**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**

**CENTRO TECNOLÓGICO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**ANA PAULA DE MORAIS BARROSO**

# AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE FUNDAÇÕES DE TORRES EÓLICAS: ESTUDO COMPARATIVO

Vitória

2023

ANA PAULA DE MORAIS BARROSO

# AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE FUNDAÇÕES DE TORRES EÓLICAS: ESTUDO COMPARATIVO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, na área de concentração Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Ing. João Luiz Calmon Nogueira da Gama

Vitória

2023

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

---

Barroso, Ana Paula de Morais, 1998-
B277a Avaliação do ciclo de vida de fundações de torres eólicas : Estudo comparativo / Ana Paula de Morais Barroso. - 2023.
125 f. : il.

Orientador: Joao Luiz Calmon Nogueira da Gama.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Avaliação do ciclo de vida. 2. Energia eólica. 3. Fundação de torre eólica. 4. Fundação com base no sistema de tensegridade. I. Gama, Joao Luiz Calmon Nogueira da. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 628

---

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

# AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE FUNDAÇÕES DE TORRES EÓLICAS: ESTUDO COMPARATIVO

**Ana Paula de Morais Barroso**

**Banca Examinadora:**

_____
Prof. Dr. João Luiz Calmon Nogueira da Gama
Orientador - PPGEA/CT/UFES

_____
Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa
Examinador Interno – PPGEA/CT/UFES

_____
Prof. Dr. Diego Lima Medeiros
Examinador Externo – UFBA

ELISA VALENTIM GOULART
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

Vitória/ES, 20 de março de 2023



**Documento assinado eletronicamente nos moldes do art. 10 da MP 2200/01 e Lei 14063/20**
[Hash SHA256] 40b8feea38fba3d73524f5a916fb3c4404575b84f926acb8a131e1c841b3177f

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Ata da Quadringentésima Quinquagésima (450ª) Sessão de Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA) do Centro Tecnológico (CT) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), da aluna **Ana Paula de Morais Barroso**, candidata ao grau de Mestre em Engenharia Ambiental.

Às catorze horas do dia vinte de março de dois mil e vinte e três (20/03/2023) por videoconferência. O Prof. Dr. João Luiz Calmon Nogueira da Gama, presidindo a Sessão, deu início aos trabalhos apresentando ao público presente à candidata **Ana Paula de Morais Barroso** e a banca examinadora da dissertação, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa – Examinador Interno - PPGEA/CT/UFES e Prof. Dr. Diego Lima Medeiros – Examinador Externo – UFMA. O Senhor Presidente da Banca Examinadora, Prof. Dr. João Luiz Calmon Nogueira da Gama passou em seguida a palavra à candidata, que em trinta minutos apresentou a Dissertação de Mestrado intitulada **"AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE FUNDAÇÕES DE TORRES EÓLICAS: ESTUDO COMPARATIVO".** Dando prosseguimento aos trabalhos de defesa da dissertação, o Senhor Presidente passou a palavra aos membros da Banca, um a um, iniciando os comentários de arguição da candidata com o examinador externo. Após, o Senhor Presidente teceu comentários sobre o trabalho da candidata e franqueou a palavra ao público presente. Findada a arguição, o Senhor Presidente convidou a Banca Examinadora se reunir em separado, para deliberação. Ao retornar, o Senhor Presidente informou ao público presente a decisão da banca que resultou na APROVAÇÃO da examinada. Por fim, a presidente da sessão alertou que a aprovada somente terá direito ao título de Mestre em Engenharia Ambiental após entrega da versão final de sua dissertação, em meio digital, à Secretária do Programa com as correções apontadas pela banca, cumpridos todos os trâmites exigidos pelo Regimento do PPGEA e da homologação do resultado da defesa pelo Colegiado Acadêmico do PPGEA. Por fim, declarou encerrada a sessão, e eu, João Luiz Calmon Nogueira da Gama, Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, do Centro Tecnológico, lavrei a presente ata, que irá assinada pelos membros da Banca Examinadora e pela mestranda.

| | |
|---|---|
| Prof. Dr. João Luiz Calmon Nogueira da Gama<br>Orientador - PPGEA/CT/UFES | Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa<br>Examinador Interno – PPGEA/CT/UFES |
| Prof. Dr. Diego Lima Medeiros<br>Examinador Externo – UFMA | Ana Paula de Morais Barroso<br>Mestranda |

Vitória/ES, 20 de março de 2023



**Documento assinado eletronicamente nos moldes do art. 10 da MP 2200/01 e Lei 14063/20**
[Hash SHA256] 40b8feea38fba3d73524f5a916fb3c4404575b84f926acb8a131e1c841b3177f

Datas e horários baseados em Brasília, Brasil
**Sincronizado com o NTP.br e Observatório Nacional (ON) em 21/03/2023 às 13:23:26**

## Folha de aprovação - Ana Paula de Morais Barroso

Data e Hora de Criação: 20/03/2023 às 16:20:30

**Documentos que originaram esse envelope:**
- Folha de aprovação - Ana Paula de Morais Barroso.pdf (Arquivo PDF) - 1 página(s)
- ata de defesa Ana Paula de Morais Barroso.pdf (Arquivo PDF) - 1 página(s)

### Hashs únicas referente à esse envelope de documentos

[SHA256]: 40b8feea38fba3d73524f5a916fb3c4404575b84f926acb8a131e1c841b3177f
[SHA512]: 772ba141909669da63d160ed0dd4fc34b5513686581f7278030f08bb8702a7c2b95683b58aac12b0cbf2b286e3648caeb16512f7e2ac2a70ef478f65b41ebb86

### Lista de assinaturas solicitadas e associadas à esse envelope

**ASSINADO - João Luiz Calmon Nogueira da Gama (calmonbarcelona@gmail.com)**
Data/Hora: 21/03/2023 - 07:06:26, IP: 177.159.78.21, Geolocalização: [-20.299002, -40.295909]
[SHA256]: 2374dbdad845992ad28215516171aeec193f39a420cc587121f160eecabe9a3b

