



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

ANDRÉ HENRIQUE CARVALHO DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA NA INDÚSTRIA DO CIMENTO: ANÁLISE
DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DO COPROCESSAMENTO DE MADEIRA**

RECIFE

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

ANDRÉ HENRIQUE CARVALHO DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA NA INDÚSTRIA DO CIMENTO: ANÁLISE DOS
IMPACTOS AMBIENTAIS DO COPROCESSAMENTO DE MADEIRA**

TCC apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Químico

Orientador(a): Felipe Pedro da Costa Gomes

RECIFE

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Silva, André Henrique Carvalho da.

Avaliação do ciclo de vida na indústria do cimento: análise dos impactos ambientais do coprocessamento de madeira / André Henrique Carvalho da Silva. - Recife, 2025.

44 : il., tab.

Orientador(a): Felipe Pedro da Costa Gomes

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Química - Bacharelado, 2025.

Inclui referências, apêndices, anexos.

1. Avaliação do ciclo de vida. 2. Coprocessamento. 3. Impactos ambientais. 4. Meio ambiente.. I. Gomes, Felipe Pedro da Costa. (Orientação). II. Título.

660 CDD (22.ed.)

ANDRÉ HENRIQUE CARVALHO DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA NA INDÚSTRIA DO CIMENTO: ANÁLISE DOS
IMPACTOS AMBIENTAIS DO COPROCESSAMENTO DE MADEIRA**

TCC apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Químico.

Aprovado em: 11/04/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Felipe Pedro da Costa Gomes (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Luciano Costa Almeida (Examinador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Ivo Diego de Lima Silva (Examinador)
Universidade Federal de Pernambuco

A minha bisavó Amara Alves da Silva

AGRADECIMENTOS

Em especial, agradeço a minha bisavó Amara Alves da Silva, ou Dona Amara, ou ainda Vó Mara como sempre a chamava, agradeço por todo amor oferecido de graça, sem ela com certeza não estaria aqui.

Agradeço às minhas Tias Fátima (Tia Fal), que me ensinou a pensar, e Evangeline (Tia Nem) que me ensinou a somar.

À Sra. Sandrely (Tia Nana), a minha vó Cleide, minha vó Tânia que foram como mães para mim me acolhendo como um filho desde meu nascimento.

A meu avô Antonio (ou vô Tonho), meu Tio Anderson, meu Tio Fabinho, Tio Marlon e Ednaldo que me deram a força que precisava em tantos momentos ao longo da vida.

A meus pais, Fabeli e André que com tantas dificuldades sempre acharam forças para me ajudar.

Ao meu irmão Ryann e aos primos Arthur, Gabriel, Jonas e Taciane por todos os momentos felizes que me proporcionaram.

Aos meus amigos e companheiros de jornada: Byanka Emilly (tantos momentos), Thais Pontes (florzinha), Nicholas, Bruna, Thiago, Gleybson, Josias, Marine, Alexandre, Marcos por tornarem a caminhada até aqui muito mais leve.

Ao meu orientador Felipe Pedro da Costa Gomes por ter acreditado na ideia do trabalho e por ter trazido toda a luz necessária para que ele.

A lista é extensa e com certeza vou esquecer de incluir muita gente, mas a todos que sob muito sol me fizeram chegar aqui pela sombra... Meu mais sincero muito obrigado!

RESUMO

A indústria cimenteira, responsável por elevadas emissões de CO₂, demanda urgentemente soluções sustentáveis. Este estudo avalia a substituição de combustíveis fósseis por biomassa de madeira na produção de cimento mediante a análise da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de cinco processos da base de dados da *Ecoinvent*: (1) "*Portland cement, at plant, production mix*" - contemplando toda a cadeia produtiva do cimento, incluindo geração de energia, matérias-primas e transportes; (2) "*Wood chips, hardwood, at plant*" - representando cavacos de madeira; (3) "*Hard coal mining (mixed), at plant*" - abrangendo a mineração de carvão (céu aberto e subterrânea); (4) "*Eucalyptus forestry, sustainable managed*" e (5) "*Eucalyptus forestry, non-sustainable managed*" - comparando diferentes sistemas de manejo florestal. Este trabalho investiga a viabilidade de substituir o carvão por cavacos de madeira na produção de cimento, a partir da análise comparativa dos poderes caloríficos e avaliação do ciclo de vida dos combustíveis. O estudo utiliza o software OpenLCA para quantificar e identificar os impactos ambientais associados, considerando as variáveis físico-químicas, logísticas e operacionais. A análise demonstrou que, para atingir a mesma demanda energética, é necessário utilizar aproximadamente 46,4% a mais de cavacos de madeira do que de carvão, evidenciando a sensibilidade dos biocombustíveis à umidade e à estocagem, mas que por outro lado oferecem níveis de emissão de poluentes ao meio ambiente muito inferiores do que o carvão. Conclui-se que a escolha do combustível deve contemplar não apenas os parâmetros termodinâmicos e econômicos, mas também os aspectos ambientais, de forma a promover uma solução mais sustentável para o setor cimenteiro.

Palavras-chave: avaliação do ciclo de vida; coprocessamento; impactos ambientais; meio ambiente.

ABSTRACT

The cement industry, a major contributor to CO₂ emissions, urgently requires sustainable solutions. This study evaluates the replacement of fossil fuels with wood biomass in cement production through a Life Cycle Assessment (LCA) of five processes from the Ecoinvent database: (1) *"Portland cement, at plant, production mix"* – covering the entire cement production chain, including energy generation, raw materials, and transportation; (2) *"Wood chips, hardwood, at plant"* – representing hardwood wood chips; (3) *"Hard coal mining (mixed), at plant"* – covering both open-pit and underground coal mining; (4) *"Eucalyptus forestry, sustainable managed"* and (5) *"Eucalyptus forestry, non-sustainable managed"* – comparing different forest management systems. This work investigates the feasibility of replacing coal with wood chips in cement production by analyzing the comparative calorific values and life cycle impacts of the fuels. The study uses OpenLCA software to quantify and identify the associated environmental impacts, taking into account physicochemical, logistical, and operational variables. The analysis showed that to meet the same energy demand, approximately 46.4% more wood chips are required compared to coal, highlighting the sensitivity of biofuels to moisture and storage. On the other hand, wood chips offer significantly lower pollutant emissions to the environment than coal. It is concluded that fuel selection should consider not only thermodynamic and economic parameters but also environmental aspects, in order to promote a more sustainable solution for the cement sector.

Keywords: life cycle assessment; coprocessing; environmental impacts; sustainability; cement industry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Consumo de cimento no Brasil (2009-2022) em milhões de toneladas.....	17
Figura 2 - Esquema Simplificado de Fabricação de Cimento Portland.....	18
Figura 3 – Calcário: Principal matéria prima do cimento.....	19
Figura 4 – Clínquer: O principal componente do cimento Portland atualmente.....	19
Figura 5 - Esquema simplificado de um moinho de bolas.....	20
Figura 6 - Esquema de Forno Rotativo de Clínquer.....	21
Figura 7 - Fluxo energético simplificado da produção de Cimento Portland.....	25
Figura 8 – Cavacos de madeira.....	26
Figura 9 - Propriedades de Cálculo no OpenLCA.....	28
Figura 10 - Povoamentos de <i>Pinnus. chiapensis</i> em Ventania, PR.....	29
Figura 11 - Estimativa do consumo energético relacionado ao carvão na produção de 150 mil toneladas de cimento comparado ao consumo residencial mensal de energia elétrica no Brasil.....	32
Figura 12 - Comparativo dos impactos sob recursos fósseis (a) e mudança climática (b).....	33
Figura 13 - Comparação percentual dos principais impactos da ACL dos cavacos de madeira em comparação com a mineração do carvão.....	34
Figura 14 - Impacto sob o indicador de mudança climática (KgCO ₂ eq).....	34
Figura 15 - Quantidade de veículos que equivalem a emissão de CO ₂ num mês para cada análise de ciclo de vida realizada.....	35
Figura 16 - O Brasil e suas plantações florestais.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Considerações do Trabalho.....	30
Tabela 2 - Tipos de recursos fósseis considerados na simulação no OpenLCA e seus respectivos impactos na produção de 150.000 toneladas de cimento.....	31
Tabela 3 – Equivalência mássica utilizada na simulação.....	32
Tabela 4 - Impactos ambientais da produção de cimento por categoria.....	40
Tabela 5 – Principais comparações da ACL do carvão e dos cavacos de madeira consolidados.....	41
Tabela 6 - Comparações da ACL dos diferentes tipos de manejo de eucalipto.....	42
Tabela 7 - Principais entradas do processo de mineração do carvão.....	43
Tabela 8 - Principais entradas do processo de cavacos de madeira.....	44

LISTA DE ABREVIACOES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AFR	Alternative Fuels and Raw materials
EF	EnvirolmentFootprint
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização da Nações Unidas
PEFCRG	Product Environmental Footprint Category Rules Guidelines

