5, a variabilidade composicional irá depender do lote do resíduo, por depender da origem do RCD, que influencia na composição deste. Para os produtos potenciais, foi atribuída nota 5 (cinco).

No quesito 6, quanto a elementos que configurem limite de tolerância, para os produtos PP2, PP3 e PP4, a NBR 15116 (2021), limita o uso para concretos com função estrutural, substituição máxima de 20% do agregado natural por agregado reciclado, bem como a o AR deve conter apenas concreto, excluindo o uso de outra tipologia do resíduo. Sendo assim, para o PP4, foi atribuída nota 5 (cinco). E os produtos PP2 e PP3, receberam nota 0 (zero), por não apresentarem limites de tolerância. O PP5, estudado por Grigoletto (2023), apresentou resíduos cimentícios com porcentagens abaixo do limite mínimo para óxido de silício, óxido de alumínio e óxido de ferro. Sendo assim, atribuída nota 5 (cinco) para este quesito.

Para os quesitos 7 e 8, foram mantidas as notas adotadas para o PP1, considerando que o há uma necessidade de adequação similar, tanto na gerado, quanto na receptora, para todos os produtos em potencial, mantendo assim a nota 5 (cinco) para ambos.

O quesito 9 se refere a existência de legislação que regulamente o produto ou restrinja o uso do resíduo. Existe legislação para o uso dos produtos PP2, PP3 e PP4, para o produto PP4, há restrições. Estas restrições não são impeditivas, porém reduzem o uso do resíduo. Para este quesito foi atribuída nota 0 (zero) para PP2 e PP3, sendo nota 5 (cinco), para o PP4. Para o PP5, no Brasil, apesar de possuírem estudos para seu uso, não há uma legislação deste produto, sendo assim, foi atribuída nota 10 (dez).

No quesito 10, se mantem a nota do PP1, tendo em vista que este quesito está associado ao resíduo, sendo que a quantidade de produção do resíduo atende a necessidade dos produtos potenciais, mantendo-se a nota 0 (zero).

O mercado consumidor para geopolímeros no Brasil ainda se encontra em estágio de desenvolvimento, porém com um futuro promissor, principalmente no desenvolvimento

sustentável fazendo uso de resíduos, porém atualmente ainda não possui um mercado ativo, sendo atribuída para o quesito 11 nota 10 (dez) no PP5. Para os demais produtos potenciais, se mantém ao exposto no PP1, possuindo mercado consumidor com uso frequente, porém assim como no PP1, o uso do AR também depende da decisão do fabricante na sua utilização, sendo este um fator determinante em sua valorização. Para os produtos PP2, PP3 e PP4, foram atribuídas nota 5 (cinco).

Respondendo ao quesito 12, o PP2, no estudo de Ferreira (2017), apresentou diferentes resultados, sendo valores maiores e menores de resistência à compressão e tração na flexão, a depender da porcentagem de material incorporada, a argamassa também sofreu um aumento das fissuras devido aos finos presentes no AR, neste contexto, foi atribuída nota 5 (cinco). Para o PP3, Frotté *et al* (2017) apontou que o aumento na substituição do agregado apresentou uma redução na resistência do concreto, bem como diminuição na trabalhabilidade, da massa específica, do módulo de elasticidade, sendo assim atribuída nota 5 (cinco). Para o PP4, por apresentarem redução na resistência, maiores aberturas de fissuras, maior deformação de estribos, resultando em um desempenho reduzido em relação ao uso do NA, foi adotada nota 5 (cinco). O PP5 apresentou resultados satisfatórios para o uso de pó de tijolos, porém a mistura entre pó de tijolos e pó de cimento atendeu parcialmente às exigências para o uso, sendo adotada nota 5 (cinco) para este quesito.

A Tabela 21 mostra que PP1 (tijolo de solo cimento) é o produto com maior prioridade para valorização, por apresentar valores mais baixos no somatório de IC dos critérios, ou seja, o produto com mais facilidade para valorização do resíduo. Seguidos de PP2 (argamassa), PP3 (concreto sem função estrutural), PP4 (concreto com função estrutural) e PP5 (geopolímero), nesta ordem. Cabe ressaltar que produtos com a mesma ordem de prioridade como PP2 e PP3, não possuem ordem entre si, por possuírem o mesmo nível de dificuldade. Salienta-se ainda que a dependência da aplicabilidade no produto candidato, o mesmo pode ser desclassificado para uso, caso o avaliador identifique a impossibilidade de valorização do resíduo no decorrer da avaliação. A listagem, é uma ferramenta para facilitar a decisão final do avaliador do resíduo e não um fator conclusivo para uso do resíduo.

