

**CENTRO UNIVERSITÁRIO  
ANTÔNIO EUFRÁSIO DE TOLEDO DE PRESIDENTE PRUDENTE**

**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DO CONCRETO**

Lawana Costa Macedo Canhati

Presidente Prudente/SP  
2025

**CENTRO UNIVERSITÁRIO  
ANTÔNIO EUFRÁSIO DE TOLEDO DE PRESIDENTE PRUDENTE**

**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DO CONCRETO**

Lawana Costa Macedo Canhati

Trabalho de Curso apresentado como  
requisito parcial de Conclusão do Curso  
para obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Civil, sob a orientação do Prof.  
Me. Felipe Pires Chaves.

Presidente Prudente/SP  
2025

## **ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DO CONCRETO**

Trabalho de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Prof. Me. Felipe Pires Chaves  
Orientador

Prof. Me. Roberto Kiyoshi Ito  
Examinador

Prof. Dr. Rodrigo Cezar Criado  
Examinador

Presidente Prudente, 03/11/2025.

Não há nada mais sagrado que os Arquivos. Mesmo os templos podem ser reconstruídos, mas os livros não podem ser reescritos.

Fourth Wing – Rebecca Yarros

Dedico este trabalho à minha avó, pelo carinho e apoio emocional constante, aos meus pais, pelo incentivo e dedicação ao longo da minha trajetória educacional, e ao meu companheiro, pela presença e apoio fundamentais nesta jornada.

Dedico também a todos os estudantes, que este trabalho possa servir como fonte de aprendizado e inspiração ao longo de sua trajetória profissional.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à minha família, pelo apoio e incentivo durante toda a minha trajetória acadêmica.

Ao meu parceiro, que com sua presença e apoio emocional tornou cada desafio desta etapa mais suportável e especial.

Às minhas amigas, pelos conselhos e valiosas trocas de experiências.

Aos meus professores e ao meu orientador, pela paciência, orientação e ensinamentos que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

## RESUMO

O presente trabalho avaliou o desempenho ambiental do ciclo produtivo do concreto por meio da Análise do Ciclo de Vida (ACV), utilizando o *software* Umberto para estruturar e quantificar entradas e saídas de materiais, consumo energético, transporte e emissões de CO<sub>2</sub>. A metodologia envolveu a ACV de 1 m<sup>3</sup> de concreto, modelando a extração, processamento e fabricação das matérias-primas, o transporte até a central de concreto, a produção, o transporte até o local de aplicação e o destino final dos resíduos, incluindo reciclagem e reaproveitamento. O *software* Umberto possibilitou analisar detalhadamente todas as entradas e saídas do processo e quantificar as emissões de CO<sub>2</sub> em cada etapa, identificando os subprocessos com maior contribuição. A pesquisa identificou que a produção do clínquer é a etapa com maior impacto ambiental, devido ao elevado consumo de energia térmica e à liberação direta de CO<sub>2</sub> durante a calcinação, enquanto outras etapas, como transporte de resíduos, extração de agregados e transporte do concreto, também apresentaram contribuições relevantes, especialmente considerando variações na distância percorrida. A análise evidenciou a relevância da adoção de estratégias sustentáveis, como a otimização do transporte e práticas baseadas na economia circular, que buscam reduzir a dependência de novos recursos naturais por meio da reciclagem, reaproveitamento de materiais e soluções mais duráveis, podendo contribuir para prolongar o ciclo de vida dos produtos, reduzir o consumo de recursos e diminuir potencialmente as emissões de CO<sub>2</sub> associadas à produção de concreto. Dessa forma, o estudo demonstrou que a utilização de ferramentas de modelagem e monitoramento ambiental permite identificar os pontos críticos de emissão de CO<sub>2</sub>, oferecendo informações que podem apoiar decisões mais conscientes no ciclo produtivo do concreto e contribuindo para a discussão sobre alternativas que promovam maior sustentabilidade na construção civil.

**Palavras-chave:** Análise do Ciclo de Vida (ACV). Concreto. Emissões de CO<sub>2</sub>. Sustentabilidade.

## ABSTRACT

This present work evaluated the environmental performance of the concrete production cycle through Life Cycle Assessment (LCA), using the Umberto *software* to structure and quantify material inputs and outputs, energy consumption, transportation, and CO<sub>2</sub> emissions. The methodology involved the LCA of 1 m<sup>3</sup> of concrete, modeling the extraction, processing, and manufacturing of raw materials, transportation to the concrete plant, production, transport to the application site, and the final disposal of waste, including recycling and reuse. The Umberto *software* made it possible to analyze in detail all inputs and outputs of the process and to quantify CO<sub>2</sub> emissions at each stage, identifying the subprocesses with the highest contribution. The study found that clinker production is the stage with the greatest environmental impact due to the high consumption of thermal energy and the direct release of CO<sub>2</sub> during calcination, while other stages, such as waste transport, aggregate extraction, and concrete transport, also showed relevant contributions, especially when considering variations in distance traveled. The analysis highlighted the importance of adopting sustainable strategies, such as transportation optimization and circular economy practices, which aim to reduce dependence on new natural resources through recycling, material reuse, and more durable solutions. These measures can help extend the product life cycle, reduce resource consumption, and potentially decrease CO<sub>2</sub> emissions associated with concrete production. Thus, the study demonstrated that the use of environmental modeling and monitoring tools makes it possible to identify critical CO<sub>2</sub> emission points, providing information that can support more conscious decisions within the concrete production cycle and contribute to the discussion of alternatives that promote greater sustainability in the construction industry.

**Keywords:** Life Cycle Assessment (LCA). Concrete. CO<sub>2</sub> Emissions. Sustainability.

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland  
ABCV – Associação Brasileira de Ciclo de Vida  
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ACV – Análise do Ciclo de Vida  
BEES – Building for Environmental and Economic Sustainability  
 $\text{CCl}_2\text{F}_2$  – Clorofluorcarbono  
 $\text{CCl}_4$  – Tetracloroeto de Carbono  
CBGCV – Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida  
CFCs – Clorofluorcarbonetos  
 $\text{CF}_3\text{Br}$  – Bromotrifluorometano  
 $\text{CH}_3\text{Br}$  – Metil Brometo  
 $\text{CH}_4$  – Metano  
 $\text{CHF}_2\text{Cl}$  – Clorodifluorometano  
CILCA – Conferência Internacional sobre ACV na América Latina  
 $\text{CO}_2$  – Dióxido de Carbono  
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente  
CP – Cimento Portland  
CP-I – Cimento Portland Comum  
CPI-S – Cimento Portland Comum com Adição  
CPII-E – Cimento Portland Composto com Escória  
CPII-F – Cimento Portland Composto com Fíler  
CPII-Z – Cimento Portland Composto com Pozolana  
CP-III – Cimento Portland de Alto Forno  
CP-IV – Cimento Portland Pozolânico  
CP-V ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial  
 $\text{CaCO}_3$  – Carbonato de Cálcio  
 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  – Gipsita  
g – Grama

gCO<sub>2</sub>/MJ – Grama de Dióxido de Carbono por Megajoule

gCO<sub>2</sub>/L – Grama de Dióxido de Carbono por Litro

GEE – Gases do Efeito Estufa

Gg – Gigagrama

GWP – Global Warming Potential

h – Hora

IBICT – Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia

ICV – Inventário do Ciclo de Vida

IFEU – Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg GmbH

IFU – Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

kcal – Quilocaloria

kcal/kg – Quilocaloria por Quilograma

kg – Quilogramakg/m<sup>3</sup> – Quilograma por Metro Cúbico

kgCO<sub>2</sub> – Quilograma de Dióxido de Carbono (usado para medir emissões de CO<sub>2</sub>)

kgCO<sub>2</sub>/kg – Quilograma de Dióxido de Carbono por Quilograma

kgCO<sub>2</sub>/L – Quilograma de Dióxido de Carbono por Litro

kgCO<sub>2</sub>/t.km – Quilograma de Dióxido de Carbono por Tonelada-Quilômetro

kJ – Quilojoule

kJ/kg – Quilojoule por Quilograma

km – Quilômetro

kW – Quilowatt

kWh – Quilowatt-hora

kWh/kg – Quilowatt-hora por Quilograma

kWh/m<sup>3</sup> – Quilowatt-hora por Metro Cúbico

kWh/t – Quilowatt-hora por Tonelada

L – Litro

L/kg – Litro por Quilograma

L/m<sup>3</sup> – Litro por Metro Cúbico

L/t.km – Litro por Tonelada-quilômetro

LCA – Life Cycle Assessment

LQES – Laboratório de Química do Estado Sólido

m<sup>2</sup> – Metro Quadrado

m<sup>3</sup> – Metro Cúbico

MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia

MJ – Megajoule

MJ/kg – Megajoule por quilograma

MJ/L – Megajoule por litro

MJ/t – Megajoule por tonelada

MP – Material Particulado

N<sub>2</sub>O – Óxido Nitroso

NH<sub>3</sub> – Amônia

NO – Monóxido de Nitrogênio

NO<sub>2</sub> – Dióxido de Nitrogênio

NO<sub>2</sub><sup>-</sup> – Nitrito

NO<sub>3</sub><sup>-</sup> – Nitrato

NO<sub>x</sub> – Óxidos de Nitrogênio

PCI – Poder Calorífico Inferior

RCD – Resíduos de Construção e Demolição

SIDAC – Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção

SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil

SO<sub>2</sub> – Dióxido de Enxofre

SO<sub>x</sub> – Óxidos de Enxofre

SP – São Paulo

t – Tonelada

t/m<sup>3</sup> – Tonelada por Metro Cúbico

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES E TABELAS

### FIGURAS

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1 – Estrutura ACV .....                                              | 19 |
| FIGURA 2 – Estágios do ciclo de vida do produto .....                       | 19 |
| FIGURA 3 – Categorias de fluxos de materiais de inventário .....            | 22 |
| FIGURA 4 – Ano letivo representado graficamente em Redes de Petri.....      | 33 |
| FIGURA 5 – Modelo de ACV.....                                               | 34 |
| FIGURA 6 – Torre de ciclone .....                                           | 38 |
| FIGURA 7 – Interface de funcionamento .....                                 | 43 |
| FIGURA 8 – Processos e entradas .....                                       | 44 |
| FIGURA 9 – Processo extração de brita .....                                 | 45 |
| FIGURA 10 – Especificações processo extração de brita.....                  | 46 |
| FIGURA 11 – Aba novas entradas processo extração de brita.....              | 46 |
| FIGURA 12 – Aba inserção de entradas processo extração de brita .....       | 47 |
| FIGURA 13 – Aba inserção de entradas processo extração de brita .....       | 47 |
| FIGURA 14 – Aba inserção de entradas processo extração de brita .....       | 48 |
| FIGURA 15 – Especificação final processo extração de brita .....            | 48 |
| FIGURA 16 – Cálculo processo extração de brita.....                         | 50 |
| FIGURA 17 – Inserção flow processo extração de brita.....                   | 50 |
| FIGURA 18 – Inserção massa específica e GWP processo extração de brita..... | 51 |
| FIGURA 19 – Impacto ambiental processo extração de brita .....              | 51 |
| FIGURA 20 – Inventário total processo extração de brita .....               | 52 |
| FIGURA 21 – Especificação processo transporte cimento.....                  | 53 |
| FIGURA 22 – Especificação processo transporte cimento.....                  | 53 |
| FIGURA 23 – Parâmetro de modelo processo transporte cimento .....           | 54 |
| FIGURA 24 – Processo extração de brita .....                                | 56 |
| FIGURA 25 – Insumos do processo extração de brita .....                     | 57 |
| FIGURA 26 – Processo extração de areia .....                                | 58 |
| FIGURA 27 – Insumos do processo extração de areia .....                     | 59 |
| FIGURA 28 – Processos produção de clínquer e cimento .....                  | 61 |
| FIGURA 29 – Insumo do processo produção de clínquer .....                   | 61 |
| FIGURA 30 – Insumo do processo produção de cimento .....                    | 62 |

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 31 – Processo captação de água .....                                            | 63 |
| FIGURA 32 – Insumo do processo captação de água .....                                  | 63 |
| FIGURA 33 – Processo transporte de brita .....                                         | 65 |
| FIGURA 34 – Insumos do processo transporte de brita .....                              | 66 |
| FIGURA 35 – Processo transporte de areia .....                                         | 67 |
| FIGURA 36 – Insumos do processo transporte de areia .....                              | 67 |
| FIGURA 37 – Processo transporte do cimento .....                                       | 68 |
| FIGURA 38 – Insumos do processo transporte do cimento .....                            | 69 |
| FIGURA 39 – Processo transporte de água .....                                          | 70 |
| FIGURA 40 – Insumos do processo transporte de água .....                               | 70 |
| FIGURA 41 – Processo produção do concreto .....                                        | 72 |
| FIGURA 42 – Insumos do processo produção do concreto .....                             | 72 |
| FIGURA 43 – Processo transporte do concreto .....                                      | 74 |
| FIGURA 44 – Insumos do processo transporte do concreto (distância 10 km) .....         | 74 |
| FIGURA 45 – Insumos do processo transporte do concreto (distância 20 km) .....         | 75 |
| FIGURA 46 – Processo utilização .....                                                  | 76 |
| FIGURA 47 – Insumos do processo utilização .....                                       | 77 |
| FIGURA 48 – Processo transporte dos resíduos .....                                     | 78 |
| FIGURA 49 – Insumos do processo transporte dos resíduos .....                          | 79 |
| FIGURA 50 – Máquina D2540 .....                                                        | 80 |
| FIGURA 51 – Processo destinação final .....                                            | 81 |
| FIGURA 52 – Insumos do processo destinação final .....                                 | 82 |
| FIGURA 53 – Inventário total (distância 10 km) .....                                   | 83 |
| FIGURA 54 – Inventário total (distância 20 km) .....                                   | 84 |
| FIGURA 55 – Avaliação de impacto – contribuição total (distância 10 km) .....          | 85 |
| FIGURA 56 – Avaliação de impacto - contribuição total (distância 20 km) ... ..         | 85 |
| FIGURA 57 – Avaliação de impacto - contribuição por processos .....                    | 86 |
| FIGURA 58 – Avaliação de impacto - contribuição por processos (distância 10 km) ... .. | 87 |
| FIGURA 59 – Avaliação de impacto - contribuição por processos (distância 20 km) ... .. | 87 |
| FIGURA 60 – Diagrama final ACV do concreto .....                                       | 89 |

## **TABELAS**

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| TABELA 1 – Composição dos cimentos Portland .....                         | 39 |
| TABELA 2 – Emissões de CO <sub>2</sub> por processo no sistema (kg) ..... | 90 |
| TABELA 3 – Emissões de CO <sub>2</sub> por processo no sistema (%).....   | 90 |

## SUMÁRIO

|                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                 | <b>16</b> |
| <b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>                      | <b>17</b> |
| 2.1 Sustentabilidade na Construção Civil .....            | 17        |
| 2.2 Contextualização Histórica .....                      | 18        |
| 2.3 Análise do Ciclo de Vida.....                         | 18        |
| 2.3.1 Definição de objetivo e escopo .....                | 20        |
| 2.3.2 Análise de inventário do ciclo de vida (ICV) .....  | 21        |
| 2.3.3 Avaliação de impacto do ciclo de vida .....         | 23        |
| 2.3.4 Interpretação dos resultados .....                  | 24        |
| 2.3.5 Cenário global da análise do ciclo de vida .....    | 24        |
| 2.4 ACV na construção civil.....                          | 26        |
| 2.5 Avaliação dos Impactos Ambientais.....                | 28        |
| 2.6 <i>Softwares</i> na ACV .....                         | 30        |
| 2.6.1 <i>Software</i> Umberto .....                       | 31        |
| 2.7 Concreto.....                                         | 35        |
| 2.7.1 Agregados.....                                      | 35        |
| 2.7.2 Cimento Portland .....                              | 37        |
| <b>3 MÉTODOS EXPERIMENTAIS .....</b>                      | <b>41</b> |
| 3.1 Utilização do <i>Software</i> .....                   | 42        |
| 3.2 Análises Realizadas .....                             | 54        |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                     | <b>55</b> |
| 4.1 Representação Gráfica da Obtenção dos Materiais ..... | 55        |
| 4.1.1 Extração de brita .....                             | 55        |
| 4.1.2 Extração de areia .....                             | 57        |
| 4.1.3 Produção de cimento .....                           | 59        |
| 4.1.4 Captação de Água .....                              | 62        |
| 4.2 Transporte das Matérias-Primas .....                  | 64        |

|                                                                   |                |
|-------------------------------------------------------------------|----------------|
| 4.2.1 Transporte de Brita .....                                   | 65             |
| 4.2.2 Transporte de Areia .....                                   | 66             |
| 4.2.3 Transporte do Cimento .....                                 | 68             |
| 4.2.4 Transporte de Água .....                                    | 69             |
| 4.3 Produção do Concreto .....                                    | 71             |
| 4.4 Transporte do Concreto.....                                   | 73             |
| 4.5 Utilização.....                                               | 75             |
| 4.6 Transporte dos Resíduos .....                                 | 77             |
| 4.7 Disposição Final.....                                         | 79             |
| 4.8 Resultados Finais.....                                        | 82             |
| 4.8.1 Inventário Total .....                                      | 83             |
| 4.8.2 Avaliação de Impacto.....                                   | 84             |
| 4.9 Diagrama Final.....                                           | 88             |
| 4.10 Análise das Emissões de kgCO <sub>2</sub> do Sistema .....   | 89             |
| 4.10.1 Medidas para Redução das Emissões de CO <sub>2</sub> ..... | 91             |
| <br><b>5 CONCLUSÃO .....</b>                                      | <br><b>93</b>  |
| <br><b>REFERÊNCIAS.....</b>                                       | <br><b>94</b>  |
| <br><b>APÊNDICE.....</b>                                          | <br><b>101</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é um dos maiores consumidores de recursos naturais e geradores de resíduos no mundo, contribuindo significativamente para as emissões de gases de efeito estufa e para a degradação ambiental. Nesse contexto, torna-se indispensável adotar ferramentas que possibilitam a diminuição dos impactos ambientais associados aos processos produtivos. A Análise do Ciclo de Vida (ACV) surge como uma metodologia capaz de avaliar de forma abrangente os impactos desde a extração das matérias-primas até o destino final dos materiais (Almeida, 2014, p. 21, 22).

Ao aplicar a ACV na produção de concreto, utilizando o *software* Umberto, é possível identificar os principais pontos críticos do processo, gerar dados confiáveis e propor melhorias que contribuam para a redução do consumo de energia, da emissão de poluentes e da geração de resíduos (IPoint, 2025, s.p.). Essa abordagem oferece suporte técnico e científico à tomada de decisões sustentáveis.

Dessa forma, a pesquisa desenvolvida possui contribuição direta para o desenvolvimento de práticas mais sustentáveis na construção civil, proporcionando dados técnicos e científicos que servem de base a tomada de decisões ambientais conscientes. Além disso, promoveu a otimização dos processos produtivos e a quantificação dos impactos ambientais.

Este trabalho teve por objetivo geral realizar a ACV do concreto, com o intuito de identificar e avaliar os impactos ambientais associados a todas as etapas de seu ciclo produtivo, desde a extração das matérias-primas até o destino final. A proposta foi fornecer dados técnicos que contribuam para práticas mais sustentáveis no setor da construção civil.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Sustentabilidade na Construção Civil

A sustentabilidade na construção civil envolve práticas que minimizam os impactos ambientais, promovem o uso eficiente de recursos naturais e buscam soluções energéticas mais econômicas e limpas. Isso inclui o reaproveitamento de materiais, a redução de resíduos e o uso consciente da energia e dos insumos naturais, garantindo viabilidade econômica e qualidade de vida a longo prazo (Feicon, 2022, s.p).

A construção civil é uma das atividades humanas que mais consome recursos naturais e energia, além de gerar grandes volumes de resíduos. Estima-se que mais da metade dos resíduos sólidos produzidos no mundo seja proveniente desse setor, o que evidencia seu elevado impacto ambiental. Diante desse cenário, torna-se indispensável repensar práticas e adotar soluções mais sustentáveis (MMA, s.d., s.p).

A atividade de construção e demolição da indústria da construção civil é um dos modelos de produção e consumo mais ineficientes, sendo responsável por:

- uma parcela entre 12% e 16% de consumo de água;
- 25% de utilização da madeira florestal;
- 30% a 40% da energia consumida;
- 40% do consumo da matéria-prima extrativa;
- 20% a 30% de produção de GEE; e
- 40% dos resíduos gerados, sendo que destes, parte é depositada em aterros sanitários (Campos, 2012, p. 32).

A implementação de práticas sustentáveis na construção civil oferece uma série de benefícios estratégicos e funcionais. Entre eles, destaca-se a redução de custos operacionais por meio da otimização dos processos e o acesso crescente a incentivos fiscais voltados a iniciativas ambientalmente responsáveis (Feicon, 2022, s.p).

Dentre as alternativas sustentáveis aplicáveis à construção civil, destacam-se a reciclagem de materiais de construção, como concreto, madeira e metais, o reuso de componentes e estruturas, que diminui a demanda por matérias-primas novas e reduz a geração de resíduos, e o uso da Análise do Ciclo de Vida (ACV), que permite avaliar os impactos ambientais de um material ou processo, desde

a extração da matéria-prima até o descarte final, possibilitando escolhas mais responsáveis ao longo de todo o ciclo construtivo.

## **2.2 Contextualização Histórica**

Durante os anos 1970, diversas empresas passaram a reavaliar suas práticas diante da crescente pressão para minimizar os danos ambientais causados por suas operações. A crise do petróleo, no início da década, foi um marco que impulsionou o interesse global por fontes de energia alternativas e pela eficiência no uso dos recursos naturais (Campos, 2012, p. 34).

Nos anos seguintes, especialmente na década de 1980, as organizações começaram a reconhecer que investir em práticas sustentáveis não apenas beneficiava o meio ambiente, mas também representava uma oportunidade para reduzir custos e melhorar a eficiência operacional (Campos, 2012, p. 35).

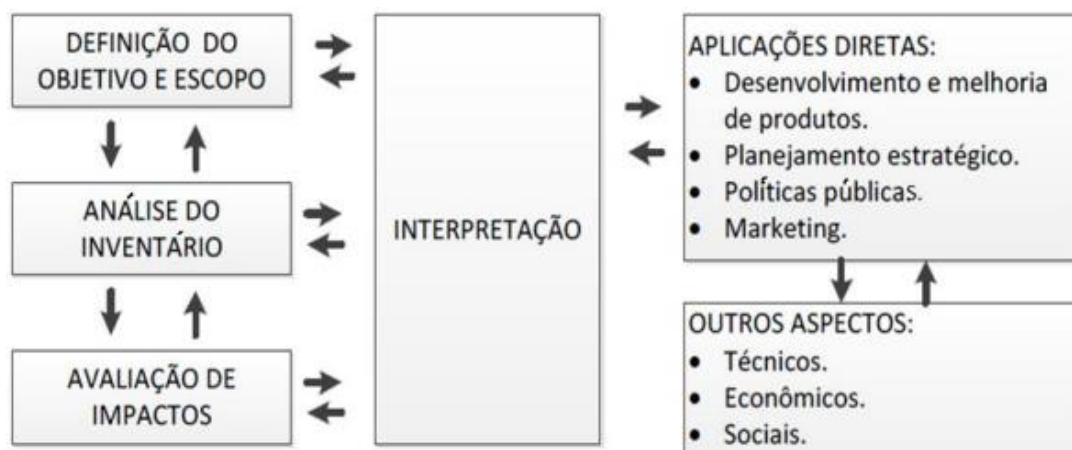
Entretanto, surgiram dificuldades ao tentar avaliar e comparar o impacto ambiental de diferentes produtos ou processos. O que parecia simples revelou-se um desafio técnico, exigindo a criação de parâmetros e critérios padronizados que permitissem realizar comparações precisas entre as diferentes opções (Campos, 2012, p. 35).

## **2.3 Análise do Ciclo de Vida**

A ACV é um método estruturado que tem como objetivo quantificar e analisar os impactos que um produto ou material gera no meio ambiente e na saúde humana ao longo de toda a sua existência (Oliveira, 2007, p. 32).

Segue a figura 1, que representa a estrutura detalhada de uma ACV.

**Figura 1 – Estrutura ACV**

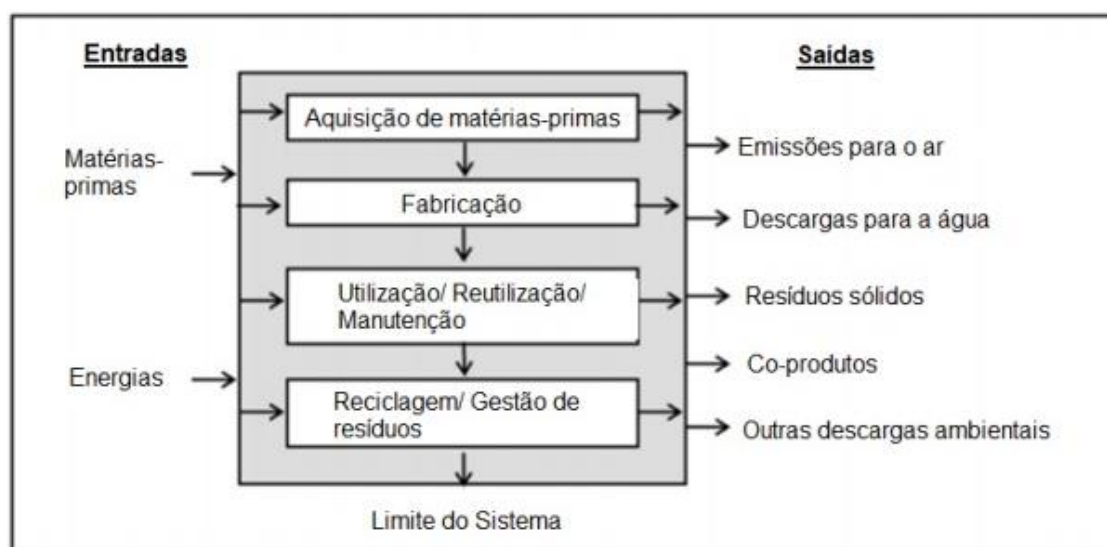


Fonte: Almeida, 2014, p. 40.

Segundo Tonon (2020, p. 33), “o termo “ciclo de vida” atribui-se à maioria das atividades no curso de vida do produto, as quais são aquisição de matéria prima, fabricação, utilização, manutenção e disposição final”.

Segue a figura 2, que representa as possíveis entradas, processos e saídas de um produto ao longo de seu ciclo de vida.

**Figura 2 – Estágios do ciclo de vida do produto**



Fonte: Tonon, 2020, p. 34.

No ano de 1997, foi publicada a norma internacional ISO 14040, responsável por estabelecer a estrutura, os princípios, e os requisitos necessários para a realização de estudos de ACV. A norma estabelece quatro etapas fundamentais para a realização de um estudo: a definição do objetivo e do escopo, a análise do inventário do ciclo de vida, a avaliação de impacto do ciclo de vida, e a interpretação do ciclo de vida (Campos, 2012, p. 37).

A norma ABNT NBR ISO 14041 trata de duas etapas da ACV: a definição do objetivo e escopo, e ICV, já as normas ABNT NBR ISO 14042 e 14043 abordam, respectivamente, a análise de inventário e a avaliação de impacto do ciclo de vida, conforme estabelecidos na ABNT NBR ISO 14040:2009, sendo a versão corrigida de 2014.

Segundo a norma NBR ISO 14040 (2001), a ACV considera categorias de impacto que incluem o uso de recursos, a saúde humana e as consequências ecológicas.

Por abranger todas as fases da vida dos produtos, e estar padronizada pela ISO, fato que garante credibilidade frente à comunidade científica, a ACV é uma metodologia que vem sendo utilizada em diversos campos da construção civil. Entre eles, pode-se citar:

- \* avaliação e certificação ambiental de materiais de construção;
- \* avaliação e certificação ambiental de edifícios;
- \* elaboração de instrumentos de informações ao projetista (catálogos);
- \* desenvolvimento de ferramentas computacionais que auxiliam na decisão no momento do projeto (Oliveira, 2007, p. 33).

### **2.3.1 Definição de objetivo e escopo**

Na definição do objetivo, deve-se apresentar de forma clara a finalidade do estudo, as motivações que justificam sua realização e o público-alvo a que se destinam os resultados (Willers, Rodrigues, Silva, 2010, p. 02).

O escopo de uma ACV varia conforme o objetivo do estudo. Ele define até que ponto o sistema será analisado e qual será o nível de detalhamento necessário. Por isso, a profundidade e o tamanho da análise podem mudar bastante de um caso para outro, conforme trata a NBR 14040 (ABNT, 2014, p. 06).

Na definição de um escopo de um estudo da ACV, devem ser considerados e claramente descritos os seguintes itens:

- a) Definição das unidades do sistema
- b) Estabelecimento da função e da unidade funcional do sistema
- c) Procedimentos de alocação
- d) Requisitos dos dados
- e) Hipóteses de limitações
- f) Avaliação de impacto, quando necessária, e a metodologia a ser adotada
- g) Interpretação dos dados, quando necessária, e a metodologia a ser adotada
- h) Tipo e formato do relatório relevante para o estudo e a definição dos critérios para a revisão crítica, se necessário (Campos, 2012, p. 39).

Um exemplo de análise de ciclo de vida envolve a comparação entre sacolas de papel e de plástico no transporte de compras. O estudo de Allen (2001) ilustra os desafios em determinar qual alternativa é ambientalmente mais vantajosa, considerando não apenas o material, mas também a funcionalidade de cada opção.

Segundo Allen (2001), as sacolas de papel suportam menos peso e só podem carregar até metade de seu volume, conseqüentemente são menos eficientes do que as de plástico. Por isso, não seria apropriado comparar uma unidade de cada diretamente. Para uma análise justa, é necessário considerar que, por exemplo, uma sacola plástica pode substituir duas de papel. Nesse contexto, a capacidade útil da sacola de papel torna-se a unidade funcional da comparação (Allen, 2001, apud Oliveira, 2007, p. 34).

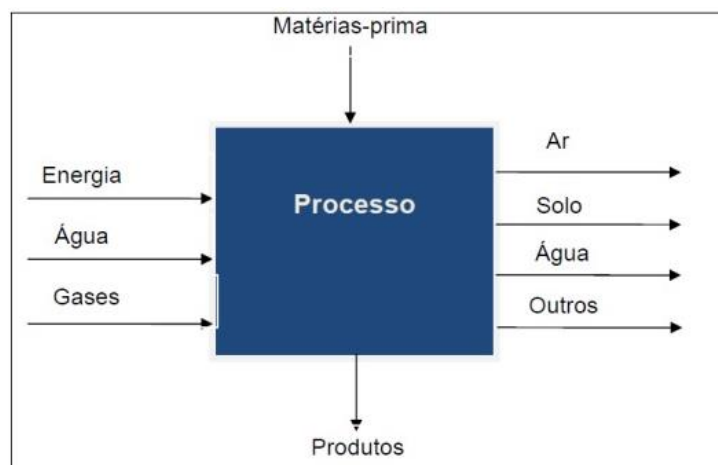
### **2.3.2 Análise de inventário do ciclo de vida (ICV)**

O processo de análise envolve a identificação e a quantificação de todos os recursos consumidos e resíduos gerados ao longo do funcionamento de um sistema produtivo. Por meio dessa coleta e organização dos dados, é possível elaborar um panorama completo dos fluxos de materiais e energia. Esse mapeamento, denominado Inventário do Ciclo de Vida (ICV), serve como base para compreender e avaliar os potenciais impactos ambientais associados a cada fase do processo (Willers, Rodrigues, Silva, 2010, p. 02).

Adota-se o princípio do equilíbrio de massa e energia, ou seja, tudo o que entra no sistema analisado deve corresponder, em quantidade, ao que dele sai, desde a origem dos recursos até a destinação final do produto (Campos 2012, p. 40).

A figura 3 apresenta uma representação desse processo.

**FIGURA 3** – Categorias de fluxos de materiais de inventário



Fonte: Campos, 2012, p. 40.

A análise de inventário do ciclo de vida (ICV) é considerada a mais complexa da ACV. Isso se deve, em grande parte, às dificuldades envolvidas na obtenção de dados, como a escassez de informações precisas e adaptadas às condições locais, além das limitações impostas pela confidencialidade de algumas fontes (Campos, 2012, p. 40). Segue os objetivos para a criação do ICV:

- a) estabelecer a base de informações dos requerimentos do sistema para futuras análises;
- b) identificar pontos dentro do ciclo de vida como um todo, ou dentro de um dado processo, onde as melhores oportunidades de redução na demanda de recursos e na geração de emissões podem ser alcançadas;
- c) comparar as entradas e saídas do sistema estudado com o de produtos alternativos;
- d) ajudar a guiar o desenvolvimento de novos produtos por meio da redução de demanda de recursos e geração de emissões;
- e) ajudar a identificar necessidades para análise de impacto no ciclo de vida;
- e
- f) promover informações necessárias para conduzir a análise de melhorias (Campos, 2012, p. 41).