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Objetivos gerais.....	15
1.2 Objetivos específicos.....	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 História e Evolução da Produção de Cimento.....	17
2.2 Visão Geral da Produção de Cimento	18
2.3 Impactos Ambientais do Setor Cimenteiro	20
2.4 O coprocessamento na indústria de cimento	21
2.5 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	22
2.6 O Software OpenLCA.....	22
2.7 Execução das Análises de Ciclo de Vida	23
3 METODOLOGIA.....	25
3.1 Avaliação do Ciclo de Vida cadeia produtiva do Cimento Portland.....	25
3.2 Avaliação do Ciclo de Vida de cavacos de madeira (Wood Chips).....	25
3.3 Avaliação do Ciclo de Vida da mineração do carvão (Hard Coal)	26
3.4 Avaliação do Ciclo de Vida de uma plantação de eucalipto com um manejo sustentável e não sustentável	27
3.5 Propriedades e hipótese central do estudo no OpenLCA.	27
3.6 Considerações da Simulação	28
4 RESULTADOS	31
4.1 Resultados da Avaliação do Ciclo de Vida do Processo de Produção de Cimento Portland	31
4.2 Análises comparativas entre os impactos do carvão e do cavaco de madeira.....	32
4.3 Avaliação dos impactos ambientais do ciclo de vida da madeira	34
5. CONCLUSÃO.....	36
REFERÊNCIAS	37
ANEXO A – Figura 16 - O Brasil e suas plantações florestais.....	39

APÊNDICE A – Tabela 4 - Impactos ambientais da produção de cimento por categoria	40
APÊNDICE B – Tabela 5 – Principais comparações da ACL do carvão e dos cavacos de madeira consolidados	41
APÊNDICE C – Tabela 6 - Comparações da ACL dos diferentes tipos de manejo de eucalipto	42
APÊNDICE D – Tabela 7 - Principais entradas do processo de mineração do carvão	43
APÊNDICE E – Tabela 8 - Principais entradas do processo de cavacos de madeira	44

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Santos (2012), a discussão sobre o reaproveitamento de resíduos em novos materiais de construção tem sido intensa, e diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas com esse objetivo. No entanto, para que esses produtos possam ser considerados "sustentáveis" e um sistema de reciclagem seja efetivamente implantado, é fundamental compreender todos os aspectos envolvidos nessa ação, bem como os ganhos reais para o setor produtivo e, principalmente, para o meio ambiente.

Segundo Santos (2023), a produção de cimento tem inúmeros efeitos negativos no meio ambiente, incluindo a emissão de gases de efeito estufa, o consumo de recursos naturais, a poluição do ar e da água, perda de biodiversidade, entre outros.

Conforme amplamente divulgado no início do século pelo *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD, 2002), a fabricação de cimento é um processo que demanda alta quantidade de energia. O consumo de energia proveniente de combustíveis fósseis, como petróleo e carvão, gera dióxido de carbono (CO_2), o principal Gás de Efeito Estufa (GEE) responsável pelas mudanças climáticas. Em 1990, o CO_2 correspondia a aproximadamente 69% das emissões totais de gases de efeito estufa em termos de peso. Além disso, o processo químico de produção do clínquer também gera CO_2 . Esses dois fatores fazem com que a indústria do cimento seja responsável por 5% das emissões globais de CO_2 de origem humana, das quais 50% provêm do processo químico e 40% da queima de combustível, sendo o restante distribuído entre o consumo de eletricidade e ao transporte representando aproximadamente 5% das emissões de CO_2 cada um.

O clínquer é o material base para a fabricação de cimento, ele é quem possui os cristais responsáveis por fornecer resistência ao cimento quando o mesmo entra em contato com água. Para a obtenção do clínquer é necessário um mix de matérias-primas que passam pelo processo de moagem, homogeneização, descarbonatação, calcinação e resfriamento (Morais, 2021).

O processo de fabricação de cimento é, essencialmente, a calcinação e a fusão de um material constituído aproximadamente de 94% de calcário, 4% de argilas e 2% (p/p) de óxidos de ferro e alumínio em um forno rotativo operando em temperaturas de 1.450°C para os sólidos, em que a temperatura de chama oscila em torno de 2.000°C. Nesse forno é produzido o clínquer. Devido, principalmente, às altas temperaturas no forno rotativo de clínquer, o complexo

cimenteiro demanda o consumo de grandes volumes de combustíveis. Dessa forma, as cimenteiras são confrontadas com os dilemas da sustentabilidade, que vão desde a garantia de suprimentos de matéria-prima e de insumos energéticos até o cumprimento de normas e padrões. Os dilemas da sustentabilidade no setor cimenteiro são evidenciados principalmente pelo aspecto econômico, o custo do suprimento de combustível. Assim, entre 1960 e 1970, essa indústria foi dependente do petróleo cru; depois migrou em parte para o carvão mineral e em parte para o carvão vegetal (Rocha, 2011).

A avaliação do ciclo de vida (ACV) tem sido utilizada em todo o mundo para orientar ações de melhoria de desempenho e inovação em sistemas de produção, visando sua sustentabilidade ambiental (Coelho Filho, 2016). Dessa forma, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) configura-se como uma ferramenta que permite uma análise abrangente dos impactos de um processo, uma vez que possibilita a integração dos efeitos decorrentes dos diversos tipos de transporte, do consumo de energia elétrica e dos impactos diretos inerentes às operações unitárias da indústria cimenteira.

Na indústria, AFRs referem-se a *Alternative Fuels and Raw materials* (Combustíveis e Matérias-Primas Alternativos). Esses materiais são utilizados para substituir os combustíveis fósseis e as matérias-primas convencionais no processo de produção do clínquer e, conseqüentemente, do cimento. Conforme Böhm (2012) quantidades significativas de AFR são utilizadas atualmente no processo de produção de clínquer de cimento Portland. O uso desses materiais reduz o consumo de recursos naturais e as emissões de dióxido de carbono. Ou seja, a utilização de AFRs permite reduzir o consumo de recursos não renováveis, diminuir as emissões de gases de efeito estufa e agregar valor à resíduos que, de outra forma, seriam destinados a aterros, contribuindo para a sustentabilidade ambiental do setor.

A utilização de resíduos industriais como combustível complementar aos convencionais e aos resíduos de origem vegetal colocou a indústria cimenteira em uma condição inédita, pois em vez de pagar por seu suprimento de combustíveis, ela passou a faturar com a recepção de resíduos para coprocessamento. Além dos aspectos econômicos, o coprocessamento contribui para compensar os problemas da alteração ambiental decorrente de toda a cadeia produtiva (Rocha, 2011).

Conforme as diretrizes da ABNT NBR 10004:2024, a biomassa proveniente de resíduos de madeira desprovida de contaminantes externos é classificada como resíduo classe 2 (não perigoso). O Brasil apresenta uma das maiores áreas de plantio de árvores para diversos fins

(vide Anexo A) e, conseqüentemente, deve figurar entre os principais geradores de resíduos de madeira. Ressalta-se que esse resíduo possui elevado potencial energético para a geração de energia, recurso que pode ser desperdiçado se destinado a aterros sanitários. Dessa forma, evidencia-se a importância de valorizar esse tipo de resíduo no mercado, especialmente por meio da sua utilização como um AFR nos fornos de clínquer.

A realização deste trabalho justifica-se na lacuna identificada na literatura quanto à aplicação prática da ACV em indústrias brasileiras. O presente estudo propõe, além de ampliar o conhecimento científico existente sobre a ferramenta, estimular sua utilização em setores industriais do país, contribuindo para o desenvolvimento de uma economia mais sustentável. Ademais, o trabalho alinha-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas, especificamente aos seguintes itens: 8 – Trabalho decente e crescimento econômico; 9 – Indústria, inovação e infraestrutura; 11 – Cidades e comunidades sustentáveis; 12 – Consumo e produção responsáveis; e 13 – Ação contra a mudança do clima (ONU, 2015).

1.1 Objetivos gerais

O objetivo geral deste estudo é avaliar a aplicabilidade da análise do ciclo de vida de processos industriais, com ênfase na indústria cimenteira brasileira, visando à quantificação dos ganhos ecológicos decorrentes da substituição de recursos fósseis por biomassa no coprocessamento, e, conseqüentemente, fomentar a adoção de práticas sustentáveis na indústria brasileira alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU.

1.2 Objetivos específicos

- Investigar e identificar as lacunas existentes na literatura acerca do uso da ACV em indústrias brasileiras, com ênfase no setor cimenteiro.
- Desenvolver uma análise comparativa dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de combustíveis fósseis e a biomassa proveniente da madeira, considerando as variáveis técnico-operacionais e regionais.
- Quantificar, por meio de simulações realizadas, os ganhos ecológicos obtidos com a substituição do carvão por cavacos de madeira através do coprocessamento numa fábrica de cimento.
- Divulgar os resultados obtidos, contribuindo para a disseminação do uso de soluções baseadas em Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e promovendo a integração de dados

técnicos, econômicos e ambientais que apoiem o desenvolvimento de uma economia mais sustentável.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

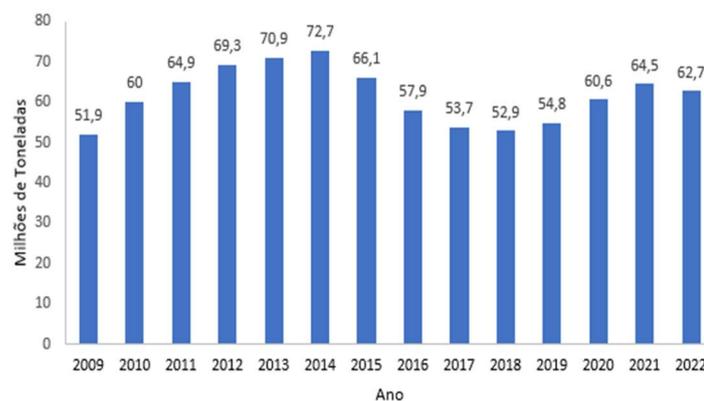
2.1 História e Evolução da Produção de Cimento

O desenvolvimento do cimento avançou significativamente em 1756, quando John Smeaton, um inglês, conseguiu um produto de alta resistência ao calcinar calcários moles e argilosos. Posteriormente, em 1818, o francês Vicat obteve resultados similares aos de Smeaton, ao misturar componentes argilosos e calcários, sendo reconhecido como o inventor do cimento artificial. Em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin combinou a queima de pedras calcárias e argila, transformando-as em um pó fino. Essa mistura, após secagem, tornou-se tão resistente quanto as pedras utilizadas nas construções, não se dissolvendo em água. Aspdin patenteou o produto no mesmo ano, denominando-o cimento Portland, devido à sua cor e propriedades que se assemelhavam às rochas da ilha britânica de Portland (Battagin, 2009).