**ASSINADO - Diego Medeiros (diegomedeiros350@gmail.com)**
Data/Hora: 21/03/2023 - 09:07:38, IP: 200.137.135.48, Geolocalização: [-2.5679336, -44.309461]
[SHA256]: 8fef2e2c341c9655e8ba09168f55c2af68619232c435804c069bb5873bda3036

**ASSINADO - Rodrigo de Alvarenga Rosa (rodrigoalvarengarosa@gmail.com)**
Data/Hora: 21/03/2023 - 13:21:52, IP: 200.137.65.102
[SHA256]: f1cec0379522a58fc0f2047cac7687d48913fb920aa259fe5f970a77bde6ebb1

**ASSINADO - Ana Paula de Morais Barroso (anapaula.mbarroso@gmail.com)**
Data/Hora: 21/03/2023 - 13:23:26, IP: 179.183.46.236
[SHA256]: a66e12658c38946187432da3a4e0ab6c935d41d67ed7a414ec7df264d3693c70

### Histórico de eventos registrados neste envelope

21/03/2023 13:23:26 - Envelope finalizado por anapaula.mbarroso@gmail.com, IP 179.183.46.236
21/03/2023 13:23:26 - Assinatura realizada por anapaula.mbarroso@gmail.com, IP 179.183.46.236
21/03/2023 13:21:52 - Assinatura realizada por rodrigoalvarengarosa@gmail.com, IP 200.137.65.102
21/03/2023 09:07:38 - Assinatura realizada por diegomedeiros350@gmail.com, IP 200.137.135.48
21/03/2023 09:07:19 - Envelope visualizado por diegomedeiros350@gmail.com, IP 200.137.135.48
21/03/2023 07:06:26 - Assinatura realizada por calmonbarcelona@gmail.com, IP 177.159.78.21
20/03/2023 16:51:58 - Envelope visualizado por calmonbarcelona@gmail.com, IP 177.159.78.21
20/03/2023 16:24:59 - Envelope registrado na Blockchain por shanna.pavan@ufes.br, IP 200.137.67.20
20/03/2023 16:24:58 - Envelope encaminhado para assinaturas por shanna.pavan@ufes.br, IP 200.137.67.20
20/03/2023 16:20:31 - Envelope criado por shanna.pavan@ufes.br, IP 200.137.67.20

Documento em conformidade com o padrão de assinatura digital ICP-Brasil e validado de acordo com o Instituto Nacional de Tecnologia da Informação

Os registros de assinatura presentes nesse documento pertencem única e exclusivamente a esse envelope.
Documento final gerado e certificado por **Universidade Federal do Espírito Santo**

## AGRADECIMENTOS

Meus anos de mestrado foram um período solitário, árduo e muita dedicação, onde exercitei resiliência e persistência. Agradeço em primeiro lugar à Deus, pela minha vida, e por me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo da realização deste trabalho.

Minha gratidão especial ao Professor Dr. João Luiz Calmon, por ter sido meu orientador e ter desempenhado tal função com muita dedicação e paciência.

Aos meus familiares, pela participação na minha caminhada até aqui, em especial minha mãe Regina Célia Barroso e minha avó Iracy Barroso pelas constantes orações e apoio incondicional nos momentos de aflição.

Agradeço também a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Espírito Santo (FAPES), pela bolsa de pesquisa concedida para que fosse desenvolvida a pesquisa.

"Conceda-me Senhor meu Deus, uma inteligência que Te conheça, uma vontade que Te busque, uma sabedoria que Te encontre, uma vida que Te agrade, uma perseverança que Te espere com confiança e que para sempre Te possua".

São Tomás de Aquino

## RESUMO

Recentemente a energia eólica tem sido considerada uma das mais promissoras ambientalmente. Apesar de sua natureza renovável, entradas de recursos não renováveis e emissões de gases de efeito estufa ocorrem durante o ciclo de vida destes sistemas. A metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) permite quantificar os possíveis impactos ambientais de um produto ou sistema. Estudos de ACV para torres eólicas usualmente detectam como componente de maior impacto ambiental a fundação da torre. Nesse contexto, se sobressai um novo modelo de torre eólica com base no sistema de tensegridade, denominado *wind tower*, que se difere de sistemas já utilizados na seção inferior da torre e na fundação, reduzindo drasticamente o volume de concreto e a quantidade de armadura de aço utilizado nas fundações, possibilitando a redução de materiais, transporte, custos e evidentemente o impacto ambiental. Assim, o objetivo dessa dissertação consistiu em realizar uma ACV comparativa entre três tipos de fundação: fundação direta convencional, fundação indireta convencional e a fundação com base no sistema de tensegridade para um aerogerador hipotético localizado na região Nordeste do Brasil. Para execução da ACV, os sistemas foram analisados no *software* OpenLCA, para seis principais categorias de impacto no método *IMPACT* 2002+: Energia não renovável, Aquecimento global, Extração mineral, Acidificação terrestre, Ocupação da terra e Ecotoxidade terrestre. Em resumo, a fundação com base no sistema de tensegridade apresentou reduções significativas dos impactos em todas as categorias avaliadas. Evidenciou-se, ainda que, nas fundações convencionais o concreto foi o responsável por uma parcela expressiva dos impactos ambientais, contribuindo com cerca de 59% dos impactos na fundação direta e 50% na fundação indireta. Sendo o concreto e as distâncias de transporte, os itens de maiores contribuições no impacto total, consequentemente, que promovem maior variabilidade nos resultados, foi realizada uma análise de sensibilidade para estes itens. A análise evidenciou que a busca pelo controle de cimento nas misturas, através da utilização de materiais cimentícios, e a redução das distâncias de transportes são excelentes opções na busca pela redução de impactos.