Portanto, o Inventário do Ciclo de Vida (ICV) é uma ferramenta essencial para avaliar o ciclo de vida completo de um produto ou processo, permitindo identificar os pontos mais críticos em termos de impacto ambiental. A partir dessa identificação, é possível buscar estratégias mais eficazes para minimizar os danos ao meio ambiente (Almeida, 2014, p. 43).

### 2.3.3 Avaliação de impacto do ciclo de vida

Essa etapa tem como foco principal interpretar a relevância dos possíveis impactos ambientais com base nas informações obtidas no inventário do ciclo de vida. De forma geral, ela busca correlacionar os dados coletados com categorias específicas de impacto ambiental, como mudanças climáticas, poluição do ar ou esgotamento de recursos. O objetivo é compreender de forma mais ampla as consequências ambientais das atividades analisadas, classificá-las e quantificá-las corretamente (Willers, Rodrigues, Silva, 2010, p. 02).

O processo envolve, obrigatoriamente, três componentes principais: a definição das categorias de impacto, que identificam os tipos de problemas ambientais a serem considerados; a classificação, que associa os dados coletados à problemas ambientais; e a caracterização, que quantifica a gravidade dos impactos (Campos, 2012, p. 41).

a) Seleções de categorias de impacto: seleção dos indicadores de categorias ou modelos de caracterização que serão definidos. Segundo Seo e Kulay (2006), as categorias devem ser definidas com base no conhecimento científico dos processos e mecanismos ambientais. Caso não seja possível, admite-se que, em alguns casos muito específicos, o julgamento de valores possa substituir parte do conhecimento científico.

b) Classificação: são classificados e agrupados os dados de inventário nas diversas categorias selecionadas, como aquecimento global, destruição da camada de ozônio, acidificação, toxicidade humana, exaustão dos recursos naturais, etc. Segundo a NBR ISO 14044 (ABNT, 2009), convém que exista uma correlação dos resultados do inventário do ciclo de vida com as categorias de impacto.

c) Caracterização: tal como transcrito na NBR ISO 14044 (ABNT, 2009), a caracterização envolve a concepção dos resultados do ICV para unidades comuns e a agregação dos resultados convertidos dentro da mesma categoria de impacto (Campos, 2012, p. 41, 42).

Dentre os recursos adicionais e opcionais que podem ser utilizados na avaliação de impactos da ACV, destacam-se a normalização, o agrupamento, a ponderação e a verificação da qualidade dos dados. Essas etapas complementares têm como finalidade consolidar as cargas ambientais em um índice único, facilitando a interpretação dos resultados (Campos, 2012, p.42).

A normalização busca equilibrar a influência de cada categoria de impacto, garantindo que todas tenham o mesmo peso na composição final. O agrupamento permite organizar e priorizar as diferentes categorias de impacto, criando uma estrutura hierárquica entre elas. Por fim, a ponderação envolve a

atribuição de pesos às categorias, com base em critérios que podem variar conforme a percepção do analista, a preferência do cliente ou o conhecimento técnico de especialistas (Oliveira, 2007, p. 36).

#### **2.3.4 Interpretação dos resultados**

Essa etapa corresponde a associação e organização dos resultados da análise do inventário e da avaliação dos impactos ambientais, de acordo com o objetivo e o escopo do estudo. O principal objetivo da etapa é compreender as informações fornecidas pelos dados analisados, interpretá-los e, elaborar conclusões e recomendações que contribuam de forma eficaz para o processo de tomada de decisão (Júnior et al., 2008, p. 05).

A fase de interpretação inclui três procedimentos principais:

- a) Identificação das questões significativas: identificação e estruturação da informação; critérios de alocação; modelos e fatores de caracterização e indicadores de categoria; identificação das escolhas de valor usadas no estudo, e o papel e as responsabilidades das diferentes partes interessadas; e a significância de categorias de dados, categorias de impacto e processos elementares incluídos no processo (SOARES et al, 2006).
- b) Avaliação: deve-se assegurar a relevância, a disponibilidade e a completude dos dados, além da confiabilidade dos resultados e a consistência das suposições, método se dados.
- c) Conclusão: após colhidas e avaliadas as informações, é, então, elaborado um relatório sobre as questões de maior relevância ao processo (Campos, 2012, p. 42).

A etapa de interpretação na ACV é essencial, uma vez que transforma os dados técnicos em informações compreensíveis e aplicáveis. É nesse momento que se avalia o que os resultados realmente significam, permitindo direcionar ações, corrigir falhas no processo e apoiar escolhas mais conscientes e alinhadas com a sustentabilidade.

#### **2.3.5 Cenário global da análise do ciclo de vida**

A ACV surgiu na década de 1960, desde então, têm se espalhado em diferentes partes do mundo. Diversos estudos realizados em contextos variados têm fortalecido a metodologia e ampliado seu reconhecimento internacional. Os países que mais se destacam nesse processo, especialmente pelo seu pioneirismo e pela qualidade das pesquisas, estão localizados na América do Norte e na Europa, que

ainda hoje são considerados centros de referência nesse campo (Willers, Rodrigues, Silva, 2010, p. 02).

De acordo com Lima (2007), a União Europeia apresenta um avanço significativo no uso da análise, contando com bancos de dados consolidados, *softwares* especializados e políticas públicas fundamentadas na abordagem (Lima 2007, apud Campos, 2012, p. 44).

Nos países em desenvolvimento, ainda há um incentivo limitado para pesquisas relacionadas à ACV. No entanto, já são visíveis algumas iniciativas promissoras, como a criação de bancos de dados e a presença em congressos e conferências voltados ao tema. Os estudos em ACV concentram-se majoritariamente no meio acadêmico, com destaque para programas de pós-graduação, como mestrados e doutorados (Almeida, 2014, p. 33).

Em alguns países, softwares estão sendo desenvolvidos para servirem como ferramenta de apoio à tomada de decisão na busca por produtos e serviços mais sustentáveis. Alguns destes, como o Building for Environmental and Economic Sustainability versão 3.0 (BEES 3.0), são fundamentados na Análise de Ciclo de Vida (ACV). Este é um procedimento sistemático para mensurar e avaliar os impactos que um produto ou material causa no meio ambiente e sobre a saúde humana, desde a sua produção até a disposição final (Oliveira, 2007, p. 07).

A criação da Associação Brasileira de Ciclo de Vida (ABCV), em 2002, marcou um passo importante na difusão da ACV no Brasil. Desde então, a entidade tem atuado ativamente na promoção do tema por meio de eventos científicos. Dentre suas principais iniciativas, destacam-se a realização da Conferência Internacional sobre ACV na América Latina (CILCA), cuja segunda edição ocorreu em 2007 em São Paulo, e a organização do Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida (CBGCV), realizado em 2008 e 2010 (Willers, Rodrigues, Silva, 2010, p. 02).

A 11ª edição da Conferência Internacional sobre Avaliação do Ciclo de Vida na América Latina (CILCA) ocorreu entre os dias 7 e 11 de abril de 2025, com o tema “Avaliação do Ciclo de Vida como base da economia circular: produção, consumo e sociedades mais sustentáveis”, na Cidade do México (Lifecycleinitiative, s.d, s.p)

A 8ª edição do Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida (CBGCV) foi realizada entre os dias 28 e 30 de novembro de 2023, com o tema "A

ACV na transição para uma economia circular e de baixo carbono". Até o momento, não há informações disponíveis sobre a próxima edição do evento (GVC, 2023, s.p).

No Brasil, a ACV começa a ganhar mais espaço e estrutura, com um cenário promissor para sua aplicação em diferentes setores, como a indústria, agroindústria e a academia. A área acadêmica, em especial, tem se mostrado ativa no desenvolvimento de pesquisas voltadas à resolução de problemas ambientais, com potencial para gerar soluções aplicáveis ao setor produtivo (Willers, Rodrigues, Silva, 2010, p. 02).

[...] No governo brasileiro, a ACV é tratada pelo Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), por meio do Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT).  
[...] Justamente por meio do IBICT foi que o Brasil passou a fazer parte da Plataforma Internacional do Ciclo de Vida, importante fórum internacional para o desenvolvimento da metodologia ACV, podendo participar ativamente no seu aperfeiçoamento e, ao mesmo tempo, disponibilizá-la para a indústria nacional, buscando a manutenção de sua competitividade em nível mundial (Campos, 2012, p. 54).

Na América Latina, o Brasil se destaca como o único país com um programa estruturado para o desenvolvimento de Inventários de Ciclo de Vida, alinhado às diretrizes da Plataforma Internacional do Ciclo de Vida e apoiado por órgãos governamentais. No entanto, sua implementação ainda está em fase preliminar, em grande parte devido à limitada colaboração da indústria na divulgação de dados fundamentais (Campos, 2012, p. 54).

## **2.4 ACV na construção civil**

A utilização da ACV no contexto das edificações visa, principalmente, compreender os padrões culturais de consumo durante as etapas de construção e utilização, estimular soluções com desempenho mais eficiente e incentivar o desenvolvimento de tecnologias voltadas às fontes de energia renováveis. Por outro lado, quando aplicada aos materiais, a ACV tem sido empregada para examinar e comparar produtos, promovendo escolhas ambientalmente mais conscientes e contribuindo para decisões mais sustentáveis ao longo do ciclo de vida dos itens avaliados (Campos, 2012, p. 55).

[...] a ACV é uma metodologia que vê sendo utilizada em diversos campos da construção civil. Entre eles, pode-se citar: avaliação e certificação ambiental de materiais de construção; avaliação e certificação ambiental de edifícios; elaboração de instrumentos de informações ao projetista (catálogos); desenvolvimento de ferramentas computacionais que auxiliam na decisão no momento do projeto (Oliveira, 2007, p. 32, 33).

O tempo de vida de um edifício tem uma relação direta com os impactos ambientais ao longo do seu ciclo. Edifícios que permanecem por mais tempo em uso reduzem a necessidade de extração de novas matérias-primas para substituí-los, além de diminuir o tempo exigido para a gestão dos resíduos gerados durante a demolição. Para avaliar de forma eficaz o impacto ambiental de uma construção, é essencial realizar uma análise do ciclo de vida que contemple todas as suas fases, desde o planejamento até a demolição. Essa análise, por sua vez, só é possível com a adoção de metodologias capazes de prever a longevidade da edificação ainda na etapa de projeto. A sustentabilidade e o desempenho se tornam, assim, conceitos que se complementam, com a vida útil funcionando como o ponto de conexão entre eles (Borges, 2012 apud Almeida et al., 2014, p. 36).

A ACV de um material ou produto da construção civil, possui em cada etapa, diferentes níveis de consumo de recursos naturais e geração de resíduos. Esses resíduos podem ser descartados no ambiente, reciclados ou até mesmo reaproveitados em outros processos produtivos. Esse tipo de análise inclui o levantamento detalhado de informações sobre esses fluxos, o que frequentemente resulta em uma enorme quantidade de dados. Devido à complexidade e à necessidade de precisão, o uso de *softwares* especializados e bancos de dados integrados torna-se essencial para a condução eficiente do estudo (Oliveira, 2007, p.16).

É essencial que suposições e limitações de escopo sejam claramente definidas e destacadas, pois essas condições podem influenciar diretamente os resultados do estudo. Realizar suposições sobre o sistema analisado ou cenários específicos pode reduzir a aplicabilidade e dificultar a replicação dos resultados (Bueno, Rossignolo, 2016, p. 07).

Uma das principais dificuldades na aplicação da metodologia para avaliação de impactos ambientais está na obtenção de dados confiáveis e completos sobre os materiais utilizados nos processos produtivos. Devido, em grande parte, à resistência de muitas empresas fornecedoras em divulgar informações sobre seus

processos, motivada por preocupações relacionadas à concorrência, possibilidade de plágio ou receio de associação negativa com a imagem da empresa. Outro desafio relevante é a mensuração dos impactos ambientais gerados pelo transporte de produtos (Scherer, Mariano, 2013, s.p).

De acordo com o IPCC (1988), o setor de transportes é um dos maiores emissores de poluentes e ainda carece de ações significativas para mitigar os efeitos da queima de combustíveis fósseis. No contexto brasileiro, esse problema se intensifica, uma vez que o transporte de insumos ocorre predominantemente por rodovias e em longas distâncias, aumentando ainda mais os impactos ambientais (Scherer, Mariano, 2013, s.p).

## **2.5 Avaliação dos Impactos Ambientais**

Os processos e insumos utilizados na construção civil estão diretamente ligados a alterações significativas no meio ambiente ao longo de seu ciclo de vida. Conforme estabelece a Resolução nº 001, de 23 de janeiro de 1986, do CONAMA, impacto ambiental refere-se a qualquer modificação no ambiente natural, seja em seus aspectos físicos, químicos ou biológicos, resultante da ação humana, e que possa comprometer, de maneira direta ou indireta, a saúde pública, a segurança, o equilíbrio ecológico, as dinâmicas sociais e econômicas, além das condições sanitárias, estéticas e da qualidade dos recursos ambientais (Almeida, 2014, p. 49).

Os *softwares* mencionados no tópico anterior incorporam diversas categorias de impactos ambientais em suas análises. Entre elas, destacam-se: aquecimento global, acidificação, eutrofização, combustíveis fósseis, habitat, poluição atmosférica, nevoeiro fotoquímico e destruição da camada de ozônio.

O aquecimento global é um fenômeno que se refere ao aumento anormal da temperatura média do planeta, sendo uma das principais manifestações das mudanças climáticas. É causado principalmente pela intensificação da emissão de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, consequência direta das atividades humanas. Os principais gases envolvidos nesse processo são o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e clorofluorcarbonetos (CFCs), que, combinados à redução da cobertura vegetal, agravam significativamente o efeito estufa natural (Guitarrara, s.d, s.p.).

A acidificação é um fenômeno que, quando ocorre nos oceanos, compromete a sobrevivência de diversas espécies marinhas e afeta diretamente comunidades que dependem da pesca e dos recursos aquáticos para alimentação e sustento. Já em ambientes terrestres, a acidificação do solo pode prejudicar o desenvolvimento de plantas, afetar a biodiversidade e representar riscos à saúde humana, especialmente em regiões onde há maior exposição a poluentes atmosféricos. As principais substâncias responsáveis pela acidificação do meio ambiente são o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), os óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) e a amônia ( $\text{NH}_3$ ) (Acvbrasil, 2021, s.p.).

A eutrofização é um processo ambiental que ocorre em corpos d'água, caracterizado pelo acúmulo excessivo de nutrientes, como a amônia ( $\text{NH}_3$ ), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), compostos de fósforo e nitrogênio (representados por  $\text{DBO}_5$  e DQO), além de íons nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), entre outros elementos (Oliveira, 2007, p. 43). Esse enriquecimento nutricional favorece a proliferação de algas e cianobactérias, comprometendo a qualidade da água. Como consequência, o ambiente aquático torna-se turvo e a disponibilidade de oxigênio diminui drasticamente, levando à morte de diversas espécies aquáticas e à degradação do ecossistema local (Santos, s.d., s.p.).

Os combustíveis fósseis são fontes de energia originadas da decomposição de matéria orgânica, como plantas e animais, soterrada há milhões de anos. Submetidos a altas pressões e temperaturas sob a crosta terrestre, esses materiais deram origem a substâncias como o petróleo, o carvão mineral e o gás natural (Casarin, 2024, s.p.). São quantificados somente os impactos causados a partir do consumo dessas substâncias geradas (Oliveira, 2007, p. 43).

O habitat é o ambiente natural que oferece as condições necessárias para que uma espécie sobreviva, se alimente, cresça e se reproduza. Cada espécie possui um habitat único, adaptado às suas características e exigências. Quando um habitat é alterado ou destruído, as espécies que dependem dele podem enfrentar sérios riscos, incluindo a extinção (Scabin, 2024, s.p.). O cálculo é realizado a partir da estimativa do número de indivíduos por metro quadrado (espécies/ $\text{m}^2$ ). Com base na densidade, estima-se a quantidade de espécies que poderiam habitar a área total onde a atividade será realizada (Oliveira, 2007, p. 43).

A poluição atmosférica é um processo ambiental no qual as substâncias químicas são emitidas na atmosfera, seja de forma direta ou devido a reações

químicas, modificando a composição original do ar. O grau de impacto dessas substâncias depende de sua composição e da quantidade liberada, podendo causar efeitos variáveis, de leve a severo, no meio ambiente (Apambiente, 2022, s.p.). Para avaliar os impactos ambientais relacionados à poluição do ar, são quantificados os óxidos de nitrogênio (NOx), o material particulado (MP) e os óxidos de enxofre (SOx) (Oliveira, 2007, p. 43).

O nevoeiro fotoquímico é um fenômeno comum em grandes centros urbanos, caracterizado por uma névoa densa e escura que se forma abaixo das nuvens, comprometendo a visibilidade e tornando o ambiente visualmente pesado. Esse tipo de poluição atmosférica ocorre principalmente devido à emissão de poluentes pelos veículos. A queima de combustíveis libera diversas substâncias tóxicas no ar, entre elas hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio (NO e NO<sub>2</sub>), que juntos são conhecidos como NOx (Souza, s.d., s.p.).

A destruição da camada de ozônio ocorre principalmente devido à liberação de clorofluorcarbonos (CFCs) na atmosfera. Esses compostos, ao alcançarem a estratosfera, se decompõem sob a ação da radiação solar, liberando átomos de cloro. O cloro atua como catalisador, destruindo milhares de moléculas de ozônio e comprometendo a proteção natural da Terra contra os raios ultravioleta (Oliveira, 2019, s.p.). Dentre as substâncias avaliadas no processo de medição dos impactos sobre a camada de ozônio, destacam-se o tetracloreto de carbono (CCl<sub>4</sub>), o clorofluorcarbono CFC-12 (CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>), o halon 1301 (CF<sub>3</sub>Br), o HCFC-22 (CHF<sub>2</sub>Cl) e o metil brometo (CH<sub>3</sub>Br), entre outros compostos (Oliveira, 2007, p. 44).

## **2.6 Softwares na ACV**

Há diversos *softwares* de balanço de massa disponíveis no mercado para auxiliar na análise e aplicação da ACV na construção civil. Essas ferramentas utilizam bancos de dados próprios, desenvolvidos com foco nas especificidades geográficas de cada região, o que as torna altamente localizadas. Essa regionalização, embora beneficie análises contextuais, pode representar um desafio significativo quando esses *softwares* são empregados em outros países sem a devida adaptação. Ainda assim, muitas dessas soluções compartilham funcionalidades

importantes que contribuem de forma consistente para a realização de estudos (Campos, 2012, p. 60).

Entre os *softwares* mais amplamente utilizados em estudos de ACV, segundo Campos (2012), destacam-se: EscoScan, Gabi 4.0, LCA-it, SimaPro, Team 4.0 e Umberto.

O EcoScan é especializado na análise do impacto ambiental e dos custos de um produto em todas as fases de seu ciclo de vida. Os resultados são apresentados de forma gráfica, permitindo comparar cenários e identificar melhorias no design ou no processo produtivo (Campos, 2012, p. 61).

A GaBi 4.0 permite modelar sistemas complexos com grande volume de dados. Suporta decisões baseadas em critérios ambientais, técnicos, sociais e econômicos, sendo amplamente usado por indústrias para otimização de processos e conformidade com a ISO 14040 (Campos, 2012, p. 61).

O LCA-it é uma ferramenta que organiza os dados de ACV no formato SPINE, padrão de intercâmbio entre sistemas. Permite importar dados de outras plataformas ou exportar seus próprios dados, tornando-se uma opção flexível para integração com outros *softwares* de balanço de massa (Campos, 2012, p. 61).

O SimaPro permite modelar, avaliar e comparar ciclos de vida de produtos e serviços com base nas normas ISO 14040. Oferece diversas bases de dados e métodos reconhecidos de avaliação de impacto ambiental, sendo ideal para análises detalhadas (Campos, 2012, p. 61).

O Team 4.0 é indicado para a descrição e análise ambiental de sistemas industriais, permite criar bancos de dados próprios e calcular inventários e impactos com base no ciclo de vida completo de produtos, processos e atividades, em conformidade com as normas ISO 14040 (Campos, 2012, p. 61).

O Umberto é especializado em modelagem de fluxos de materiais e energia. É usado para otimizar cadeias produtivas, identificar gargalos e reduzir o uso de recursos e energia. Ideal para empresas que buscam maior eficiência ambiental e econômica nos processos industriais (Campos, 2012, p. 62).

### **2.6.1 Software Umberto**

O desenvolvimento do Umberto teve início em 1993, a partir de iniciativas de pesquisadores da Universidade de Hamburgo, que mais tarde fundaram

o *ifu – Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH* (Instituto de Informática Ambiental Hamburgo Ltda.). Em parceria com o *ifeu – Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg GmbH* (Instituto de Pesquisa Energética e Ambiental Heidelberg Ltda.), a primeira versão do *software* foi lançada em 1994. Desde então, o programa passou por sucessivas atualizações, incorporando melhorias técnicas e funcionais (Cardoso, 2022, p. 01).

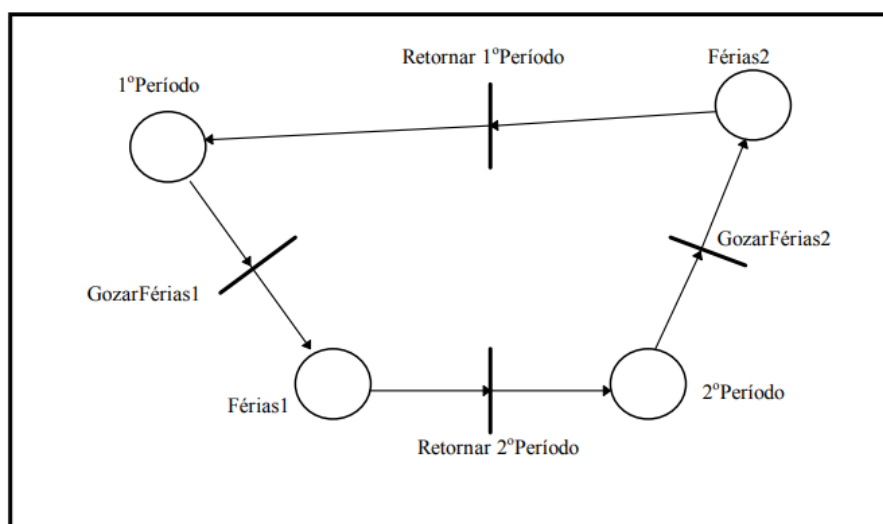
O Umberto é um *software* avançado voltado à ACV amplamente adotado por profissionais da indústria, consultores, pesquisadores e instituições de ensino. A ferramenta permite examinar impactos ambientais associados a produtos e processos, auxiliando na criação de soluções sustentáveis, na redução da pegada ecológica e melhoria do desempenho ambiental corporativo (Cardoso, 2022, p. 01).

A operacionalização do Umberto consiste em utilizar redes de fluxo baseadas em redes de Petri, “(...) técnica de modelagem que permite a representação de sistemas, utilizando como alicerce uma forte base matemática” (Francês, 2003, p. 02), compostas por três componentes principais: transições, lugares e fluxos (Cardoso, 2022, p. 01).

Os lugares (representados por círculos) servem como pontos de alocação de insumos e resíduos ao longo do processo. Eles podem ser classificados de diferentes formas: como entradas (*inputs*), saídas (*outputs*), entradas/saídas (*inputs/outputs*) ou conexões (*connection*). Nos locais de conexão, a quantidade de material que entra é igual à quantidade que sai, sem possibilidade de armazenamento. As transições, simbolizadas por quadrados, representam as etapas em que ocorre a transformação dos materiais. Por fim, os fluxos (indicado por setas) são as conexões entre os lugares e as transições, compondo a estrutura da rede de processos (Cardoso, 2022, p. 01, 02).

Segue figura 4 com a representação de uma rede Petri.

**FIGURA 4** – Ano letivo representado graficamente em Redes de Petri



Fonte: Francês, 2003, p. 03.

A *ecoinvent* é uma base de dados desenvolvida e constantemente atualizada pelo *Ecoinvent* Centre da Suíça, com o propósito de fornecer dados de ICVs que sejam relevantes, claros e acessíveis para usuários globais de ACV. Com mais de 4.000 inventários de processos industriais e 17 diferentes métodos de avaliação de impacto, essa base é uma referência para estudos em gestão ambiental, design sustentável e outras áreas (Cardoso, 2022, p. 02).

O primeiro passo para criar um projeto no Umberto é definir os materiais envolvidos no sistema, suas unidades de medida (kg ou kJ) e, se necessário, seu valor de mercado para cálculo de custos. Em seguida, constrói-se a rede, que inclui processos (quadrados) e locais (círculos) de entrada, saída ou passagem de materiais. Os fluxos, representados por setas, conectam processos e locais, definindo o percurso dos materiais (Cardoso, 2022, p. 02).

Os processos podem ser especificados por meio de equações matemáticas, permitindo a modelagem de sistemas não lineares, ou utilizando módulos pré-configurados da biblioteca do *software*. Também é possível criar sub-redes hierárquicas dentro do sistema principal para facilitar a análise (Cardoso, 2022, p. 02).

Além dos fluxos, o Umberto também calcula os custos do sistema, levando em consideração os preços dos materiais e outros custos associados, como amortização de investimentos e custos variáveis relacionados à quantidade de material processado (Cardoso, 2022, p. 03).

Com isso, o software Umberto possibilita a tomada de decisão gerencial por meio de análise de cenários alternativos, permitindo a melhor escolha nas atitudes gerenciais. Ele possibilita: modelar redes de fluxos de materiais; gerenciar materiais e seus respectivos custos; utilizar base de dados pré-existentes; analisar e avaliar diferentes cenários e seus respectivos impactos ambientais; especificar e definir processos; efetuar cálculos e apresentar resultados, por meio de relatórios e sob forma de inventários; e representar graficamente os resultados (Campos, 2012, p. 62).

Segue figura 5 com a representação de um modelo ACV no *software* Umberto.

Fonte: IPont, 2025.

## 2.7 Concreto

O concreto é um material amplamente utilizado na construção civil, resultante da combinação de aglomerantes, agregados miúdos e graúdos, e água. A essa mistura podem ser incorporados aditivos orgânicos e sintéticos, que têm como objetivo modificar suas propriedades, melhorar o desempenho ou reduzir custos, conferindo ao concreto características especiais de acordo com as exigências de projeto (Almeida, 2014, p. 62).

Segundo Oliveira (2007, p. 30), “dentre os materiais empregados na construção civil destaca-se o concreto, material mais utilizado no mundo depois da água”

O concreto, apesar de não atingir os níveis de resistência e tenacidade do aço, destaca-se por sua durabilidade e elevada resistência à ação da água. Ao contrário da madeira e do aço comum, o concreto não sofre grandes deteriorações quando exposto à umidade, o que o torna especialmente adequado para obras de infraestrutura hidráulica, como reservatórios, canais e barragens. Historicamente, uma de suas primeiras utilizações foi na construção de aquedutos e muros de contenção pelos romanos (Mehta, Monteiro, 2014, p. 04).

A durabilidade de uma estrutura de concreto depende de sua capacidade de desempenhar adequadamente as funções para as quais foi concebida ao longo do tempo. No entanto, essa vida útil pode ser comprometida por diversos fatores, o que exige uma abordagem cuidadosa em todas as fases do processo construtivo. O concreto pode apresentar falhas como corrosão das armaduras, regiões com falhas de adensamento e fissuras que em casos extremos, podem até resultar no colapso da estrutura (Couto et al., 2013, p. 02).

### 2.7.1 Agregados

A pedra britada é o tipo de agregado graúdo mais empregado na construção civil. Esse material é produzido em instalações industriais conhecidas como pedreiras, em que ocorre a fragmentação da rocha por meio de explosões controladas. Após essa etapa, grandes blocos de rocha, chamados matacões, são levados para equipamentos denominados britadores, nos quais são triturados. Em seguida, o material fragmentado passa por um processo de separação

granulométrica, sendo separado conforme a sua granulometria. Por fim, a brita é transportada por esteiras até compartimentos de armazenamento (Oliveira, 2007, p. 61).

Os agregados podem ser classificados de acordo com sua granulometria. A norma brasileira NBR 7211 (ABNT, 2022, p. 06) define os critérios para essa classificação, categorizando-os como agregados graúdos e miúdos:

Agregado graúdo: agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm.

[...] ensaios realizados de acordo com a ABNT NBR 17054, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1.3.2.

Agregado miúdo: agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150µm.

[...] ensaios realizados de acordo com a ABNT NBR 17054, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1 (NBR 7211, ABNT 2022, p. 06).

A utilização de agregados em argamassas e concretos é essencial, pois influencia na resistência mecânica, durabilidade e no desempenho das estruturas. Os agregados devem ser selecionados e aplicados conforme a granulometria adequada (Armac, 2020, n.p.).

A aplicação da brita na construção civil, abrange desde a produção de concreto, pavimentação de estradas, além de decorações em paisagismo, entre outros (Engemix, 2021, n.p.).

A areia, agregado miúdo convencionalmente utilizado na produção do concreto, é um material granular de origem mineral, formado a partir da desintegração e decomposição de rochas ao longo do tempo, por meio de processos naturais de intemperismo (processo de desgastes e/ou decomposição de rochas), principalmente causados pela ação da água e dos ventos (Almeida, 2014, p. 65).

Esse insumo é essencial na construção civil, sendo empregada em diversas fases da obra, desde a preparação de argamassas até a produção de concreto. A principal forma de classificação da areia é pela granulometria, ou seja, pelo tamanho dos grãos, sendo classificada em areia fina, média e grossa (Lima, Cícero, 2024, n.p.).

A areia fina, com grãos entre 0,05 e 0,42 mm, é ideal para acabamentos mais delicados, como rebocos internos, por proporcionar uma superfície mais lisa e uniforme. A areia média, de 0,42 a 2 mm, é utilizada no preparo de argamassas para

assentamento de blocos e tijolos, além do chapisco. Já a areia grossa, que possui grãos entre 2 e 4 mm, é indicada para o preparo do concreto e execução de contrapisos, devido à sua maior resistência. Por fim, a areia lavada, extraída de rios e submetida a um processo de limpeza para remoção de impurezas, pode ser encontrada nas três granulometrias, e se destaca como a mais utilizada em obras e serviços gerais de construção (Lima, Cícero, 2024, n.p.).

### **2.7.2 Cimento Portland**

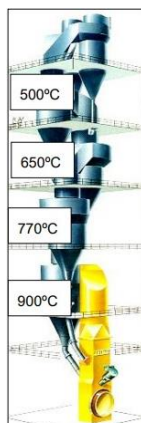
O cimento Portland é um material aglomerante hidráulico, produzido a partir da moagem do clínquer com a adição de sulfato de cálcio geralmente na forma de gipsita, e com outras adições, em casos específicos (Oliveira, 2007, p. 64).

O clínquer tem a peculiaridade de desenvolver uma reação química em presença de água, na qual ele, primeiramente, torna-se pastoso e, em seguida, endurece, adquirindo elevada resistência e durabilidade. É essa característica adquirida pelo clínquer, que faz dele um ligante hidráulico muito resistente, é sua propriedade mais importante (ABCP, 2002, apud Oliveira 2007).

A produção do cimento começa com a extração de calcário e argila, que são misturados e empilhados na etapa de pré-homogeneização. Após essa fase, o material segue para o britador secundário e, em seguida, para o moinho, onde é transformado em uma farinha fina chamada "farinha de cru". Essa farinha é armazenada em silos e depois aquecida gradualmente em uma torre de ciclone, passando por temperaturas crescentes de até 900°C, preparando-a para a clinquerização (Lima, 2011, p. 05).

A figura 6 apresenta o funcionamento de uma torre de ciclone.

**Figura 6 – Torre de ciclone**



Fonte: Lima, 2011, p. 18.

Na etapa final, a farinha entra no forno rotativo e é submetida a uma chama que pode alcançar 2000°C, resultando na formação do clínquer, que sai do forno a cerca de 1450°C. O clínquer é então resfriado, armazenado, e depois moído junto com aditivos como escória, gesso e material pozzolânico. Essa mistura resulta nos diversos tipos de cimento Portland disponíveis no mercado (Lima, 2011, p. 05).