Os primeiros registros de produção de cimento no Brasil datam do século XIX, no estado da Paraíba, dessa forma, a indústria de cimento surgiu no país quase que simultaneamente às indústrias têxtil e alimentícia, que eram as principais atividades manufatureiras da época. Porém o Brasil só veio a ter unidades de fabricação de cimento de fato no século XX e apesar do funcionamento de novas fábricas, o abastecimento do mercado interno dependeu das importações até a primeira metade da década de 1950 (Santos, 2011).

Nota-se que atualmente o consumo de cimento no mercado nacional varia bastante de acordo com a situação econômica do país como é possível constatar na Figura 1. Contudo, apresenta um valor alto em termos de produção anual que se mantem ao longo dos anos.

Figura 1 - Consumo de cimento no Brasil (2009-2022) em milhões de toneladas



Fonte: O autor, adaptado de Cimento.org (2023)

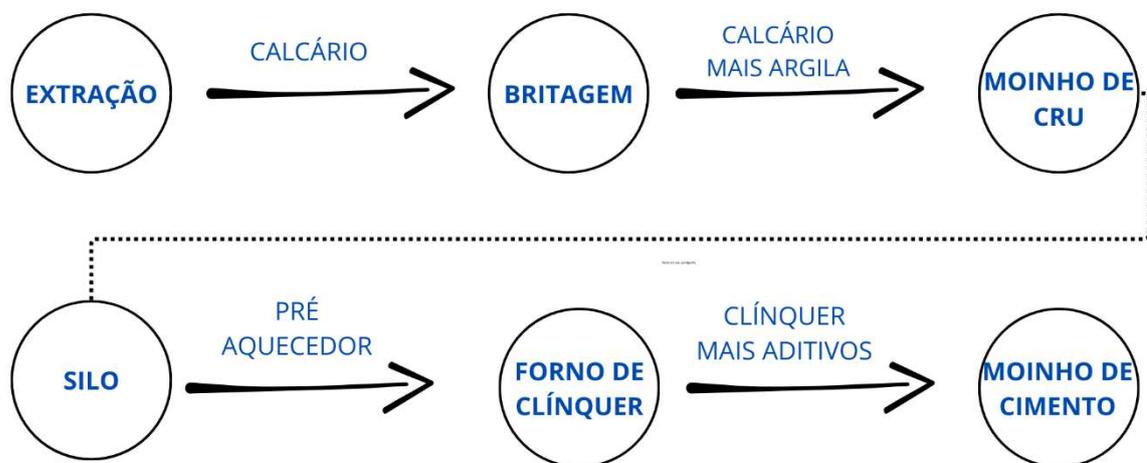
2.2 Visão Geral da Produção de Cimento

O processo de fabricação de cimento pode ser facilmente simplificado em algumas etapas muito bem definidas.

De acordo com Sellitto (2013) o cimento Portland é produzido pelo aquecimento a 1450°C de uma mistura de compostos a base de cálcio, originados da moagem de calcários e carbonatos diversos. O calcário é a principal matéria-prima do cimento, constituído basicamente por carbonato de cálcio (CaCO_3) e impurezas, tais como magnésio, silício, alumínio e ferro. Quando exposto à temperatura acima de 800°C, uma parte do CaCO_3 se decompõe em 0,56 partes de CaO e 0,44 de CO_2 . Como o CO_2 foge para o ambiente, há perda de matéria-prima no processo de fabricação, exigindo que a fábrica se localize próximo à jazida.

A partir da condensação elaborada por Pinho (2012), é possível enxergar o processo produtivo de uma forma bastante simples e com etapas muito bem definidas como visto na figura 2.

Figura 2 - Esquema Simplificado de Fabricação de Cimento Portland



Fonte: O Autor, adaptado de Pinho (2012)

Ainda conforme Sellitto (2013) descreve, o processo de fabricação de cimento é composto basicamente pelas seguintes etapas:

1. Extração de calcário em jazida natural, trituração e britagem do calcário;
2. Homogeneização de calcário para reduzir a variabilidade no teor de carbonato;
3. Moagem do calcário para reduzir a granulometria: com isto, o produto passa a chamar-se farinha conforme ilustrado na figura 3;

Figura 3 – Calcário: Principal matéria prima do cimento



Fonte: Santos, (2019)

4. Homogeneização da farinha em processo de mistura;
5. Queima da farinha em forno: com isto, o produto passa a chamar-se clínquer, um material de cor escura e com o formato semelhante a pequenas pedras vide a figura 4;

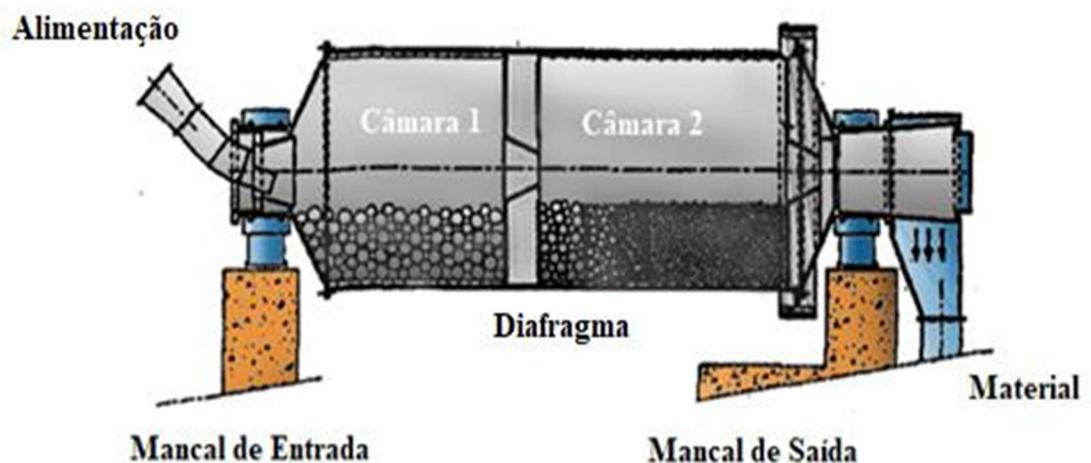
Figura 4 – Clínquer: O principal componente do cimento Portland atualmente



Fonte: Santos, (2019)

6. Estocagem de clínquer em hangar a céu aberto;
7. Moagem do clínquer em moinho de esferas, em conjunto com o gesso, calcário de baixo teor de carbonato e eventualmente enchimentos inorgânicos, tais como cinza de carvão e sílicas. Na figura 5 é possível observar o esquema da operação desse equipamento que é fundamental para a cominuição das matérias primas.

Figura 5 - Esquema simplificado de um moinho de bolas



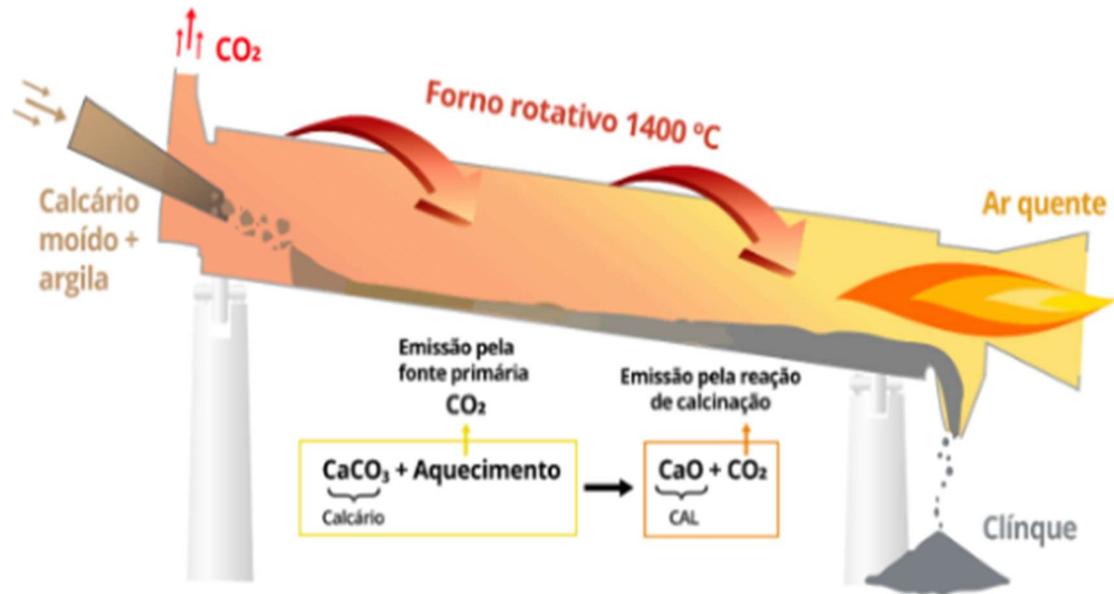
Fonte: Andreatta, (2020).