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, verificou-se que a produção anual de RCD ultrapassa 10 bilhões de toneladas a nível mundial. Apenas para cidade de Criciúma, estima-se uma quantidade de 107 mil toneladas ao ano. Com a crescente modernização e adensamento urbano, estes números tendem a crescer em relação ao tempo, considerando que estes números são fundamentados nos indicadores populacionais. Seguindo os objetivos estabelecidos pela ODS, faz-se necessário a reciclagem desses resíduos para garantir o ciclo da economia circular da indústria da construção civil, bem como preservar recursos naturais.

A estimativa diagnóstica global dos constituintes do RCD aponta a predominância de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Na}_2\text{O}$  da composição do agregado natural (AN), sendo o  $\text{SiO}_2$  responsável entre 64,56 e 95,81%, devido a presença de sílica na constituição da areia de rio. No grupo de cerâmica vermelha (CV) se destaca pela presença de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , com 42,10 a 70,79% e 10,10 a 23,38%, seguido de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  com 2,44 a 11,90%, respectivamente. A presença predominante destes constituintes se dá pelo elevado teor de hematita e outros minerais portadores de Fe. No grupo do concreto (CO), há maior variação na composição, valores de  $\text{SiO}_2$  entre 5,98 e 81,65%,  $\text{CaO}$  com valores entre 8,39 e 87,11%, e o teor deste constituinte se destaca dos demais grupos, que tem como origem o cimento. O grupo dos materiais cimentícios (CI), apresenta um destaque em  $\text{SiO}_2$  e  $\text{CaO}$ , 41,40 a 76,40% e 10,92 a 44,00%, respectivamente. E o grupo dos materiais mistos (MI), composto pela mistura de cerâmica vermelha, concreto e argamassa, apresenta uma variação de 39,30 a 75,53% de  $\text{SiO}_2$ , 6,10 a 29,83% de  $\text{CaO}$ , 6 a 12,64% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 1,57 a 8,91% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

O trabalho expôs a similaridade composicional do RCD, baseada em uma estimativa global. Mostrando que é possível utilizar a sistemática CPQvA a nível mundial, tendo em vista que a tipologia do RCD se apresenta em sua maior quantidade na fração cerâmica, composta de forma geral, por concretos, argamassas, cerâmicas (tijolo, telhas, revestimentos, entre outros), gessos e solos. Sua composição torna o RCD um material promissor na substituição de recursos naturais.

Neste contexto, é essencial o uso de ferramentas para o gerenciamento do RCD. A fim de contribuir com a ferramenta já existente da sistemática CPQvA, este trabalho integrou uma adaptação da metodologia GUT, com o intuito de aprimorar esta ferramenta.

No critério classificação da sistemática, existem legislações vigentes referentes ao RCD, quanto à sua classificação, gestão, reciclagem e destinação final. Porém a grande maioria deste material é utilizada em aterros, minimizando seu potencial de uso. Devido à

predominância de frações cerâmicas (concretos, argamassas e cerâmica vermelha) no RCD, sendo estes materiais comumente inorgânicos, isolantes e inertes, não possuindo maiores restrições. Porém, para tanto é necessária a segregação na fonte geradora, a fim de separar materiais contaminantes, como exemplo, o gesso.

Na análise do critério potencialidade, o fator que diferencia significativamente o agregado natural do agregado reciclado, foi a alta absorção de água do AR, ligada com a alta porosidade e maior área superficial do RCD, sendo este um fator que pode reduzir o uso do AR em determinados produtos potenciais.

Para o critério quantidade e viabilidade, apesar da composição semelhante entre os resíduos, a quantidade de constituintes apresenta uma variação considerável. No entanto, não impede a reciclagem do material, porém necessita de uma gestão focada no RCD, com atenção especial na segregação da tipologia na origem e o tratamento granulométrico na receptora do material. A quantidade de RCD gerada é elevada, atendendo as necessidades de produtos candidatos.

Na aplicabilidade, o produto potencial utilizado para o estudo aprofundado foi o tijolo de solo-cimento, por ser um produto ecológico, sem necessidade de tratamento térmico e de simples tecnologia. O tijolo de solo-cimento (PP1) apresentou resultado satisfatório, cumprindo o exigido pelas normas vigentes. Porém, com a substituição em 50% de AR, a média da resistência do produto candidato apresentou uma redução de 40% em relação a amostra com formulação padrão. E no ensaio de absorção de água apresentou um aumento de 23% na média dos valores obtidos. O produto potencial apresentou uma redução na qualidade, porém não desqualifica a aplicação do AR. Outro fator observado, foi a coloração das amostras, sendo assim, é necessária uma homogeneização do AR para evitar diferença de coloração, tendo em vista que o tijolo de solo-cimento, não faz uso de revestimento, podendo interferir na estética do uso final do produto.