O processo de fabricação do cimento por Via Seco é amplamente utilizado na indústria cimenteira, no Brasil, aproximadamente 98% das fábricas adotam esse método, geralmente em conjunto com o uso de pré-calcinadores. O método se caracteriza pela ausência de água no transporte e homogeneização das matérias-primas antes da entrada no forno (Oliveira, 2007, p. 65).

Segundo ABCP (2025), existem diversos tipos de cimento Portland utilizados no Brasil que se diferenciam em sua composição. Os principais, ou mais comercializados e empregados na construção civil brasileira são:

- Cimento Portland Comum (CP-I);
- Cimento Portland Comum com Adição (CPI-S);
- Cimento Portland Composto com Escória (CPII-E);
- Cimento Portland Composto com Pozolana (CPII-Z);
- Cimento Portland Composto com Fíler (CPII-F);
- Cimento Portland de Alto Forno (CP-III);
- Cimento Portland Pozzolânico (CP-IV);
- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP-V ARI).

A Tabela 1 indica as composições de cada tipo de cimento mencionado anteriormente.

**Tabela 1 – Composição dos cimentos Portland**

| Designação normalizada                                        | Sigla             | Classe de resistência | Sufixo   | Clínquer + sulfatos de cálcio | Escória granulada de alto-forno | Material pozzolânico | Material carbonático |
|---------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------|----------|-------------------------------|---------------------------------|----------------------|----------------------|
| Cimento Portland comum                                        | CP I              | 25, 32 ou 40          | RS ou BC | 95 – 100                      | 0 – 5                           |                      |                      |
|                                                               | CP I-S            |                       |          | 90 – 94                       | 0                               | 0                    | 6 – 10               |
| Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno | CP II-E           |                       |          | 51 – 94                       | 6 – 34                          | 0                    | 0 – 15               |
| Cimento Portland composto com material pozzolânico            | CP II-Z           |                       |          | 71 – 94                       | 0                               | 6 – 14               | 0 – 15               |
| Cimento Portland composto com material carbonático            | CP II-F           |                       |          | 75 – 89                       | 0                               | 0                    | 11 – 25              |
| Cimento Portland de alto forno <sup>b</sup>                   | CP III            |                       |          | 25 – 65                       | 35 – 75                         | 0                    | 0 – 10               |
| Cimento Portland pozzolânico <sup>c</sup>                     | CP IV             |                       |          | 45 – 85                       | 0                               | 15 – 50              | 0 – 10               |
| Cimento Portland de alta resistência inicial                  | CP V <sup>a</sup> | ARI                   |          | 90 – 100                      | 0                               | 0                    | 0 – 10               |
| Cimento Portland branco                                       | Estrutural        | 25, 32 ou 40          |          | 75 – 100                      | —                               | —                    | 0 – 25               |
|                                                               | Não estrutural    | —                     |          | 50 – 74                       | —                               | —                    | 26 – 50              |

Fonte: ABNT 2018, p. 09.

Os cimentos diferenciam-se principalmente pelos tipos de adições incorporadas à sua composição.

O calcário, principal matéria-prima do cimento, é composto, em sua maior parte, por carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), embora contenha impurezas como óxidos de ferro, alumínio, silício, magnésio, sódio e potássio. Apesar de sua abundância, apenas 56% do calcário bruto é aproveitado na forma de cal, que é o elemento ativo na produção do cimento (Lima, 2011, p. 12).

A argila é rica em silicatos de alumínio hidratados e óxidos metálicos, sendo essencial para fornecer os elementos químicos complementares ao calcário na formação do clínquer (Lima, 2011, p. 12).

O gesso, normalmente na forma de gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), atua como regulador do tempo de pega do cimento, retardando seu endurecimento além de estar presente em todos os tipos de cimento Portland (Lima, 2011, p. 12).

A escória de alto forno, resíduo da produção de ferro, pode compor até 65% do cimento em formulações específicas, e possui propriedades aglomerantes ativadas pelo hidróxido de cálcio, contribuindo significativamente para a resistência final do produto, estando presente em cimentos como CPI-S, CP-II-E e CP-III (Lima, 2011, p. 12).

Os materiais pozolânicos, como rochas vulcânicas, argilas calcinadas e cinza volante (proveniente da queima do carvão mineral), também possuem propriedades ligantes e contribuem para a resistência e desempenho do cimento (Oliveira, 2007, p. 71).

### 3 MÉTODOS EXPERIMENTAIS

A metodologia adotada nesta pesquisa foi baseada na realização da ACV de 1 m<sup>3</sup> de concreto, utilizando do *software* Umberto. A modelagem incluiu as etapas de representação gráfica dos fluxos de obtenção das matérias-primas, abrangendo a extração, o processamento e a fabricação dos insumos, o transporte dos materiais até a central de concreto, o processo de produção e transporte do concreto até o local de aplicação, além da análise do destino final dos resíduos, considerando a reciclagem e o reaproveitamento.

Para a execução do estudo, considerou-se o traço 1:2,3:2,7, correspondendo, respectivamente, a cimento, brita e areia. Esse traço foi obtido a partir das composições do SINAPI/SP, referentes a agosto de 2025.

O traço corresponde às seguintes proporções: 362,66 kg de cimento, 0,7229 m<sup>3</sup> de areia, 0,5934 m<sup>3</sup> de brita e fator água/cimento igual a 0,56. Para a conversão dos volumes em massa, de m<sup>3</sup> para kg, foram consideradas as densidades informadas pela empresa Operation (2025), sendo 1.600 kg/m<sup>3</sup> para a areia e 1.500 kg/m<sup>3</sup> para a brita.

Para a determinação das massas correspondentes aos volumes de areia e brita do traço estudado, foi necessário considerar as densidades aparentes dos materiais. No caso da areia, com volume de 0,7229 m<sup>3</sup>, a densidade média é de 1.600 kg/m<sup>3</sup>, resultando em aproximadamente 1.156,64 kg.

Para a brita, considerou-se a densidade de 1.500 kg/m<sup>3</sup>, aplicada ao volume de 0,5934 m<sup>3</sup>. O cálculo resultou em uma massa aproximada de 890,1 kg.

O fator água/cimento (a/c) utilizado foi de 0,56, aplicado à massa de cimento de 362,66 kg. Dessa forma, obteve-se uma quantidade de água de 203,09 kg, equivalente a cerca de 203 litros. Quando convertido em volume, utilizando-se a densidade da água (1.000 kg/m<sup>3</sup>), esse valor corresponde a 0,2031 m<sup>3</sup>.

Assim, o traço estudado para 1 m<sup>3</sup> de concreto foi expresso em valores de massa como: 362,66 kg de cimento, 1.156,64 kg de areia, 890,1 kg de brita e 0,2031 m<sup>3</sup> de água.

Visando calcular o traço dos materiais que compõem o concreto e estimar o consumo energético na destinação final dos resíduos, foram aplicadas, respectivamente, as fórmulas da densidade e da potência elétrica.

### Equação 1 – Equação da Densidade

$$\rho = \frac{M}{V}$$

Em que se pode ler:  $\rho$  = densidade (kg/m<sup>3</sup>), M = massa (kg), V = volume (m<sup>3</sup>).

Segundo Laboratório de Química do Estado Sólido (LQES) – Instituto de Química – UNICAMP (s.d), “a densidade absoluta é uma propriedade específica, isto é, cada substância pura tem uma densidade própria, que a identifica e a diferencia das outras substâncias”.

### Equação 2 – Equação da Potência Elétrica

$$P = \frac{W}{\Delta t}$$

Em que se pode ler: P = potência elétrica (kW), t = intervalo de tempo (h), W = energia (kWh).

Segundo a Apostila de Eletricidade Básica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (s.d), “a potência é um indicativo da quantidade de conversão de energia que pode ser realizado em um certo período de tempo”.

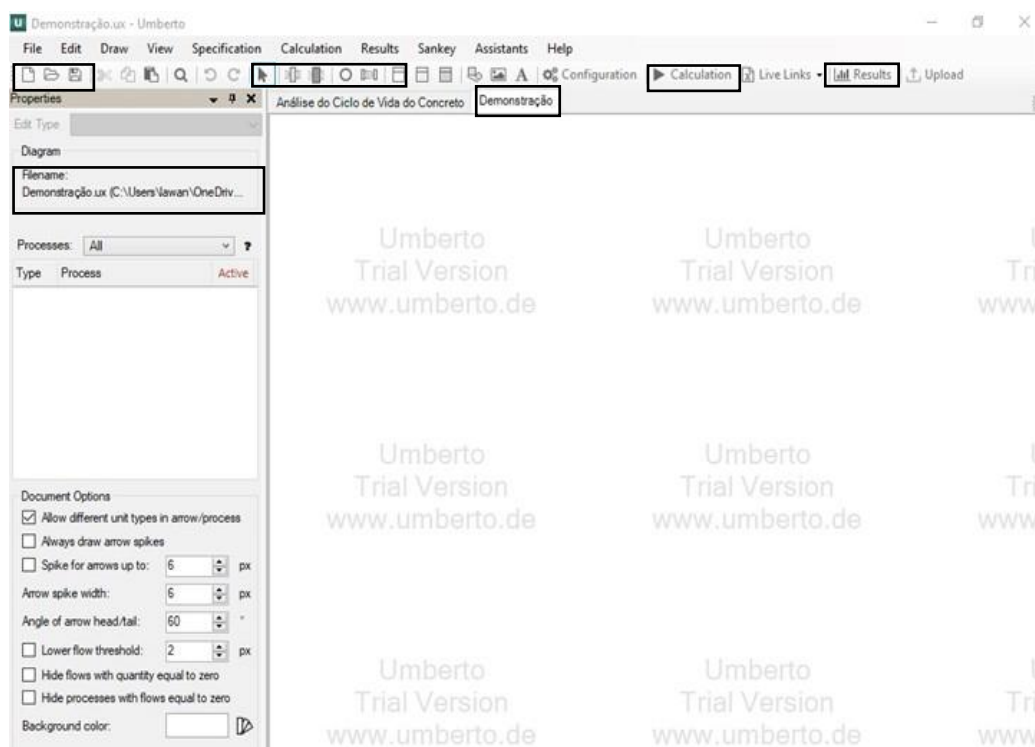
## 3.1 Utilização do Software

Ao iniciar o *software*, no canto superior esquerdo, encontram-se as opções *New Document* (criar um novo arquivo), *Open Document* (abrir um arquivo existente) e *Save Document* (salvar o arquivo atual), com a indicação do nome e do local de salvamento exibidos em *Filename*. Logo acima das abas *Análise de Ciclo de Vida* e *Demonstração*, estão disponíveis os ícones de *Edit Mode* (edição), *Process* (início de processo simples), *User-defined Functions Process* (início de processo complexo), *Place* (adição de entradas e saídas), *Arrow* (conexão dos elementos por

setas) e *Life Cycle Stages* (separação dos estágios do ciclo de vida). Por fim, as opções *Calculation* e *Results* permitem realizar os cálculos e visualizar os resultados obtidos após a finalização do esquema.

A Figura 7 apresenta a interface do *software* Umberto, exemplificando as funcionalidades citadas previamente.

**Figura 7** – Interface de funcionamento

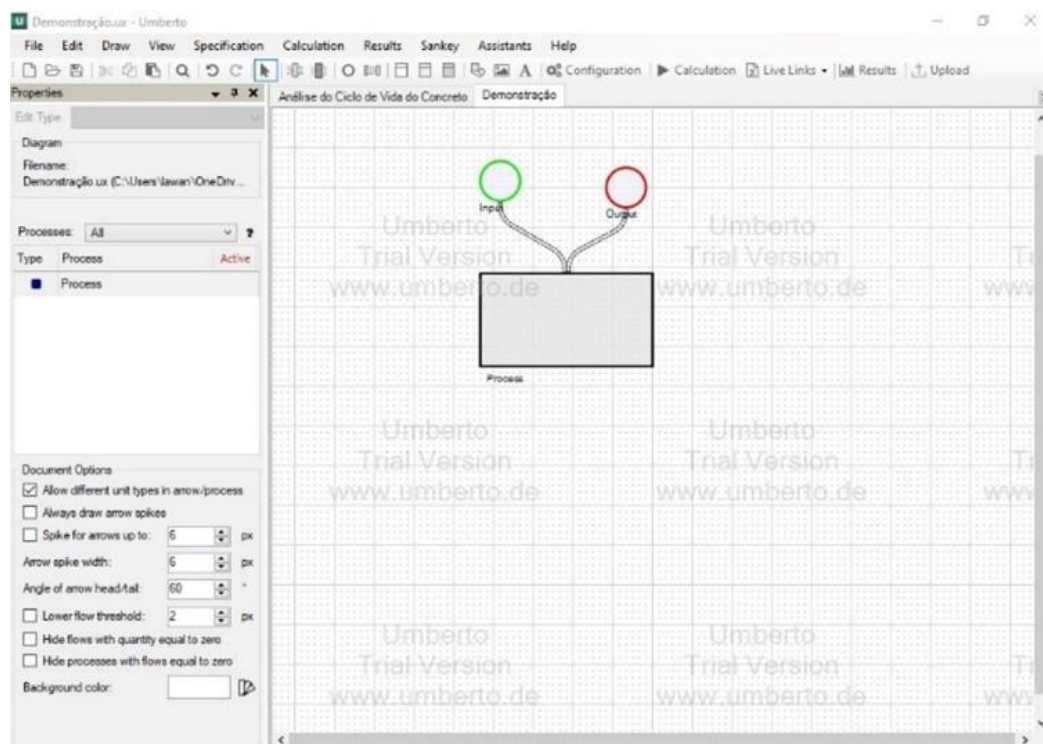


Fonte: Autor, 2025.

O esquema pode ser iniciado pela aplicação de um processo simples ou complexo (com funções matemáticas integradas), seguido da definição das entradas e saídas e da conexão do sistema por meio de setas. Nesse contexto, o processo é representado por um retângulo cinza, a entrada por um círculo verde e a saída por um círculo vermelho.

A Figura 8 apresenta a interface do *software* Umberto, exemplificando as funcionalidades citadas previamente.

**Figura 8 – Processos e entradas**

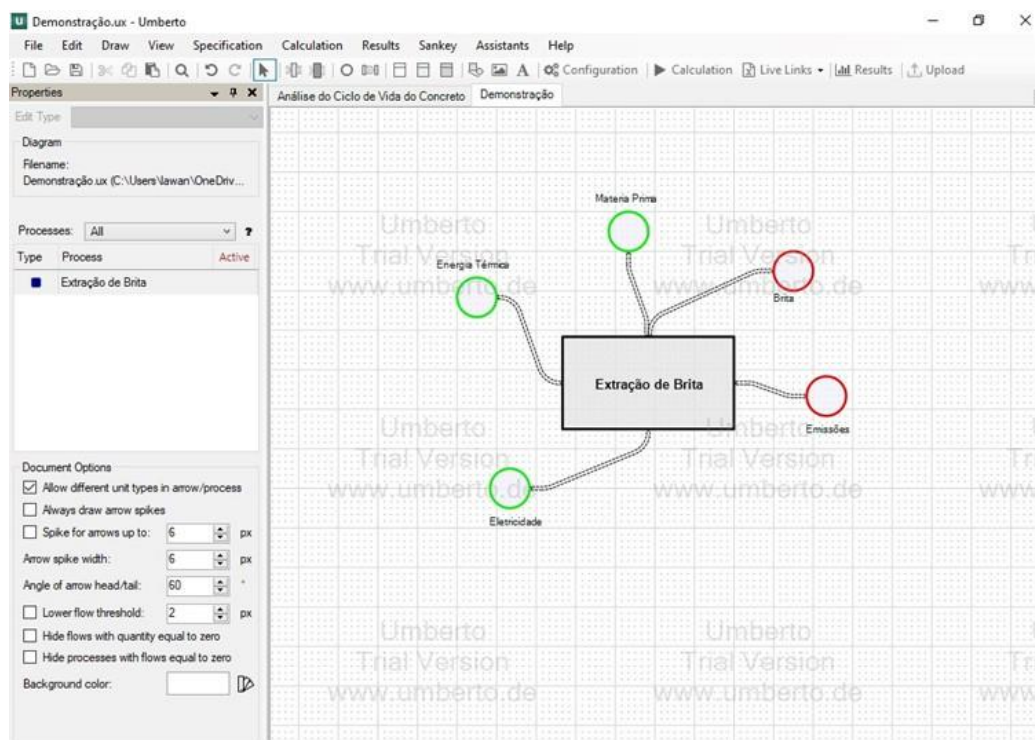


Fonte: Autor, 2025.

É possível renomear os processos, as entradas e as saídas, assim como ajustar a formatação do texto. Neste caso, será exemplificado com um dos processos da ACV do concreto: a extração de brita.

A Figura 9 apresenta a interface do *software* Umberto, exemplificando as funcionalidades citadas previamente.

**Figura 9 – Processo extração de brita**



Fonte: Autor, 2025.

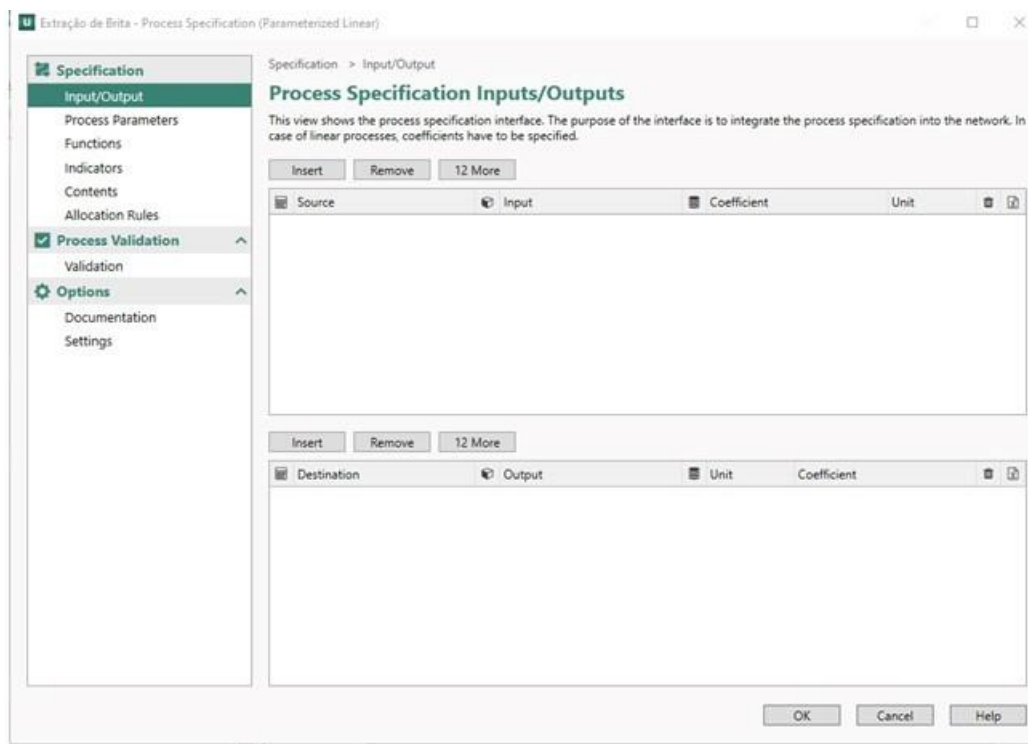
Após a renomeação, é possível inserir os insumos. Para isso, deve-se selecionar o processo “Extração de Brita” e, na nova aba aberta, utilizar a opção *Insert* para adicionar as entradas e saídas correspondentes ao processo, que, neste caso, são: energia elétrica, energia térmica, rocha matriz, brita e dióxido de carbono.

Na opção *New Entries*, ao selecionar *Insert New Intermediate Entries*, abre-se uma nova aba que permite alterar a classificação do material (*Entry Classification*), podendo ser definida como: matérias-primas, materiais auxiliares, energia, produtos intermediários, produtos, serviços, resíduos, resíduos recicláveis, emissões, componente ou componente com resíduo. Nessa mesma aba também é possível modificar a unidade de medida (*Unit*), que pode ser expressa em massa, energia, volume, massa de transporte ou adimensional.

Após a inserção, pode-se ainda ajustar a quantidade de cada material e atribuí-lo corretamente às entradas e saídas, sendo que cada uma delas pode conter múltiplos materiais.

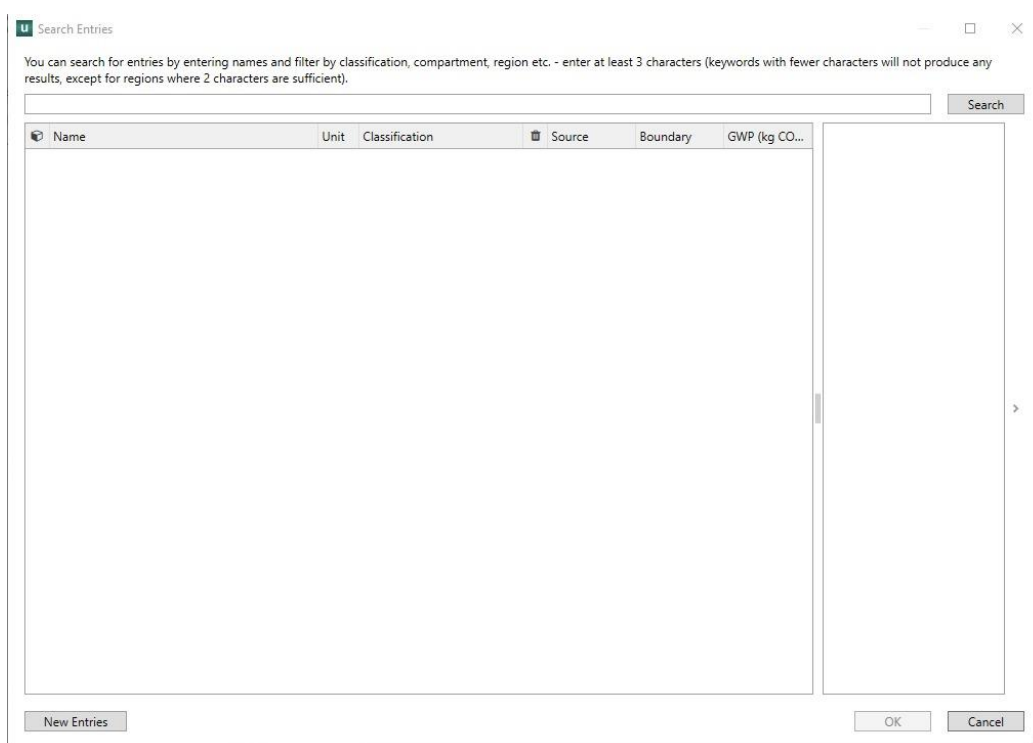
As Figuras 10, 11, 12, 13, 14 e 15 apresentam a interface do *software* Umberto, exemplificando as funcionalidades citadas previamente.

**Figura 10** – Especificações processo extração de brita



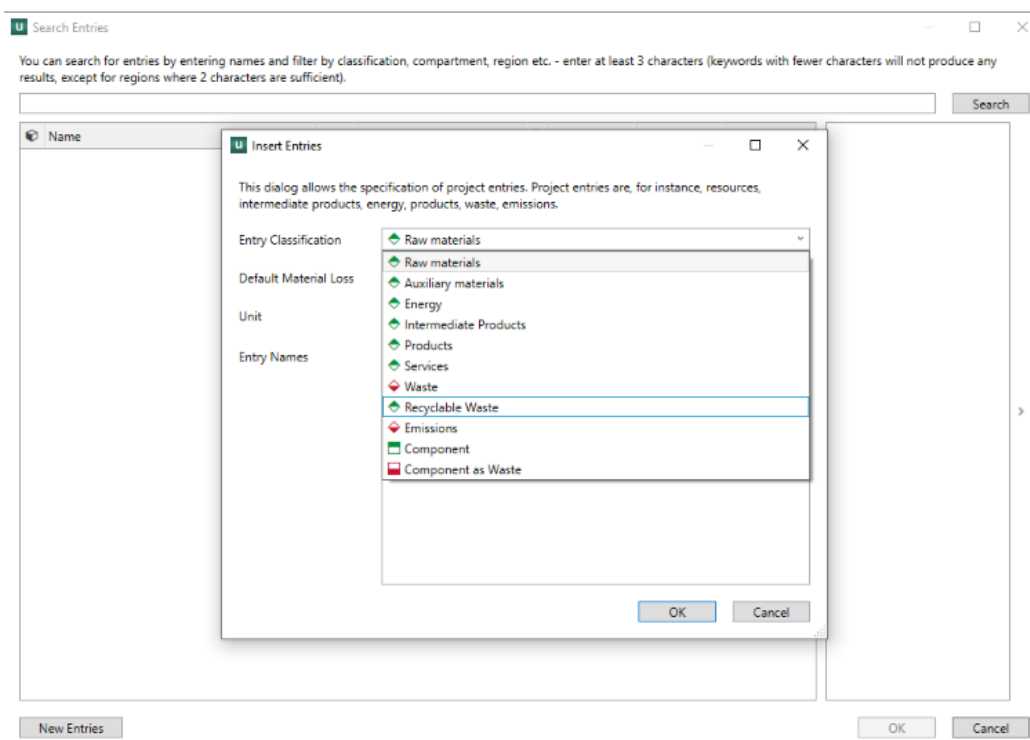
Fonte: Autor, 2025.

**Figura 11** – Aba novas entradas processo extração de brita



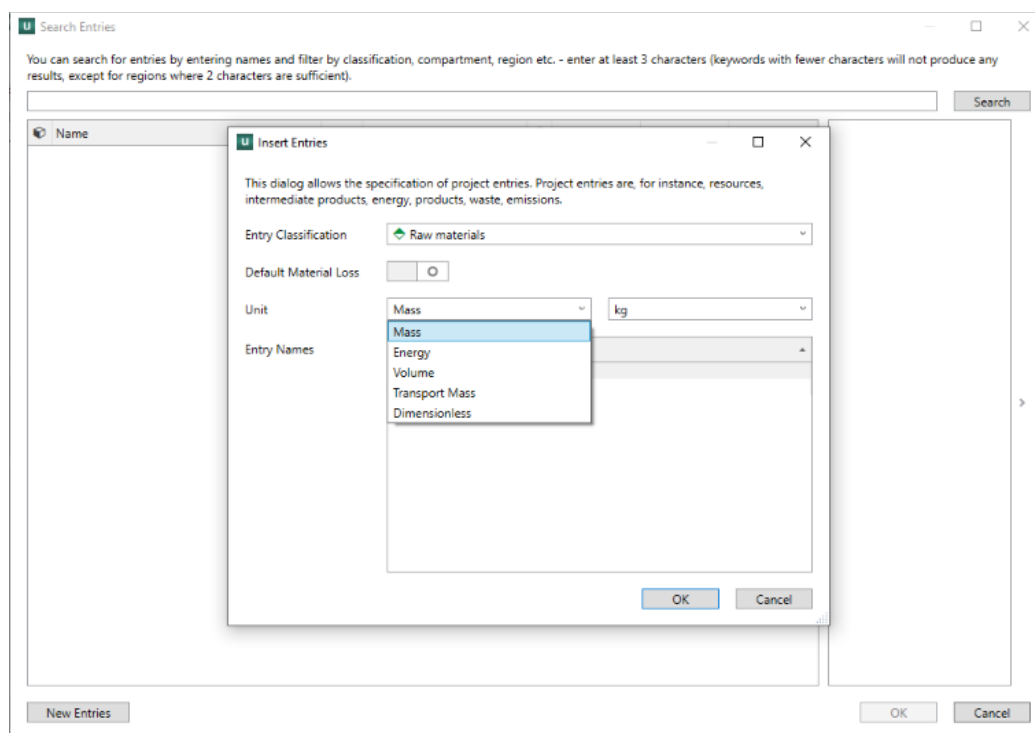
Fonte: Autor, 2025.

**Figura 12** – Aba inserção de entradas processo extração de brita



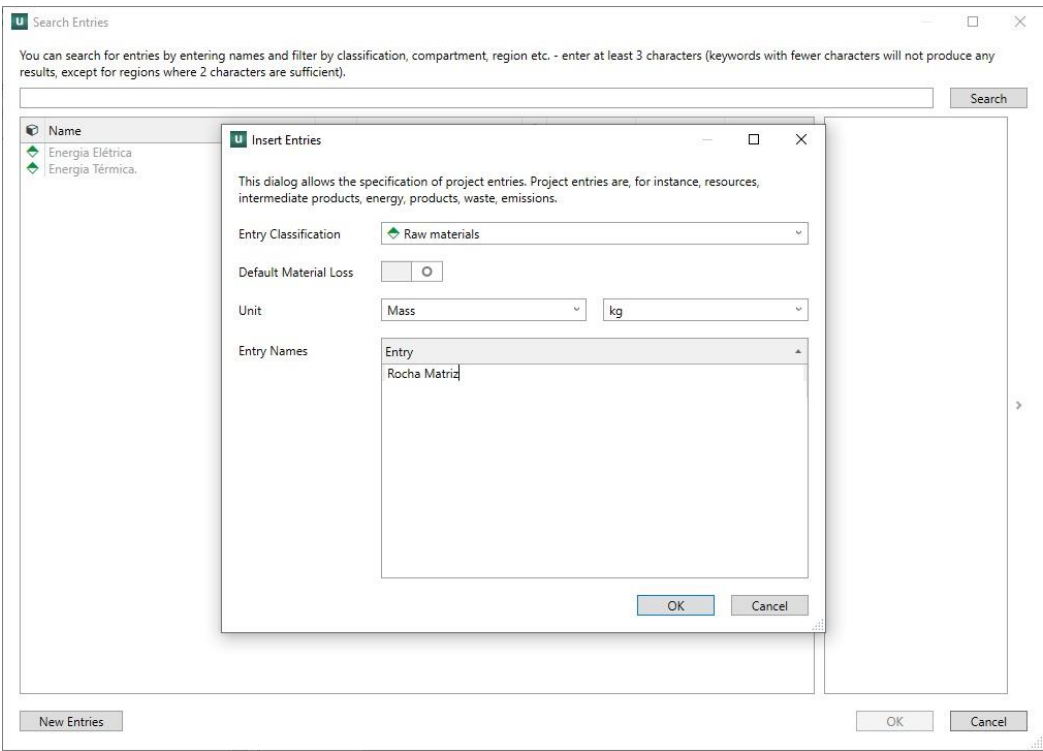
Fonte: Autor, 2025.

**Figura 13** – Aba inserção de entradas processo extração de brita



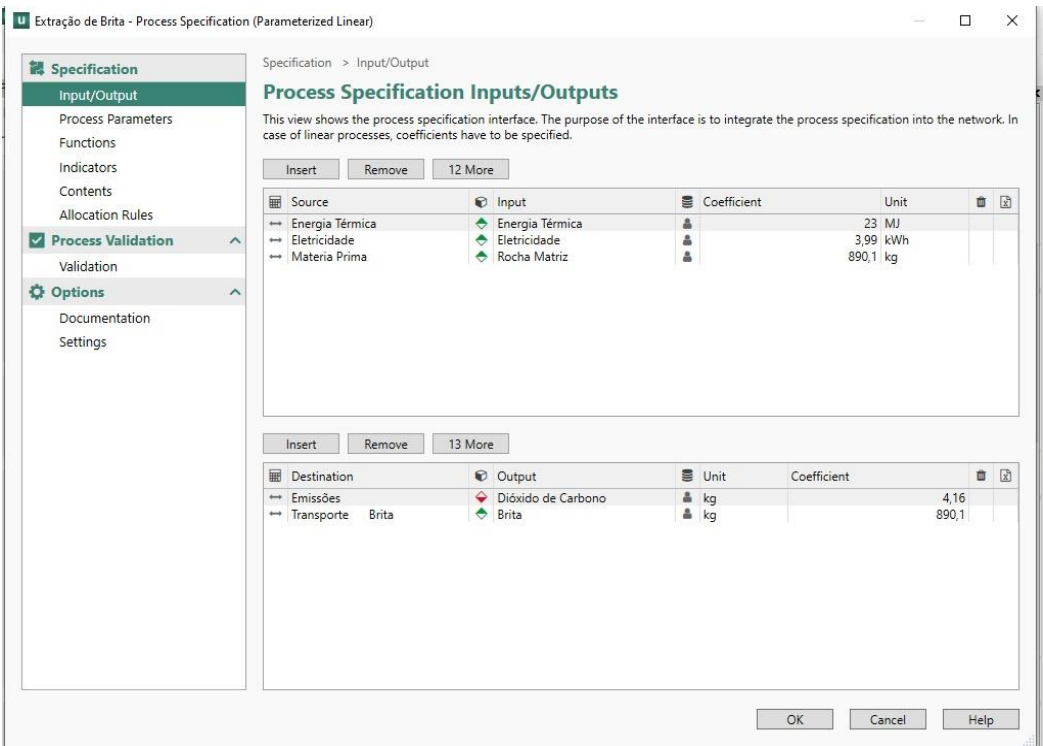
Fonte: Autor, 2025.