8. Ensaque do cimento produzido em embalagens de papel e carga no veículo do comprador.

2.3 Impactos Ambientais do Setor Cimenteiro

Na indústria do cimento, a emissão de CO₂ é um problema significativo, dividido em duas fontes principais: 60% das emissões resultam de reações químicas e 40% do aquecimento necessário para a produção de clínquer. Este último processo é intensivo em energia, envolvendo tanto a energia térmica, usada para aquecer os fornos rotativos, quanto a energia elétrica para operar máquinas e movimentar fornos e moinhos. O maior consumo de energia provém da queima de combustíveis, destacando a complexa relação entre a produção de cimento e o impacto ambiental devido às emissões de gases de efeito estufa (conforme ilustrado no esquema da figura 6) e ao uso intensivo de recursos energéticos (Souza 2024).

Figura 6 - Esquema de Forno Rotativo de Clínquer



Fonte: Souza, (2024).

Souza (2024) também ressalta que os fornos cimenteiros atualmente dependem de combustíveis não renováveis como petróleo e carvão. Entre os combustíveis mais comuns estão o coque de petróleo e a gasolina, além de gás natural e outros derivados do carvão mineral. O coque de petróleo é amplamente utilizado na indústria do cimento devido ao seu alto poder calorífico e custo relativamente baixo, sendo composto majoritariamente por carbono e contendo um teor significativo de enxofre.

2.4 O coprocessamento na indústria de cimento

O coprocessamento de resíduos industriais tem como objetivo reutilizar os materiais provenientes da produção de cimento como substitutos de parte da matéria-prima necessária para a produção de cimento. Essa reutilização e substituição pode ocorrer das seguintes formas: por meio da substituição de insumos que são incorporados no processo para a produção de cimento ou através da substituição de combustíveis tradicionais, como por exemplo, o coque de petróleo, atuando então como um combustível alternativo para a produção de cimento (CRUZ, 2023).

Com isso, nota-se que essa tecnologia vem sendo bem vista dado a série de impactos ambientais intrínsecos ao processo produtivo o coprocessamento se mostra como uma

alternativa para mitigar os danos. Estudos como os de Freitas (2014) demonstram diversos benefícios como a diminuição de emissão de SO₂ no processo.

2.5 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

De acordo com Santos, (2012) a necessidade de se contabilizar não somente o consumo de recursos e energia, mas também as emissões para o ar, água e solo, foram ganhando cada vez mais força no cenário mundial, tanto que a década de 80 foi marcada pelo início dos esforços para a realização de acordos internacionais, visando a redução do efeito estufa e a proteção à camada de ozônio. As análises ambientais passam então a incorporar e quantificar estes novos fatores em sua metodologia, passando a ser chamadas de “ecobalço” (*ecobalance*), ou ainda, “análise de berço ao túmulo” (*cradle to grave*).

Segundo o mesmo autor a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem se mostrado uma ferramenta de Gestão Ambiental muito versátil e eficiente, possível de ser aplicada em diferentes produtos e serviços e com resultados cada vez mais comprovados. Em suma, a revisão da literatura destaca que o coprocessamento e a ACV são abordagens que promovem soluções sustentáveis para o setor de cimento. Este estudo busca contribuir para essa discussão ao explorar as diferenças um cenário de destinação de resíduos de madeira e seu impacto na produção de cimento no contexto brasileiro.

2.6 O Software OpenLCA

O OpenLCA foi escolhido como ferramenta central para a modelagem e análise do ciclo de vida (ACV) dos processos avaliados, em consonância com os objetivos e o método adotados neste estudo. O software foi escolhido por sua capacidade de integrar dados técnicos, econômicos e ambientais, permitindo uma análise detalhada dos impactos associados aos combustíveis empregados na indústria cimenteira.

Nesse contexto, o OpenLCA se destaca como uma plataforma de código aberto para modelagem e análise de ACV, oferecendo uma solução acessível e adaptável para profissionais e pesquisadores. Embora amplamente utilizado em países desenvolvidos, seu uso ainda é limitado no Brasil, especialmente em aplicações industriais que demandam integração com dados locais e especificidades regionais.

Como hipótese central, considera-se que o uso do OpenLCA, é capaz de oferecer resultados mais representativos e adaptados à realidade nacional, contribuindo para a tomada

de decisões mais informadas em projetos industriais em países desenvolvidos, seu uso ainda é limitado no Brasil, especialmente em aplicações industriais que demandam integração com dados locais e especificidades regionais.

Foi utilizada a versão 2.3.1 do OpenLCA selecionada por sua compatibilidade com bancos de dados internacionais funcionalidades avançadas de análise de sensibilidade. O banco de dados utilizado foi como o *Ecoinvent*.

2.7 Execução das Análises de Ciclo de Vida

Segundo a ABNT NBR ISO 14040:2009 (ABNT, 2009), a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) configura-se como uma ferramenta metodológica imprescindível para analisar os impactos ambientais de um produto ou serviço, considerando todas as etapas do seu ciclo – desde a extração das matérias-primas até o descarte final. Essa norma estabelece um arcabouço teórico fundamentado em diretrizes internacionais, especialmente nas normas ISO 14040 e ISO 14044, adaptadas ao contexto brasileiro, o que confere robustez ao procedimento de análise.

A norma define as seguintes fases para a realização de um estudo de ACV: inicialmente, a definição do objetivo e do escopo, etapa que delimita os limites do sistema e estabelece as hipóteses a serem consideradas; posteriormente, a análise do inventário, onde são identificados e quantificados os fluxos de entrada (por exemplo, matérias-primas e energia) e de saída (tais como emissões e resíduos) do sistema; a terceira fase consiste na avaliação dos impactos ambientais, que converte os fluxos identificados em indicadores que possibilitam a comparação dos efeitos ambientais entre diferentes produtos ou processos; e, finalmente, a etapa de interpretação, que consolida os resultados, evidencia os pontos críticos e aponta oportunidades para melhorias ambientais.

A aplicação dessa norma, além de facilitar a compreensão dos impactos ambientais de produtos e serviços, fundamenta a tomada de decisões estratégicas orientadas para a sustentabilidade. Ao adotar uma abordagem sistêmica, a ACV possibilita a identificação de pontos de alavancagem ao longo do ciclo de vida, permitindo intervenções que minimizem os efeitos adversos sobre o meio ambiente. Dessa forma, a ABNT NBR ISO 14040:2009 revela-se como um instrumento indispensável para o desenvolvimento de tecnologias e processos que promovam um equilíbrio entre o avanço econômico e a preservação ambiental.

Em síntese, a norma não apenas orienta a execução de estudos de ACV com rigor metodológico, mas também contribui de maneira significativa para a promoção de práticas sustentáveis, beneficiando pesquisadores e profissionais na busca por um equilíbrio entre o desenvolvimento econômico e a conservação do meio ambiente.

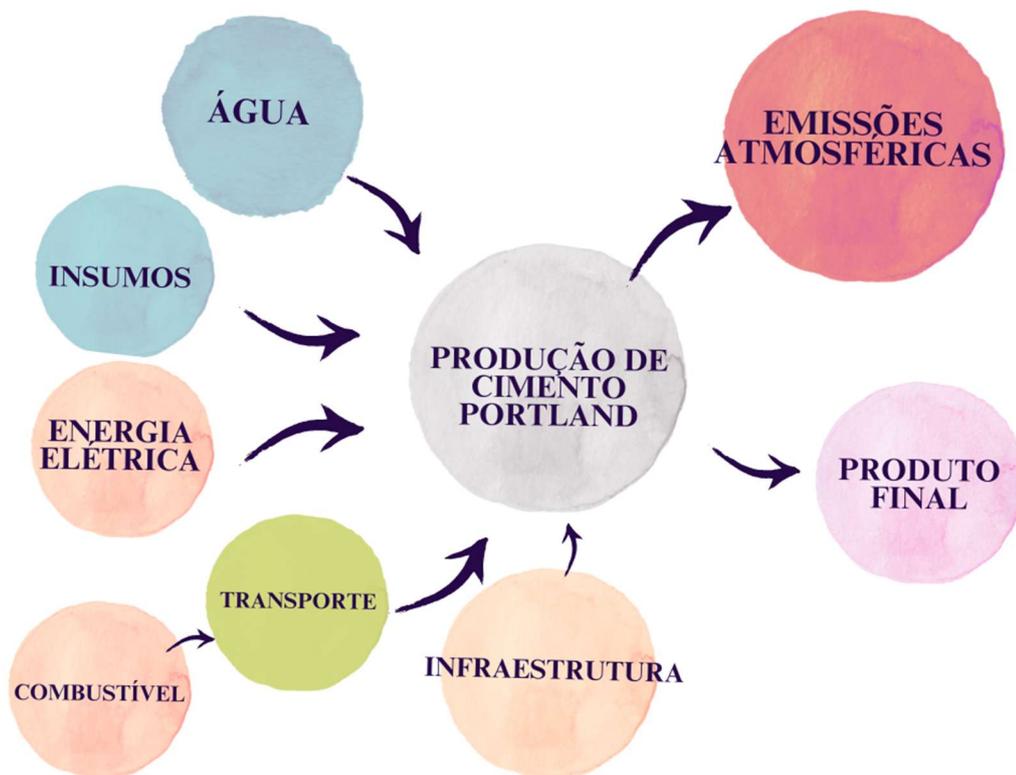
3 METODOLOGIA

Foram definidas como foco da pesquisa cinco processos da base de dados da Ecoinvent que se relacionam de alguma forma com a indústria do cimento.