Por fim, o aprimoramento da sistemática CPQvA, para além do tijolo de solo cimento (PP1), selecionado para o estudo aprofundado, para aplicação do método GUT, fez necessário apontar outros produtos potenciais para a listagem de prioridades, a partir de levantamento bibliográfico, sendo estes argamassa (PP2), concreto sem função estrutural (PP3), concreto com função estrutural (PP4) e geopolímero (PP5). Calculados os índices de criticidade (Ic) de cada critério foi aplicada a adaptação da metodologia GUT, somando o Ic de cada critério de cada produto potencial e gerando uma ordem numérica crescente dado o nível de prioridade para valorização de resíduos. O método aponta que PP1 (tijolo de solo cimento) é o produto com maior prioridade para valorização, por apresentar valores mais baixos no somatório de IC

dos critérios, ou seja, o produto com mais facilidade para valorização do resíduo. Seguidos de PP2 (argamassa), PP3 (concreto sem função estrutural), PP4 (concreto com função estrutural) e PP5 (geopolímero), nesta ordem. Salienta-se que a listagem é uma ferramenta para facilitar a decisão final do avaliador do resíduo, e não um fator conclusivo para uso do resíduo.

## REFERÊNCIAS

- AMERICA'S CEMENT MANUFACTURERS. **Recycled Aggregates**. Skokie: Portland Cement Association (PCA), [2023]. Disponível em: <https://www.cement.org/learn/concrete-technology/concrete-design-production/recycled-aggregates>. Acesso em: 27 nov. 2023.
- ANDRADE, Jairo José de Oliveira; POSSAN, Edna; SQUIAVON, Jéssica Zamboni; ORTOLAN, Tiago Luis Possebon. Evaluation of mechanical properties and carbonation of mortars produced with construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 70-83, fev. 2018.
- ANGULO, Sérgio Cirelli. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2000. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- ANTUNES, Ana; COSTA, Hugo; CARMO, Ricardo do; JÚLIO, Eduardo. A comprehensive review of sustainable use of construction and demolition waste as recycled aggregates in the production of concrete – Properties, mix design and on-site applications. **Construction and Building Materials**, v. 482, 41733, 2025.
- ASLAM, Muhammad Shujaat; HUANG, Beijia; CUI, Lifeng. Review of construction and demolition waste management in China and USA. **Journal of Cleaner Production**, v. 264, 110445, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **CP-601: Manual do solo-cimento**. São Paulo: ABCP, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Solos e rochas – terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7200: Execução de revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto - Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8491: Tijolo de solo-cimento – requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8492: Tijolo de solo-cimento – análise dimensional, determinação da resistência à compressão e absorção de água – métodos de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10833**: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10834**: Bloco de solo-cimento sem função estrutural – requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10836**: Bloco de solo-cimento sem função estrutural - análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11798**: Materiais para base de solo-cimento – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15112**: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15113**: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15114**: Resíduos sólidos da construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116**: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: Agregado miúdo: determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972**: Agregados: determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: Agregados: determinação da composição granulométrica – método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17100-1**: Gerenciamento de resíduos – parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM ISO 3310-1**: Peneiras de ensaio: requisitos técnicos e verificação – parte 1: peneiras de ensaio com tela de tecido metálico (ISO 3310-1, IDT). Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (ABRECON). **Pesquisa Setorial ABRECON 2020**: a reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil. São Paulo: ABRECON, 2020.

AUSTRALIA. Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water. **Resource recovery and waste materials analysis**. Canberra: Australian Government, 2024. Disponível em: <https://www.dcceew.gov.au/environment/protection/waste/publications/national-waste-resource-recovery-reporting/resource-recovery-waste-material-analysis-2024>. Acesso em: 5 nov. 2025.

AYALP, Gulden Gumusburun; ANAÇ, Merve. A comprehensive analysis of the barriers to effective construction and demolition waste management: A bibliometric approach. **Cleaner Waste Systems**, v. 8, 100141, ago. 2024.

AZEVEDO, Afonso Rangel Garcez; CECCHIN, Daiane; CARMO, Dirlane De Fátima Do; SILVA, Flavio; CAMPOS, Claudia Maria De Oliveira; SHTRUCKA, T. G.; MARVILA, Markssuel Teixeira; MONTEIRO, Sergio Neves. Analysis of the compactness and properties of the hardened state of mortars with recycling of construction and demolition waste (CDW). **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 3, p. 5942-5952, maio/jun. 2020.

BAI, Guoliang; ZHU, Chao; LIU, Chao; LIU, Biao. An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 240, 117978, abr. 2020.