**Palavras-Chaves:** Avaliação do ciclo de vida (ACV); Energia Eólica; Tensegridade; Fundação direta; Fundação indireta.

**ABSTRACT**

Recently wind energy has been considered one of the most environmentally promising. Despite their renewable nature, non-renewable resource inputs and greenhouse gas emissions occur during the life cycle of these systems. The Life-Cycle Assessment (LCA) methodology makes it possible to quantify the possible environmental impacts of a product or system. LCA studies for wind towers usually detect the foundation of the tower as the component with the highest environmental impact. In this context, a new model of wind tower stands out based on the tensegrity system, called "wind tower", which differs from the current systems used in the lower section of the tower and in the foundation, drastically reducing the volume of concrete and the amount of steel reinforcement used in the foundations, enabling the reduction of materials, transport, costs and, evidently, the environmental impact. Thus, the objective of this dissertation was to carry out a comparative LCA between three types of foundation: standard shallow foundation, standard deep foundation and the tensegrity foundation for a hypothetical wind turbine located in the Northeast region of Brazil. To perform the LCA, the systems were analyzed using the OpenLCA software, for six midpoint impact categories in the IMPACT 2002+ method: Non-renewable energy, Global warming, Mineral extraction, Terrestrial acidification, Land occupation, Terrestrial ecotoxicity. In short, the tensegrity foundation showed significant reductions in impacts in all evaluated categories. It was also evident that in standard foundations, concrete was responsible for a significant portion of the environmental impacts, contributing with about 59% of the impacts in the shallow foundation and 50% in the deep foundation. Since concrete and transport distances are the items with the biggest contributions to the total impact, and consequently, which promote greater variability in the results, a sensitivity analysis was performed for these items. The analysis has shown that the search for cement control in the mixtures, through the use of cementitious materials and the reduction of transport distances are excellent measures to reduce the impacts.

**Keywords:** Life-cycle assessment (LCA); Wind Energy; Tensegrity; Shallow foundation; Deep foundation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Crescimento eólico mundial ..... 18
Figura 2- Ranking da capacidade total instalada onshore ..... 18
Figura 3- Potencial Eólico Brasileiro ..... 19
Figura 4- Disposição dos parques eólicos nos estados brasileiros ..... 21
Figura 5- Principais componentes do aerogerador de eixo horizontal ..... 22
Figura 6- Bloco de fundação sobre estacas ..... 24
Figura 7- Montagem da armadura do bloco de fundação. ..... 25
Figura 8- Vista lateral da fundação ..... 25
Figura 9- Concretagem da sapata ..... 26
Figura 10- *Wind fence* ..... 27
Figura 11- *Wind tower* ..... 27
Figura 12- Fundação direta convencional *versus* fundação com base no sistema de tensegridade. ..... 28
Figura 13- Fases de uma ACV ..... 29
Figura 14-Categorias de impactos de pontos médios e danos para o método *IMPACT* 2002+. . 32
Figura 15-Filtros aplicados com base no método ProKnow-C ..... 37
Figura 16-Publicações por ano ..... 37
Figura 17-Publicações por periódico ..... 38
Figura 18-Publicações por país do autor principal ..... 38
Figura 19-Fronteiras utilizadas nos estudos de ACV. ..... 40
Figura 20- Principais metodologias de AICV utilizadas nos estudos. ..... 41
Figura 21- Apresentação dos resultados de AICV dos estudos ..... 42
Figura 22- Ciclo de vida das fundações de aerogeradores. ..... 45
Figura 23-Vista superior da fundação direta convencional. ..... 47
Figura 24-Vista lateral da fundação direta convencional. ..... 47
Figura 25- Vista superior da fundação indireta convencional. ..... 48
Figura 26-Vista lateral da fundação indireta convencional. ..... 48
Figura 27-Modelo da fundação de tensegridade. ..... 49
Figura 28-Resultado da categoria Energia não renovável para os três tipos de fundações. ..... 57
Figura 29-Resultado da categoria Extração mineral para os três tipos de fundações ..... 57
Figura 30-Resultado da categoria Aquecimento global para os três tipos de fundações. ..... 58
Figura 31-Resultado da categoria Ocupação da terra para os três tipos de fundações ..... 58
Figura 32-Resultado da categoria Acidificação terrestre para os três tipos de fundações ..... 59
Figura 33- Resultado da categoria Ecotoxidade terrestre para os três tipos de fundações ..... 59
Figura 34-Caracterização das categorias de impacto para a fundação direta. ..... 61
Figura 35- Resultado correspondente ao transporte para a fundação direta. ..... 63
Figura 36-Caracterização das categorias de impacto para a fundação indireta. ..... 63
Figura 37-Resultado correspondente ao transporte para a fundação indireta. ..... 65
Figura 38-Caracterização das categorias de impacto para a fundação com base no sistema de tensegridade ..... 66
Figura 39-Resultado atrelado ao transporte para fundação com base no sistema de tensegridade. ..... 68
Figura 40-Resultados por m³ dos traços na categoria Energia não renovável ..... 70
Figura 41-Resultados por m³ dos traços na categoria Extração mineral ..... 71
Figura 42-Resultados por m³ dos traços na categoria Aquecimento global ..... 71
Figura 43-Resultados por m³ dos traços na categoria Ocupação da terra ..... 72