3.1 Avaliação do Ciclo de Vida cadeia produtiva do Cimento Portland

O processo utilizado foi o *Portland cement, at plant, production mix, per kg portland cement*. Esse processo inclui atividades de geração de eletricidade e calor, matéria-prima, infraestrutura, transportes, produtos auxiliares e emissões (figura 7).

Figura 7 - Fluxo energético simplificado da produção de Cimento Portland



Fonte: O autor (2025)

3.2 Avaliação do Ciclo de Vida de cavacos de madeira (Wood Chips)

O processo utilizado foi o *Wood chips, hardwood, at plant, production mix, per kg wood*. Tal bloco no OpenLCA considera na produção de cavacos de madeira a partir de espécies mistas, inclui madeira de silvicultura, além de considerar o conteúdo de água igual a 0,5 (adimensional) com uma densidade úmida de 1025 kg/m³ e o conteúdo de carbono biogênico 0,494 (adimensional). Os cavacos são resíduos de madeira já processada ou sobras de outros processos que são comumente picados e comercializados vide a figura 8.

Figura 8 – Cavacos de madeira



Fonte: SETA, (2025)

3.3 Avaliação do Ciclo de Vida da mineração do carvão (Hard Coal)

O processo utilizado foi o *Hard coal mining (mixed), production mix, at plant, technology mix, 27 MJ/kg net calorific value*. O conjunto de dados em questão abrange uma combinação de processos de mineração a céu aberto e subterrânea, bem como aspectos relacionados ao transporte dos materiais extraídos.

Na mineração a céu aberto, o carvão é extraído por meio de detonações e com o auxílio de equipamentos de grande porte, como escavadeiras de pá, carregadeiras de rodas e draglines. Inicialmente, procede-se à remoção da camada de cobertura para possibilitar o acesso ao carvão. Em seguida, é comum o uso de transportadores de correia para o deslocamento do material extraído até as áreas de processamento ou estocagem.

A mineração subterrânea envolve atividades fundamentais, entre as quais se destacam o corte, a perfuração, a detonação, o carregamento e o transporte do carvão. Complementarmente, são executadas operações de suporte, como a ventilação, a drenagem, o fornecimento de energia, a manutenção das comunicações e a iluminação das áreas de trabalho.

Para que o carvão atenda aos critérios de qualidade, é necessário que ele apresente dimensões apropriadas e esteja livre de impurezas minerais. O processo de preparação envolve

diversas etapas, a saber: homogeneização, fragmentação, britagem, peneiramento, limpeza, desaguamento e mistura, visando a obtenção de um produto com características padronizadas.

No tocante ao transporte, são considerados todos os processos relevantes e amplamente reconhecidos, abrangendo o transporte marítimo (tanto oceânico quanto fluvial), o ferroviário, o rodoviário e o realizado por dutos, principalmente para o deslocamento de commodities a granel. Os vetores energéticos são modelados conforme a situação específica de suprimento (vide eletricidade).

3.4 Avaliação do Ciclo de Vida de uma plantação de eucalipto com um manejo sustentável e não sustentável

Os processos utilizados para essas ACL foram: *Eucalyptus forestry, at plantation, non-sustainable managed, per kg wood - EU-28+3* e *Eucalyptus forestry, at plantation, sustainable managed, per kg wood - EU-28+3*.

Todos os dados de energia e transporte, tanto do sistema em primeiro plano quanto do sistema em segundo plano, foram extraídos da base de dados do *EnvironmentFootprint*. Outras atividades foram obtidas da base de dados *Ecoinvent*. O conjunto de dados referente à abordagem não-sustentável foi derivado daquele sustentável, considerando-se o dobro da ocupação do solo e a emissão de 190 kg de CO₂ por m³ de madeira, em decorrência da transformação do uso do solo, conforme os resultados do PEFCR da madeira.

Essa abordagem metodológica evidencia a rigorosidade na utilização de bases de dados consolidadas, contribuindo para a confiabilidade dos resultados apresentados na avaliação do ciclo de vida do produto.

3.5 Propriedades e hipótese central do estudo no OpenLCA.

A partir dos dados obtidos na ACL do processo de produção de cimento temos as referências dos principais impactos ambientais associados intrinsecamente a essa atividade. Todas as simulações realizadas utilizaram o método de alocação físico e como referência do método de avaliação de impacto o *EnvironmentFootprint* conforme a figura 9.

Figura 9 - Propriedades de Cálculo no OpenLCA

The image shows a dark-themed interface for setting calculation properties. It contains four rows of controls:

- Método de alocação:** A dropdown menu with 'Físico' selected.
- Método de avaliação de impacto:** A dropdown menu with 'Environmental Footprint (Mid-point indicator)' selected.
- Normalização e ponderação definidos:** An empty dropdown menu.
- Tipo de cálculo:** Three radio buttons: 'Lazy/On-demand' (selected), 'Eager/All', and 'Simulação de Monte Carlo'.

Fonte: O autor (2025)

Com isso, a partir de tais processos foi realizada uma pesquisa na literatura para obtenção de dados do potencial energético do carvão e dos cavacos de madeira, de posse de tais resultados foram realizados balanços de massa para obtenção do peso no qual potencial de energia é equivalente. Foi realizada posteriormente a avaliação de dois processos de plantação de eucalipto um com manejo sustentável e o outro com manejo não sustentável, tais simulações foram realizadas com o mesmo equivalente em massa obtido para os cavacos de madeira, com o objetivo de relacionada a hipótese de que o potencial energético proveniente da madeira seja ambientalmente sustentável apenas se for um **resíduo**. Dado tais considerações foram realizadas as devidas comparações dos impactos ambientais de cada atividade a partir dos dados obtidos no OpenLCA.

3.6 Considerações da Simulação

A análise comparativa do poder calorífico entre cavacos de madeira e o carvão revela diferenças significativas em termos de potencial energético, diretamente relacionadas às características físico-químicas de cada material.

Conforme destacado por Carvalho (2020), o poder calorífico de cavacos de madeira de *Pinus spp* (figura 10). apresenta ampla variabilidade, oscilando entre menos de $4,19 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ (equivalente a $<1.000 \text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$) e mais de $16,75 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($>4.000 \text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$), dependendo principalmente do teor de umidade e das condições de estocagem. O autor ressalta que o armazenamento inadequado pode acentuar a absorção de água, reduzindo drasticamente a eficiência energética do biocombustível. Para este trabalho, adotou-se um valor de **16,32 $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$** ($3.900 \text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$) para os cavacos, considerando práticas de secagem e armazenamento que mitigam parcialmente a degradação qualitativa.

Figura 10 - Povoamentos de *Pinnus. chiapensis* em Ventania, PR.



Fonte: EMBRAPA FLORESTAS, 2014 (foto: Jarbas Yukio Shimizu)

Conforme a definição da Comissão Econômica das Nações Unidas para a Europa (UNECE, 1988), o carvão duro (*hard coal*) é classificado como aquele que possui poder calorífico bruto superior a $23,9 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($5.700 \text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$). Carvões com poder calorífico inferior a esse valor são designados como carvão marrom (*brown coal*). Nos resultados da simulação, os impactos desses dois tipos de carvão são considerados separadamente. No presente estudo, avaliou-se apenas os impactos do carvão duro; portanto, sempre que o termo "carvão" for mencionado ao longo do texto, refere-se ao carvão com maior potencial energético. Assim, para as estimativas deste trabalho, considerou-se o valor mínimo estabelecido pela UNECE, de $23,9 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Essa disparidade ressalta a importância de contextualizar a aplicabilidade de cada combustível: enquanto o carvão oferece alta densidade energética e previsibilidade, os cavacos de madeira demandam rigor no controle de umidade e logística de estocagem para minimizar perdas. A escolha entre ambos deve, portanto, considerar não apenas parâmetros termodinâmicos, mas também fatores econômicos, operacionais e especialmente ambientais, que é o foco da avaliação realizada nesta pesquisa.

O valor de 150 mil toneladas por mês foi adotado para este trabalho com o intuito de representar uma produção de uma fábrica de cimento de médio porte, a consolidação das principais considerações esta presente na tabela 1.

Tabela 1 - Considerações do Trabalho

Referência	Valores Utilizados
Poder calorífico dos cavacos de madeira	16,32 MJ
Poder calorífico do carvão (hard coal)	23,9 MJ
Produção de Cimento (OpenLCA)	150.000 toneladas/mês

Fonte: O autor (2025)

Considerando os poderes caloríficos dos combustíveis avaliados – 16,32 MJ/kg para o cavaco de madeira e 23,9 MJ/kg para o carvão – buscou-se estabelecer a relação entre as massas destes materiais de modo a atingir a mesma demanda energética.