Figura 14 – Aba inserção de entradas processo extração de brita



Fonte: Autor, 2025.

Figura 15 – Especificação final processo extração de brita



Fonte: Autor, 2025.

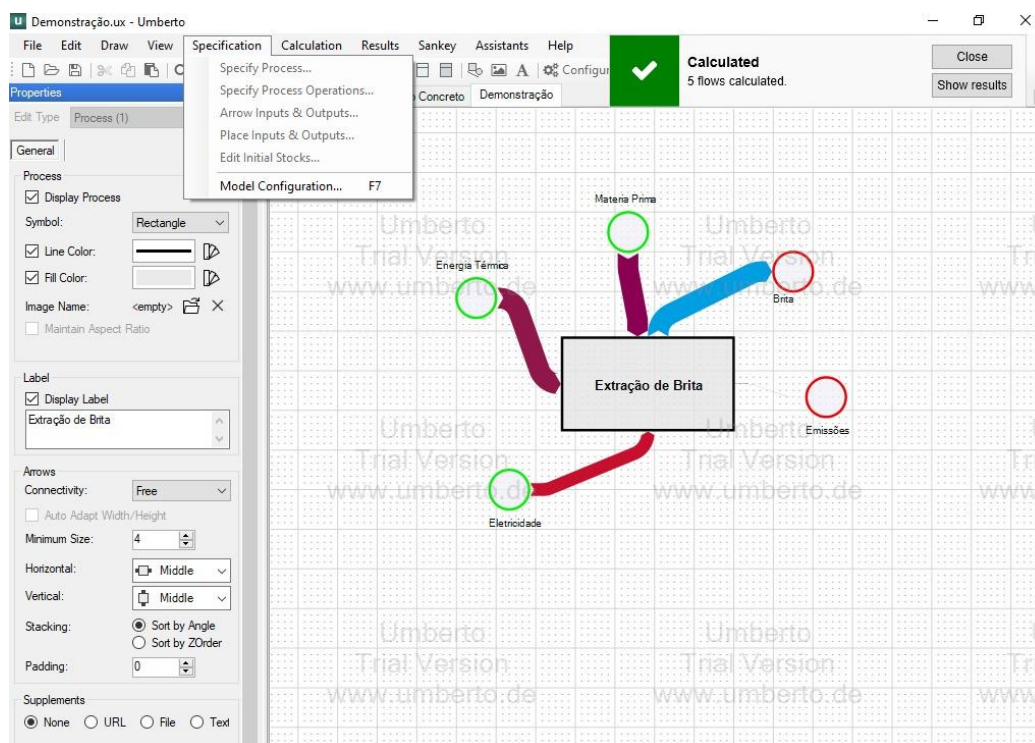
A etapa final consiste em calcular todo o sistema e consultar os resultados. Para isso, é necessário inserir o fluxo (*Flow*) na aba *Specification* (Especificação). Em seguida, deve-se acessar *Model Configuration* (Configuração do Modelo), que abrirá uma nova aba para consulta. Nessa aba, deve ser adicionado o insumo brita, considerando que este é o produto final do esquema, na opção *Functional Unit* (Unidade Funcional). Além disso, devem ser inseridos a massa específica (*Specific Mass*) e o potencial de aquecimento global (*Global Warming Potential – GWP*) dos insumos, disponíveis na mesma aba, na opção *Properties* (Propriedades). Dessa forma, o cálculo poderá ser finalizado sem erros.

Por fim, deve-se acessar a aba *Results* (Resultados), selecionar *Impact Assessment* (Avaliação de Impacto) e observar os impactos ambientais calculados. No caso desta pesquisa, considera-se apenas o dióxido de carbono como responsável pelo efeito no aquecimento global.

Na aba *Results* (Resultados), também é possível visualizar o *Total Inventory* (Inventário Total), que calcula todos os insumos e processos inseridos no sistema.

As Figuras 16, 17, 18, 19, e 20 apresentam a interface do *software* Umberto, exemplificando as funcionalidades citadas previamente.

**Figura 16 – Cálculo processo extração de brita**



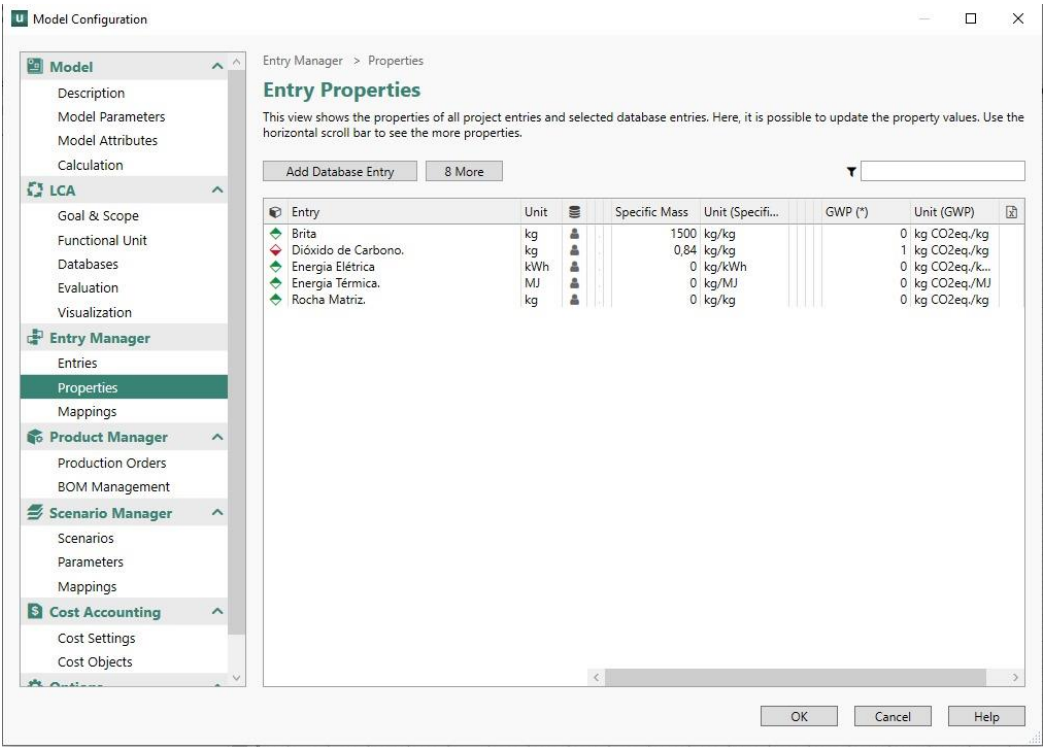
Fonte: Autor, 2025.

**Figura 17 – Inserção flow processo extração de brita**

| Flow  | Side   | Quantity | Manual Flow | Unit | Unit | Use Manual...            |
|-------|--------|----------|-------------|------|------|--------------------------|
| Brita | Output | 1        |             | kg   | kg   | <input type="checkbox"/> |

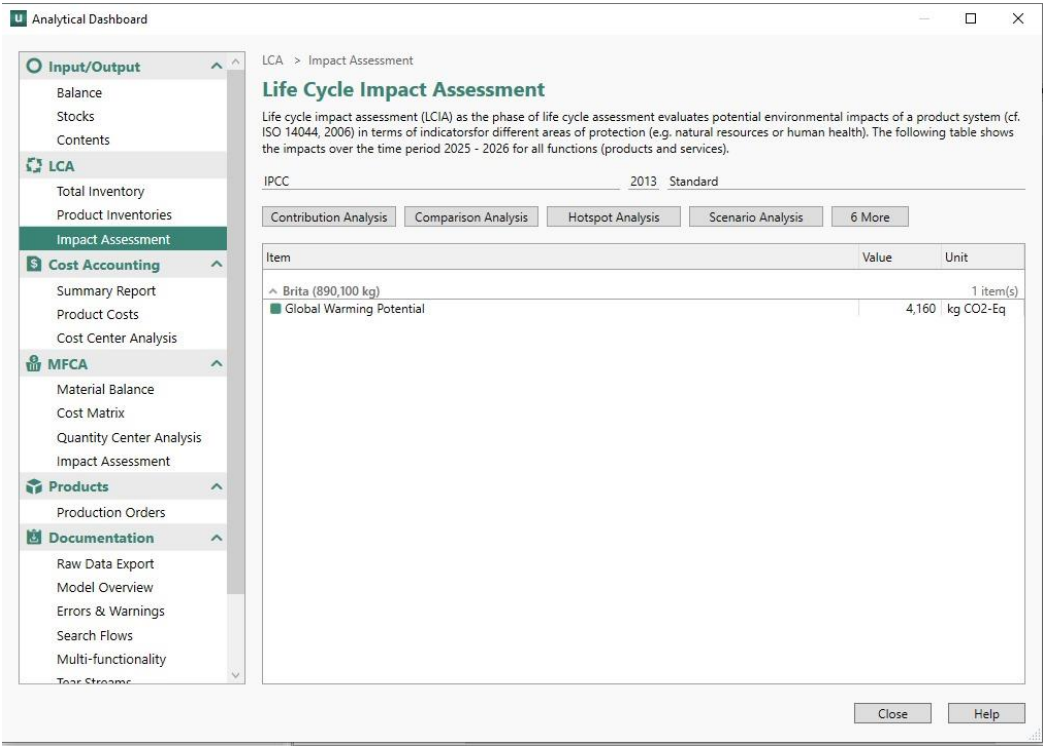
Fonte: Autor, 2025.

Figura 18 – Inserção massa específica e GWP processo extração de brita



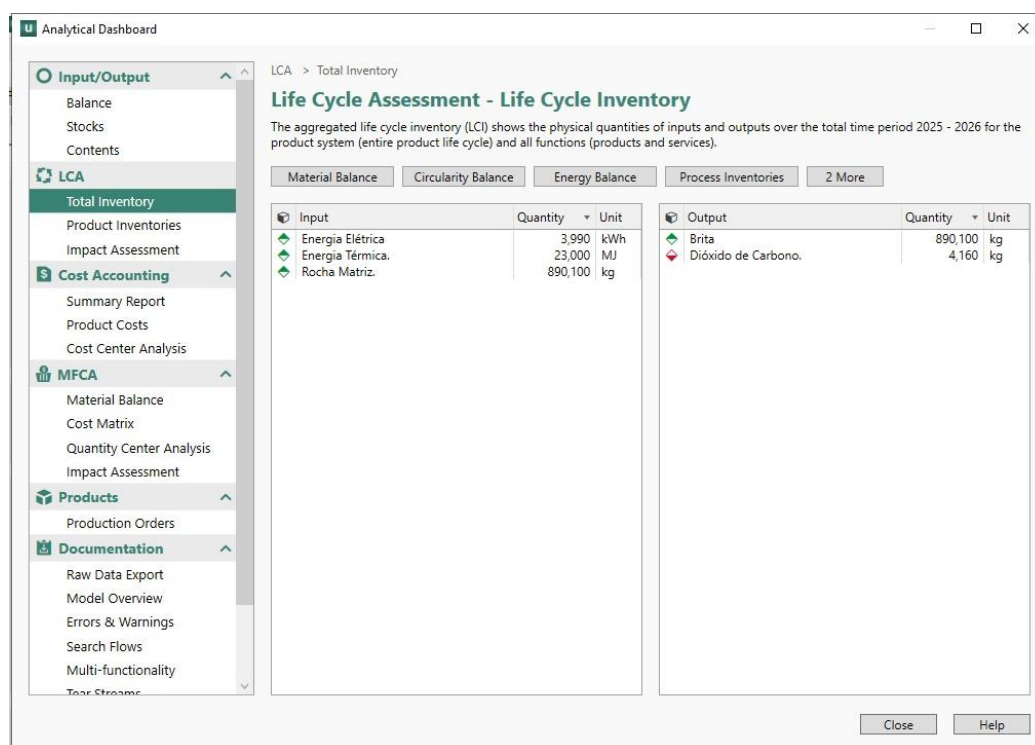
Fonte: Autor, 2025.

Figura 19 – Impacto ambiental processo extração de brita



Fonte: Autor, 2025.

**Figura 20 – Inventário total processo extração de brita**



Fonte: Autor, 2025.

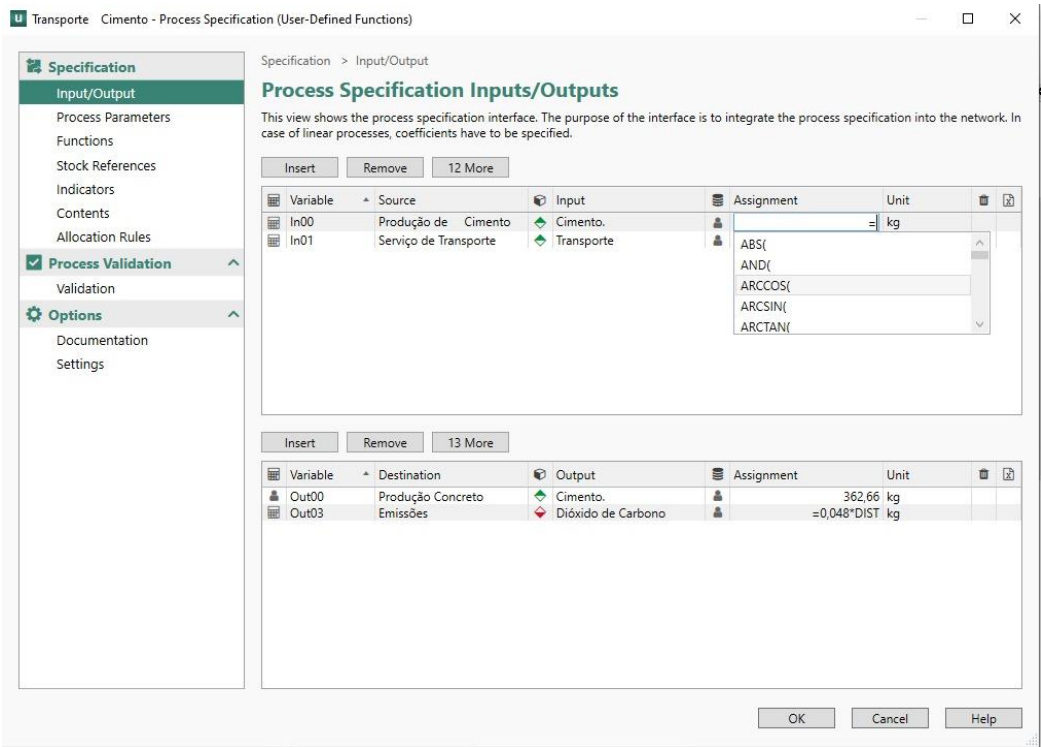
Outra opção de processo, utilizada principalmente para o transporte de materiais, é o *User-defined Functions Process* (Processo Complexo). Nesse processo, é possível adicionar fórmulas, ao digitar o sinal = no teclado, diversas fórmulas disponíveis podem ser utilizadas. No exemplo do processo “Transporte de Concreto”, foram aplicadas as seguintes fórmulas:

- =Out00: copia o valor da variável Out00;
- =Mass(Out00)\*DIST: copia a massa da variável Out00 e a multiplica por DIST;
- =0,05\*DIST: multiplica o valor indicado por DIST.

O parâmetro DIST corresponde a uma medida predefinida na aba *Model Configuration* (Configuração do Modelo), na opção *Model Parameters* (Parâmetros de Modelo), em que o seu valor foi definido e padronizado para o cálculo dos processos.

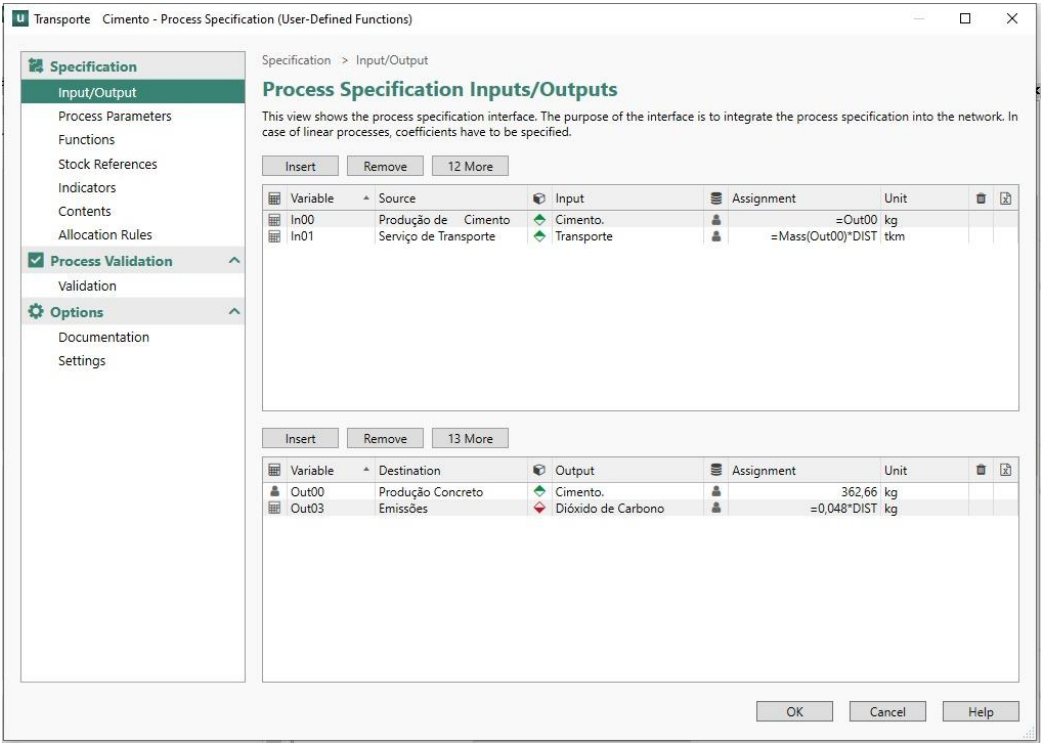
As Figuras 21, 22 e 23 apresentam a interface do *software* Umberto, exemplificando as funcionalidades citadas previamente.

Figura 21 – Especificação processo transporte cimento



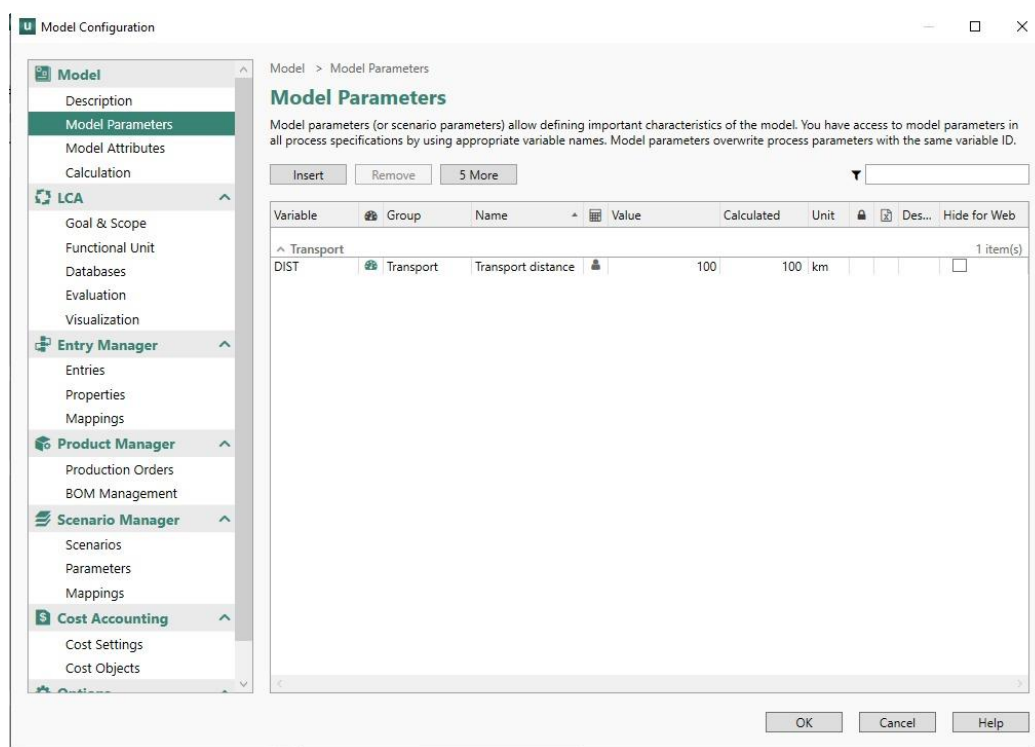
Fonte: Autor, 2025.

Figura 22 – Especificação processo transporte cimento



Fonte: Autor, 2025.

**Figura 23 – Parâmetro de modelo processo transporte cimento**



Fonte: Autor, 2025.

### 3.2 Análises Realizadas

As análises foram desenvolvidas com base na modelagem realizada no *software* Umberto, contemplando todas as etapas do ciclo produtivo do concreto, desde a extração das matérias-primas até a destinação final dos resíduos. Essa modelagem permitiu representar, de forma visual e sistematizada, os fluxos de materiais, energia e emissões envolvidos em cada fase do processo, possibilitando uma compreensão integrada do desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida do concreto.

Foram consideradas as etapas de extração de brita e areia, produção do clínquer e cimento, captação de água, transporte das matérias-primas citadas, produção e transporte do concreto, além das fases de utilização e disposição dos resíduos. A análise teve como objetivo identificar quais processos contribuem mais para as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e avaliar como fatores como distância de transporte e tipo de insumo influenciam o desempenho ambiental do sistema.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Representação Gráfica da Obtenção dos Materiais

A representação gráfica da obtenção dos materiais apresenta os processos iniciais envolvidos na produção do concreto, estruturados no *software* por meio de entradas, saídas e emissões correspondentes, incluindo também as unidades de medida e os respectivos quantitativos.

#### 4.1.1 Extração de brita

O processo de extração de brita teve como entradas a energia térmica, eletricidade (energia elétrica), rocha matriz, e saídas o dióxido de carbono e a própria brita. Não foram consideradas perdas no processo.

Para o cálculo do consumo de energia e das emissões de CO<sub>2</sub>, foram utilizadas as referências disponibilizadas pelo SIDAC (2022), Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção, com base na metodologia e no relatório de coleta de dados referentes a agregados e minerais de construção. De acordo com essa fonte, a produção de brita apresentou consumo médio de eletricidade de  $4,48 \cdot 10^{-3}$  kWh/kg, consumo médio de diesel de  $7,28 \cdot 10^{-4}$  L/kg, e emissão média de CO<sub>2</sub> de  $4,67 \cdot 10^{-3}$  kgCO<sub>2</sub>/kg.

Para calcular a energia elétrica e as emissões de CO<sub>2</sub> associadas à brita, multiplicou-se os valores pela massa total do material, 890,1 kg, e obteve 3,99 kWh de energia elétrica, e 4,16 kgCO<sub>2</sub>.

O cálculo da energia térmica gerada pelo consumo de diesel requer informações sobre a densidade do combustível e seu Poder Calorífico Inferior (PCI). Para este estudo, utilizou-se o Anuário Estatístico do Governo de 2019, que fornece a densidade do diesel de 0,84 t/m<sup>3</sup> e o PCI de 10.100 kcal/kg. Considerando que 1 kcal equivale a 4,184 kJ, o PCI em joules por quilograma é calculado como:

$$10.100 \frac{kcal}{kg} \times 4,184 \frac{kJ}{kcal} = 42.258,4 \text{ kJ/kg}$$

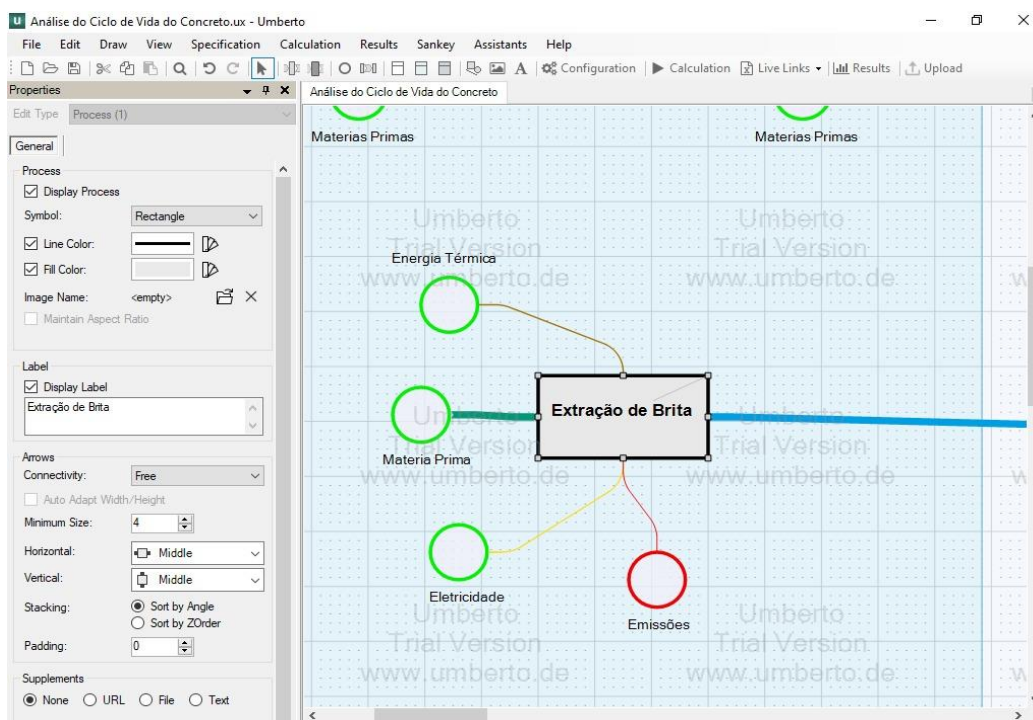
Convertendo para megajoules:

$$42.258,4 \frac{kJ}{kg} \div 1000 = 42,26 MJ/kg$$

Em seguida, o consumo energético do diesel foi obtido multiplicando-se o consumo específico de  $7,28 \cdot 10^{-4} \text{ L/kg}$  pela densidade do diesel,  $0,84 \text{ t/m}^3$ , resultando em  $0,00061152 \text{ kg}$  de diesel por  $\text{kg}$  de brita. Este valor foi multiplicado pelo PCI do diesel,  $42,26 \text{ MJ/kg}$ , e se obteve  $0,02584 \text{ MJ/kg}$ . Por último, esse valor foi multiplicado pelo total de brita,  $890,1 \text{ kg}$ , e a energia térmica total gerada pelo consumo de diesel foi de aproximadamente  $23 \text{ MJ}$ .

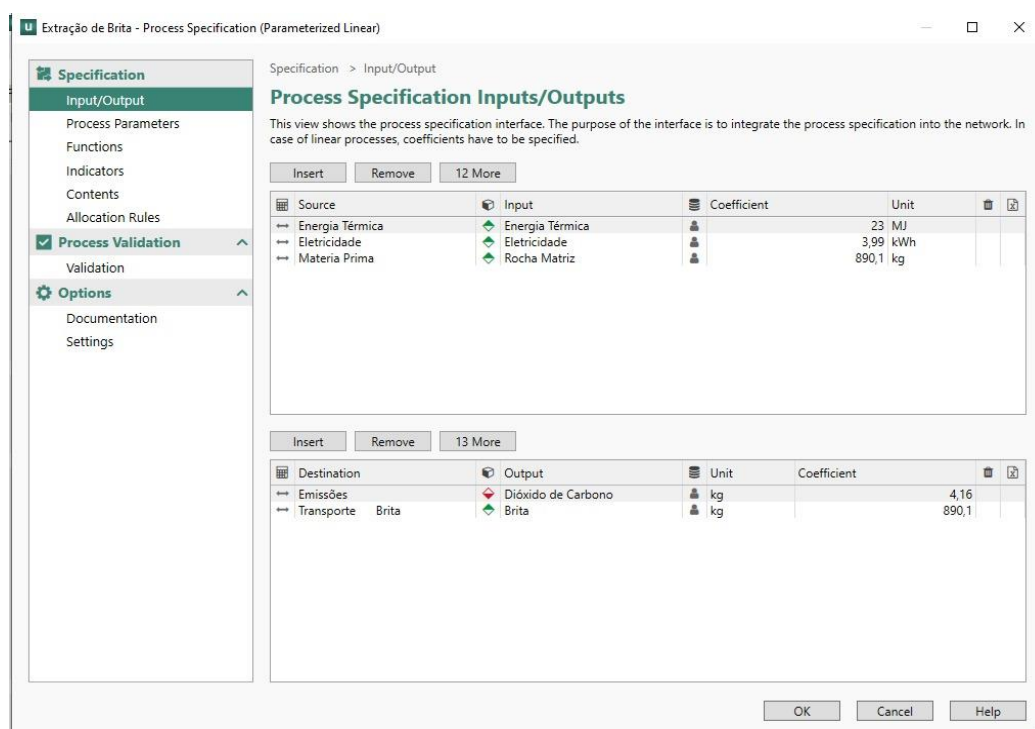
As Figuras 24 e 25 apresentam o processo de extração de brita no *software* Umberto.

**Figura 24 – Processo extração de brita**



Fonte: Autor, 2025.

**Figura 25 – Insumos do processo extração de brita**



Fonte: Autor, 2025.

#### 4.1.2 Extração de areia

O processo de extração de areia, é similar ao da brita, teve as mesmas entradas, como a energia térmica, eletricidade (energia elétrica), rocha matriz, e as mesmas saídas, como o dióxido de carbono e a própria areia. Não foram consideradas perdas no processo.

Para o cálculo do consumo de energia e das emissões de CO<sub>2</sub>, também foram utilizadas as referências disponibilizadas pelo SIDAC (2022), com base na metodologia e no relatório de coleta de dados referentes a agregados e minerais de construção. De acordo com essa fonte, a produção de areia apresentou consumo médio de eletricidade de  $1,38 \cdot 10^{-4}$  kWh/kg, consumo médio de diesel de  $2,13 \cdot 10^{-3}$  L/kg, e emissão média de CO<sub>2</sub> de  $1,25 \cdot 10^{-2}$  CO<sub>2</sub>kg/kg.

Para calcular a energia elétrica e as emissões de CO<sub>2</sub> associadas à areia, multiplicou-se os valores pela massa total do material, 1156,64 kg, e obteve aproximadamente 0,1596 kWh de energia elétrica, e 14,458 kgCO<sub>2</sub>.

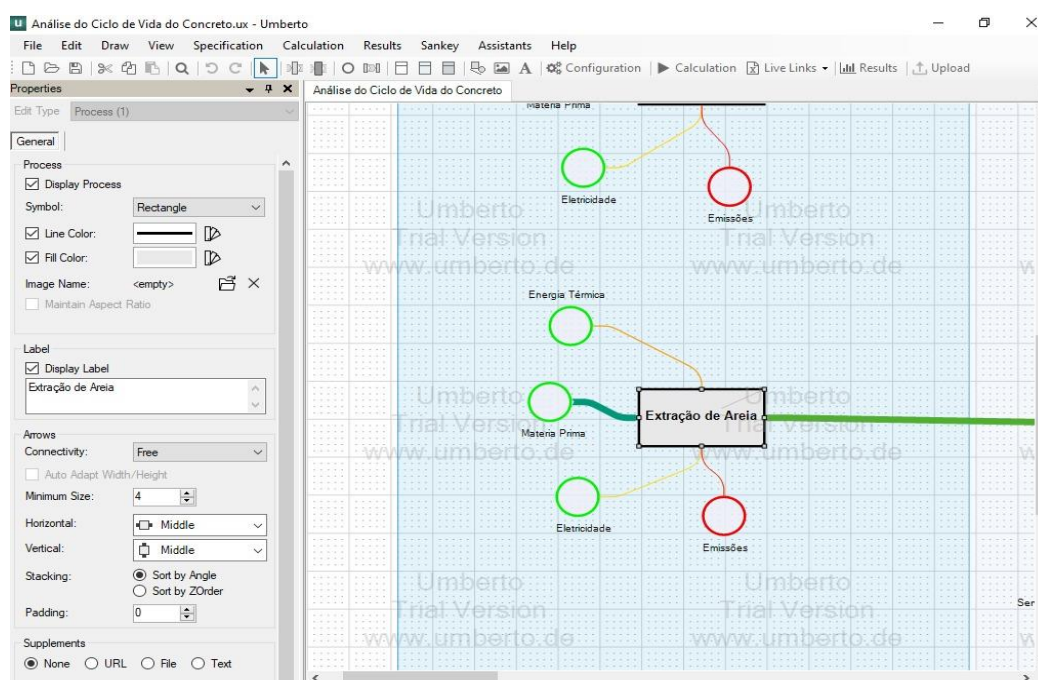
O cálculo da energia térmica gerada pelo consumo de diesel foi realizado da mesma forma, utilizando os dados do Anuário Estatístico do Governo de 2019,

sendo: a densidade do diesel de  $0,84 \text{ t/m}^3$  e o PCI de  $10.100 \text{ kcal/kg}$ . Considerando que  $1 \text{ kcal}$  equivale a  $4,184 \text{ kJ}$ , o valor do PCI do diesel, de  $10.100 \text{ kcal/kg}$ , foi convertido para  $42.258,4 \text{ kJ/kg}$ . Em seguida, o resultado foi dividido por  $1.000$ , obtendo-se  $42,26 \text{ MJ/kg}$ .