Figura 44-Resultados por m³ dos traços na categoria Acidificação terrestre ..... 72
Figura 45-Resultados por m³ dos traços na categoria Ecotoxidade terrestre..... 73
Figura 46-Resultado para fundação direta no C1 e C2 da análise de sensibilidade ..... 74
Figura 47- Resultado para fundação indireta no C1 e C2 da análise de sensibilidade ..... 74
Figura 48- Resultado para fundação com base no sistema de tensegridade no C1 e C2 da análise de sensibilidade ..... 75
Figura 49- Resultados para o C3 da análise de sensibilidade na categoria Energia não renovável ..... 76
Figura 50- Resultados para o C3 da análise de sensibilidade na categoria Acidificação terrestre ..... 76
Figura 51- Resultados para o C3 da análise de sensibilidade na categoria Ecotoxidade terrestre ..... 77
Figura 52- Resultados para o C3 da análise de sensibilidade na categoria Aquecimento global 77
Figura 53-Resultados de incerteza para Energia não renovável..... 79
Figura 54-Resultados de incerteza para Extração mineral ..... 79
Figura 55-Resultados de incerteza para Aquecimento global ..... 80
Figura 56-Resultados de incerteza para Ocupação terrestre..... 80
Figura 57-Resultados de incerteza para Acidificação terrestre ..... 81

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Visão geral das bases de dados ..... 31
Quadro 2- Caracterização das categorias de impacto..... 33
Quadro 3-Principais metodologias de AICV..... 34
Quadro 4-Matriz Pedigree Ecoinvent..... 46
Quadro 5-Cenário de transporte dos insumos das fundações de aerogerador avaliadas. ..... 51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Traços de concreto ..... 50
Tabela 2- Traços utilizados na análise de sensibilidade..... 53
Tabela 3- Cenários de transporte para análise de sensibilidade. ..... 54
Tabela 4- Participação dos constituintes do concreto no impacto total da fundação direta. ..... 61
Tabela 5- Participação dos constituintes do concreto no impacto total da fundação indireta. .... 64
Tabela 6-Participação dos constituintes do concreto no impacto total da fundação com base no sistema de tensegridade. ..... 67
Tabela 7-Resultados obtidos por diferentes métodos de AICV ..... 69
Tabela 8- Resultados dos cenários de concreto para fundação de tensegridade ..... 78

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---|---|
| ACV | Avaliação do Ciclo de Vida |
| AICV | Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida |
| COP | Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas |
| CP | Cimento Portland |
| DQC | *Data quality goals* |
| DQI | *Data quality indicator* |
| GWEC | *Global Wind Energy Council* |
| ICV | Inventário de ciclo de vida |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| MRIO | *Multi-region input output* |
| PROINFA | Programa de Incentivo às Fontes Alternativas |
| PROKNOW-C | Processo de Desenvolvimento do Conhecimento-Construtivista |

**SUMÁRIO**

**1 INTRODUÇÃO** ..... **13**
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA ..... 13
1.2 QUESTÕES DA PESQUISA ..... 14
1.3 LIMITAÇÕES DE PESQUISA ..... 15
**2 OBJETIVOS** ..... **16**
2.1 OBJETIVO GERAL ..... 16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS ..... 16
**3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA** ..... **17**
3.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA ..... 17
**3.1.1 Energia Eólica** ..... **17**
**3.1.2 Aerogeradores** ..... **21**
**3.1.3 Fundações de torres eólicas** ..... **23**
**3.1.4 Avaliação do ciclo de vida (ACV)** ..... **28**
3.2. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA ..... 36
3.3 REVISÃO CRÍTICA ..... 39
**3.3.1 Definição de objetivo e escopo** ..... **39**
**3.3.2 Análise de inventário do ciclo de vida** ..... **41**
**3.3.3 Avaliação de impacto de ciclo de vida** ..... **41**
**3.3.4 Interpretação dos resultados** ..... **42**
**4 MATERIAIS E MÉTODOS** ..... **44**
4.1 DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO ..... 44
**4.1.1 Unidade funcional e fronteira do sistema** ..... **44**
**4.1.2 Objetivos de qualidade dos dados** ..... **45**
**4.1.3 Cenários considerados** ..... **46**
4.2 ANÁLISE DE INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA ..... 49
**4.2.1 Base de dados e ferramenta computacional** ..... **49**
**4.2.2 Materiais componentes do sistema** ..... **50**
**4.2.3 Cenário de transporte** ..... **51**
4.3 AVALIAÇÃO DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA ..... 52
**4.3.1 Métodos de avaliação de impacto e categorias de impacto** ..... **52**
4.4 INTERPRETAÇÃO ..... 52
**4.4.1 Análise de sensibilidade** ..... **52**
**4.4.2 Análise de incerteza** ..... **54**
**5 RESULTADOS E DISCUSSÕES** ..... **56**
5.1 COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS DE FUNDAÇÃO ..... 56

5.2 COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE IMPACTO ..... 68
5.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE..... 69
**5.3.1 Cenários de traços de concreto..... 69**
**5.3.2 Cenários de distâncias de transporte..... 74**
**5.3.3 Cenários de volume do concreto na fundação de tensegridade..... 78**
5.4 ANÁLISE DE INCERTEZA..... 78
**6.0 CONCLUSÃO..... 82**
6.1 CONCLUSÕES GERAIS ..... 82
6.2 CONCLUSÕES ESPECÍFICAS ..... 82
**6.2.1 Conclusões relativas ao tipo de fundação..... 82**
**6.2.2 Conclusões relativas à sensibilidade do transporte..... 82**
**6.2.3 Conclusões relativas à sensibilidade de uso de materiais..... 83**
**6.2.4 Conclusões relativas à sensibilidade do volume do concreto na fundação de tensegridade..... 83**
**6.2.5 Conclusões relativas aos métodos de impacto..... 84**
**6.2.6 Conclusões relativas aos métodos de incerteza..... 84**
6.3 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS ..... 84
**REFERÊNCIAS..... 86**
**APÊNDICES..... 93**
**APÊNDICE A- VISÃO GERAL DOS ARTIGOS SELECIONADOS SOBRE ACV DE AEROGERADORES..... 94**
**APÊNDICE B- INVENTÁRIO FUNDAÇÃO DIRETA..... 102**
**APÊNDICE C- INVENTÁRIO FUNDAÇÃO INDIRETA..... 107**
**APÊNDICE D- INVENTÁRIO FUNDAÇÃO COM BASE NO SISTEMA DE TENSEGRIDADE..... 114**
**APÊNDICE E- RESULTADOS DAS CATEGORIAS DE IMAPCTOS PARA OS SISTEMAS DE FUNDAÇÃO..... 119**
**APÊNDICE F- IMPACTO POR SISTEMA DE FUNDAÇÃO PARA OS TRAÇOS AVALIADOS NA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE..... 125**