A energia liberada por um combustível pode ser expressa pela relação:

$$E = m \times PC(I)$$

Onde E representa a energia liberada, m a massa do combustível e PC o seu poder calorífico. Para que a mesma quantidade de energia seja obtida, igualando as energias provenientes dos dois combustíveis, tem-se:

$$m(\text{cavaco}) \times PC(\text{cavaco}) = m(\text{carvão}) \times PC(\text{carvão}) \quad (2)$$

Como trata-se de uma base dados europeia, tal foi criada baseada nessa realidade, logo o impacto do ciclo de vida de fatores como a matriz energética difere bastante quando comparada a realidade brasileira vide os altos valores provenientes de urânio que são considerados nesse processo.

4 RESULTADOS

4.1 Resultados da Avaliação do Ciclo de Vida do Processo de Produção de Cimento Portland

Dentre os impactos analisados destaca-se como já esperado o alto valor no consumo de recursos fósseis, conforme o Apêndice A. Do total de $4,59 \times 10^8$ MJ de consumos de recursos fósseis temos a seguinte discriminação de tais recursos na Tabela 2.

Tabela 2 - Tipos de recursos fósseis considerados na simulação no Open LCA e seus respectivos impactos na produção de 150.000 toneladas de cimento

Nome	Resultado do impacto	Contribuição %
Óleo cru (<i>crude oil</i>)	1,77E+8 MJ	39%
Carvão duro (<i>hard coal</i>)	1,60E+8 MJ	35%
Gás natural	6,02E+7 MJ	13%
Urânio	4,25E+7 MJ	9%
Carvão marrom (<i>brown coal</i>)	1,88E+7 MJ	4%

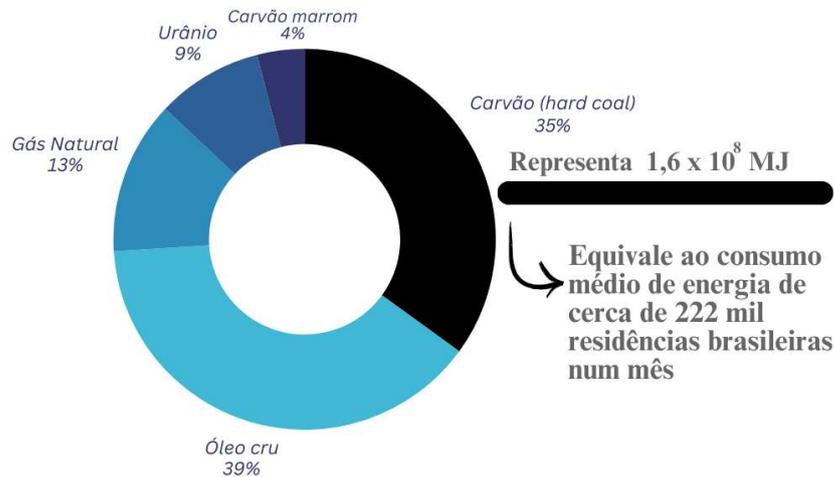
Fonte: O autor (2025)

Conforme análise realizada na base de dados *ecoinvent*, por meio do software OpenLCA, identificou-se que o carvão corresponde a 35% do consumo de recursos fósseis no ciclo de vida da produção de cimento, posicionando-se como o segundo insumo de maior impacto, antecedido apenas pelo óleo cru (39%), relacionado principalmente ao uso de coque de petróleo em fornos de cimenteiras. Esse cenário evidencia a dependência histórica do setor cimenteiro em combustíveis fósseis, com implicações diretas nas emissões de CO₂ e na depleção de recursos não renováveis.

De acordo com o Anuário Estatístico de Energia de 2024 da EPE (Empresa de Pesquisa Energética) o consumo residencial médio de energia elétrica no Brasil no ano de 2023 varia bastante de acordo com cada região do país indo de 131.1 KWh/mês no Nordeste até uma média de 204,5 KWh/mês na região Norte do país.

Adotando um valor médio de 200 KWh/mês para o consumo médio de uma residência no país, temos que a fração de energia representada pelo carvão, em um mês, na indústria do cimento representa o consumo de cerca de 222 mil residências brasileiras como ilustrado na figura 11.

Figura 11 - Estimativa do consumo energético relacionado ao carvão na produção de 150 mil toneladas de cimento comparado ao consumo residencial mensal de energia elétrica no Brasil



Fonte: O autor (2025)

4.2 Análises comparativas entre os impactos do carvão e do cavaco de madeira

O resultado proveniente da equação 2 indica que, para substituir o carvão e alcançar o mesmo poder calorífico, deve-se empregar aproximadamente **1,464 kg** de cavaco de madeira para cada 1 kg de carvão. Em termos percentuais, isso significa um acréscimo de 46,4%. Assim, conclui-se que é necessário utilizar 46,4% a mais de cavacos de madeira do que a massa carvão empregada para se obter a mesma energia no processo de produção de cimento.

Baseando-se no valor de $1,60 \times 10^8$ MJ que é o consumo de carvão no processo, foi realizada a avaliação baseada no poder calorífico de cada um para obter qual o valor em massa é necessário para atingir tal valor (Tabela 3).

Tabela 3 – Equivalência mássica utilizada na simulação

Recurso	Valor em toneladas
Carvão	6694,56
Cavacos de madeira	9467,45

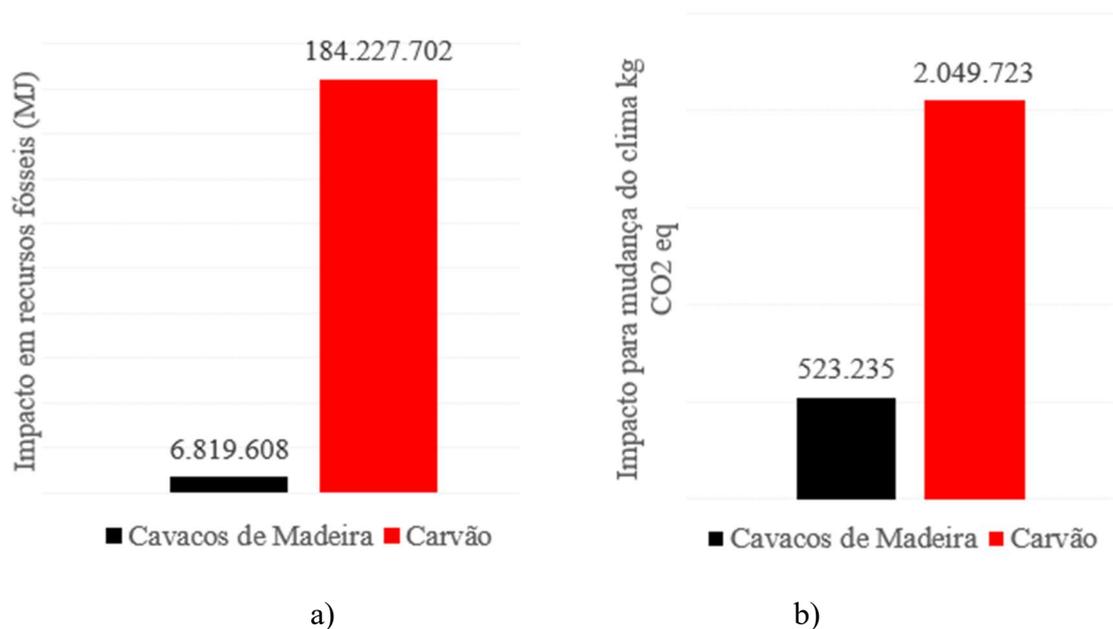
Fonte: O autor (2025)

Com esses valores definidos, foi realizada a análise dos impactos e emissões para o processo de cavacos de madeira e da mineração de carvão para avaliar o impacto na produção de cada um e avaliados seus principais contrastes em cada indicador (Apêndice B).

Na figura 12 nota-se que o impacto ambiental tanto no indicador de mudança do clima quanto no consumo de recursos fósseis possui uma diferença significativa entre tais insumos da indústria do cimento.

Tais resultados consolidam que de fato o coprocessamento é uma alternativa que pode mitigar muito os impactos ambientais da indústria, visto que no processo avaliado o consumo de carvão era o segundo recurso fóssil mais consumido e que pode ser substituído por cavacos de madeira.

Figura 12 - Comparativo dos impactos sob recursos fósseis (a) e mudança climática (b)



Fonte: O autor (2025)

Conforme observado na figura 13, o impacto na acidificação na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) dos cavacos de madeira foi consideravelmente superior, devido especialmente às emissões elevadas de óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio na simulação. Entretanto, além de a diferença em relação à mineração do carvão não ser tão significativa, constatou-se uma discrepância substancial quando comparados os indicadores de mudança climática e, especialmente, de recursos fósseis, evidenciando que o dano ecológico proporcional decorrente da utilização do carvão é consideravelmente maior.