BAO, Zhikang; LU, Weisheng. Applicability of the environmental Kuznets curve to construction waste management: A panel analysis of 27 European economies. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 188, 106667, 2023.

BARBOSA, Maria Teresa Gomes; COURA, Cláudia Valéria Gávio; MENDES, Larissa de Oliveira. Estudo sobre a areia artificial em substituição à natural para confecção de concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 8, n. 4, p. 51-60, out./dez. 2008.

BAUER, Luiz Alfredo Falcão. *Materiais de construção*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 3 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm). Acesso em: 15 jan. 2024.

BRASILEIRO, Luzana Leite; MATOS, José Milton Elias de. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, São Paulo, v. 61, n. 358, p. 178-189, 2015.

CABRAL, Antônio Eduardo Bezerra; MOREIRA, Karoline Mary de Vasconcelos. **Manual sobre os resíduos sólidos da construção civil**. Fortaleza: SINDUSCON-CE, 2011.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). **Informativo econômico**: Construção Civil confirma expectativas e cresce forte pelo segundo ano consecutivo. Brasília, DF: CBIC, 2023.

CARASEK, Helena; ARAÚJO, Renato Costa; CASCUDO, Oswaldo; ANGELIM, Renato. Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento. **Matéria**, v. 21, n. 3, p. 714-732, set. 2016.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado segundo a NBR 6118:2003**. 3. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2010.

CAVALHEIRO, Orion Pires. Argamassas de revestimento: evolução técnica e problemas de normalização. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 1., 1995, Goiânia. **Anais [...]**. Goiânia: ANTAC, 1995.

CEVADA, Luana Zanini; DAMY-BENEDETTI, Patricia de Carvalho. Uso da matriz de priorização (matriz GUT) como aliada em auditorias. **Revista Científica Unilago**, v. 1, n. 1, 2021.

CHAVES, Arthur Pinto. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. São Paulo: Signus, 1996. v. 2. 424 p.

CHEN, Kunyang; WANG, Jiayuan; YU, Bo; WU, Huanyu; ZHANG, Jingrong. Critical evaluation of construction and demolition waste and associated environmental impacts: A scientometric analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 287, 125071, mar. 2021.

CHICOLI, Roberta. Tijolo ecológico: tudo o que você precisa saber sobre o assunto. Sienge Blog, 2020. Disponível em: <https://sienge.com.br/blog/tijolo-ecologico/>. Acesso em: 7 abril. 2026.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). **Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, DF: CONAMA, 2002.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). **Resolução nº 431, de 24 de maio de 2011**. Altera o art. 3º da Resolução nº 307/2002 do CONAMA, estabelecendo nova classificação para o gesso. Brasília, DF: CONAMA, 2011. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&force=1&legislacao=118789>. Acesso em: 15 nov. 2024.

COSTA, Amanda Rodrigues Santos; SANTOS, Tássia Camila Gonçalves dos; KOZMHINSKY, Marcelo; ALENCAR, Sidney Kal-raís Pereira de; VALLE, Grazielle. Aplicação da Matriz GUT na Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Cidade do Recife-PE. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales**, v. 10, n. 2, p. 201-213, 2017.

CONTRERAS-LLANES, Manuel; TEIXEIRA, Silvio Rainho; LUCAS, Murilo; LIMA, L.C N.; CARDOSO, D S L.; SILVA, G A. C. da; GREGÓRIO, G.C.; SOUZA, Agda Eunice de; SANTOS, A. dos. Recycling of construction and demolition waste for producing new

construction material (Brazil case-study). **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 594-600, 2016.

CUNHA, Késia da Silva; ROBERTO, José Carlos Alves; SOUTO, Sístina Pereira; LIMA, Suelen Costa. Resíduos sólidos na construção civil no Brasil. **Management and Administrative Professional Review**, v. 14, n. 6, p. 8671-8692, 2023.

DING, Zhikun; YANG, Qifan; ZHANG, Zhiyu; CHEN, Jiayu. Interfering implicit attitudes of adopting recycled products from construction wastes. **Journal of Cleaner Production**, v. 464, 142775, jul. 2024.

ECO PRODUÇÃO. **Tijolo ecológico de solo-cimento**: manual técnico. São Paulo: Eco Produção, 2022.

EUROPEAN PARLIAMENT AND COUNCIL. **Directive 2008/98/EC** of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. Bruxelas: Eur-Lex, 2008. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32008L0098>. Acesso em: 27 out. 2024.

EUROSTAT. **Data Browser**: Generation of waste by waste category, hazardousness and NACE Rev. 2 activity. [S. l.]: Eurostat, 2023. Disponível em: [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env\\_wasgen/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_wasgen/default/table?lang=en). Acesso em: 27 nov. 2023.