Esse foi obtido multiplicando-se o consumo específico de  $2,13 \cdot 10^{-3} \text{ L/kg}$  pela densidade do diesel,  $0,84 \text{ t/m}^3$ , resultando em  $1,78 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$  de diesel por kg de areia. Este valor foi multiplicado pelo PCI do diesel,  $42,26 \text{ MJ/kg}$ , e se obteve  $0,0752 \text{ MJ/kg}$ . Por último, esse valor foi multiplicado pelo total de areia,  $1.156,64 \text{ kg}$ , e a energia térmica total gerada pelo consumo de diesel foi de aproximadamente  $87 \text{ MJ}$ .

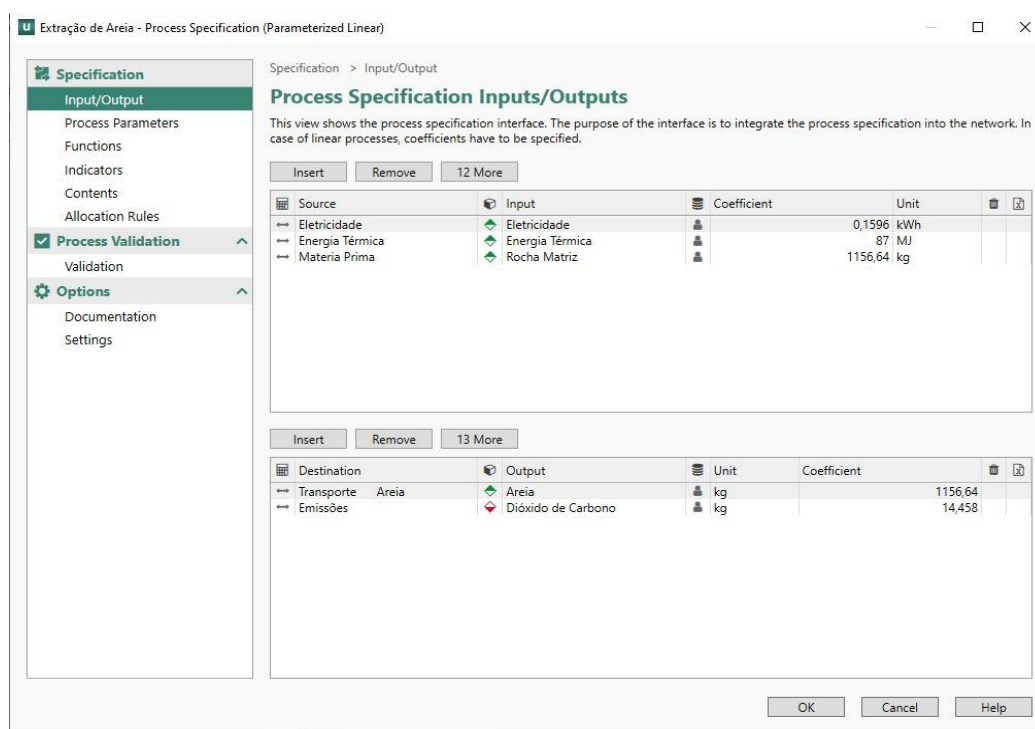
As Figuras 26 e 27 apresentam o processo de extração de areia no *software* Umberto.

**Figura 26 – Processo extração de areia**



Fonte: Autor, 2025.

**Figura 27 – Insumos do processo extração de areia**



Fonte: Autor, 2025.

### 4.1.3 Produção de cimento

O cimento escolhido para a utilização no diagrama foi cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno (CPII-E). De acordo com a Tabela 1 – Composição dos Cimentos Portland, apresentada anteriormente, esse tipo de cimento pode apresentar classe de resistência de 25, 32 ou 40 MPa, sendo constituído por clínquer e sulfatos de cálcio (51–94%), escória granulada de alto-forno (6–34%), e material carbonático (0–15%).

Para este estudo, foram considerados os seguintes dados: a fabricação do clínquer, composta por 75–80% de calcário e 20–25% de argila, segundo Lima (2011), e a composição do cimento, formada por 97% de clínquer e 3% de gesso, conforme o boletim técnico da Associação Brasileira de Cimento Portland (2002).

Na definição da composição do cimento, foram adotadas as seguintes proporções: 80% de clínquer mais sulfatos de cálcio, 18% de escória granulada de alto-forno e 2% de material carbonático. A escolha desses valores foi realizada pelo autor, uma vez que se encontram dentro dos limites estabelecidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018), que normatiza a composição dos cimentos Portland.

Dessa forma, para uma massa total de 362,66 kg de cimento, obteve-se 290,13 kg de clínquer mais sulfatos de cálcio, 65,28 kg de escória granulada de alto-forno e 7,25 kg de material carbonático.

Do total de clínquer mais sulfatos de cálcio, 97% correspondem ao clínquer, equivalente a 281,43 kg, e 3% ao gesso, equivalente a 8,70 kg. A produção do clínquer foi calculada com base na proporção de 80% de calcário e 20% de argila, resultando, respectivamente, em 225,14 kg de calcário e 56,29 kg de argila, considerando o total de 281,43 kg de clínquer.

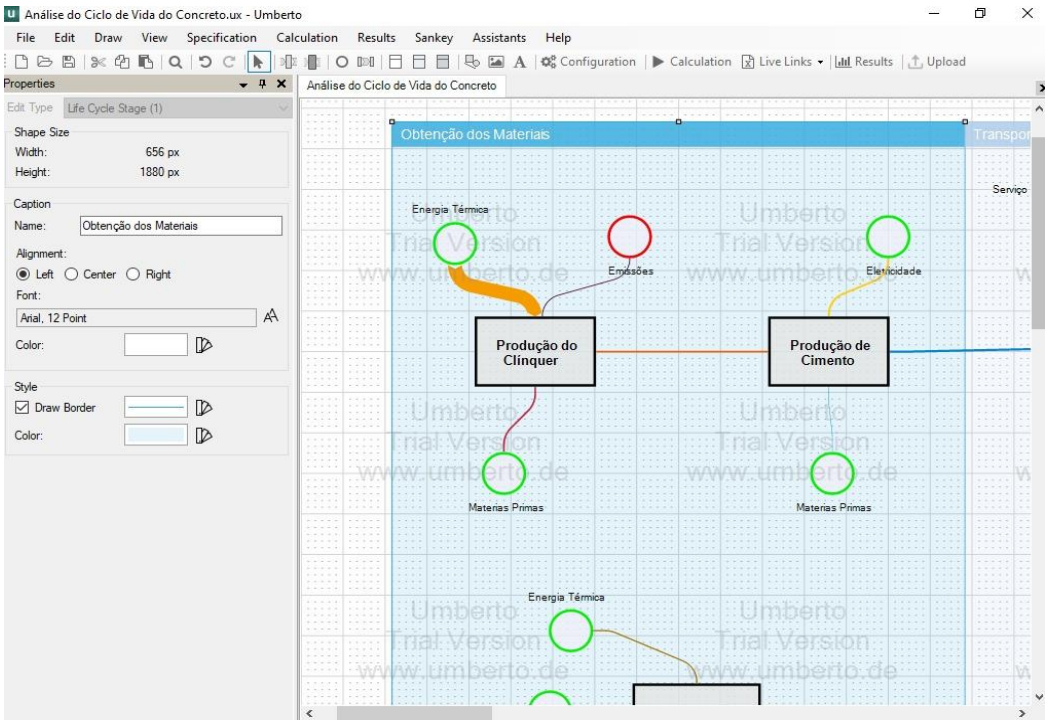
Diferentemente da produção da brita e da areia, a produção do cimento exige a etapa de fabricação do clínquer. Nesse processo, as entradas são energia térmica, calcário moído e argila, e as saídas são o clínquer, e o dióxido de carbono. No processo de produção do cimento, as entradas são energia elétrica, gesso, clínquer, escória granulada de alto-forno e material carbonático, e a saída é o próprio cimento.

Para o cálculo do consumo energético, foram utilizados os dados do estudo Modelagem Setorial de Opções de Baixo Carbono para o Setor de Cimento (2017), que estabelece os valores médios de 3.520 MJ por tonelada de clínquer para energia térmica e 103 kWh por tonelada de cimento para energia elétrica. Considerando esses valores, o consumo obtido foi de 990,63 MJ de energia térmica para a produção de clínquer e 37,35 kWh de energia elétrica para a produção de cimento, sendo o primeiro valor obtido multiplicando-se 3.520 MJ/t pela massa de clínquer considerada em toneladas (0,28143 t) e o segundo valor obtido multiplicando-se 103 kWh/t pela massa de cimento considerada em toneladas (0,36266 t).

Ainda com base no mesmo estudo, foi possível estimar as emissões de CO<sub>2</sub>, que registraram em determinado ano 26.800 Gg de emissões provenientes do processo de calcinação frente a uma produção nacional de 64.093 mil toneladas de cimento. A razão entre esses valores resulta em um fator de emissão médio de 0,418 kgCO<sub>2</sub> por quilograma de cimento produzido. Aplicando esse fator à massa de 362,66 kg de cimento considerada, obteve-se um total de 151,59 kgCO<sub>2</sub> emitidos. Não foram consideradas perdas no processo.

As Figuras 28, 29, e 30 apresentam os processos de produção de clínquer e cimento no *software* Umberto.

Figura 28 – Processos produção de clínquer e cimento



Fonte: Autor, 2025.

Figura 29 – Insumo do processo produção de clínquer

The screenshot shows the 'Produção do Clínquer - Process Specification (Parameterized Linear)' dialog box. It has a left sidebar with 'Specification' (Input/Output, Process Parameters, Functions, Indicators, Contents, Allocation Rules, Process Validation, Options) and a main area titled 'Process Specification Inputs/Outputs'. The main area contains two tables: 'Input' and 'Output'.

| Source          | Input            | Coefficient | Unit |
|-----------------|------------------|-------------|------|
| Energia Térmica | Energia Térmica  | 990,63      | MJ   |
| Materias Primas | Calcário Moído   | 225,14      | kg   |
| Materias Primas | Argila (BR) (BR) | 56,29       | kg   |

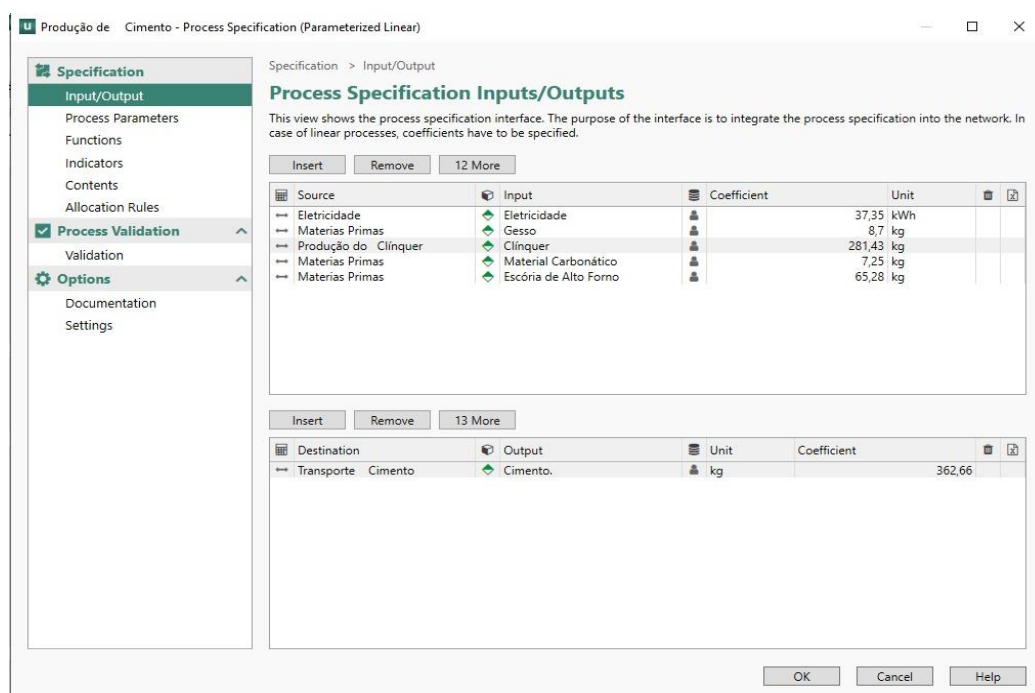
  

| Destination         | Output             | Coefficient | Unit |
|---------------------|--------------------|-------------|------|
| Emissões            | Dióxido de Carbono | 151,59      | kg   |
| Produção de Cimento | Clínquer           | 281,43      | kg   |

Buttons at the bottom: OK, Cancel, Help.

Fonte: Autor, 2025.

**Figura 30 – Insumo do processo produção de cimento**



Fonte: Autor, 2025.

#### 4.1.4 Captação de água

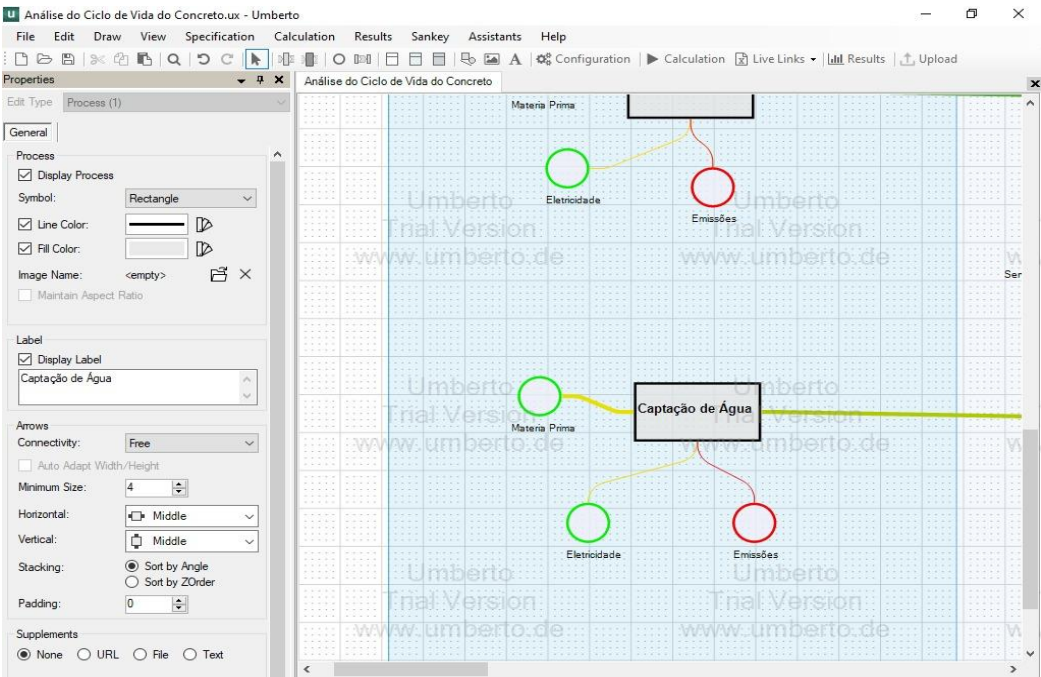
O processo de captação de água teve as entrada de eletricidade (energia elétrica), tratamento de água, e como saídas, o dióxido de carbono e a própria água. Não foram consideradas perdas no processo.

Para o cálculo, foram utilizadas informações do Portal do Tratamento de Água e do artigo Cálculo das Emissões de CO<sub>2</sub> no Ciclo de Vida das Habitações Populares – Estudo de Caso do Conjunto Habitacional Jd. Edith. No primeiro, obteve-se o consumo médio de energia de 0,65 kWh/m<sup>3</sup> de água, enquanto no segundo, o valor médio de emissões, 0,033 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de água.

Com base nesses dados, o consumo de energia elétrica no processo foi calculado como 0,1320 kWh, e as emissões de CO<sub>2</sub> como 0,0067 kg CO<sub>2</sub>, considerando-se a quantidade de 0,2031 m<sup>3</sup> de água, multiplicada pelos respectivos valores médios de consumo energético e de emissões.

As Figuras 31 e 32 apresentam o processo de captação de água no *software* Umberto.

Figura 31 – Processo captação de água



Fonte: Autor, 2025.

Figura 32 – Insumo do processo captação de água

The screenshot shows the 'Captação de Água - Process Specification (Parameterized Linear)' window. The left sidebar contains a tree view with 'Specification' expanded, showing 'Input/Output', 'Process Parameters', 'Functions', 'Indicators', 'Contents', 'Allocation Rules', 'Process Validation', 'Options', 'Documentation', and 'Settings'. The main area is titled 'Process Specification Inputs/Outputs' and contains two tables. The top table lists inputs, and the bottom table lists outputs. Both tables include columns for 'Source' or 'Destination', 'Input' or 'Output', 'Coefficient', and 'Unit'. The bottom table also includes a 'Destination' column.

| Source        | Input              | Coefficient | Unit |
|---------------|--------------------|-------------|------|
| Eleticidade   | Eleticidade        | 0,132       | kWh  |
| Materia Prima | Tratamento de Água | 0,2031      | m³   |

| Destination | Output             | Coefficient | Unit |
|-------------|--------------------|-------------|------|
| Transporte  | Água               | 0,2031      | m³   |
| Emissões    | Dióxido de Carbono | 0,0067      | kg   |

Fonte: Autor, 2025.

## 4.2 Transporte das Matérias-Primas

Os processos de transporte de materiais tiveram como entradas os insumos transportados, sendo: brita, areia, cimento ou água, e o serviço de transporte, enquanto as saídas corresponderam ao próprio material transportado e às emissões de dióxido de carbono. Não foram consideradas perdas durante o processo.

Para o cálculo do transporte das matérias-primas, foram utilizadas diferentes referências. A primeira foi o relatório Trajetórias Tecnológicas mais Eficientes para a Descarbonização da Mobilidade (2024), em que se obteve a intensidade de carbono do diesel, de 87 gCO<sub>2</sub>/MJ. Em complemento, foram utilizados os dados do Anuário Estatístico do Governo (2019), que forneceu a densidade do diesel de 0,84 t/m<sup>3</sup> e o PCI de 10.100 kcal/kg. Por fim, o SIDAC (2022) disponibilizou o consumo específico de combustível, sendo 0,0421 L/t.km para caminhões betoneira e pipa, e 0,0427 L/t.km para caminhões basculantes toco (2 eixos).

O cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> geradas pelo consumo de diesel foi realizado da mesma forma, utilizando os dados do Anuário Estatístico do Governo de 2019, sendo: a densidade do diesel de 0,84 t/m<sup>3</sup> e o PCI de 10.100 kcal/kg. Considerando que 1 kcal equivale a 4,184 kJ, o valor do PCI do diesel, de 10.100 kcal/kg, foi convertido para 42.258,4 kJ/kg. Em seguida, o resultado foi dividido por 1.000, obtendo-se 42,26 MJ/kg. A densidade do diesel foi convertida de 0,84 t/m<sup>3</sup> para 0,84 kg/L, esse valor foi multiplicado pelo PCI de 42,26 MJ/kg, resultando em 35,50 MJ/L. Multiplicando esse resultado pelo fator de emissão de 87 gCO<sub>2</sub>/MJ, obteve-se 3.088,5 gCO<sub>2</sub>/L, valor que corresponde aproximadamente a 3,088 kgCO<sub>2</sub>/L.

Para calcular as emissões por unidade de transporte (L/t.km), multiplicou-se os valores de 0,0421 L/t.km (caminhões betoneira e pipa) e 0,0427 L/t.km (caminhão basculante toco) por 3,088 kgCO<sub>2</sub>/L, resultando, respectivamente, em 0,1300 kgCO<sub>2</sub>/t.km e 0,1319 kgCO<sub>2</sub>/t.km.

Por fim, adotou-se uma distância padrão de 100 km (DIST) para todos os processos de transporte de matérias-primas modelados no *software*.

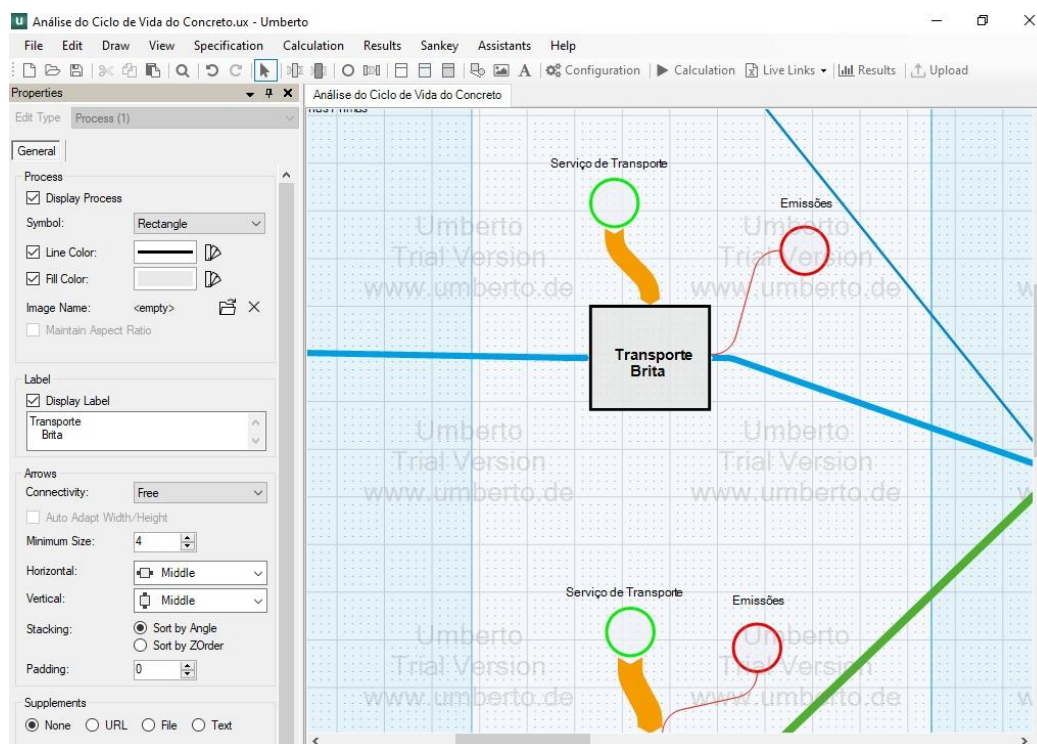
### 4.2.1 Transporte de Brita

O cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> referentes ao transporte da brita considerou o valor de 0,1319 kgCO<sub>2</sub>/t.km para o caminhão basculante. Multiplicando-

se esse fator pela massa transportada de brita, equivalente a 0,8901 t, obteve-se aproximadamente 0,117 kgCO<sub>2</sub>. Não foram consideradas perdas no processo.

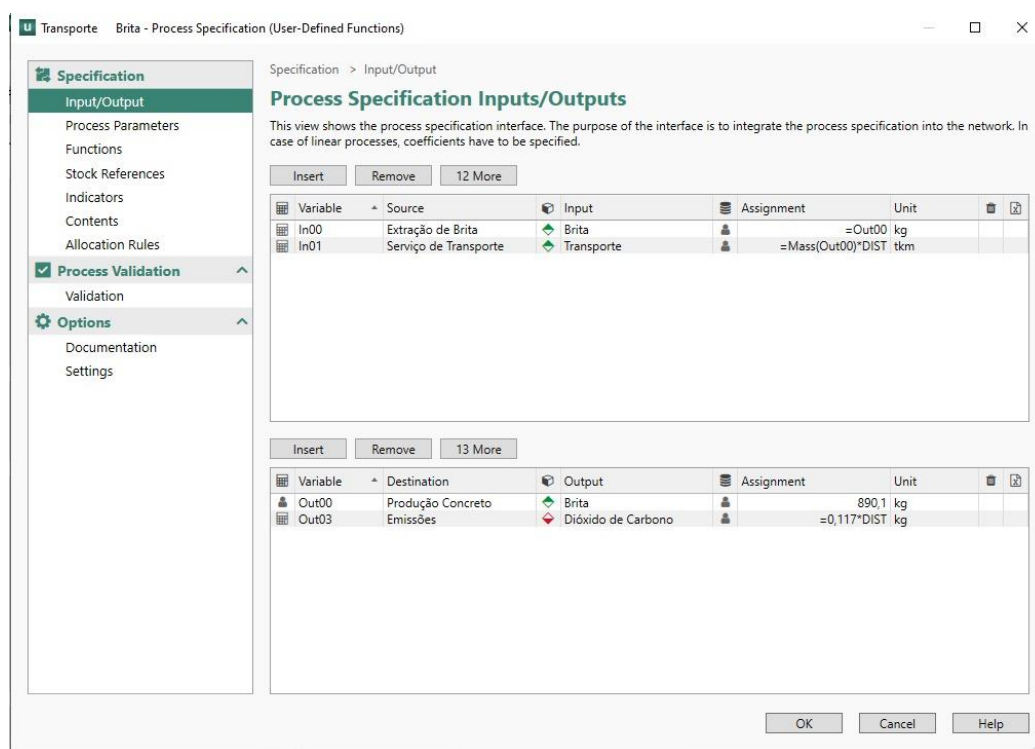
As Figuras 33 e 34 apresentam o processo de transporte de brita no *software* Umberto.

**Figura 33** – Processo transporte de brita



Fonte: Autor, 2025.

**Figura 34** – Insumos do processo transporte de brita



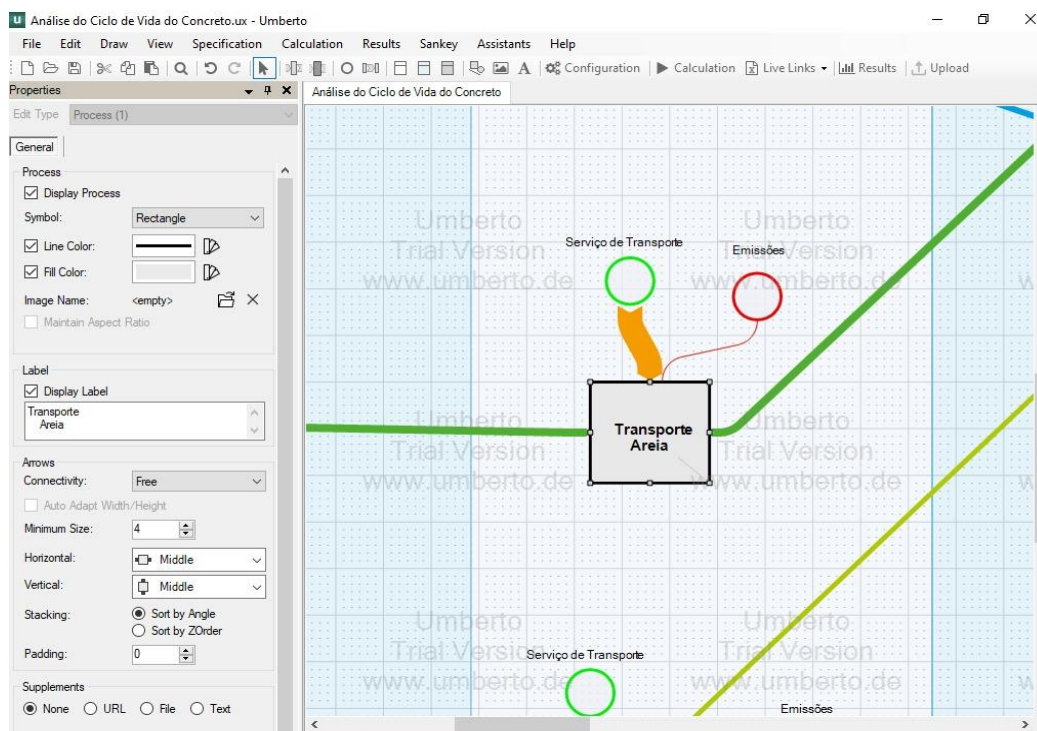
Fonte: Autor, 2025.

#### 4.2.2 Transporte de Areia

O cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> no transporte da areia foi realizado com base no fator de 0,1319 kgCO<sub>2</sub>/t.km para o caminhão basculante. Considerando a massa transportada de 1,15664 t, obteve-se um valor aproximado de 0,153 kgCO<sub>2</sub>. Não foram consideradas perdas no processo.

As Figuras 35 e 36 apresentam o processo de transporte de areia no *software* Umberto.

**Figura 35 – Processo transporte de areia**



Fonte: Autor, 2025.

**Figura 36 – Insumos do processo transporte de areia**

The screenshot shows the 'Transporte Areia - Process Specification (User-Defined Functions)' window. The window has a sidebar with tabs for 'Specification', 'Input/Output', 'Functions', 'Stock References', 'Indicators', 'Contents', 'Allocation Rules', 'Process Validation', 'Options', 'Documentation', and 'Settings'. The 'Input/Output' tab is selected, showing a table of process specification inputs/outputs. The table is divided into two sections: 'Input' and 'Output'.

| Variable | Source                | Input      | Assignment        | Unit |
|----------|-----------------------|------------|-------------------|------|
| In00     | Extração de Areia     | Areia      | =Out00            | kg   |
| In01     | Serviço de Transporte | Transporte | =Mass(Out00)*DIST | tkm  |

| Variable | Destination       | Output             | Assignment  | Unit |
|----------|-------------------|--------------------|-------------|------|
| Out00    | Produção Concreto | Areia              | 1156,64     | kg   |
| Out03    | Emissões          | Dióxido de Carbono | =0,153*DIST | kg   |

At the bottom of the window, there are buttons for 'OK', 'Cancel', and 'Help'.

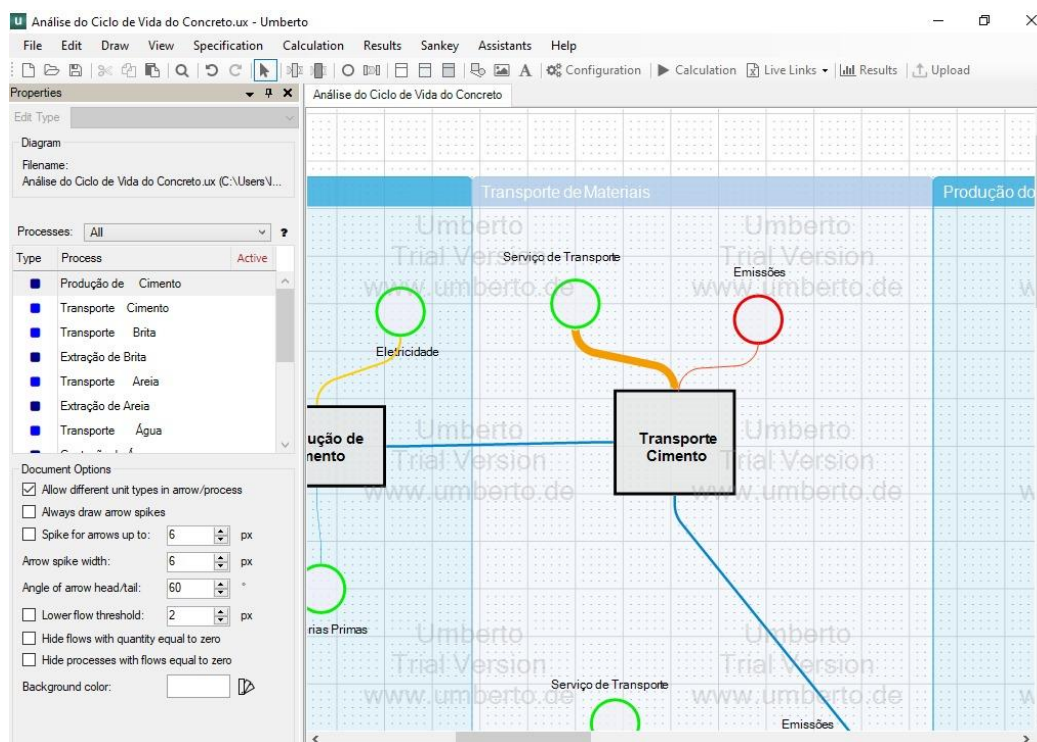
Fonte: Autor, 2025.