Figura 13 - Comparação percentual dos principais impactos da ACL dos cavacos de madeira em comparação com a mineração do carvão



Fonte: O autor (2025)

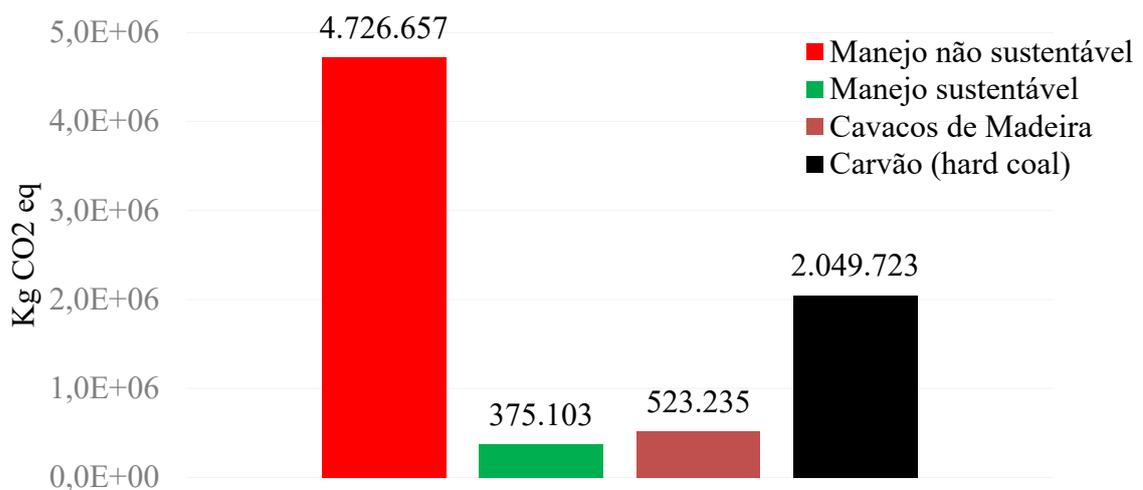
Os resultados são coerentes com hipótese realizada a partir das entradas de cada sistema (Apêndices D e E).

4.3 Avaliação dos impactos ambientais do ciclo de vida da madeira

Na figura 14 é possível observar os resultados do impacto em mudança do clima das plantações de eucalipto com seus diferentes tipos de manejo.

Verificou-se que o impacto em mudanças climáticas do cavaco de madeira é significativamente inferior ao observado em plantações de eucalipto com manejo não sustentável, mas consideravelmente superior ao registrado em plantações manejadas de forma sustentável, além de ser, conforme mencionado, muito inferior ao impacto decorrente da mineração do carvão.

Figura 14 - Impacto sob o indicador de mudança climática (KgCO₂ eq)



Fonte: O autor (2025)

Destaca-se, ainda, que o coprocessamento da madeira é ambientalmente sustentável somente quando a matéria-prima é proveniente de resíduos já utilizados, destinados à alimentação de fornos de cimento, visto que conforme descrito na metodologia o manejo não

sustentável considera basicamente o dobro da ocupação de solo (além de uma emissão de 190 Kg de CO₂ por m³ de madeira) do que a simulação com manejo sustentável e a partir disso observamos uma diferença exorbitante entre os resultados desses processos, como é muito difícil garantir que uma plantação de eucalipto tenha a produtividade desejada com um uso mínimo de solo de forma ecologicamente sustentável, com isso tal prática apresenta um risco de emissão que pode ser superior a utilização do carvão. Dessa forma, considerando um manejo menos rigoroso, não se justifica o plantio de árvores com o objetivo exclusivo de fornecer madeira para o coprocessamento, a consolidação das principais diferenças presentes no Apêndice C corroboram para isso.

De acordo com dados da pesquisa de KBB (2024) pode-se considerar a média de quilometragem por veículo no Brasil de aproximadamente 14 mil quilômetros anuais. Conforme o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV, 2024) que classifica os veículos de acordo com o seu consumo de combustível, é uma aproximação válida considerar que os 10 carros mais vendidos no país emitem, em média, 0,096 kg de CO₂ por quilômetro. Considerando um percurso mensal de 1.100 quilômetros, estima-se que cada veículo gere aproximadamente **105,6 kg de CO₂** por mês. Os resultados apresentados na Figura 15 oferecem uma base para a compreensão do impacto ambiental de cada indicador.

Figura 15 - Quantidade de veículos que equivalem a emissão de CO₂ num mês para cada análise de ciclo de vida realizada.



Fonte: O autor (2025)

Logo, é possível quantificar a partir desse levantamento que o coprocessamento de cavacos de madeira numa única indústria cimenteira com uma produção mensal de 150 mil toneladas de cimento mensais provoca uma redução de dióxido de carbono equivalente a emissão de aproximadamente 15 mil veículos num mês no Brasil.

5. CONCLUSÃO

Em conclusão, a presente pesquisa evidenciou que a substituição parcial do carvão por cavacos de madeira no processo de produção de cimento se mostra viável do ponto de vista energético, uma vez que, para atingir o mesmo potencial calorífico, é necessário empregar aproximadamente 46,4% a mais de biomassa. A aplicação do OpenLCA permitiu a modelagem e análise do ciclo de vida dos combustíveis, revelando que, apesar do elevado impacto na acidificação decorrente das emissões de óxidos de enxofre e nitrogênio associados aos cavacos de madeira, os danos ecológicos relativos à utilização do carvão são significativamente maiores, sobretudo no que tange à mudança climática e ao consumo de recursos fósseis.

Adicionalmente, os resultados demonstraram que o coprocessamento da madeira é ambientalmente sustentável somente quando é proveniente de resíduos. Assim, enfatiza-se a importância do coprocessamento no setor cimenteiro, que se mostra como peça fundamental para a valorização de resíduos sólidos como fonte energética.

Por fim, os achados deste estudo corroboram a necessidade de estratégias que promovam a substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis, contribuindo para a redução dos impactos ambientais e para a transição energética rumo a uma economia mais sustentável. Recomenda-se a continuidade de pesquisas que aprimorem as metodologias de Avaliação do Ciclo de Vida, a fim de viabilizar uma análise mais detalhada dos benefícios e desafios inerentes ao coprocessamento na indústria de cimento.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10004:2024 – Resíduos sólidos: Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 14040:2009 – Gestão ambiental: Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

AGÊNCIA SENADO. Afinal, o cultivo de eucalipto é mesmo prejudicial ao meio ambiente?. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/infomaterias/2024/09/afinal-o-cultivo-de-eucalipto-e-mesmo-prejudicial-ao-meio-ambiente>. Acesso em: 31 mar. 2025.

ANDREATA, Karina Assini. Estimativa da finura do cimento durante o processo de moagem em moinho de bolas. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

BATTAGIN, Arnaldo Forti. Uma breve história do cimento Portland. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2009.

BÖHM, Matthias. Effects of alternative fuels and raw materials on clinker properties. In: **Proceedings of the 34th international conference on cement microscopy.** 2012.

CARVALHO, Douglas Edson; FRANÇA, Ramiro Faria; SCHROEDER, Felipe; SILVA, Dimas Agostinho da. Qualidade energética de cavacos de *Pinus spp.* em diferentes condições de armazenamento. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 35, n. 2, p. 236-245, abr./jun. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17224/EnergAgric.2020v35n2p236-245>.

CIMENTO.ORG. O mercado do cimento Brasil em 2022. 28 jul. 2023. Disponível em: <https://cimento.org/o-mercado-do-cimento-brasil-em-2022/>. Acesso em: 02 jan. 2025.

COELHO FILHO, Osmar; SACCARO JUNIOR, Nilo Luiz; LUEDEMANN, Gustavo. A avaliação de ciclo de vida como ferramenta para a formulação de políticas públicas no Brasil. Brasília: Ipea, 2016. Disponível em: Repositório do Conhecimento do IPEA. Acesso em: 14 abr. 2025.

CRUZ, Maria Carolina Rego Gomes et al. Coprocessamento na indústria de cimento Portland: estado da arte. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

EMBRAPA FLORESTAS. Cultivo de Pinus. Sistema de Produção, nº 5. Versão eletrônica. 2. ed. jun. 2014. ISSN 1678-3913.

FREITAS, Sidcléa Sousa; NÓBREGA, Cláudia Coutinho. Os benefícios do coprocessamento de pneus inservíveis para a indústria cimenteira. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, p. 293-300, 2014.

KBB BRASIL – KELLEY BLUE BOOK BRASIL. Relatório de quilometragem média rodada por marca, modelo e ano de produção da frota brasileira: relatório de dados. São Paulo: KBB Brasil, 2024.

MORAIS, Lais Tamires Oliveira. O impacto do ajuste da chama no tamanho dos cristais de Alita em fornos de clínquer. 2021.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Transformando nosso mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Nova York: ONU, 2015.

PINHO, M.; FARIA, L. G. D. Economia de baixo carbono: avaliação de impactos de restrições e perspectivas tecnológicas. Indústria do cimento. Ribeirão Preto: Universidade de São Paulo, Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, 2012.

PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM VEICULAR – PBEV 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/veiculos-automotivos-pbe-veicular/pbe-veicular-2024-1.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2025.

ROCHA, Sônia Denise Ferreira; LINS, Vanessa de Freitas Cunha; SANTO, Belinazir Costa do Espírito. Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 16, p. 1-10, 2011.

SANTOS, Leandro Bruno. A indústria de cimento no Brasil: origens, consolidação e internacionalização. Sociedade & Natureza, v. 23, p. 77-94, 2011.

SANTOS, M. F. N. dos; BATTISTELLE, R. A. G.; HORI, C. Y.; JULIOTI, P. S. Importância da avaliação do ciclo de vida na análise de produtos: possíveis aplicações na construção civil. Revista Gestão Da Produção Operações E Sistemas, p. 57, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.15675/gepros.v0i2.882>.

SANTOS, Mateus. Identificação dos impactos ambientais causados pela indústria cimenteira no Brasil. Natural Resources, v. 13, n. 2, p. 44-55, mar./abr./mai. 2023. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2237-9290.2023.002.0006>.