FARACO, Morgana Nuernberg Sartor. **Valorização de frações residuais geradas no beneficiamento de carvão mineral da região sul de Santa Catarina**. 2022. 137 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

FERREIRA, Ruan Landolfo da Silva; ANJOS, Marcos Alyssandro Soares; MAIA, Cinthia; PINTO, Licarion; AZEVEDO, Afonso Rangel Garcez de; BRITO, Jorge de. Long-term analysis of the physical properties of the mixed recycled aggregate and their effect on the properties of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 274, 121796, mar. 2021.

FERREIRA, Ruan Landolfo da Silva; ANJOS, Marcos Alyssandro Soares; LEDESMA, Enrique Fernández; PEREIRA, Jéssyca Emanuella Saraiva; NÓBREGA, Andreza Kalline Casimiro. Evaluation of the physical-mechanical properties of cement-lime based masonry mortars produced with mixed recycled aggregates. **Materiales de Construcción**, v. 70, n. 337, e210, 2020.

FERREIRA, Ruan Landolfo da Silva. Efeitos da incorporação de areia reciclada de resíduos de construção e demolição (RCD) em argamassas mistas de revestimento. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

FERREIRA, Ruan Landolfo da Silva; ANJOS, Marcos Alyssandro Soares; PEREIRA, Jéssyca Emanuella Saraiva; FONSECA, N. J. M.; NÓBREGA, Andreza Kalline Casimiro. Avaliação das propriedades físicas, químicas e mineralógicas da fração fina (< 150 µm) do agregado reciclado de RCD. **Cerâmica**, São Paulo, v. 65, n. 373, p. 139-146, 2019.

FIORITO, Antonio. **Manual de argamasas e revestimentos – Estudos e procedimentos de execução**. Ed. PINI. São Paulo, 1994.

FRASER, Matthew; HAIGH, Laxmi; STAL, Caspar; AKERBOOM, Sandra; BANERJEE, Arshiya; PRADA, Álvaro. **El Circularid – Informe de brecha**. Amsterdam: Circle Economy, 2023. 39 p.

FRAZÃO, Ely Borges. **Tecnologia de rochas na construção civil**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2002.

FROTTÉ, Camila; DI NUBILA, Clarisse Sophia Alejandra; NAGALI, André; MAZER, Wellington; MACIOSKI, Gustavo; DE OLIVEIRA, Luna Ollin Steffen. Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD. *Matéria*, v. 22, n. 2, e11811, 2017.

GENCEL, Osman; OGUZ, Mirac; GHOLAMPOUR, Aliakbar; OZBAKKALOGLU, Togay. Recycling waste concretes as fine aggregate and fly ash as binder in production of thermal insulating foam concretes. **Journal of Building Engineering**, v. 38, 102232, jun. 2021.

GEUS, Lúcio Marcos de; GARCIAS, Carlos Mello. Panorama da gestão de resíduos de construção e demolição. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 8, n. 2, ago. 2016.

GRANDE, Fernando Mazeo. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento**. 2003. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

GRIGOLETO, Flávia Muller. Resíduos de construção e demolição em materiais alcali-ativados. 2023. 79 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro federal de educação tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.

HAFEZ, Hisham; KURDA, Reben; KURDA, Rawaz; AL-HADAD, Botan; MUSTAFA, Rasheed; ALI, Barham. A Critical Review on the Influence of Fine Recycled Aggregates on Technical Performance, Environmental Impact and Cost of Concrete. **Applied Sciences**, v. 10, n. 3, 1018, 2020.

HOSSEINNEZHAD, Hojjat; SÜRMEİİÖĞLU, Setenay; ÇAKIR, Özge Andıç; RAMYAR, Kambiz. A Novel Method for Characterization of Recycled Concrete Aggregates: Computerized Microtomography. **Journal of Building Engineering**, v. 76, 107321, out. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA (IBGE), 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sc/criciuma.html>. Acesso em: 23 abr. 2026.

ITTYEIPE, Alan Verghese; THOMAS, Anu; RAMASWAMY, K. P. C&D waste management in India: A case study on the estimation of demolition waste generation rate. **Materials Today: Proceedings**, 2023. *In press*.