### 4.2.3 Transporte do Cimento

O cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> no transporte do cimento considerou o fator de 0,1319 kgCO<sub>2</sub>/t.km para o caminhão basculante. A partir da massa transportada de 0,36266 t, obteve-se um valor aproximado de 0,048 kgCO<sub>2</sub>. Não foram consideradas perdas no processo.

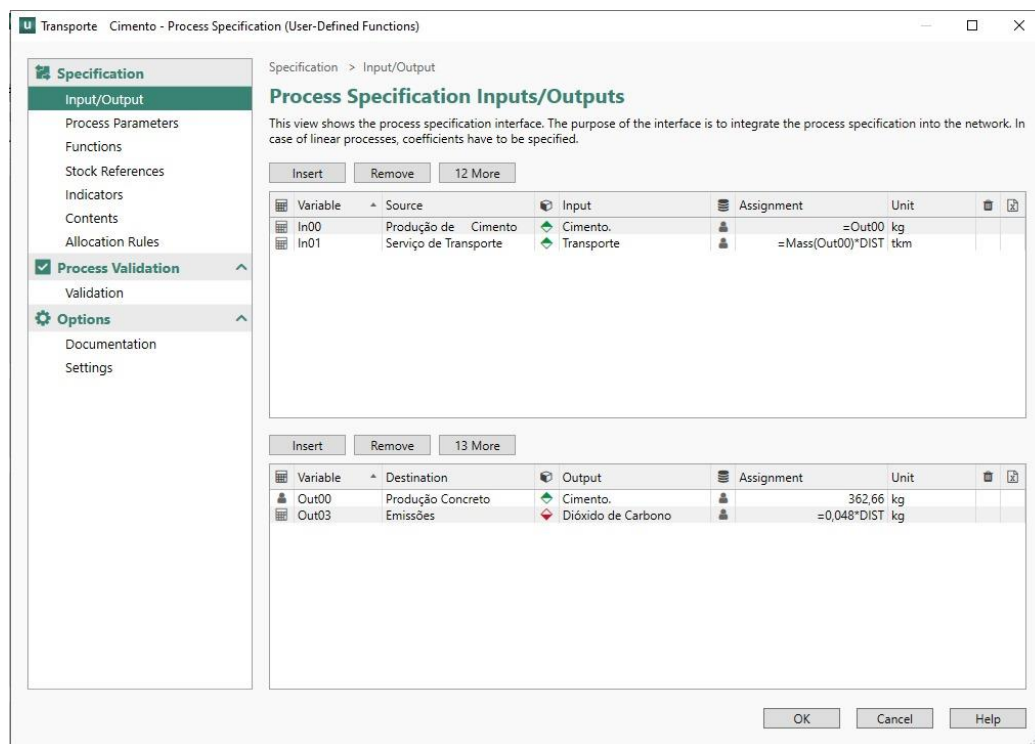
As Figuras 37 e 38 apresentam o processo de transporte do cimento no *software* Umberto.

**Figura 37** – Processo transporte do cimento



Fonte: Autor, 2025.

**Figura 38** – Insumos do processo transporte do cimento



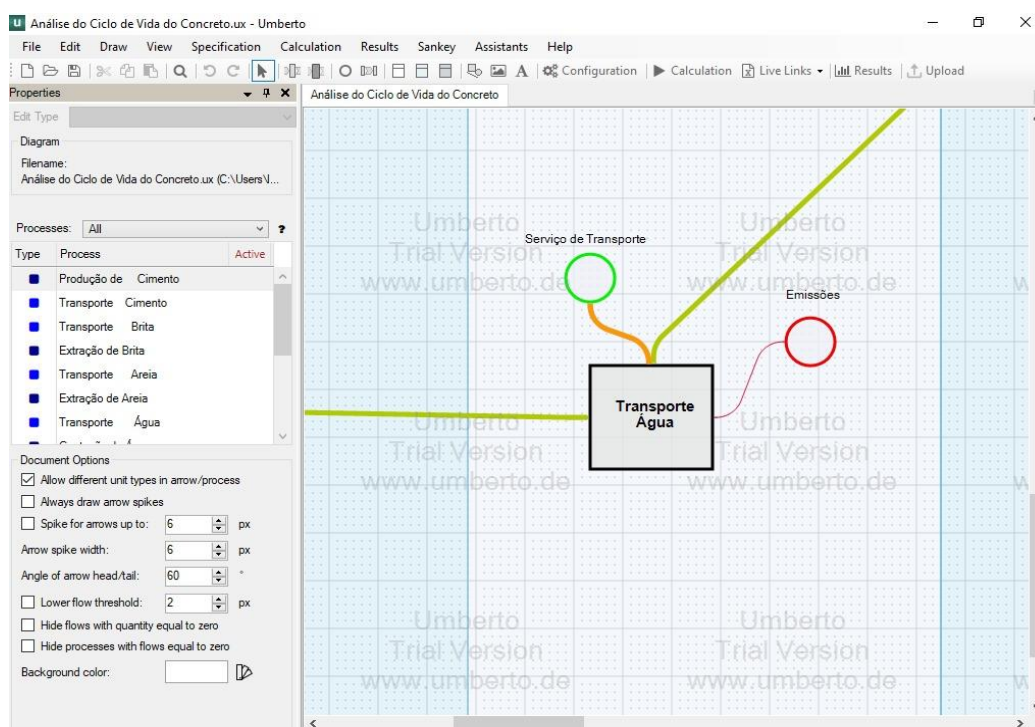
Fonte: Autor, 2025.

#### 4.2.4 Transporte de Água

O cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> no transporte da água foi realizado utilizando o fator de 0,1300 kgCO<sub>2</sub>/t.km referente ao caminhão pipa. Considerando a massa transportada de 0,2031 t, obteve-se aproximadamente 0,026 kgCO<sub>2</sub>. Não foram consideradas perdas no processo.

As Figuras 39 e 40 apresentam o processo de transporte de água no *software* Umberto.

**Figura 39 – Processo transporte de água**



Fonte: Autor, 2025.

**Figura 40 – Insumos do processo transporte de água**

The screenshot shows the 'Transporte Água - Process Specification (User-Defined Functions)' window. The 'Input/Output' tab is active, displaying a table of process specifications. The table lists inputs (In00, In01) and outputs (Out00, Out03) with their respective sources, destinations, and units.

| Variable | Source                | Input      | Assignment        | Unit |
|----------|-----------------------|------------|-------------------|------|
| In00     | Captação de Água      | Água       | =Out00            | m³   |
| In01     | Serviço de Transporte | Transporte | =Mass(Out00)*DIST | tkm  |

| Variable | Destination       | Output             | Assignment  | Unit |
|----------|-------------------|--------------------|-------------|------|
| Out00    | Produção Concreto | Água               | 0,2031      | m³   |
| Out03    | Emissões          | Dióxido de Carbono | =0,026*DIST | kg   |

Fonte: Autor, 2025.

### 4.3 Produção do Concreto

O processo de produção do concreto, teve como entradas, a eletricidade (energia elétrica), o transporte de brita, areia, água e cimento, e como saídas, o próprio concreto. Não foram consideradas perdas no processo.

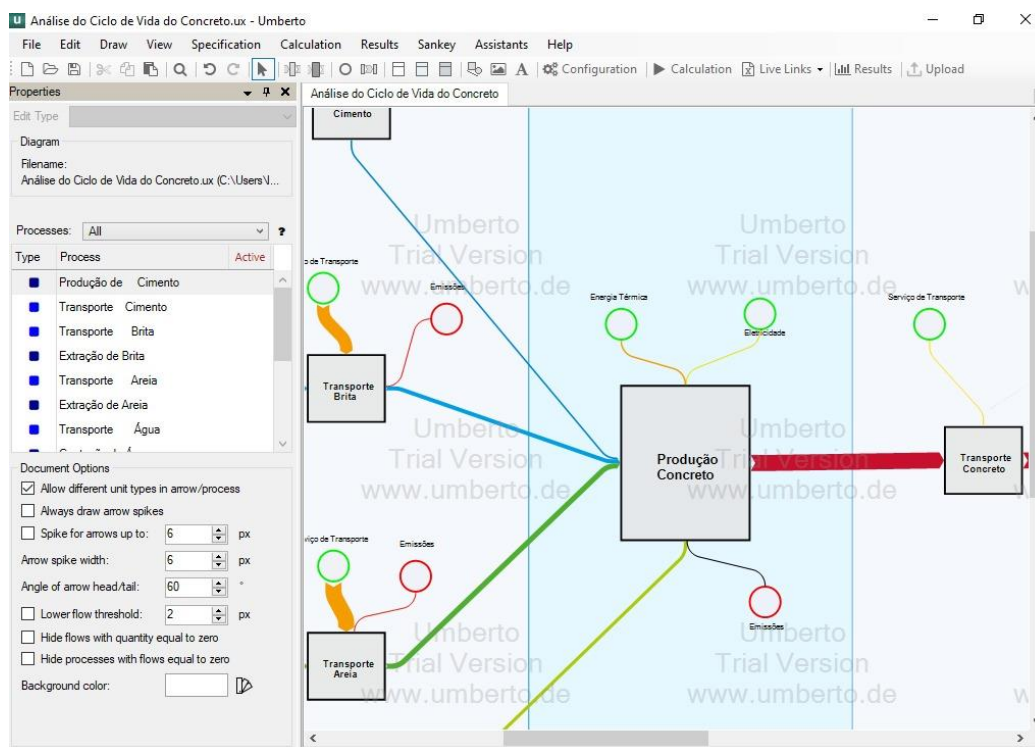
Para a produção do concreto, considerou-se o uso de uma central dosadora, na qual os materiais, cimento, areia, brita e água, são medidos com precisão, conforme a dosagem previamente definida em laboratório. Em seguida, a mistura é transferida para o caminhão-betoneira, cujo tambor gira continuamente durante o transporte, garantindo a homogeneidade e a trabalhabilidade do concreto até o momento da aplicação na obra.

Segundo o SIDAC (2022), o processo de produção de concreto dosado em central apresenta consumo de energia elétrica variando entre 0,9 e 6,1 kWh/m<sup>3</sup>, enquanto o consumo de óleo diesel situa-se entre 3 e 5 L/m<sup>3</sup>. Esses valores representam o consumo total de energia associado à produção do concreto, abrangendo a operação da central, as etapas de carregamento e mistura, realizadas tanto em centrais estacionárias quanto, em alguns casos, no próprio caminhão-betoneira, dependendo do tipo de processo adotado.

Para o cálculo, foram utilizadas as médias das faixas de consumo, resultando em 3,5 kWh/m<sup>3</sup> de energia elétrica e 4 L/m<sup>3</sup> de diesel. Considerando a produção de 1 m<sup>3</sup> de concreto, estima-se o consumo de 3,5 kWh de energia elétrica e 4 L de diesel. Para converter o diesel em energia térmica foi adotada a densidade do diesel de 0,84 kg/L, obtendo-se uma massa de 3,36 kg. A energia térmica foi calculada multiplicando-se a massa pelo PCI do diesel (42,26 MJ/kg), resultando em 141,99 MJ. Para estimar as emissões de CO<sub>2</sub>, o valor da energia térmica foi multiplicado pelo fator de emissão do diesel (87 gCO<sub>2</sub>/MJ), obtendo-se 12,35 kgCO<sub>2</sub>.

As Figuras 41 e 42 apresentam o processo da produção do concreto no *software* Umberto.

**Figura 41 – Processo produção do concreto**



Fonte: Autor, 2025.

**Figura 42 – Insumos do processo produção do concreto**

**Produção Concreto - Process Specification (User-Defined Functions)**

Specification > Input/Output

**Process Specification Inputs/Outputs**

This view shows the process specification interface. The purpose of the interface is to integrate the process specification into the network. In case of linear processes, coefficients have to be specified.

| Variable | Source             | Input           | Assignment | Unit |
|----------|--------------------|-----------------|------------|------|
| In00     | Transporte Brita   | Brita           | 890,1 kg   |      |
| In01     | Transporte Areia   | Areia           | 1156,64 kg |      |
| In02     | Transporte Água    | Água            | 0,2031 m³  |      |
| In03     | Transporte Cimento | Cimento         | 362,66 kg  |      |
| In04     | Eleticidade        | Eleticidade     | 3,5 kWh    |      |
| In05     | Energia Térmica    | Energia Térmica | 141,99 MJ  |      |

| Variable | Destination         | Output             | Assignment | Unit |
|----------|---------------------|--------------------|------------|------|
| Out00    | Transporte Concreto | Concreto           | 1 m³       |      |
| Out01    | Emissões            | Dióxido de Carbono | 12,35 kg   |      |

OK Cancel Help

Fonte: Autor, 2025.

#### 4.4 Transporte do Concreto

O processo de transporte do concreto teve como entradas o próprio concreto e o serviço de transporte, enquanto as saídas corresponderam ao material transportado e às emissões de dióxido de carbono. Não foram consideradas perdas durante o processo.

Para o cálculo do transporte do concreto, foram utilizadas as mesmas referências, sendo o relatório Trajetórias Tecnológicas mais Eficientes para a Descarbonização da Mobilidade (2024), em que se obteve a intensidade de carbono do diesel, de 87 gCO<sub>2</sub>/MJ, e os dados do Anuário Estatístico do Governo (2019), no qual se obteve a densidade do diesel de 0,84 t/m<sup>3</sup> e o PCI de 10.100 kcal/kg. Além disso, o SIDAC (2022) forneceu o consumo específico de combustível, que para caminhões betoneira e pipa é de 0,0421 L/t.km, valor adotado neste estudo.

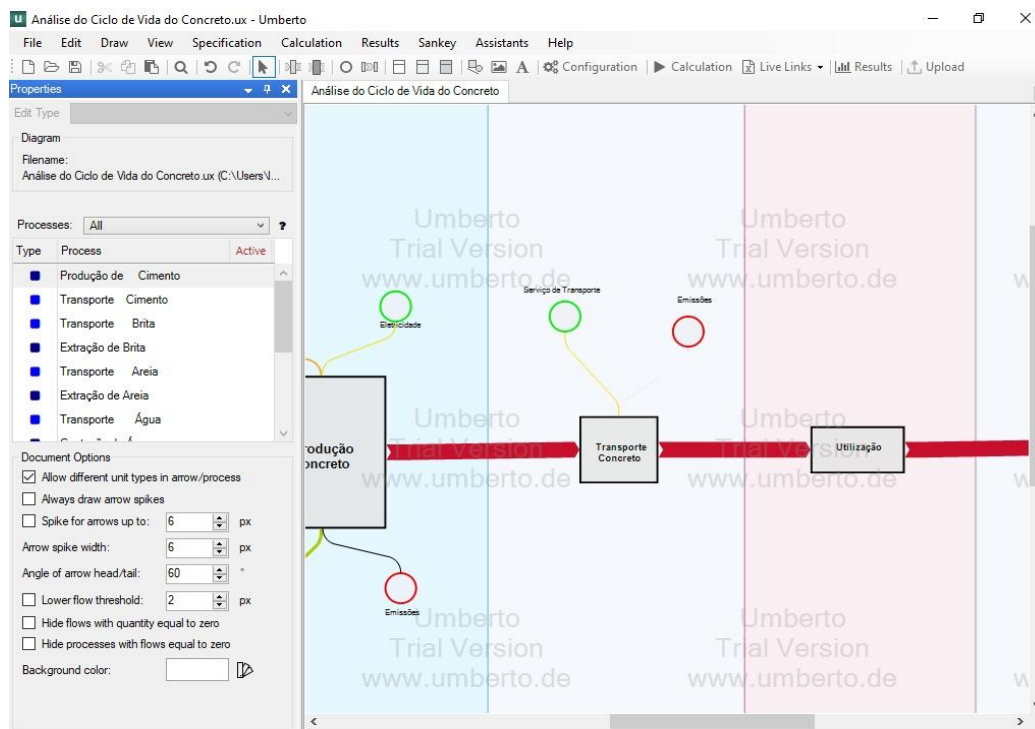
Para calcular as emissões de CO<sub>2</sub> por unidade de transporte (kgCO<sub>2</sub>/t.km), multiplicou-se os valores de 0,0421 L/t.km (caminhões betoneira e pipa) por 3,088 kgCO<sub>2</sub>/L, resultando em 0,1300 kgCO<sub>2</sub>/t.km.

Dessa forma, considerando a massa transportada de 2,612 t, as emissões de CO<sub>2</sub> no transporte do concreto foram calculadas como aproximadamente 0,339 kgCO<sub>2</sub>. Não foram consideradas perdas no processo.

As distâncias consideradas foram de 10 km e 20 km até o local de utilização na obra, tendo em vista o uso de caminhão betoneira, visto que o concreto usinado possui tempo limitado para aplicação e não pode ser transportado por longos percursos. No *software*, essas distâncias foram representadas pelas variáveis DIST2 e DIST3, correspondendo a 10 km e 20 km, respectivamente.

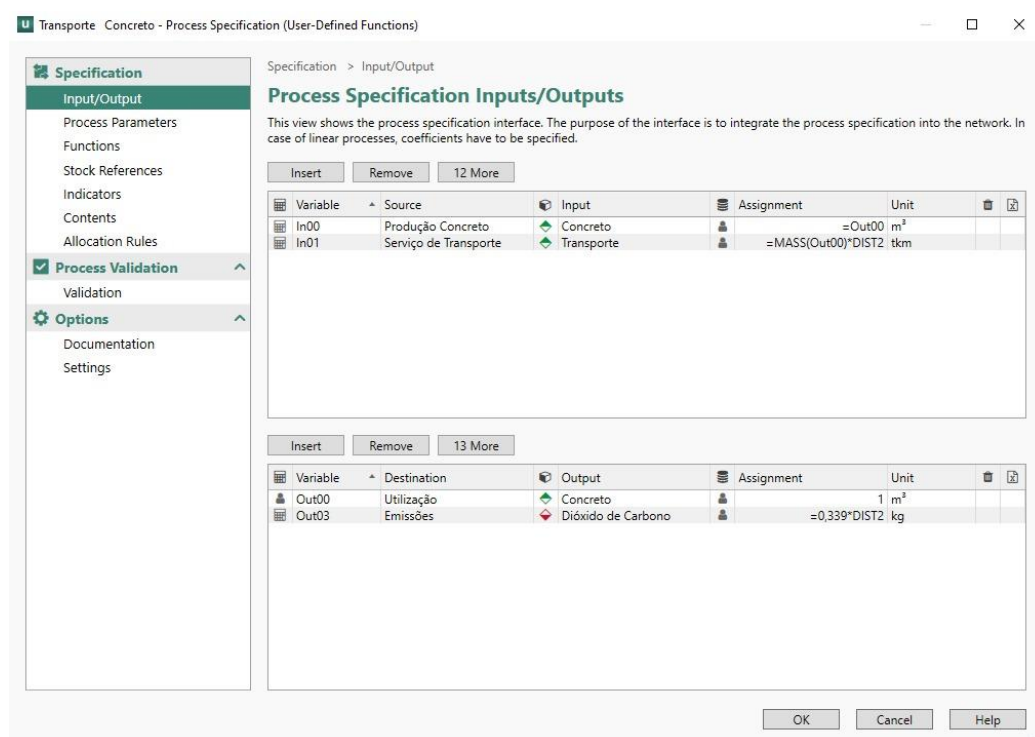
As Figuras 43, 44 e 45 apresentam o processo de transporte do concreto no *software* Umberto.

**Figura 43 – Processo transporte do concreto**



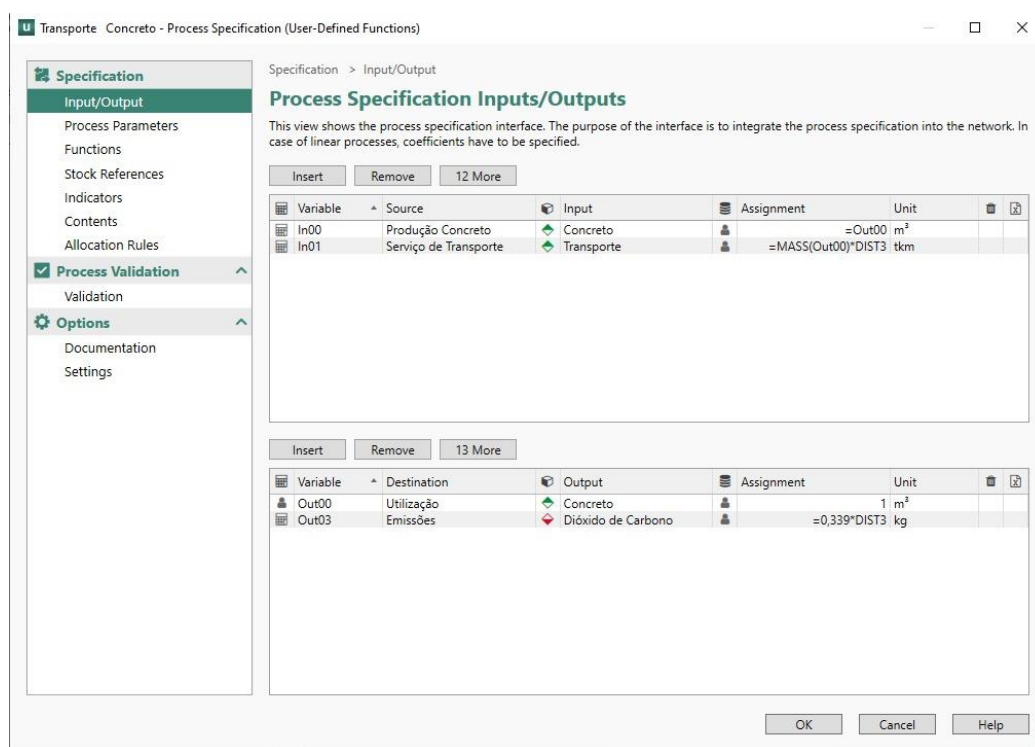
Fonte: Autor, 2025.

**Figura 44 – Insumos do processo transporte do concreto (distância 10 km)**



Fonte: Autor, 2025.

**Figura 45** – Insumos do processo transporte do concreto (distância 20 km)



Fonte: Autor, 2025.

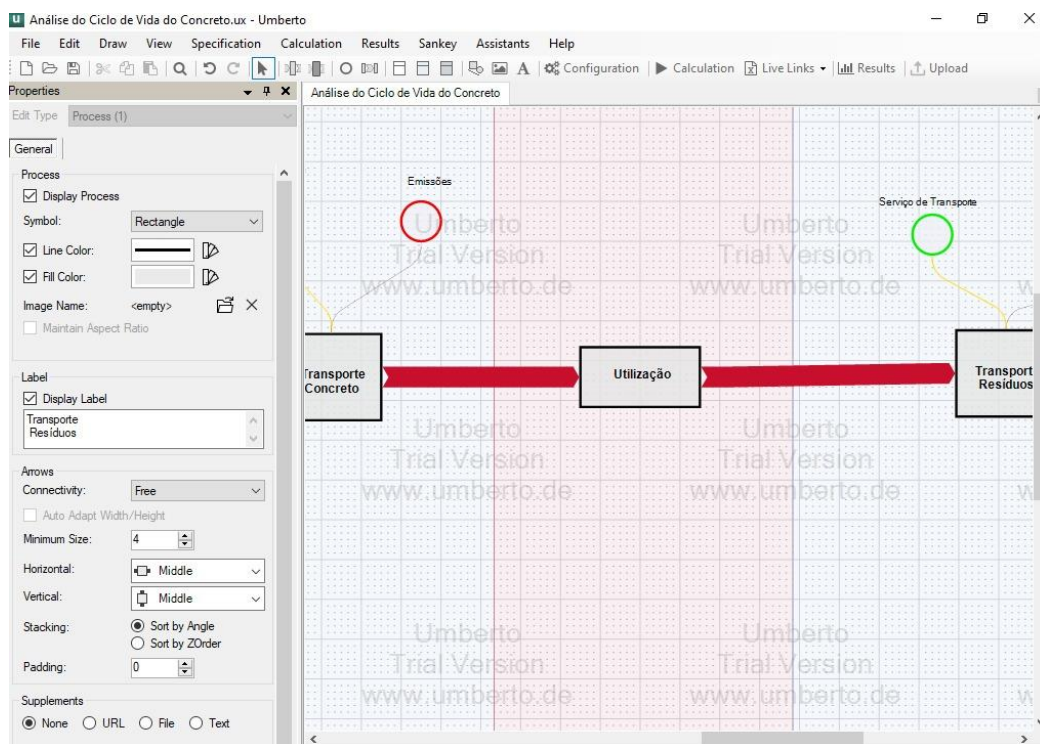
## 4.5 Utilização

O processo de utilização teve como entrada e saída o concreto, de volume equivalente a 1 m³. Considera-se que esse material foi inicialmente empregado na obra e, posteriormente, destinado à demolição, seja por término da vida útil da estrutura ou por outros motivos construtivos. Optou-se por não aplicar o índice de empolamento do concreto, uma vez que a literatura apresenta grande variação nos valores atribuídos a esse fator, podendo oscilar de 25%, conforme o estudo de mestrado Alternativas Adotadas para Segregação, Coleta e Destinação de Resíduos de Construção de Edificações com Base em um Estudo de Casos (2006), até o dobro do volume original (2 m³), segundo dados publicados no site Planejamento de Obras (2025). Dessa forma, para fins de padronização e coerência dos cálculos, foi mantido o valor de 1 m³ tanto para a entrada quanto para a saída do concreto.

O empolamento é o fenômeno pelo qual o material, ao ser quebrado ou desagregado, passa a ocupar um volume maior do que o original, devido à formação de espaços vazios entre os fragmentos e à perda da compactação inicial (Sávio, 2022).

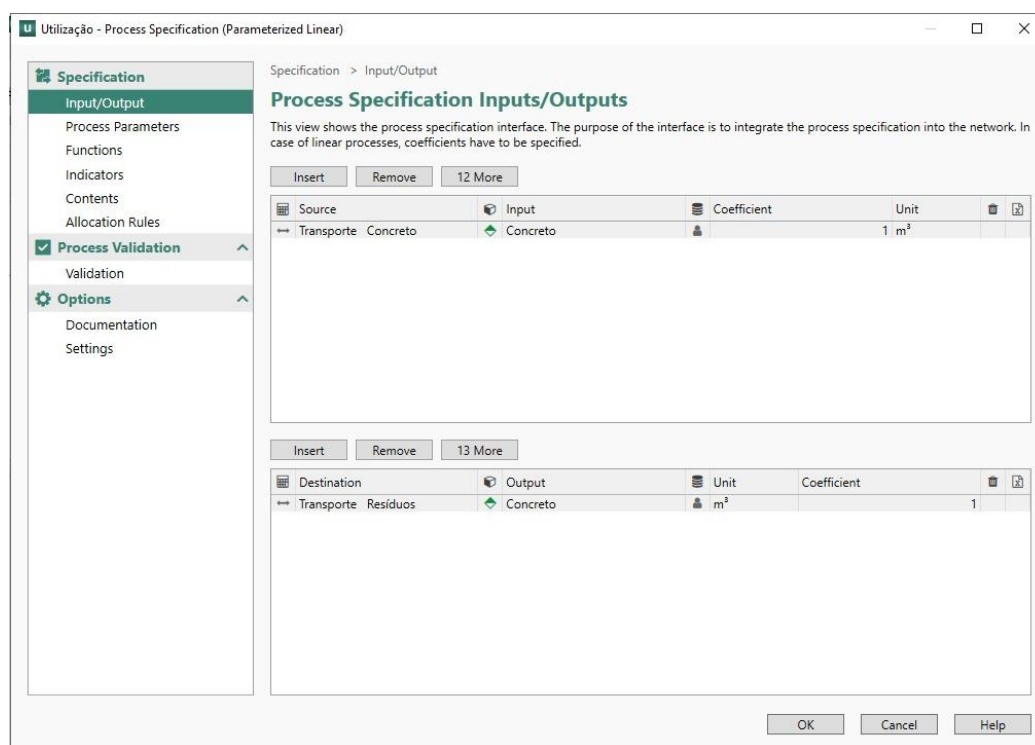
As Figuras 46 e 47 apresentam o processo de utilização no *software* Umberto.

**Figura 46** – Processo utilização



Fonte: Autor, 2025.

**Figura 47 – Insumos do processo utilização**



Fonte: Autor, 2025.

## 4.6 Transporte dos Resíduos

O processo de transporte dos resíduos teve como entradas o próprio concreto e o serviço de transporte, enquanto as saídas corresponderam ao material transportado e às emissões de dióxido de carbono. Não foram consideradas perdas durante o processo.

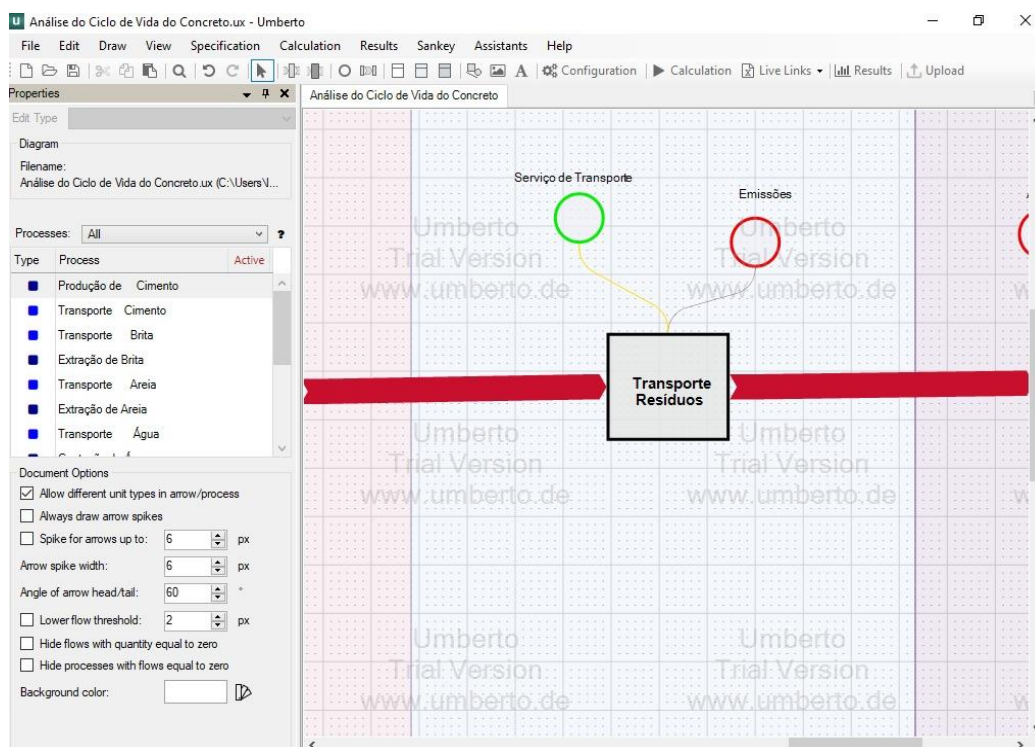
O cálculo das emissões referentes ao transporte dos resíduos seguiu metodologia semelhante à utilizada para o transporte de concreto. A principal diferença foi a adoção de caminhões basculantes, cujo consumo específico é de 0,0427 L/t.km, conforme mencionado anteriormente. Esse valor foi multiplicado por 3,088 kgCO<sub>2</sub>/L, resultando em 0,1319 kgCO<sub>2</sub>/t.km.

Dessa forma, considerando a massa transportada de 2,612 t, as emissões de CO<sub>2</sub> no transporte dos resíduos foram calculadas como aproximadamente 0,344 kgCO<sub>2</sub>. Não foram consideradas perdas no processo.

Por fim, adotou-se uma distância padrão de 100 km (DIST) o processo de transporte de resíduos modelado no *software*.