SELLITTO, Miguel Afonso et al. Coprocessamento de cascas de arroz e pneus inservíveis e logística reversa na fabricação de cimento. Ambiente & Sociedade, v. 16, p. 141-162, 2013.

SETA. Cavaco de madeira: o que é, para que serve e suas vantagens. Disponível em: <https://www.setaoficial.com/noticia/cavaco-de-madeira-o-que-e-para-que-serve-e-suas-vantagens>. Acesso em: 31 mar. 2025.

SOUZA, Danilo. Por que é difícil descarbonizar a indústria de cimento? 19 fev. 2024. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/por-que-e-dificil-descarbonizar-a-industria-de-cimento/>. Acesso em: 02 jan. 2024.

UNITED NATION ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE – UNECE. International Codification System for Medium and High Rank Coal. Geneve: UNECE, 1988.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. The Cement Sustainability Initiative: Our agenda for action. WBCSD, jul. 2002.

ANEXO A – Figura 16 - O Brasil e suas plantações florestais

As plantações florestais no Brasil

País tem uma das maiores áreas plantadas do mundo. Principal área produtora é o centro-sul do Brasil, com destaque para o eucalipto

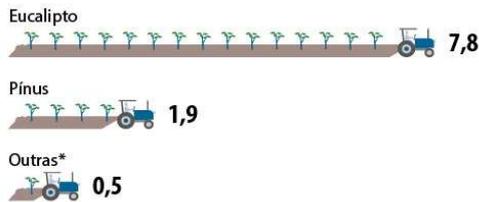
Maiores plantações florestais no mundo
(em % das plantações mundiais)

1		China	27,3	
2		Estados Unidos	9,1	
3		Rússia	6,9	
4		Canadá	5,5	
5		Suécia	4,7	
6		Índia	4,2	
7		Japão	3,6	
8		Polônia	3,1	
9		Brasil	2,7	
10		Finlândia	2,3	
11		Sudão	2,1	
12		Alemanha	1,8	

Área plantada no Brasil
(em milhões de hectares)



Espécies plantadas
(em milhões de hectares)



Estados com maiores plantações florestais
(em milhões de hectares)



*seringueira, teca, acácia e araucária
fontes: FAO 2015 e IBA 2023



APÊNDICE A – Tabela 4 - Impactos ambientais da produção de cimento por categoria

Impact category	Reference unit	Result
Acidification	mol H+ eq	257962,2573
Climate change	kg CO2 eq	128924833,4
Climate change-Biogenic	kg CO2 eq	24826,77293
Climate change-Fossil	kg CO2 eq	128890383,4
Climate change-Land use and land use change	kg CO2 eq	9623,256044
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	7959802,622
Eutrophication marine	kg N eq	72994,63321
Eutrophication, freshwater	kg P eq	1128,364731
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	847489,3469
Human toxicity, câncer	CTUh	0,39109526
Human toxicity, non-cancer	CTUh	5,38067394
Ionising radiation, human health	kBq U-235 eq	2632854,962
Land use	Pt	91277477,18
Ozone depletion	kg CFC11 eq	0,010429226
Particulate Matter	disease inc.	2,018482124
Photochemical ozone formation - human health	kg NMVOC eq	209653,3572
Resource use, fóssil	MJ	458947362,8

Fonte: O autor (2025)

APÊNDICE B – Tabela 5 – Principais comparações da ACL do carvão e dos cavacos de madeira consolidados

Impact	Reference unit	Cavaco de Madeira	Carvão	Diferença (Carvão – Cavaco)
Acidification	mol H ⁺ eq	2463,461522	1678,773162	-784,6883598
Climate change	kg CO ₂ eq	523235,07	2049722,547	1526487,477
Climate change- Biogenic	kg CO ₂ eq	17700,0072	124,7588381	-17575,24836
Climate change- Fossil	kg CO ₂ eq	503688,8566	2049452,861	1545764,004
Climate change- Land use and land use change	kg CO ₂ eq	1846,206183	144,9276897	-1701,278493
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	3752315,022	114391,4163	-3637923,605
Eutrophication marine	kg N eq	1142,756931	423,9256042	-718,8313263
Eutrophication, freshwater	kg P eq	32,67837018	0,305323109	-32,37304707
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	8757,675976	4667,456548	-4090,219427
Human toxicity, cancer	CTUh	0,011633857	0,003043314	-0,008590542
Human toxicity, non-cancer	CTUh	0,202304181	0,032723522	-0,169580659
Ionising radiation, human health	kBq U-235 eq	31373,28677	4809,697411	-26563,58936
Land use	Pt	1092778118	3773480,582	-1089004638
Ozone depletion	kg CFC11 eq	0,006162345	2,75574E-06	-0,006159589
Particulate Matter Photochemical ozone formation - human health	disease inc.	0,020917211	0,060668415	0,039751205
Resource use, fossils	kg NMVOC eq	3324,158894	1656,771884	-1667,387011
Resource use, minerals and metals	MJ	6819607,623	184227702,4	177408094,8
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	2,843651787	0,020651331	-2,823000457
Water use	m ³ depriv.	182207,5231	-797,6455494	-183005,1686

Fonte: O autor (2025)

APÊNDICE C – Tabela 6 - Comparações da ACL dos diferentes tipos de manejo de eucalipto

Impact category	Reference unit	Não Sustentável	Sustentável
Acidification	mol H+ eq	2631,92675	2631,92675
Climate change	kg CO2 eq	4726656,583	375103,4241
Climate change-Biogenic	kg CO2 eq	14554,96789	14554,96789
Climate change-Fossil	kg CO2 eq	360285,7131	360285,7131
Climate change-Land use and land use change	kg CO2 eq	4351815,902	262,7430432
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	3112932,116	3112932,116
Eutrophication marine	kg N eq	1296,949136	1296,949136
Eutrophication, freshwater	kg P eq	26,95507235	26,95507235
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	10670,00837	10670,00837
Human toxicity, cancer	CTUh	0,009053758	0,009053758
Human toxicity, non-cancer	CTUh	0,17034524	0,17034524
Ionising radiation, human health	kBq U-235 eq	23468,33437	23468,33437
Land use	Pt	1296279701	651516615,2
Ozone depletion	kg CFC11 eq	0,004758652	0,004758652
Particulate Matter	disease inc.	0,0495362	0,0495362
Photochemical ozone formation - human health	kg NMVOC eq	3149,051632	3149,051632
Resource use, fossils	MJ	5273567,858	5273567,858
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	2,045423104	2,045423104
Water use	m3 depriv.	168105,1299	168105,1299

Fonte: O autor (2025)

APÊNDICE D – Tabela 7 - Principais entradas do processo de mineração do carvão

Flow	Amount	Unit
hard coal	26,54563592	MJ
inert rock	3,937370963	kg
natural gas	0,633682599	MJ
crude oil	0,304217646	MJ
air	0,134842259	kg
Water (rain water)	0,119644835	kg
sea water	0,059650519	kg
primary energy from solar energy	0,022236062	MJ
brown coal	0,019293433	MJ
uranium	0,01846019	MJ
primary energy from hydro power	0,013345536	MJ
calcium carbonate	0,011635179	kg
primary energy from wind power	0,005745947	MJ
iron	0,003986905	kg
Water to turbine - IN	0,003872907	m3
Water to turbine - CN	0,003704432	m3
Water to turbine - DE	0,002853598	m3
natural aggregate	0,002738325	kg
Water to turbine - SE	0,002290934	m3
river water	0,002222645	m3
from forest, used	0,002138509	m2
to forest, used	0,002138478	m2
forest, used	0,002138449	m2*a
carbon dioxide (biogenic)	0,002132738	kg
soil	0,001710538	kg
Water to turbine - RU	0,001660806	m3
industrial area	0,0015	m2*a
ground water - CN	0,001054069	m3
oxygen	0,000875583	kg
Oil sand (10% bitumen)	0,000785219	MJ
Oil sand (100% bitumen)	0,000685535	MJ
Water to turbine - NO	0,00068377	m3
Water to turbine - US	0,000675421	m3
Water to turbine - AT	0,000666099	m3
Water to turbine - CA	0,000553352	m3
clay	0,00052515	kg
Water to turbine - FR	0,000487498	m3
Water to turbine - BR	0,000479586	m3
quartz sand	0,000349321	kg
Water to turbine - KZ	0,000333051	m3

Fonte: O autor (2025)

APÊNDICE E – Tabela 8 - Principais entradas do processo de cavacos de madeira

Flow	Amount	Unit
biomass	11,72832	MJ
forest, intensive	1,353973	m2*a
Water (rain water)	0,34646963	kg
crude oil	0,34335044	MJ
forest, extensive	0,076509349	m2*a
gravel	0,073782288	kg
natural gas	0,039355582	MJ
sea water	0,026537241	kg
traffic area, rail/road embankment	0,023118708	m2*a
hard coal	0,016033849	MJ
to forest, intensive	0,013911657	m2
from forest, intensive	0,013911544	m2
air	0,013142156	kg
uranium	0,008319944	MJ
Energy, solar, converted	0,008021156	MJ
inert rock	0,00742748	kg
brown coal	0,00350347	MJ
primary energy from hydro power	0,003202587	MJ
Energy, kinetic (in wind), converted	0,001526343	MJ

Fonte: O autor (2025)