JOHN, Vanderley Moacyr. **Reciclagem de resíduos na construção civil**: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. 113 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

- KABIRIFAR, Kamyar; MOJTAHEDI, Mohammad; WANG, Changxin; TAM, Vivian. Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 263, 121265, ago. 2020.
- KAZMIERCZAK, Claudio de Souza. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**: produtos de cerâmica vermelha. São Paulo: IBRACON, 2007.
- KNAPP, Lia Marina; OLIVAN, Lucy Inês. **Método GUT aplicado às estruturas metálicas e estruturas de concreto**. São Paulo: LEUD, 2021.
- KEPNER, Charles Higgins; TREGOE, Benjamin B. **O novo administrador racional**. São Paulo: Kepner-Tregoe do Brasil: McGraw-Hill, 1986. 215 p.
- KUL, Anil; OZCELIKCI, Emircan; OZEL, Behlul Furkan; ILCAN, Huseyin; SAHIN, Oguzhan; GUNAL, Muhammed Faruk; YILDIRIM, Gurkan; SAHMARAN, Mustafa. Optimizing mechanical performance of geopolymers produced from construction and demolition waste: A comparative study of materials from different origins. **Construction and Building Materials**, v. 426, 136171, maio 2024.
- LAADILA, Mohamed Amine; LEBIHAN, Yann; CARON, Richard-Francois; VANEECKHAUTE, Céline. Construction, renovation and demolition (CRD) wastes contaminated by gypsum residues: Characterization, treatment and valorization. **Waste Management**, v. 120, p. 125-135, 2021.
- LARA, Beatriz Leão Evangelista de; PENTEADO, Carmenlucia Santos Giordano. Environmental assessment of construction waste prevention: A case study in a social housing project in Southeast Brazil. **Cleaner Waste Systems**, v. 8, 100145, 2024.
- LEDERER, Jakob; GASSNER, Andreas; KLEEMANN, Felix; FELLNER, Johann. Potenciais para uma Economia Circular de Materiais Minerais de Construção e Resíduos de Demolição em Áreas Urbanas: um estudo de caso de Viena. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 161, 104942, 2020.
- LEONHARDT, Fritz; MONNIG, Eduard. **Construções de concreto**: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. v. 1.
- LIMA, Renan S.B.; TAVARES, M.E.N.; BENTO, Rayza S. Estudo experimental de vigas de concreto armado com agregado de RCD. **VI Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção**, v. 6, p. 197-213, 2019.
- LOPES, Diogo Plachi; SANTOS, Gustavo Soares; MARCOMINI, Luiz Henrique de Brito; MELO, Ruan Aparecido de; PEDROSO, Vinicius Augusto. Reciclagem de Resíduos da Construção Civil no Brasil. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 9, n. 1, 2023.
- MA, Wenting; HAO, Jian Li. Enhancing a circular economy for construction and demolition waste management in China: A stakeholder engagement and key strategy approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 450, 141763, abr. 2024.

MANIPURA, Aruna; DRECHSEL, Pay; JAYAWARDHANA, H. M. L. C.; SHANMUGAPRIYA, R.; MANNAPPERUMA, N. R.; JAYATILLEKE, H. S. I. Improved performance indicators and institutional setup for more viable compost production from municipal solid waste in Sri Lanka. **Waste Management Bulletin**, v. 3, 100217, 2025.

MARÍN-CORTÉS, Sonia; FERNÁNDEZ-ÁLVAREZ, María; ENRÍQUEZ, Esther; FERNÁNDEZ, José F. Experimental characterization data on aggregates from construction and demolition wastes for the assistance in sorting and recycling practices. **Construction and Building Materials**, v. 435, 36798, 2024.

MARKOPOULOS, Evangelos; REFFLINGHAUS, Jens; ROELL, Marven; VANHARANTA, Hannu. Understanding Situationality Using the Kepner-Tregoe Problem Solving Method in the Company Democracy Model to Increase Employee Engagement and Knowledge Contribution. **Creativity, Innovation and Entrepreneurship**, v. 31, p. 196-207, 2022.

MARQUES, Rui Cunha. **A experiência europeia no gerenciamento e aplicação dos resíduos de construção e demolição (RCC)**. Lisboa: Técnico Lisboa, 2017.

MARTÍNEZ, Pablo Saiz; CORTINA, Mariano González; MARTÍNEZ, Francisco Fernández; RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ, Antonio. Comparative study of three types of fine recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW), and their use in masonry mortar fabrication. **Journal of Cleaner Production**, v. 118, p. 162-169, abr. 2016.

MEHTA, Povindar Kumar; MONTEIRO, Paulo José Melaragno. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MONSANI, Juliana Acordi. **Desenvolvimento de argamassas cimentícias a partir da valorização de minerais contidos em rejeitos de carvão catarinense**. 2022. 152 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

MONTEIRO, Adriano Antunes; SILVA, Karoline Teixeira da; MONTEIRO, Adrian Melo; NASCIMENTO, Daniel Brito do. Matriz GUT como Diagnóstico em Inspeção Predial: estudo de caso em edifício multifamiliar em Fortaleza-CE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIAS DAS CONSTRUÇÕES (CBPAT), 2020, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: ALCONPAT, 2020.