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Recentemente, muitos dos eventos mais catastróficos foram associados as mudanças climáticas, em decorrência do aquecimento global e consequências do efeito estufa. A 27ª Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP-27), realizada em Harm El Sheikh no Egito, teve como função primordial o debate sobre questões climáticas, almejando assim o cumprimento de metas de redução de emissões de gases de efeitos estufa até 2030, visando em especial as ações de transição energética. O uso de fontes renováveis de energia, como alternativa aos combustíveis fósseis, é essencial na busca por um planeta livre de emissões de $CO_2$ e para a redução da contaminação ambiental (STAVRIDOU; KOLTSAKIS; BANIOTOPOULOS, 2020).

A energia eólica, além de sua natureza renovável e seu grande potencial, é considerada uma das mais limpas dentre as fontes de energia renováveis, dado que durante sua fase operacional, os parques eólicos são instalações quase com "emissão zero" de poluentes atmosféricos, como gases de efeito estufa, consequentemente seu desenvolvimento tem sido impulsionado em todo o mundo (LI *et al*., 2021; STAVRIDOU; KOLTSAKIS; BANIOTOPOULOS, 2019).

Contudo, apesar de sua natureza renovável, a energia eólica não é completamente limpa dado que entradas de recursos não renováveis e emissões de gases de efeito estufa ocorrem durante o ciclo de vida deste sistema (ARVESEN; HERTWICH, 2011). Isso se deve ao consumo de grandes quantidades de materiais durante o processo produtivo dos aerogeradores e das demais instalações existentes em um parque eólico, o que se traduz no consumo de energia, recursos e na emissão de poluentes (LI *et al*., 2021).

De modo geral, os impactos ambientais da energia eólica são detectados em maior escala nos estágios de fabricação e de transporte das torres eólicas, sendo ainda o componente de maior impacto ambiental a fundação da torre. Os aerogeradores de grande porte são usualmente suportados por fundações maciças, envolvendo centenas de metros cúbicos de concreto e toneladas de aço (BERNDT, 2015).

Os grandes volumes de concreto envolvidos na construção de fundações de um aerogerador, sejam elas diretas ou indiretas, estão associados a preocupações em relação às emissões de $CO_2$ (BERNDT, 2015). Segundo Gkantou, Rebelo, Baniotopoulos (2020), a maior parcela de concreto de toda a estrutura do aerogerador encontra-se na fundação. Os autores ainda dizem que as fundações de concreto armado para um aerogerador *onshore* de 5 MW contribuem com 490,9 toneladas de $CO_2$ eq., o que corresponde a aproximadamente 24% das emissões, considerando desde o processo de manufatura dos componentes até a destinação final em um aterro para uma vida útil de 20 anos da estrutura.

Uma das maneiras de medir os impactos ambientais é por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), uma metodologia holística capaz de quantificar impactos ambientais diretos e indiretos ao longo das etapas do ciclo de vida de produtos ou sistemas (ABNT, 2014a). A ACV tem sido cada vez mais aplicada com uma perspectiva futura para avaliar tecnologias emergentes. A avaliação de uma tecnologia em seu estágio inicial de desenvolvimento fornece a oportunidade de identificar os impactos ambientais, que podem ser barreiras para sua implementação em larga escala (FANG *et al*., 2016). A ACV voltada para aerogeradores, pode não apenas auxiliar as

empresas deste setor a realizar projetos mais sustentáveis, como também a orientar estudos para os componentes e materiais responsáveis por gerarem maiores impactos nos parques eólicos.

Nesse contexto, se sobressai um novo modelo de torre eólica com base no sistema de tensegridade, denominado *wind tower*, que se difere de sistemas já utilizados na seção inferior da torre e na fundação. Este sistema, apresenta a estruturação de uma torre tubular composta de uma coluna central e elementos estruturais de tração e compressão, fornecendo assim, uma base reforçada para suporte de uma torre eólica capaz de evitar a flexão em várias alturas da coluna central (BRANDÃO *et al*., 2019). Este novo modelo, reduz drasticamente o volume de concreto e a quantidade de armadura de aço utilizado nas fundações, cerca de 90%, possibilitando a redução de materiais, transporte, custos e evidentemente o impacto ambiental (METALVIX ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA; MCA TECNOLOGIA DE ESTRUTURAS, 2016).

Uma vez que a fundação é um dos componentes do aerogerador com os maiores impactos ambientais, esta dissertação consiste em realizar uma Avaliação de Ciclo de Vida comparativa entre três tipos de fundação: fundação direta convencional, fundação indireta convencional e a fundação com base no sistema de tensegridade de um aerogerador hipotético localizado na região Nordeste do Brasil. A região Nordeste do Brasil foi escolhida devido seu alto potencial de ventos e grande quantidade de parques eólicos, sendo definidos a localização do canteiro e os fornecedores, observando parques eólicos pré-existentes. Ressalta-se, que para obter resultados comparáveis, as estruturas das torres consideradas compartilham a mesma altura, potência e têm o mesmo carregamento, considerando dados reais.