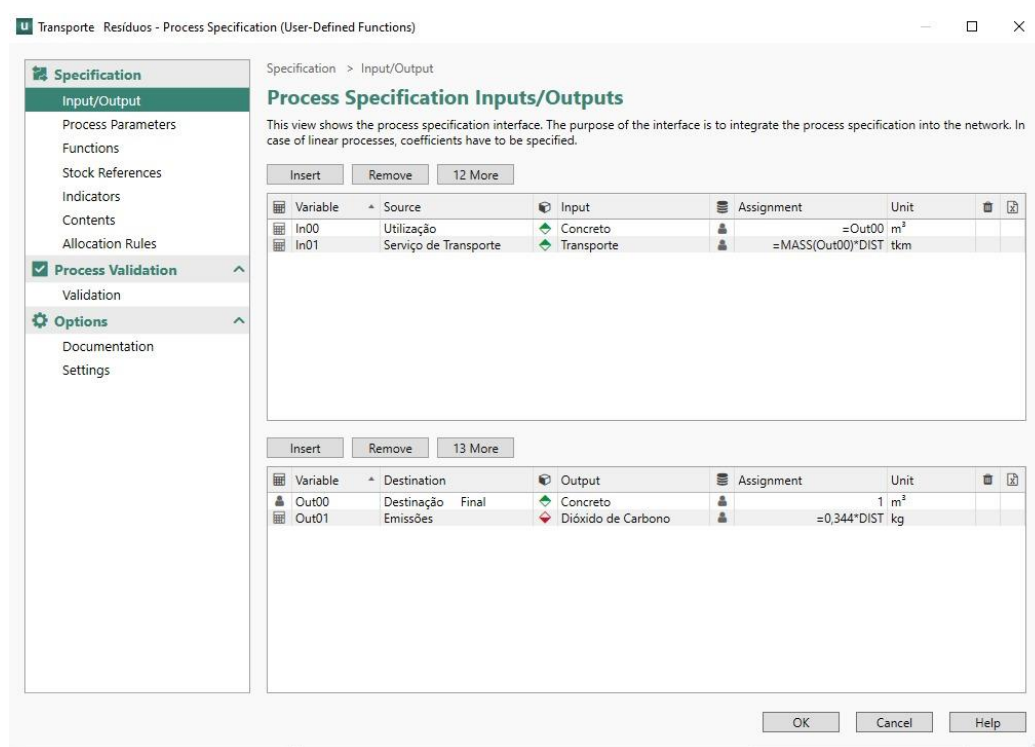
As Figuras 48 e 49 apresentam o processo de transporte dos resíduos no *software* Umberto

**Figura 48** – Processo transporte dos resíduos



Fonte: Autor, 2025.

**Figura 49** – Insumos do processo transporte dos resíduos



Fonte: Autor, 2025.

## 4.7 Disposição Final

O processo de disposição final teve como entradas o concreto, a eletricidade (energia elétrica) e a energia térmica, enquanto as saídas corresponderam à reutilização do material, ao descarte em aterro e às emissões de dióxido de carbono. Não foram consideradas perdas durante o processo.

O cálculo das emissões referentes à disposição final seguiu metodologia semelhante à utilizada para o transporte das matérias-primas. Foram utilizados como referência o relatório Trajetórias Tecnológicas mais Eficientes para a Descarbonização da Mobilidade (2024), que apresenta a intensidade de carbono do diesel de 87 gCO<sub>2</sub>/MJ, e o Anuário Estatístico do Governo (2019), que fornece a densidade do diesel de 0,84 t/m³ e o PCI de 10.100 kcal/kg. Considerando que 1 kcal equivale a 4,184 kJ, obteve-se o valor de 42,26 MJ/kg. Em seguida, a partir da conversão da densidade do diesel de 0,84 t/m³ para 0,84 kg/L, foi multiplicado pelo PCI de 42,26 MJ/kg, chegando-se a 35,50 MJ/L.

Foi considerada a máquina D2540, um britador de mandíbula a diesel, cujos dados operacionais foram obtidos na fonte Sandman: capacidade de processamento de 10–20 t/h, potência de 23 kW e consumo de 4 L/h de óleo diesel.

A Figura 50 apresentam a máquina D2540 que foi utilizada no processo.

**Figura 50** – Máquina D2540



Fonte: SandmanCrusher, 2025.

O cálculo do consumo de combustível foi realizado a partir da massa de concreto (2,612 t), dividida pela capacidade adotada de 10 t/h, resultando em 0,2612 h de operação. Multiplicando-se esse valor pelo consumo horário de 4 L/h, obteve-se 1,045 L de diesel. Em seguida, esse valor foi multiplicado pelo PCI do diesel (35,50 MJ/L), resultando em 37,10 MJ de energia térmica. Por fim, ao multiplicar esse valor pela intensidade de carbono (87 gCO<sub>2</sub>/MJ), obteve-se uma emissão aproximada de 3,228 kgCO<sub>2</sub>.

Para o cálculo do consumo de energia elétrica, multiplicou-se a potência da máquina (23 kW) pelo tempo de operação (0,2612 h), resultando em aproximadamente 6 kWh.

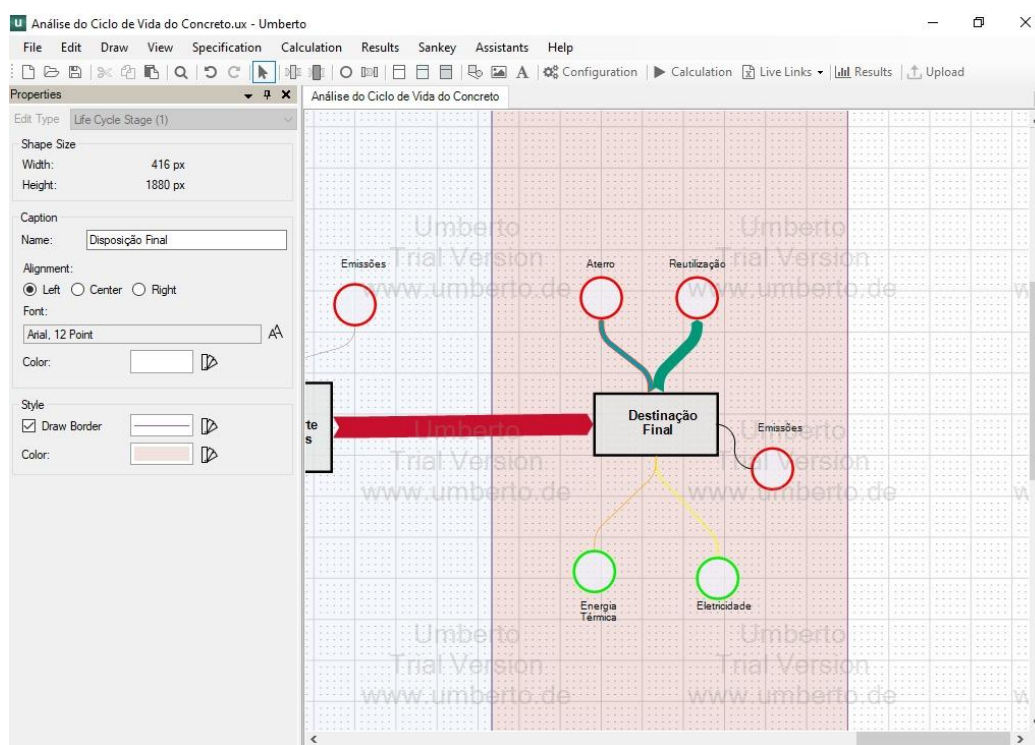
Considerando-se a reciclagem de 1 m<sup>3</sup> de concreto, utilizou-se como base a fonte R3Ciclo, “Tecnologia Reciclagem RCD: Inovações Transformando a Gestão de Resíduos da Construção Civil” (2025), que indica uma taxa média de

reaproveitamento de 60 a 70% dos resíduos de construção e demolição (RCD) pelos métodos tradicionais.

Adotando-se uma taxa de 70% de reaproveitamento e considerando a massa de 2.612,5 kg de concreto por metro cúbico, obteve-se 1.828,75 kg de material passível de reutilização e 783,75 kg destinados ao descarte em aterros.

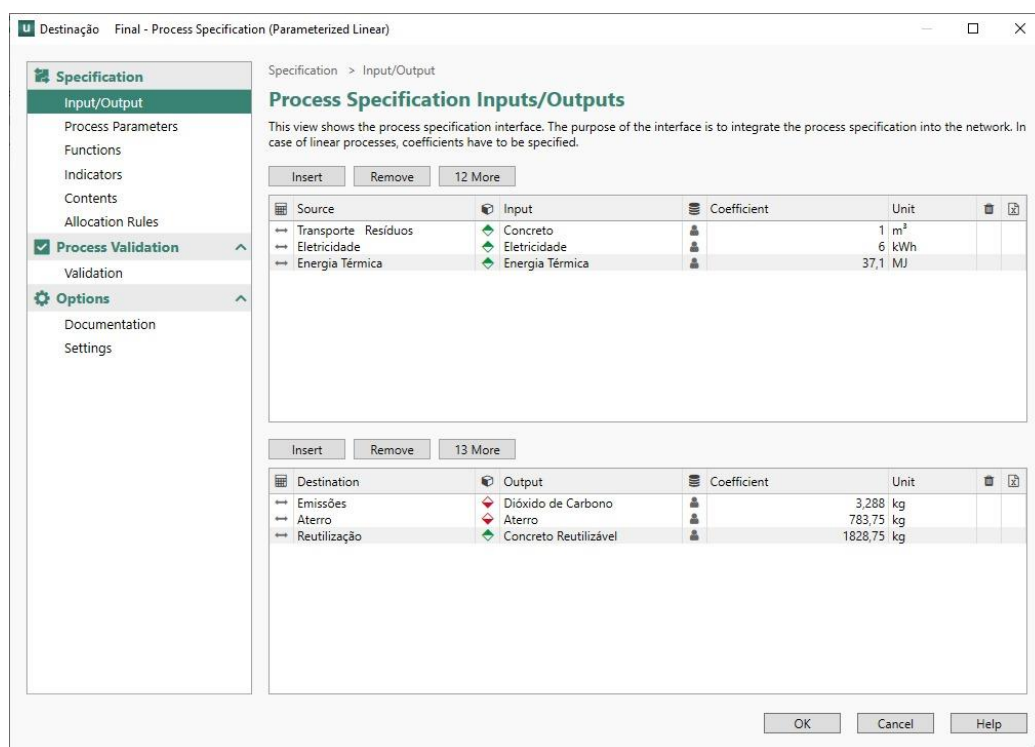
As Figuras 51 e 52 apresentam o processo de destinação final no *software* Umberto.

**Figura 51** – Processo destinação final



Fonte: Autor, 2025.

**Figura 52** – Insumos do processo destinação final



Fonte: Autor, 2025.

## 4.8 Resultados Finais

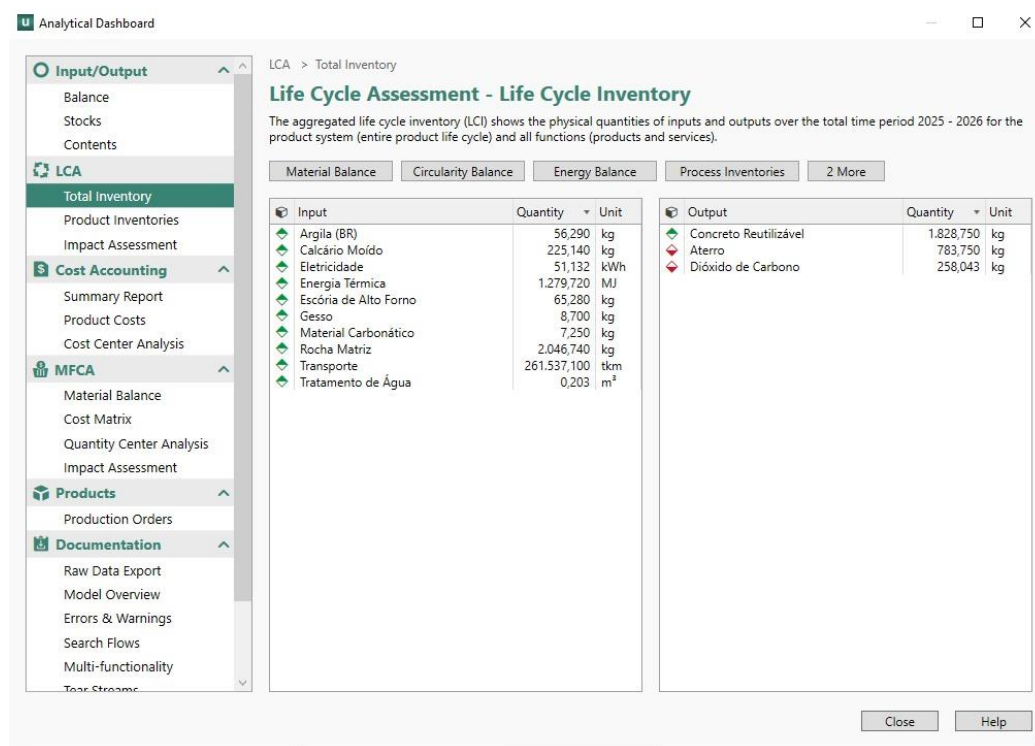
Ao final da execução do diagrama no *software* Umberto, foi possível realizar uma análise detalhada dos resultados obtidos por meio da aba *Results* (Resultados). Nessa etapa, o programa disponibiliza informações referentes ao Inventário Total do processo, que compreende todas as entradas e saídas de materiais, energia e emissões associadas às atividades modeladas. Além disso, a aba Avaliação de Impacto permite quantificar e visualizar os impactos ambientais gerados, neste caso, as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) em cada etapa do processo e no sistema como um todo. Essa análise possibilita compreender quais subprocessos apresentam maior contribuição para as emissões, servindo como base para a proposição de medidas de mitigação e melhoria de desempenho ambiental.

### 4.8.1 Inventário Total

O Inventário Total contempla todos os insumos empregados, o consumo energético, as distâncias percorridas e as respectivas emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), devidamente quantificados e calculados ao longo de todas as etapas modeladas no *software* Umberto. Esse inventário permite uma visão abrangente do desempenho ambiental do sistema, possibilitando a identificação das etapas mais impactantes em termos de consumo de recursos e emissões.

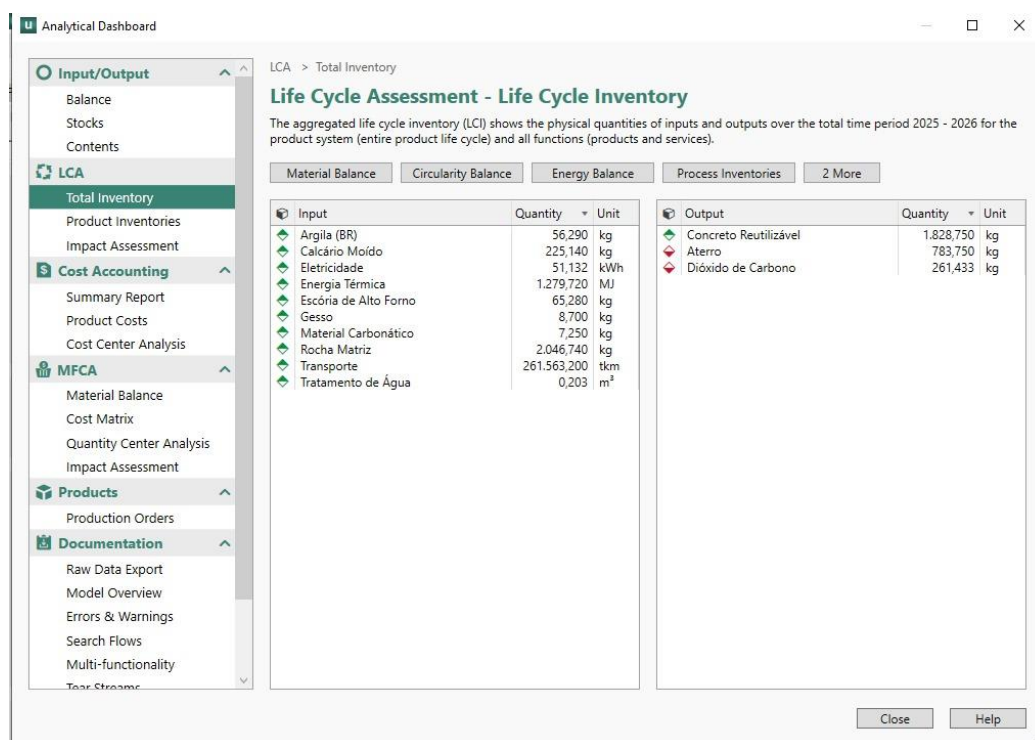
As Figuras 53 e 54 apresentam o Inventário Total dos processos obtidos no *software*, diferenciando-se pela variação da distância considerada no transporte do concreto até o local de aplicação, permitindo observar a influência desse parâmetro sobre o total de emissões de CO<sub>2</sub> geradas.

**Figura 53** – Inventário total (distância 10 km)



Fonte: Autor, 2025.

**Figura 54 – Inventário total (distância 20 km)**



Fonte: Autor, 2025.

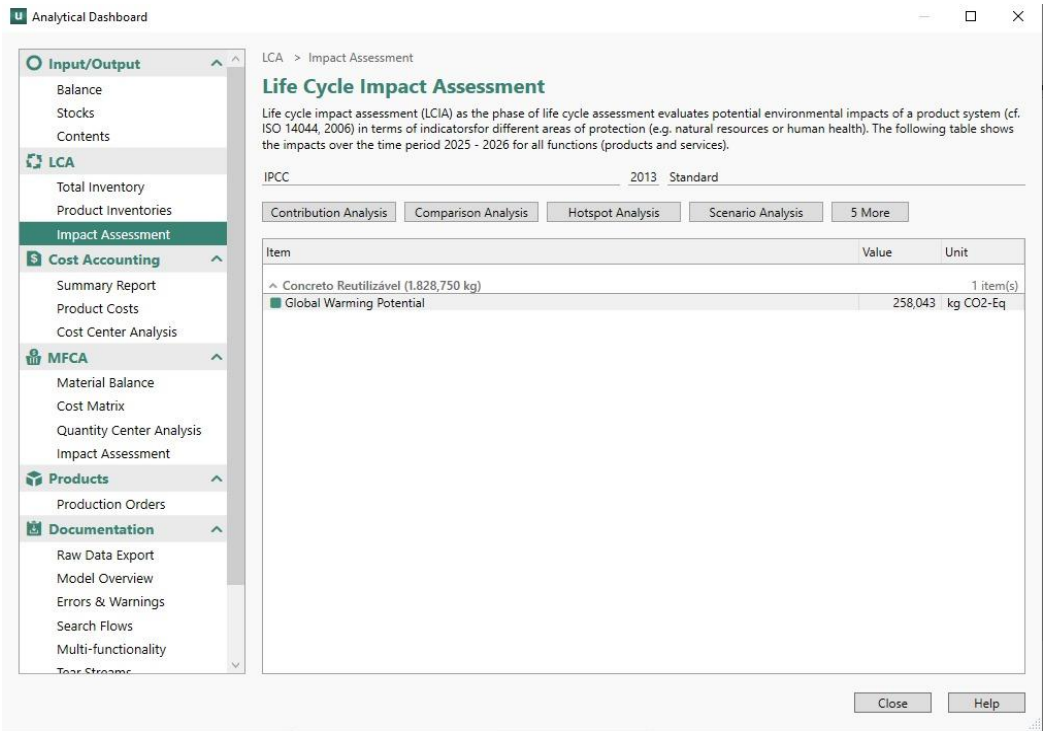
#### 4.8.2 Avaliação de Impacto

A aba Avaliação de Impacto do *software* Umberto apresenta todas as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) geradas, devidamente quantificadas e calculadas ao longo de todos os processos modelados. Essa funcionalidade permite a visualização dos resultados tanto de forma agregada, representando o total das emissões do sistema, quanto de maneira individualizada, evidenciando as contribuições específicas de cada processo.

Para que a exibição ocorra de forma detalhada por processo, é necessário ajustar a configuração de *Contribution Analysis* (Análise de Contribuição) para *Process Contributions* (Contribuição por Processos), o que possibilita identificar quais processos possuem maior impacto ambiental.

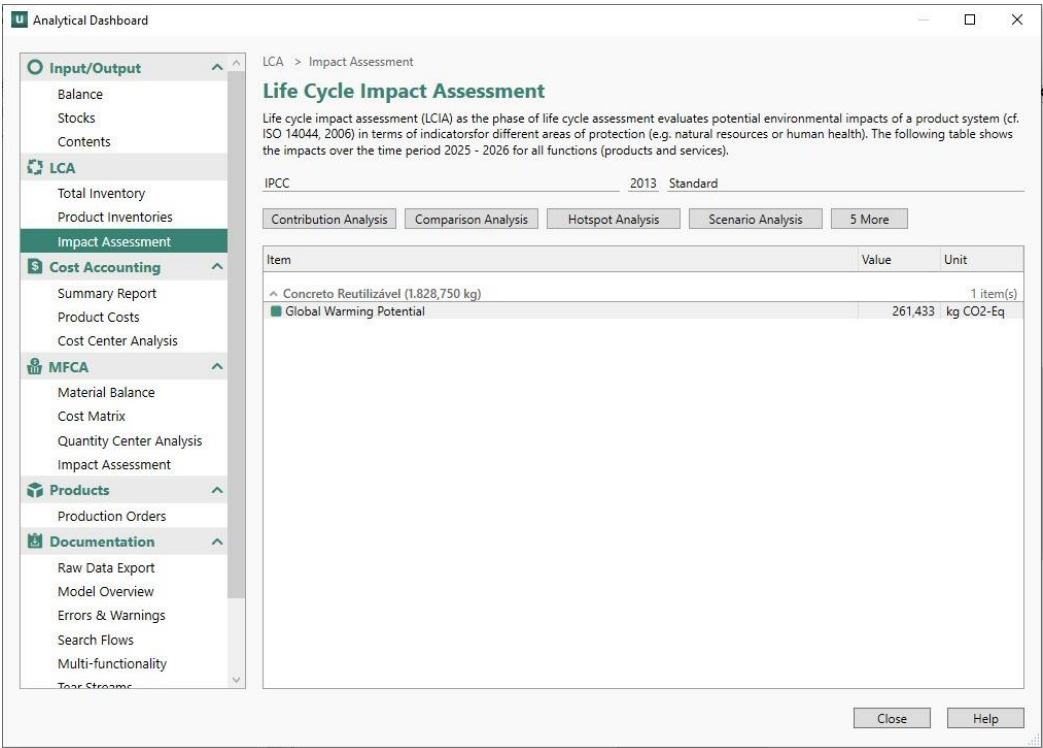
As Figuras 55 e 56 apresentam a aba Avaliação de Impacto com a opção Análise de Contribuição, diferenciando-se pela variação da distância considerada no transporte do concreto até o local de aplicação, permitindo observar a influência desse parâmetro sobre o total de emissões de CO<sub>2</sub> geradas.

Figura 55 – Avaliação de impacto – contribuição total (distância 10 km)



Fonte: Autor, 2025.

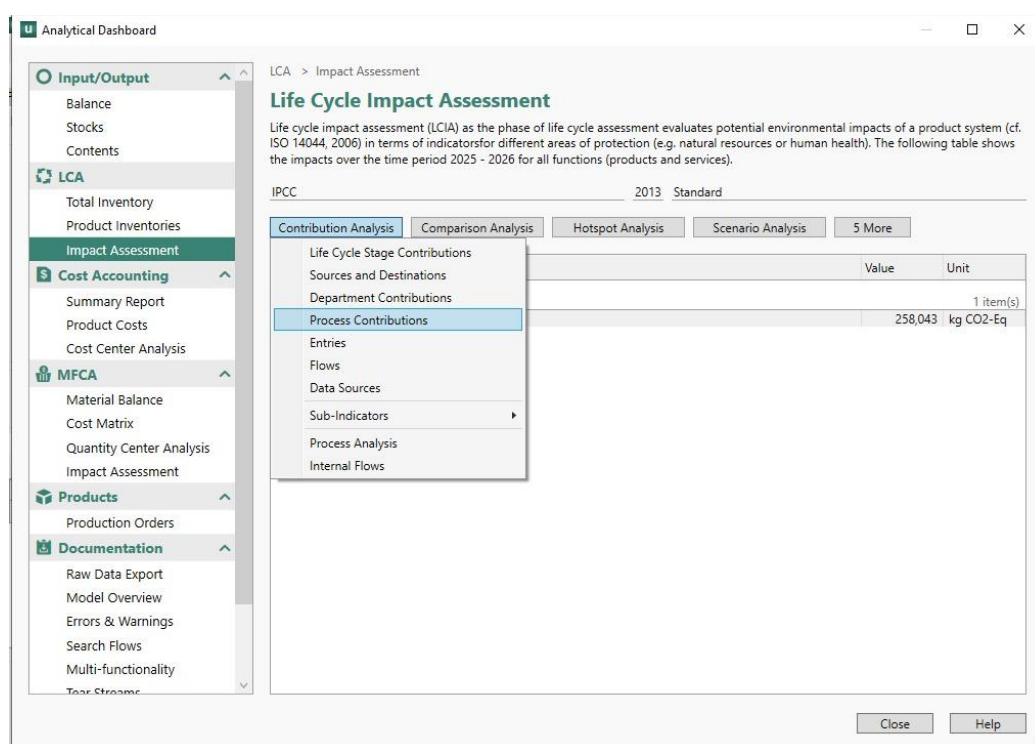
Figura 56 – Avaliação de impacto – contribuição total (distância 20 km)



Fonte: Autor, 2025.

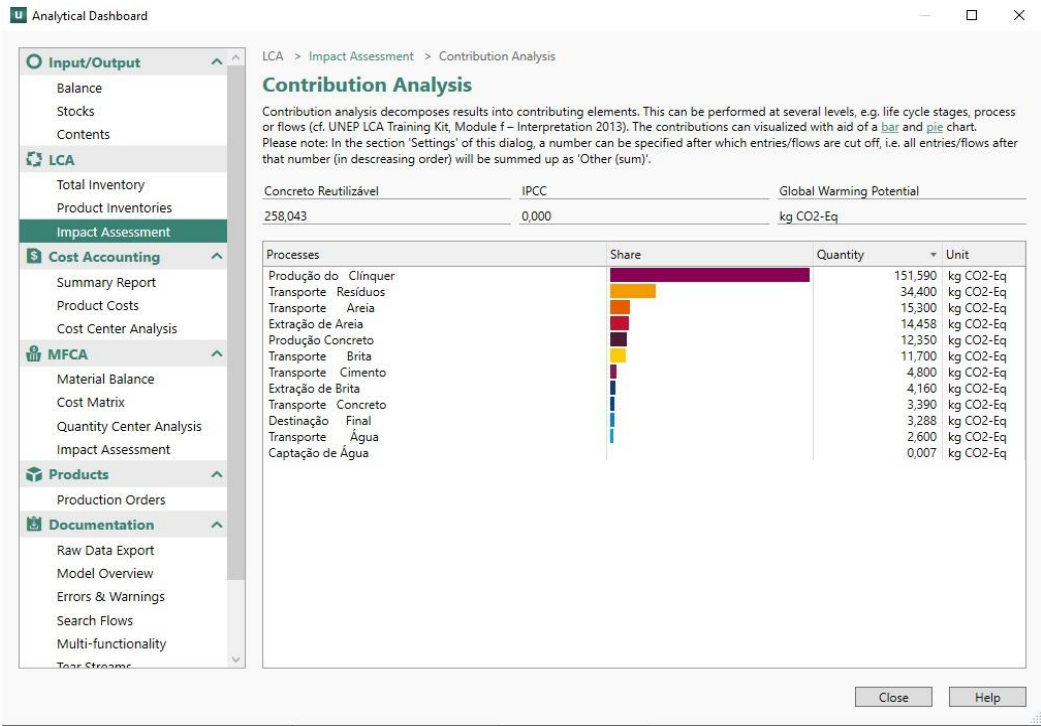
As Figuras 57, 58 e 59 apresentam a aba Avaliação de Impacto configurada na opção Contribuição por Processos, evidenciando a distribuição das emissões de CO<sub>2</sub> entre as diferentes etapas do sistema. As figuras se diferenciam pela variação da distância considerada no transporte do concreto até o local de utilização, permitindo observar a influência desse parâmetro sobre o total de emissões de CO<sub>2</sub> geradas.

**Figura 57** – Avaliação de impacto - contribuição por processos



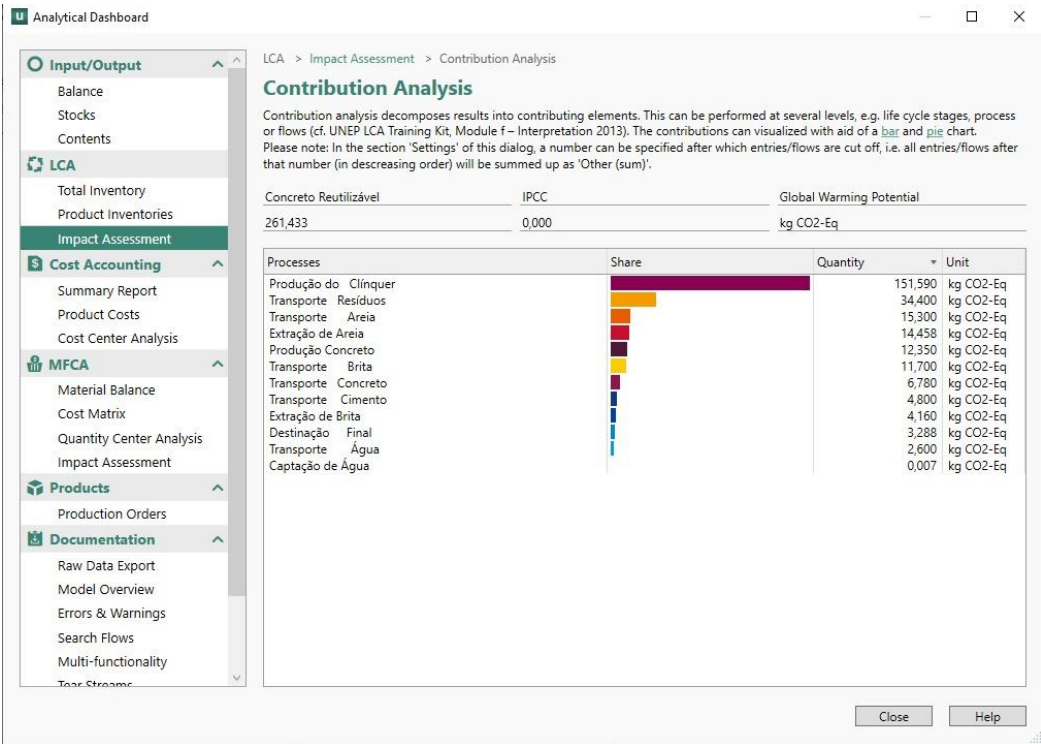
Fonte: Autor, 2025.

Figura 58 – Avaliação de impacto - contribuição por processos (distância 10 km)



Fonte: Autor, 2025.

Figura 59 – Avaliação de impacto - contribuição por processos (distância 20 km)



Fonte: Autor, 2025.

Verificou-se que o processo com maior emissão de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) foi a produção do clínquer, totalizando 151,59  $\text{kgCO}_2$ , em razão do seu elevado consumo energético e caráter altamente calorífico.

Considerando a variável de 10 km para o transporte do concreto, os processos subsequentes com maiores emissões foram: transporte de resíduos (34,40  $\text{kgCO}_2$ ), transporte de areia (15,30  $\text{kgCO}_2$ ), extração de areia (14,458  $\text{kgCO}_2$ ), produção de concreto (12,35  $\text{kgCO}_2$ ), transporte de brita (11,70  $\text{kgCO}_2$ ), transporte de cimento (4,80  $\text{kgCO}_2$ ), extração de brita (4,16  $\text{kgCO}_2$ ), transporte de concreto (3,39  $\text{kgCO}_2$ ), destinação final (3,288  $\text{kgCO}_2$ ), transporte de água (2,60  $\text{kgCO}_2$ ) e captação de água (0,007  $\text{kgCO}_2$ ).

Ao considerar a variável de 20 km para o transporte do concreto, observou-se um aumento proporcional nas emissões desse processo, que passaram a 6,78  $\text{kgCO}_2$ , enquanto os demais processos mantiveram os mesmos valores. Assim, as emissões totais do sistema corresponderam a 258,043  $\text{kgCO}_2$  para a distância de 10 km e 261,433  $\text{kgCO}_2$  para a distância de 20 km, evidenciando a influência direta da distância de transporte sobre o impacto ambiental global.

#### 4.9 Diagrama Final

O diagrama final no *software* Umberto representa todas as etapas da ACV do concreto, desde a produção do clínquer e do cimento, passando pela extração e transporte de brita, areia, cimento e água, até a produção, transporte e utilização do concreto, finalizando com o transporte de resíduos e a disposição final.

A Figura 60 apresenta o Diagrama Final da ACV do concreto no *software* Umberto. A mesma figura encontra-se como Apêndice A no presente trabalho, para visualização em maior definição.