NANDAL, Mohit; SOOD, Hemant; GUPTA, Pardeep Kumar; HAQ, Md. Zia Ul. Morphological and physical characterization of construction and demolition waste. **Materials Today: Proceedings**, 2022. *In press*.

NGUYEN, Hung Phong; MUELLER, Anette; NGUYEN, Van Tuan; NGUYEN, Cong Thang. Development and characterization of lightweight aggregate recycled from construction and demolition waste mixed with other industrial by-products. **Construction and Building Materials**, v. 313, n. 125472, dez. 2021.

NETO, Claudio Sbrighi. Agregados para concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 1, cap. 10, p. 323-344

- OLIVEIRA, Kamila Almeida de. **Sistemática CPQvA para a valorização de resíduos sólidos industriais**: um guia para tomada de decisão. 2017. 150 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)**. [S. l.]: ONU, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 20 out. 2023.
- OZEL, Behlul Furkan; GUNAL, Muhammed Faruk; OZCELIKCI, Emircan; TUNCER, Metin; YILDIRIM, Gurkan; SAHMARAN, Mustafa; LACHEMI, Mohamed. Autogenous self-healing of construction and demolition waste-based Engineered Geopolymer Composites: Mechanical property characterization. **Structures**, v. 71, 110128, 2025.
- PADILHA, Angelo Fernando. **Materiais de engenharia**: microestrutura e propriedades. São Paulo: Hemus, 2007.
- PARLAMENTO EUROPEU (EPRS). **Economia Circular**: definição, importância e benefícios. Bruxelas: Parlamento Europeu, 2015. Disponível em: <https://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicao-importancia-e-beneficios>. Acesso em: 5 dez. 2023.
- PAZ, Candida Fachinetto. **Inventário do ciclo de vida aplicado à produção de agregados a partir de resíduos de construção e demolição**. 2020. 120 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2020.
- PINTO, Tarcísio de Paula. **Metodologia para gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 218 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- RAUPP-PEREIRA, Fabiano. **Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral**: composições cerâmicas e cimentícias. 2006. 267 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2006.
- RIBEIRO, Flávio de Miranda. De lixo a recurso: a visão dos resíduos sólidos na economia circular. **Leopoldianum**, Santos, n. 137, 2023.
- RODRIGUES, Fernando; CARVALHO, Maria Teresa; EVANGELISTA, Luís; BRITO, Jorge de. Physical–chemical and mineralogical characterization of fine aggregates from construction and demolition waste recycling plants. **Journal of Cleaner Production**, v. 52, n. 1, p. 438-445, 2013.
- RODRIGUEZ-MORALES, Juliana; BURCIAGA-DIAZ, Oswaldo; GOMEZ-ZAMORANO, Lauren Y.; ESCALANTE-GARCIA, José Ivan. Transforming construction and demolition waste concrete as a precursor in sustainable cementitious materials: An innovative recycling approach. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 204, 107474, maio 2024.

SABERIAN, Mohammad; LI, Jie. Investigation of the mechanical properties and carbonation of construction and demolition materials together with rubber. **Journal of Cleaner Production**, v. 202, p. 553-560, nov. 2018.

SAKTHIBALA, R. K.; VASANTHI, P.; HARIHARASUDHAN, C.; PARTHEEBAN, Pachaivannan. A critical review on recycling and reuse of construction and demolition waste materials. **Cleaner Waste Systems**, v. 12, 100375, dez. 2025.

SANTOS, Pécisio de Souza. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1992. v. 1.

SANTOS, Winnie Franco. Tratamento superficial dos agregados reciclados de RCD com hidrofugante. 2016. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

SANTOS, Rogério Pires; TUBINO, Rejane Maria Candiota. Potential Evaluation of the Use of Construction and Demolition Waste (CDW) in the Recovery of Degraded Soils by Mining in Brazil. **Resources, Conservation & Recycling Advances**, v. 12, 200060, dez. 2021.

SEMBIRING, Firdaus; WASESA, Meditya. **Kepner-Tregoe and analytic hierarchy process or decision support in selecting low-capacity pumps at refinery unit VI Balongan**. Bandung: Institut Teknologi Bandung, 2024.

SHOOSHTARIAN, Salman; CALDERA, Savindi; MAQSOOD, Tayyab; RYLEY, Tim. Using recycled construction and demolition waste products: a review of stakeholders' perceptions, decisions, and motivations. *Recycling*, v. 5, n. 4, 31, 2020.