## 1.2 QUESTÕES DA PESQUISA

A pesquisa visa responder aos seguintes questionamentos:

- Qual é o estado atual da pesquisa na aplicação da metodologia da ACV para avaliar o desempenho ambiental de aerogeradores e em particular de fundações de aerogeradores?

- Qual o componente responsável por gerar a maior parcela dos impactos ambientais nas fundações de aerogeradores?

- O novo modelo de fundações para torres eólicas, com base no sistema de tensegridade, apresenta menos impactos ambientais do que fundações convencionais?

- Como a mudança nos materiais componentes da fundação e mudança nas distâncias de transporte (localização geográfica dos fornecedores) reflete no impacto ambiental da fundação da torre eólica?

- Como a variação no consumo de concreto para a fundação com base no sistema de tensegridade reflete nos impactos ambientais neste sistema?

- A utilização de diferentes métodos de avaliação de impactos de ciclo de vida impacta nos resultados da ACV?

## 1.3 LIMITAÇÕES DE PESQUISA

Neste item, são ressaltadas as limitações da pesquisa proposta nesta dissertação:

- Somente foram analisados os impactos das fundações. Os demais componentes como rotor, nacele e torre utilizados, não foram considerados na ACV, pois seriam os mesmos para as três alternativas de fundação da torre. Ressalta-se, que no caso da fundação com base no sistema de tensegridade, alguns elementos estruturais acoplados com a torre foram considerados, pois fazem parte deste sistema de fundação.

- Os dados apresentados acerca do aerogerador e das fundações convencionais direta e indireta, apesar de serem reais não foram autorizados a serem vinculados ao parque eólico de origem, uma vez que não foi autorizado citar o nome do mesmo. Assim, apenas sendo possível informar a região do Brasil onde foram obtidos os dados do parque eólico.

- Devido ao fato de algumas informações acerca dos fornecedores de materiais e insumos estarem incompletas, foi necessário supor a origem de alguns elementos. Entretanto, será realizada a análise de incerteza e a análise de sensibilidade para evitar prejuízo a pesquisa.

# 2 OBJETIVOS

## 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo da pesquisa é realizar uma Avaliação de Ciclo de Vida comparativa entre três tipos de fundação: fundação direta convencional, fundação indireta convencional e a fundação com base no sistema de tensegridade de um aerogerador hipotético localizado na região Nordeste do Brasil.

## 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar um estudo de ACV comparativa de três sistemas de fundação: fundação direta convencional, fundação indireta convencional e fundação com base no sistema de tensegridade;

- Comparar os resultados da ACV proveniente de diferentes métodos de avaliação de impacto para as mesmas categorias de impacto;

- Avaliar diferentes eficiências ambientais de materiais a partir de traços de concreto, que contenham resíduos ou subprodutos industriais como adição, como: cinza volante e escória de alto forno;

- Avaliar resultados obtidos através da variação das distâncias de transporte dos componentes do sistema de fundação.

- Avaliar como a variação no consumo de concreto na fundação com base no sistema de tensegridade influenciam nos resultados das categorias de impacto.

# 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 3.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir, serão apresentados conceitos e definições gerais que fundamentam este estudo.

### 3.1.1 Energia Eólica

A energia eólica está entre as fontes de energia sustentável mais promissoras. Sendo uma energia limpa, inesgotável e renovável, a energia eólica é fundamental para a mitigação das mudanças climáticas, dado que contribui no cumprimento de metas de redução nas emissões de gases de efeito estufa (GERVÁSIO *et al*., 2014).

A energia de fonte eólica é gerada por aerogeradores, que convertem a energia cinética do vento em energia elétrica. A transformação energética se dá com a captura da energia do vento através de pás aerodinamicamente projetadas e sua conversão em energia mecânica rotativa para realizar o acionamento de conjuntos de engrenagens de redução e eixos acionadores do gerador elétrico (BLAABJERG *et al*., 2004).

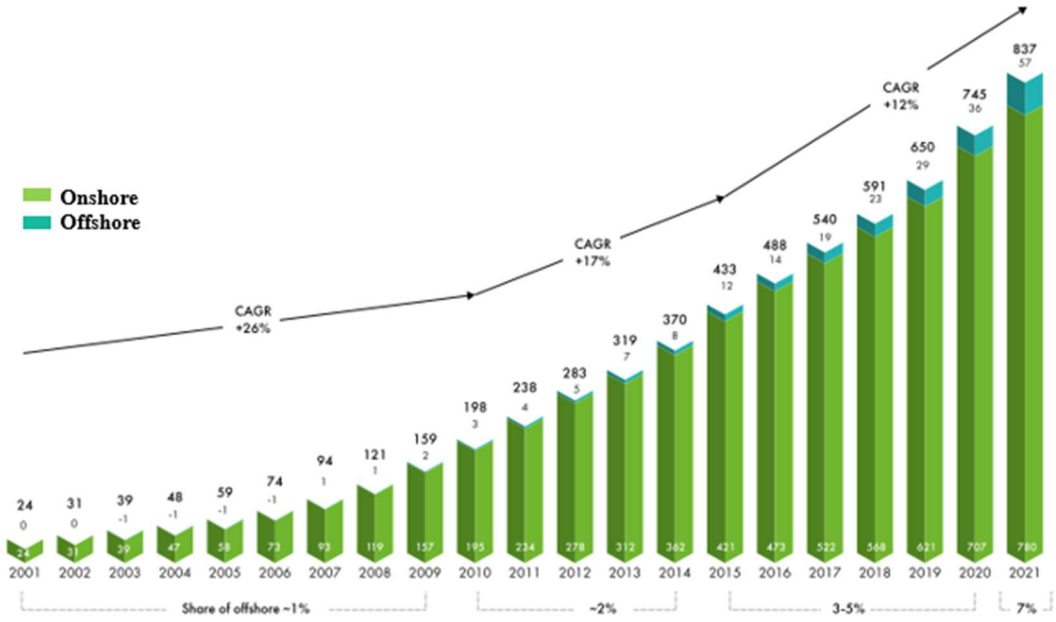
Além do funcionamento dos aerogeradores não gerarem gases poluentes e resíduos, sua implementação reduz a dependência energética aos combustíveis fósseis, uma vez que, os mesmos não necessitam de abastecimento de combustível. Outra vantagem desta fonte energética, é a possibilidade da execução de atividades em paralelo ao funcionamento da usina eólica, como a agricultura e a pecuária. Ressalta-se ainda, que os parques eólicos são reversíveis, ou seja, no seu fim de vida útil o terreno pode ser recuperado, bem como, a flora da região (BARBOSA FILHO; AZEVEDO, 2013; PESTANA, 2016).