**Tabela 2** – Emissões de CO<sub>2</sub> por processo no sistema (kg)

| PROCESSOS              | KgCo <sub>2</sub> |         |
|------------------------|-------------------|---------|
|                        | 10 km             | 20 km   |
| PRODUÇÃO DE CLÍNQUER   | 151,590           | 151,590 |
| EXTRAÇÃO DE BRITA      | 4,160             | 4,160   |
| EXTRAÇÃO DE AREIA      | 14,458            | 14,458  |
| CAPTAÇÃO DE ÁGUA       | 0,007             | 0,007   |
| TRANSPORTE DE CIMENTO  | 4,800             | 4,800   |
| TRANSPORTE DE BRITA    | 11,700            | 11,700  |
| TRANSPORTE DE AREIA    | 15,300            | 15,300  |
| TRANSPORTE DE ÁGUA     | 2,600             | 2,600   |
| PRODUÇÃO DE CONCRETO   | 12,350            | 12,350  |
| TRANSPORTE DE CONCRETO | 3,390             | 6,780   |
| TRANSPORTE DE RESÍDUOS | 34,400            | 34,400  |
| DESTINAÇÃO FINAL       | 3,288             | 3,288   |
| TOTAL                  | 258,043           | 261,433 |

Fonte: Autor, 2025.

**Tabela 3** – Emissões de CO<sub>2</sub> por processo no sistema (%)

| PROCESSOS              | KgCo <sub>2</sub> |         |
|------------------------|-------------------|---------|
|                        | 10 km             | 20 km   |
| PRODUÇÃO DE CLÍNQUER   | 58,746%           | 57,984% |
| EXTRAÇÃO DE BRITA      | 1,612%            | 1,591%  |
| EXTRAÇÃO DE AREIA      | 5,603%            | 5,530%  |
| CAPTAÇÃO DE ÁGUA       | 0,003%            | 0,003%  |
| TRANSPORTE DE CIMENTO  | 1,860%            | 1,836%  |
| TRANSPORTE DE BRITA    | 4,534%            | 4,475%  |
| TRANSPORTE DE AREIA    | 5,929%            | 5,852%  |
| TRANSPORTE DE ÁGUA     | 1,008%            | 0,995%  |
| PRODUÇÃO DE CONCRETO   | 4,786%            | 4,724%  |
| TRANSPORTE DE CONCRETO | 1,314%            | 2,593%  |
| TRANSPORTE DE RESÍDUOS | 13,331%           | 13,158% |
| DESTINAÇÃO FINAL       | 1,274%            | 1,258%  |
| TOTAL                  | 100%              | 100%    |

Fonte: Autor, 2025.

O processo que mais contribuiu para o impacto ambiental foi a produção de clínquer, responsável por aproximadamente 58,75% das emissões no cenário de 10 km e 57,98% no cenário de 20 km. Esse resultado originou-se da calcinação do calcário e ao consumo de energia térmica em fornos de alta temperatura.

Em seguida, destacou-se o transporte dos resíduos, responsável por aproximadamente 13,33% das emissões no cenário de 10 km e 13,16% no cenário de 20 km. Esse impacto esteve relacionado à longa distância adotada para o deslocamento (100 km) e ao consumo de combustível necessário para sua realização.

Outros processos de relevância intermediária incluíram o transporte de areia, com participação entre 5,93% e 5,85%, a extração de areia, variando de 5,60% a 5,53%, a produção de concreto, de 4,79% a 4,72%, e o transporte de brita, que apresentou valores entre 4,53% e 4,48%. Essas etapas, embora menos expressivas isoladamente, em conjunto representaram cerca de 20% das emissões totais, indicando que as operações de transporte e processamento de agregados também exerceram influência significativa sobre o desempenho ambiental do ciclo.

Além disso, foi possível analisar que o aumento da distância de transporte do concreto de 10 km para 20 km resultou em acréscimo de aproximadamente 1,3% nas emissões totais (de 258,043 kgCO<sub>2</sub> para 261,433 kgCO<sub>2</sub>). Esse aumento reforçou a importância de reduzir trajetos logísticos e otimizar rotas de transporte, sobretudo em regiões metropolitanas, em que a distância entre a central dosadora e o canteiro de obras poderia ser significativa.

#### **4.10.1 Medidas para Redução das Emissões de CO<sub>2</sub>**

Diversas estratégias têm sido adotadas para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> na cadeia produtiva do cimento e do concreto. Medidas como a otimização de rotas de transporte, o monitoramento por telemetria e a gestão de resíduos com base na economia circular são mais simples de implementar e geram resultados imediatos. Em contrapartida, a redução do fator clínquer se apresenta como um processo mais complexo, pois exige ajustes técnicos, disponibilidade de materiais substitutos e a garantia de qualidade do produto final, embora tenha grande potencial de mitigação a longo prazo.

A redução do fator clínquer consiste na substituição parcial do clínquer por materiais cimentícios alternativos, sem comprometer as propriedades mecânicas

e a durabilidade do cimento. Essa prática é considerada uma das principais estratégias para diminuir as emissões de CO<sub>2</sub> no setor cimenteiro, uma vez que o clínquer é o componente de maior intensidade energética e emissiva na produção de cimento. Como exemplo, a Votorantim Cimentos tem adotado essas iniciativas em suas operações, incorporando materiais substitutos e ajustando processos produtivos para tornar o ciclo de produção mais sustentável (Revista Mineração, 2025).

A redução das emissões de CO<sub>2</sub> no transporte de cargas está diretamente relacionada à adoção de práticas que tornem o uso de combustíveis e veículos mais eficientes. Segundo a Opentech (2024), algumas medidas podem gerar resultados significativos na diminuição do impacto ambiental das operações logísticas.

A otimização de rotas, consiste em planejar trajetos mais curtos e eficientes, evitando congestionamentos e deslocamentos desnecessários. Essa prática resulta em menor tempo de funcionamento do motor e menor consumo de combustível, o que impacta positivamente na pegada de carbono (Opentech, 2024).

O monitoramento em tempo real (telemetria) também é uma ferramenta importante, pois permite acompanhar o desempenho dos veículos e dos motoristas, identificando padrões de consumo elevados e oportunidades de melhoria. Essa abordagem possibilita ajustes imediatos e a correção de condutas ineficientes, promovendo uma operação mais sustentável (Opentech, 2024).

A gestão de resíduos, envolve práticas de redução, reutilização e reciclagem. É necessário buscar alternativas que minimizem a geração de resíduos e as emissões associadas ao seu descarte, promovendo uma cadeia logística mais limpa e circular (Coblico, 2024).

Por fim, destaca-se a importância de adotar métodos baseados na economia circular, que buscam otimizar o uso de recursos e diminuir a necessidade de extração de novas matérias-primas. Ao invés de explorar continuamente os recursos naturais, a proposta é investir em reciclagem, reaproveitamento de materiais, soluções duráveis e o uso de energias renováveis, prolongando o ciclo de vida dos produtos e reduzindo significativamente o impacto ambiental (IndustriaSantaLuiza, 2023).

## 5 CONCLUSÃO

O estudo teve como objetivo analisar o desempenho ambiental do ciclo produtivo do concreto, identificando os principais processos responsáveis pelas emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), a partir da modelagem no *software* Umberto.

A utilização da ferramenta permitiu estruturar e quantificar todas as entradas e saídas de materiais, consumo energético, transporte e emissões associadas às etapas envolvidas na produção, utilização e destinação final do concreto.

Os resultados obtidos demonstraram que a produção do clínquer é a etapa com maior impacto ambiental, apresentando emissões de 151,59 kgCO<sub>2</sub>, devido ao seu elevado consumo térmico e à liberação direta de CO<sub>2</sub> durante o processo de calcinação. As demais etapas, como o transporte de resíduos, transporte e extração de agregados e o transporte do concreto, também apresentaram contribuições significativas, especialmente quando considerada a variação da distância percorrida. Ao dobrar a distância do transporte do concreto de 10 km para 20 km, observou-se um aumento nas emissões totais do sistema, passando de 258,043 kgCO<sub>2</sub> para 261,433 kgCO<sub>2</sub>, evidenciando a influência direta da logística no impacto ambiental.

Os cálculos e as fontes de dados utilizados neste trabalho foram escolhidos e aplicados especificamente para o desenvolvimento deste estudo, a fim de garantir coerência metodológica e consistência nos resultados obtidos. Contudo, destaca-se que, caso outro pesquisador optasse por empregar valores ou referências diferentes, os resultados poderiam apresentar variações. Isso ocorreu porque o *software* utilizado foi parametrizado com base nas informações inseridas, possibilitando diferentes cenários de análise conforme as escolhas adotadas.

Diante disso, destacou-se a importância da adoção de estratégias sustentáveis que buscaram mitigar os impactos associados ao ciclo produtivo do concreto, como a otimização do transporte, a redução do fator clínquer, e práticas baseadas na economia circular, as quais tiveram como propósito otimizar o uso de recursos e reduzir a dependência de novos insumos extraídos da natureza. Essas medidas podiam contribuir para prolongar o ciclo de vida dos materiais, diminuir a demanda por recursos naturais e reduzir potencialmente as emissões de CO<sub>2</sub>, promovendo uma produção de concreto mais eficiente e ambientalmente responsável.

## REFERÊNCIAS

ABCP. **A versatilidade do cimento brasileiro**. São Paulo, 2025. “Disponível em: <https://abcp.org.br/cimento/tipos/>”. “Acesso em: 14 abril 2025”.

ACVBRASIL. **Desmistificando as Categorias de Impacto: Acidificação**. 2021. “Disponível em: <https://acvbrasil.com.br/artigo/desmistificando-acidificacao>”. “Acesso em: 11 maio 2025”.

ALMEIDA, R. G. **Estudos sobre análise do ciclo de vida e sua aplicação para concreto estrutural**. 2014. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – FATECS, UniCEUB, Brasília – DF, 2014, 139 p. “Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/187131150.pdf>”. “Acesso em: 14 abril 2025”.

APAMBIENTE. **Poluição do ar**. 2022. “Disponível em: <https://apambiente.pt/ar-e-ruído/poluicao-do-ar#:~:text=A%20poluição%20do%20ar%20é,química%20e%20os%20quantitativos%20emitidos.>”. “Acesso em: 11 maio 2025”.

ARMAC. **Agregados na construção civil: entenda o que são e a importância desses materiais!**. 2020. “Disponível em: <https://armac.com.br/blog/engenharia/agregados-na-construcao-civil/>”. “Acesso em: 14 abril 2025”.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7ª revisão. São Paulo, 2002, 28 p. “Disponível em: <https://solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2012/11/28-Guia-basico-de-utilizacao-do-cimento-portland.pdf>”. “Acesso em: 30 outubro 2025”.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040: Gestão Ambiental — Avaliação do Ciclo de Vida — Princípios e Estrutura**. Rio de Janeiro, 2025, 21 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14041 - Gestão Ambiental — Avaliação do Ciclo De Vida — Definição de Objetivo e Escopo e Análise De Inventário**. Rio de Janeiro, 2009, 25 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14042 - Gestão Ambiental — Avaliação do Ciclo De Vida — Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida**. Rio de Janeiro, 2009, 17 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14043 - Gestão Ambiental — Avaliação do Ciclo de Vida — Interpretação do Ciclo de Vida**. Rio de Janeiro, 2009, 19 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697 - Cimento Portland — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018, 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17054: Agregados — Determinação da Composição Granulométrica — Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 2022, 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211: Agregados para concreto — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2022, 10 p.

BELIZARIO-SILVA, F. et al. **Sistema de informação do desempenho ambiental da construção – metodologia**. 1ª edição. São Paulo: SIDAC, 2022, 74 p.  
 “Disponível em: [https://sidac.org.br/documentos/Sidac\\_Metodologia\\_v1.0.pdf](https://sidac.org.br/documentos/Sidac_Metodologia_v1.0.pdf)”.  
 “Acesso em: 30 outubro 2025”.

BLOGBRKAMBIENTAL. **Conheça as Etapas do Processo de Tratamento da Água**. 2019. “Disponível em: <https://blog.brkambiental.com.br/etapas-tratamento-de-agua/>”. “Acesso em: 26 maio 2025”.

BUENO, C.; ROSSIGNOLO, J. A. **A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) de Sistemas Construtivos**. 2016, v. 12, p. 339-389. “Disponível em: [https://editorascienza.com.br/pdfs/capitulo\\_12\\_livro\\_sustentabilidade.pdf](https://editorascienza.com.br/pdfs/capitulo_12_livro_sustentabilidade.pdf)”. “Acesso em: 11 maio 2025”.

CAIXA. **SNAPI relatórios mensais**. 2025. “Disponível em: [https://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria\\_888](https://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_888)”. “Acesso em: 30 outubro 2025”.

CAMPOS, F. H. A. **Análise do ciclo de vida na construção civil: um estudo comparativo entre vedações estruturais em painéis pré-moldados e alvenaria em blocos de concreto**. 2012. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - UFMG – Belo Horizonte, 2012, 122 p. “Disponível em: [https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/ISMS-8XVK6S/1/dm\\_\\_\\_felipe\\_2012\\_rev02.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/ISMS-8XVK6S/1/dm___felipe_2012_rev02.pdf)”. “Acesso em: 14 abril 2025”.

CARDOSO, E. **Umberto Software de Ecoeficiência**. 2022, 05 p. “Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/244225/Umberto.pdf?sequencia=1&isAllowed=y>”. “Acesso em: 11 maio 2025”.

CASARIN, R. **Combustíveis fósseis**. 2024. “Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/combustiveis-fosseis>”. “Acesso em: 11 maio 2025”.

CHOICETECH. **Gestão de Energia - Diagrama Sankey**. 2025. “Disponível em: <https://www.choicetech.com.br/solucoes-automacao-seguranca-industrial/gestao-de-energia-diagrama-sankey/>”. “Acesso em: 26 maio 2025”.

COBLICO. **Maneiras de realizar a redução de co2 na sua empresa**. 2024. “Disponível em <https://www.cobli.co/blog/reducao-co2>”. “Acesso em: 30 outubro 2025”.

COSTA R. D; JOHN. V. **Relatório de coleta de dados para o sistema de informação do desempenho ambiental da construção: concreto**. São Paulo:

SIDAC, 2022, 23 p. “Disponível em: [https://sidac.org.br/documentos/Sidac\\_Concreto.pdf](https://sidac.org.br/documentos/Sidac_Concreto.pdf)”. “Acesso em: 30 outubro 2025”.

COUTO, J. A. S.; CARMINATTI, R. L.; NUNES, R. R. A.; MOURA, R. C. A. **O concreto como material de construção**. 2013. Artigo Científico – Universidade Tiradentes – Sergipe, 2013, v. 1, n. 1, p. 49-58. “Disponível em: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjC0ZzTgdiMAxWiLrkGHRwKlVmqFnoECBAQAQ&url=https%3A%2F%2Fperiodicos.set.edu.br%2Fcadernoexatas%2Farticle%2Fdownload%2F552%2F566%2F3674&usq=AOvVaw3KrwFhK2Vldst\\_lj5PayOy&opi=89978449](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjC0ZzTgdiMAxWiLrkGHRwKlVmqFnoECBAQAQ&url=https%3A%2F%2Fperiodicos.set.edu.br%2Fcadernoexatas%2Farticle%2Fdownload%2F552%2F566%2F3674&usq=AOvVaw3KrwFhK2Vldst_lj5PayOy&opi=89978449)”. “Acesso em: 14 abril 2025”.

EDUCAMAISSBRASIL. **Destruição da Camada de Ozônio**. 2019. “Disponível em: <https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/geografia/destruicao-da-camada-de-ozonio>”. “Acesso em: 11 maio 2025”.

ENGEMIX. **O que é brita? Conheça suas características**. 2021. “Disponível em: <https://www.engemix.com.br/o-que-e-brita-conheca-suas-caracteristicas/>”. “Acesso em: 14 abril 2025”.

FEICON. **Sustentabilidade na construção civil: entenda a importância e como aplicar**. 2022. “<https://www.feicon.com.br/pt-br/blog/construtores---engenheiros---projetistas/sustentabilidade-na-construcao-civil--entenda-a-importancia-e-co.html>”. “Acesso em: 11 maio 2025”.

FRANCÊS, C. R. L. **Introdução às Redes de Petri**. 2003. Universidade Federal do Pará – UFPA. 2003, 19 p. “Disponível em: [https://www.dca.ufrn.br/~affonso/FTP/DCA409/redes\\_de\\_petri.pdf](https://www.dca.ufrn.br/~affonso/FTP/DCA409/redes_de_petri.pdf)”. “Acesso em: 11 maio 2025”.

GCV. **Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida**. São Paulo, 2023. “Disponível em: <https://gcv.org.br/>”. “Acesso em: 14 abril 2025”.

GOV. **Fatores de conversão, densidades e poderes caloríficos inferiores**. 2020. “Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2020/anuario-2020-fatores-conversao.pdf>”. “Acesso em: 30 outubro 2025”.

GOV. **Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de cimento**. 7ª revisão. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações Onu Meio Ambiente, 2017, 107 p. “Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/arquivos/opcoes-de-mitigacao-de-emissoes-de-gee-em-setores-chave/modelagem-setorial-de-opcoes-de-baixo-carbono-para-o-setor-de-cimento.pdf>”. “Acesso em: 30 outubro 2025”.

GUERREIRO, L. R.; CACHOLA, C. S.; PACCA, S. A. **Relatório de coleta de dados para o sistema de informação do desempenho ambiental da construção: energia e transporte**. São Paulo: SIDAC, 2022, 16 p. “Disponível em: [https://sidac.org.br/documentos/Sidac\\_Energia\\_e\\_transporte.pdf](https://sidac.org.br/documentos/Sidac_Energia_e_transporte.pdf)”. “Acesso em: 30 outubro 2025”.

GUITARRARA, P. **Aquecimento global**. S.D. “Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/geografia/aquecimento-global.htm>”. “Acesso em: 11 maio 2025”.

INDUSTRIASANTALUIZA. **O que é pegada de carbono e como reduzir o co2 na construção civil?**. 2023. “Disponível em <https://www.industriasantaluzia.com.br/blog/pegada-de-carbono>”. “Acesso em: 30 outubro 2025”.

IPOINT. **Advanced LCA Software for Expert-Level Life Cycle Assessments - Umberto**. 2025. “Disponível em: <https://www.ipoint-systems.com/software/umberto/>”. “Acesso em: 11 maio 2025”.

JÚNIOR, A. F. B; MORAIS, R. M.; EMERENCIANO, S. V.; PIMENTA, H. C. D. **Conceitos e aplicações de análise do ciclo de vida (ACV) no Brasil**. 2008. Revista Ibero Americana de Estratégia. Universidade Nove de Julho - São Paulo, 2008, v. 7, n. 1, 2008, p. 39-44. “Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/3312/331227111005.pdf>”. “Acesso em: 14 abril 2025”.

LEMES, A. S. **Apostila de eletricidade básica**. São Paulo: Ministério da Educação Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo Campus de Presidente Epitácio, s.d, 28 p. “Disponível em: <https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/4/47/ApostilaEB2.pdf>”. “Acesso em: 30 outubro 2025”.

LIFECYCLEINITIATIVE. **XI International Conference on Life Cycle Assessment in Latin America – CILCA 2025**. S.d. “Disponível em: [https://www.lifecycleinitiative-org.translate.google/event/xi-international-conference-on-life-cycle-assessment-in-latin-america-cilca-2025/?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=pt&\\_x\\_tr\\_hl=pt&\\_x\\_tr\\_pto=tc](https://www.lifecycleinitiative-org.translate.google/event/xi-international-conference-on-life-cycle-assessment-in-latin-america-cilca-2025/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt&_x_tr_pto=tc)”. “Acesso em: 14 abril 2025”.

LIMA, A. B. **O processo produtivo do cimento portland**. 2011. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Recursos Minerais) – UFMG – Belo Horizonte, 2011, 39 p. “Disponível em: [https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9C6HHC/1/monografia\\_processo\\_produtivo\\_cimento\\_portland.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9C6HHC/1/monografia_processo_produtivo_cimento_portland.pdf)”. “Acesso em: 14 abril 2025”.

LIMA M.; CÍCIERO R. **6 tipos de areia para construção e quando usar cada uma delas**. 2024. “Disponível em: <https://blog.obramax.com.br/construcao-civil/tipos-areia/>”. “Acesso em: 14 abril 2025”.

LIFECYCLEINITIATIVE. **XI International Conference on Life Cycle Assessment in Latin America – CILCA 2025**. S.d. “Disponível em: [https://www.lifecycleinitiative-org.translate.google/event/xi-international-conference-on-life-cycle-assessment-in-latin-america-cilca-2025/?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=pt&\\_x\\_tr\\_hl=pt&\\_x\\_tr\\_pto=tc](https://www.lifecycleinitiative-org.translate.google/event/xi-international-conference-on-life-cycle-assessment-in-latin-america-cilca-2025/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt&_x_tr_pto=tc)”. “Acesso em: 14 abril 2025”.

MAZALI, I. O. **Determinação da densidade de sólidos pelo método de Arquimedes**. São Paulo: LQES – Laboratório de Química do Estado Sólido – Instituto de Química - UNICAMP, s.d, 11 p. “Disponível em:

[https://lqes.iqm.unicamp.br/images/vivencia\\_lqes\\_meprotec\\_densidade\\_arquimedes.pdf](https://lqes.iqm.unicamp.br/images/vivencia_lqes_meprotec_densidade_arquimedes.pdf)". "Acesso em: 30 outubro 2025".

**MBCB. Trajetórias tecnológicas mais eficientes para a descarbonização da mobilidade.** Estudo Elaborado por LCA Consultores e Mtempo Capital, 2024, 172 p. "Disponível em: [https://mbcbrasil.com.br/wp-content/uploads/2024/04/2024\\_04\\_10\\_Relatorio\\_MBCBrasil\\_LCA\\_MTempo-3.pdf](https://mbcbrasil.com.br/wp-content/uploads/2024/04/2024_04_10_Relatorio_MBCBrasil_LCA_MTempo-3.pdf)". "Acesso em: 30 outubro 2025".

**MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: IBRACON, 2014, 751 p.

**OLIVEIRA, A. S. Análise ambiental da viabilidade de seleção de produtos da construção civil através da ACV e do software BEES 3.0.** 2007. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - UFRGS - Porto Alegre, 2007, 118 p. "Disponível em: [https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/13451/000640916.pdf?sequence="](https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/13451/000640916.pdf?sequence=)". "Acesso em: 14 abril 2025".

**OPENTECH. Redução de co2 no transporte: medidas para minimizar emissão na logística.** 2024. "Disponível em <https://opentechgr.com.br/blog/reducao-de-co2>". "Acesso em: 30 outubro 2025".

**OPERATION. Densidade dos materiais.** 2025. "Disponível em: <https://operation.com.br/densidade-dos-materiais>". "Acesso em: 30 outubro 2025".

**PESSOA, E. V. Gestão de resíduos de construção civil: alternativas adotadas para segregação, coleta e destinação de resíduos de construção de edificações com base em um estudo de casos.** Salvador: Universidade Federal da Bahia Escola Politécnica Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana, 2006, 117 p. "Disponível em: <https://ppec.ufba.br/files/cp008572.pdf>". "Acesso em: 30 outubro 2025".

**PLANEJAMENTO OBRAS. Cálculo de entulho de demolição para sucesso na obra.** 2025. "Disponível em <https://www.planejamentoobras.com.br/blog/calculo-de-entulho-de-demolicao-para-sucesso-na-obra>". "Acesso em: 30 outubro 2025".

**RAHMLEVITZ, L.; ALMEIDA, L. E. T.; MANTOVANINI, P. M. Cálculo das emissões de co2 no ciclo de vida das habitações populares – estudo de caso do conjunto habitacional jd. edith.** São Paulo, 2012, 154 p. "Disponível em: <https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/7a2ccddd-a79d-4c6c-80a9-a88c83bf3f95/Rahmlevitz.pdf>". "Acesso em: 30 outubro 2025".

**R3CICLO. Tecnologia reciclagem rcd: inovações transformando a gestão de resíduos da construção civil.** 2025. "Disponível em: <https://r3ciclo.com.br/tecnologia-reciclagem-rcd-inovacoes-transformando-a-gestao-de-residuos-da-construcao-civil>". "Acesso em: 30 outubro 2025".

REVISTAMINERAÇÃO. **Votorantim cimentos reduz emissões globais de co2.** 2024. “Disponível em <https://revistamineracao.com.br/2025/04/10/votorantim-cimentos-reduz-emissoes-globais-co2>”. “Acesso em: 30 outubro 2025”.

RODRIGUES, J. Z.; FERREIRA, R. L. **Sustentabilidade no ambiente construído.** 2019, v. 15, n. 8, p. 70-88 Caderno Meio Ambiente e Sustentabilidade – Uninter. “Disponível em: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiPseWI\\_dONAXeIZUCHTRSOiAQFnoECBcQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.cadernosuninter.com%2Findex.php%2FmeioAmbiente%2Farticle%2Fview%2F1249%2F1058&usg=AOvVaw337PWZ6KbCrOYJRntSuHdR&opi=89978449](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiPseWI_dONAXeIZUCHTRSOiAQFnoECBcQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.cadernosuninter.com%2Findex.php%2FmeioAmbiente%2Farticle%2Fview%2F1249%2F1058&usg=AOvVaw337PWZ6KbCrOYJRntSuHdR&opi=89978449)”. “Acesso em: 11 maio 2025”.

SANDMAN. **D2540 diesel stone crusher.** 2025. “Disponível em: <https://www.sandmancrusher.com/en/product/d2540-diesel-stone-crusher.html>”. “Acesso em: 30 outubro 2025”.

SANTOS, V. S. D; **Eutrofização.** “Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/biologia/eutrofizacao.htm#:~:text=A%20eutrofização%20inicia-se%20com,reduz%20a%20passagem%20de%20luz.>”. “Acesso em 11 maio 2025”.

SCABIN, D. **Dificuldades e Limitações da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).** 2013. “Disponível em: <https://andrebmariano.blogspot.com/2013/06/dificuldades-e-limitacoes-da-avaliacao.html>”. “Acesso em: 11 maio 2025”.

SCHERER, M. D.; MARIANO, A.B. **Habitat.** 2024. “Disponível em: <https://semil.sp.gov.br/educacaoambiental/prateleira-ambiental/habitat/>”. “Acesso em: 11 maio 2025”.

SCHMALFUSS, L. M.; TIMM, J.; PASSUELLO, A. C. B. **Relatório de coleta de dados para o sistema de informação do desempenho ambiental da construção: minerais.** São Paulo: SIDAC, 2022, 27 p. “Disponível em: [https://sidac.org.br/documentos/Sidac\\_Agregados\\_e\\_minerais.pdf](https://sidac.org.br/documentos/Sidac_Agregados_e_minerais.pdf)”. “Acesso em: 30 outubro 2025”.

SOUZA, C. D. R; SILVA, S. D.; SILVA, M. A. V; JUNIOR, I. C. L.; RODRIGUES, J. M. M.; ALMEIDA, M. L. R.; BARBOZA, A. P. **Inventário de emissões atmosféricas por veículos automotores do estado do rio de janeiro.** Rio de Janeiro: Laboratório de Transporte de Carga – LTC/PET/COPPE/UFRJ, 2011, 151 p. “Disponível em: [https://www.ltc.coppe.ufrj.br/src/uploads/2020/05/relatorio\\_inventario\\_2011.pdf](https://www.ltc.coppe.ufrj.br/src/uploads/2020/05/relatorio_inventario_2011.pdf)”. “Acesso em: 30 outubro 2025”.

SOUZA, L. A. D. **Nevoeiro fotoquímico.** “Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/quimica/nevoeiro-fotoquimico.htm>”. “Acesso em 11 maio 2025”.

TONON, D. C. S. **Avaliação do ciclo de vida (ACV) dos concretos compostos com agregados graúdos de construção e demolição em diferentes teores de**

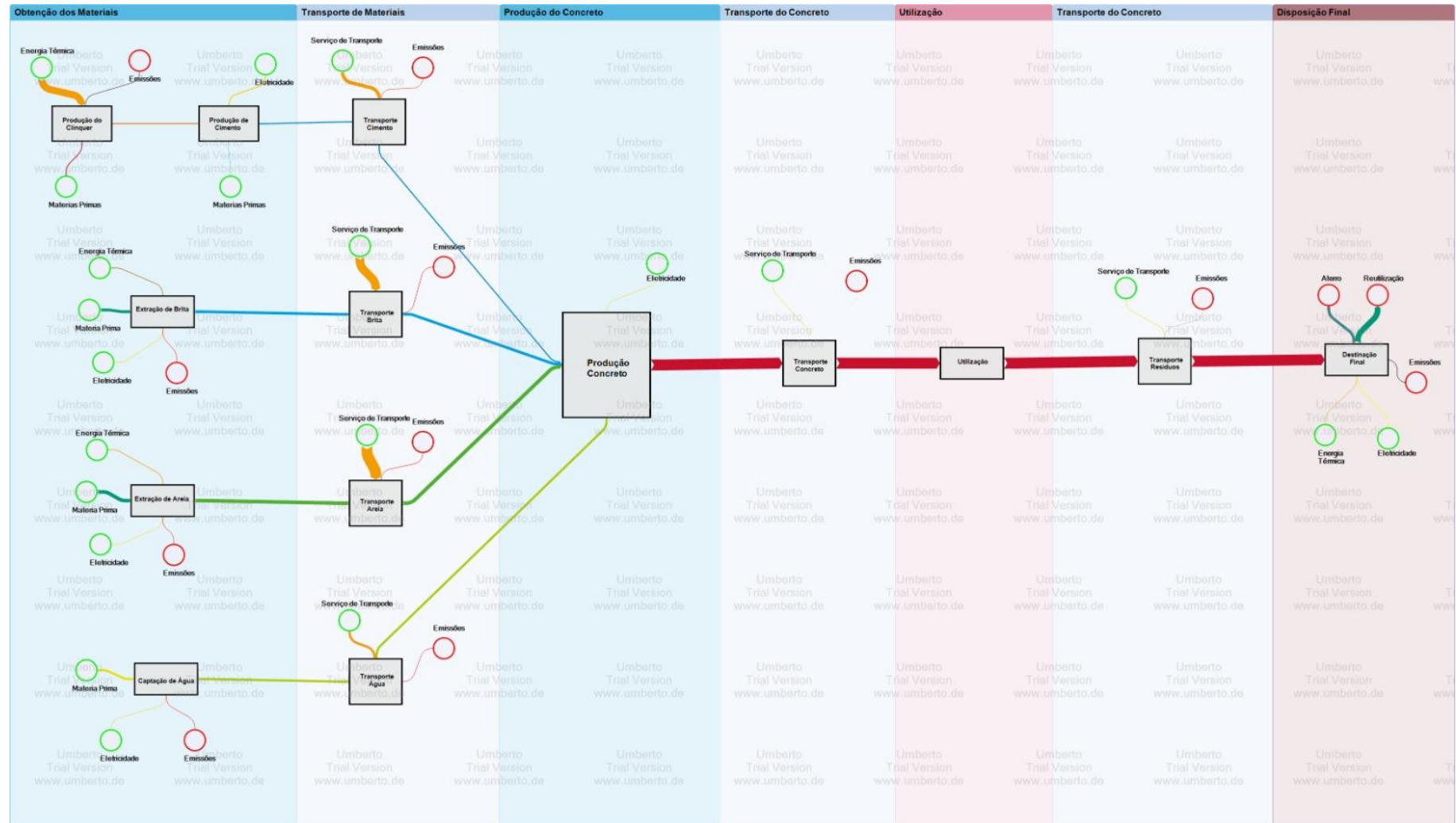
**substituição.** 2020, 92 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais) - PGETEMA - Porto Alegre, 2020. “Disponível em: <https://tede2.pucrs.br/tede2/bitstream/tede/9465/2/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Danielli%20Cecim%20da%20Silva%20Tonon%20-%20Mestrado.pdf>”. “Acesso em: 14 abril 2025”.

**TRATAMENTODEÁGUA. Consumo de energia elétrica nos sistemas de abastecimento de água.** 2019. “Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/consumo-energia-sistema-abastecimento>”. “Acesso em: 30 outubro 2025”.

**VASCONCELOS, D. S. O. T. Acompanhamento e análise das operações de carregamento e transporte na lavra de calcário da empresa SM minérios.** Ceará: Universidade Federal do Ceará Campus de Crateús - Curso de Engenharia de Minas, 2022, 79 p. “Disponível em: [https://repositorio.ufc.br/ri/bitstream/riufc/67840/1/2022\\_tcc\\_dsotvasconcelos.pdf](https://repositorio.ufc.br/ri/bitstream/riufc/67840/1/2022_tcc_dsotvasconcelos.pdf)”. “Acesso em: 30 outubro 2025”.

**WILLERS, C. D; RODRIGUES, L. B; SILVA, C. A. Avaliação do ciclo de vida no Brasil: uma investigação nas principais bases científicas nacionais.** 2013. Pesquisa Bibliográfica - UESB – Itapetininga, Bahia, 2013, v. 23, n. 2, p. 436-447. “Disponível em: <https://www.scielo.br/j/prod/a/drtHRpqTk9hJ3XSZhGD4CHx/?lang=pt&format=pdf>”. “Acesso em: 14 abril 2025”.

## APÊNDICE A



Fonte: Autor, 2025.