SILVA, Gilson Vicente da; BORGES, Simone Pereira Taguchi; BARAÑANO, Audrei Giménez. Propriedades físicas, químicas e mecânicas dos cimentos tipo CPI e CPV obtidos com diferentes proporções com filler de calcário. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 13, e309101321272, 2021.

SIMÕES, João Carlos Leite; FORNARI JUNIOR, Celso Carlino Maria. Aplicação da matriz de prioridade (GUT) na gestão de uma usina de reciclagem de resíduos no campus da Universidade Estadual de Santa Cruz. **Revista Focando a Extensão**, v. 10, n. 12, 2023.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE A GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS (SINIR). **Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2019. Disponível em: <https://sinir.gov.br/relatorios/nacional/>. Acesso em: 27 out. 2023.

SOTO-PAZ, Jonathan; ARROYO, Orlando; TORRES-GUEVARA, Luz Elba; PARRA-OROBIO, Brayan A.; CASALLAS-OJEDA, Miguel. The Circular Economy in the Construction and Demolition Waste Management: a comparative analysis in emerging and developed countries. **Journal of Building Engineering**, v. 78, 107724, nov. 2023.

SOUZA, Eduardo. **O futuro sob nossos pés: tijolos de solo-cimento e o caminho para uma construção sustentável**. ArchDaily Brasil, 2024. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/1013227/o-futuro-sob-nossos-pes-tijolos-de-solo-cimento-e-o-caminho-para-uma-construcao-sustentavel>. Acesso em: 5 jan. 2025.

TABOADA, Guillermo Lopez; SERUCA, Isabel; SOUSA, Cristina; PEREIRA, Ángeles. Exploratory Data Analysis and Data Envelopment Analysis of Construction and Demolition Waste Management in the European Economic Area. *Sustainability*, v. 12, 4995, 2020.

TAM, Vivian W. Y.; SOOMRO, Mahfooz; EVANGELISTA, Ana Catarina Jorge. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Construction and Building Materials*, v. 172, p. 272-292, 2018.

ULSEN, Carina; KAHN, Henrique; HAWLITSCHKEK, Gustav; MASINI, Eldon; ANGULO, Sérgio Cirelli; JOHN, Vanderley Moacyr. Production of recycled sand from construction and demolition waste. *Construction and Building Materials*, Oxford, v. 40, p. 1168-1173, mar. 2013.

ULUGÖL, Hüseyin; KUL, Anıl; YILDIRIM, Gürkan; ŞAHMARAN, Mustafa; ALDEMIR, Alper; FIGUEIRA, Diogo; ASHOUR, Ashraf. Mechanical and microstructural characterization of geopolymers from assorted construction and demolition waste-based masonry and glass. *Journal of Cleaner Production*, v. 280, 124358, jan. 2021.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **National Emissions Inventory (NEI) Data**. [Washington, DC]: EPA, 2020. Disponível em: <https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/2020-national-emissions-inventory-nei-data>. Acesso em: 17 nov. 2023.

VILAÇA, André Sales Issa. **Valorização de resíduos da mineração de ferro do quadrilátero ferrífero: métricas de avaliação na perspectiva da economia circular**. 2020. 115 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

WANG, Xiaomei; SOUTH, Andrew; FARNSWORTH, Clifton; HASHIMOTO, Brett. From three-pillars to three-environments: Shifting the paradigm of sustainability in civil and construction engineering. *Cleaner Engineering and Technology*, v. 20, 100748, jun. 2024.

WORLD BANK GROUP (WBG). **Databank**: World Development Indicators. Washington, DC: WBG, 2023. Disponível em: <https://databank.worldbank.org/reports.aspx?source=2&series=SP.POP.TOTL&country=WL>. Acesso em: 24 mar. 2026.

XAVIER, Lúcia Helena; CONTADOR, Luciana; MOFATI, Luciana Marelli; FREITAS, Emmanuelle. Quadro Preliminar para a Gestão dos Minerais Estratégicos a partir dos Princípios da Economia Circular no Brasil. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 76., 2023, São Paulo. *Anais [...]*. São Paulo: ABM, 2023.

YAZIGI, Walid. **A técnica de edificar**. 12. ed. São Paulo: Ed. PINI, 2013.

ZHANG, Chunbo; HU, Mingming; DI MAIO, Francesco; SPRECHER, Benjamin; YANG, Xining; TUKKER, Arnold. An Overview of the Waste Hierarchy Framework for Analyzing the Circularity in Construction and Demolition Waste Management in Europe. *Science of The Total Environment*, v. 803, 149892, jan. 2022.

ZHU, Jiqing; WU, Shaopeng; ZHONG, Jinjun; WANG, Dongming. Investigation of asphalt mixture containing demolition waste obtained from earthquake-damaged buildings. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 466-475, abr. 2012.