Ao avaliar o impacto ambiental das instalações de geração de energia, não se deve levar em consideração apenas o estágio da operação, onde a energia eólica emite quase zero dióxido de carbono, mas também sua fabricação, etapas de transporte, instalação e desmontagem (STAVRIDOU; KOLTSAKIS; BANIOTOPOULOS, 2019). Os impactos decorrentes da implantação e operação de uma usina eólica estão relacionados a supressão da vegetação, perda de habitat pela fauna, degradação da área afetada, a alteração do nível hidrostático do lençol freático, e ainda no meio socioeconômico, devido a emissão de ruído, impacto visual, interferências eletromagnéticas, efeito estroboscópico e as interferências locais (BARBOSA FILHO; AZEVEDO, 2013).

#### 3.1.1.1 Panorama Mundial

O crescimento da produção de energia elétrica, por via da energia eólica, já é uma realidade mundial, em 2021 as novas instalações propiciaram o aumento de 93,6 GW em relação a 2020, compondo assim, a capacidade eólica global cumulativa de 837 GW (GWEC, 2022), vale ressaltar que a produção brasileira no mesmo ano era referente a 2,57% da capacidade global. A Figura 1 apresenta o histórico de crescimento da capacidade eólica mundial em 19 anos.

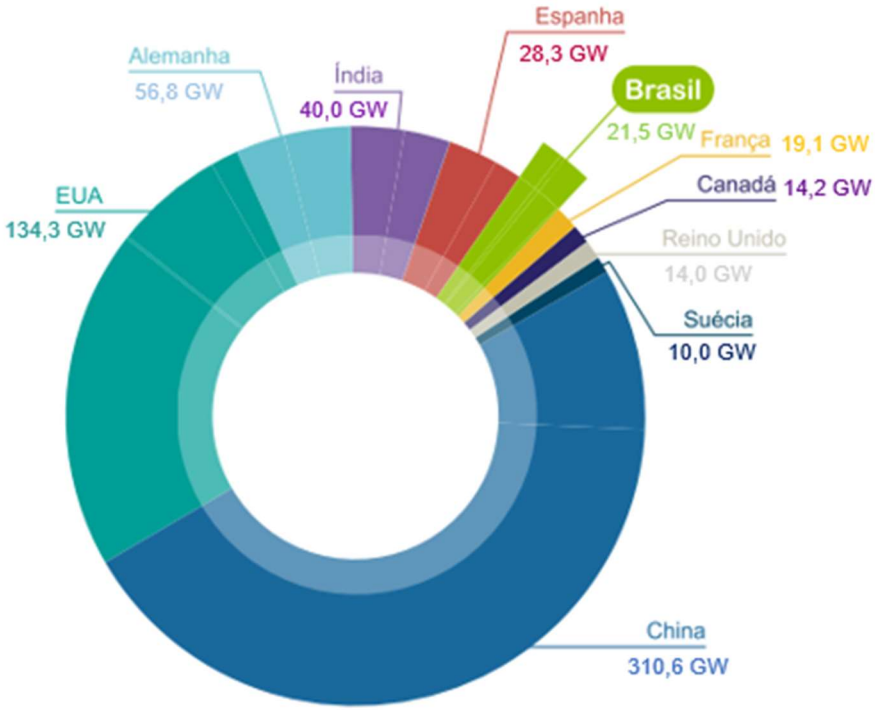
Figura 1- Crescimento eólico mundial




Fonte: GWEC, 2022, p.111.

A Figura 2 mostra os países com maior produção eólica *onshore* em nível mundial, onde a China se encontra na primeira posição, com uma potência instalada de cerca 310,6 GW. Em seguida, os Estados Unidos com 134,3 GW, e só depois aparece a maior potência europeia (Alemanha) com 56,8 GW. O Brasil encontra-se na sexta posição no Ranking Mundial de capacidade eólica acumulada elaborado pelo *Global Wind Energy Council* (GWEC).

Figura 2- Ranking da capacidade total instalada onshore



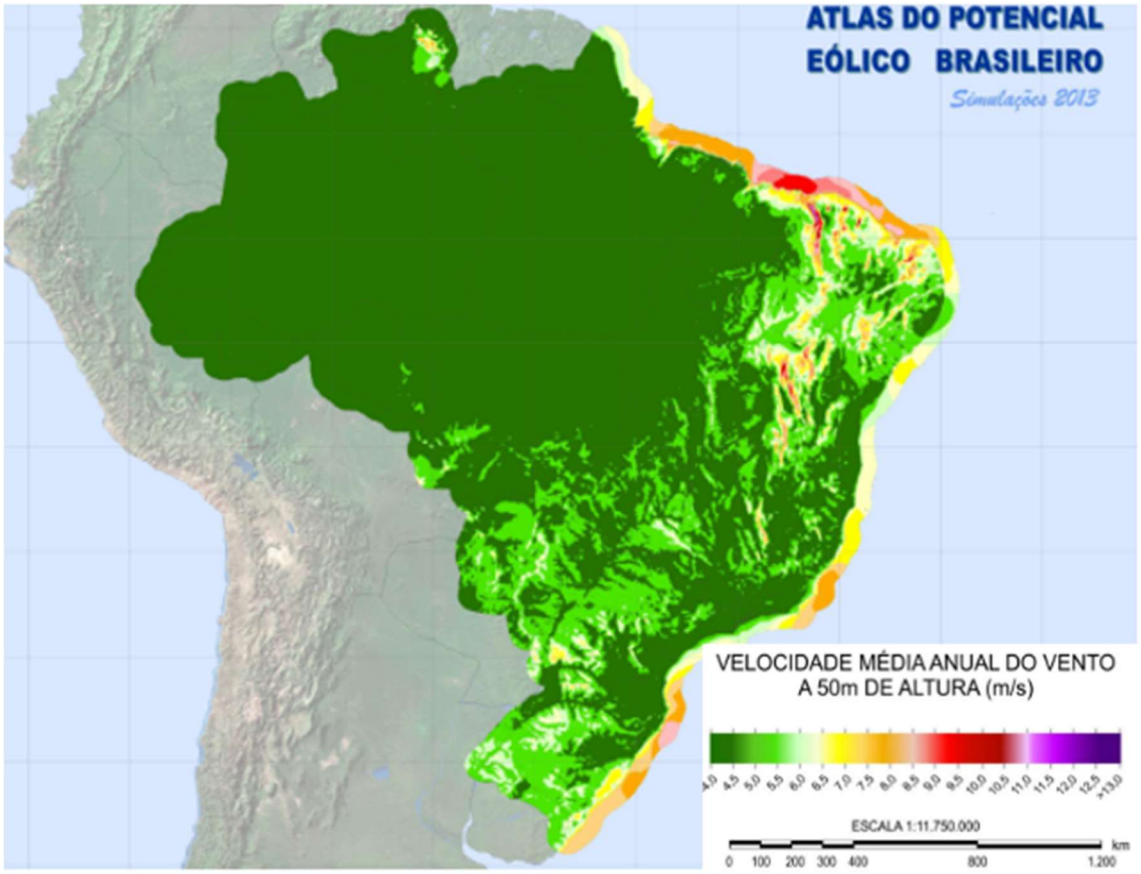

Fonte: Adaptado de ABEEólica, 2022.

O crescimento da energia eólica na matriz energética asiática, tem sido conduzido principalmente pela China e pela Índia, que dispõem de forte estímulo de seus governos, por meio de investimentos diretos e de medidas regulatórias, além de metas quinquenais de geração de energia renovável (LAGE; PROCESSI, 2013).

3.1.1.2 Panorama Nacional

Os ventos no território brasileiro se caracterizam por uma presença duas vezes superior à média mundial e pela volatilidade de 5% (oscilação da velocidade), o que permite a maior previsibilidade da quantidade de energia a ser produzida (ANEEL, 2008). Outra vantagem na geração eólica no Brasil, é que a velocidade dos ventos costuma ser maior em períodos de estiagem, assim é possível operar as usinas eólicas em sistema complementar com as usinas hidrelétricas, de forma a preservar a água em períodos de poucas chuvas (ANEEL, 2008). Vale ressaltar que, o potencial de expansão hidráulica do País caminha para o esgotamento nos próximos anos, sendo assim, ainda mais necessário aumentar a diversificação de sua matriz energética, preferencialmente com outras fontes renováveis de energia (ASPE, 2009). A Figura 3 apresenta o mapa do potencial eólico brasileiro *onshore* a 50 m de altura.

Figura 3- Potencial Eólico Brasileiro




Fonte: CEPEL, 2017, p. 19.

No Brasil, o interesse por essa fonte energética foi manifestado de modo efetivo em 2002, a partir da criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA), que possibilitou a implantação de algumas usinas no litoral nordestino e no Sul brasileiro (LAGE; PROCESSI, 2013). No entanto, o processo mais acelerado de expansão do uso da fonte eólica na sua matriz

elétrica ocorreu apenas em 2014, com incremento anual acima de 1 GW, em grande parte graças ao lançamento por parte do Governo Federal de leilões de comercialização de energia contemplando esta fonte e também à elevação de sua competitividade ante outras opções de geração (BEZERRA, 2019).

Neste contexto, em 2021, totalizou-se 795 usinas instaladas e 21,57 GW de potência eólica, representando assim, a participação de 11,8% da matriz elétrica brasileira, além de colocar o Brasil na sexta posição no Ranking Mundial de capacidade eólica acumulada elaborado pelo GWEC (ABEEÓLICA, 2022).

Entretanto, vale ressaltar, que diversos estados brasileiros possuem pouca exploração dessa fonte energética. O Espírito Santo, por exemplo, importa 52% da energia elétrica que consome, sendo o consumo total em 2020 de 9.938 GWh, contudo ressalta-se o potencial de geração de energia eólica muito promissor do Estado, de 1,79 GW a 75 m de altura para áreas com ventos iguais ou superiores a 6,5 m/s (ASPE, 2009; ARPS, 2021). O mapeamento do Potencial Eólico do Espírito Santo evidenciou duas principais regiões no Estado, o litoral de Linhares, que apresenta baixa rugosidade do terreno e um excelente regime de ventos, e o Litoral Sul, cujo melhor potencial se concentra na faixa de extensão dos municípios de Presidente Kennedy e Marataízes. Todavia, o licenciamento ambiental é um dos principais entraves ao desenvolvimento da energia eólica na região, sobretudo devido à forte concomitância de reservas ambientais ou terras indígenas com áreas de melhores regimes de ventos (CATTAN, 2019).

#### 3.1.1.3 Região Nordeste

O subsistema Nordeste, devido ao seu enorme potencial eólico, foi detentor de 88,7% da geração de energia eólica de todo País em 2021, o que corresponde a geração de 63,20 TWh (ABEEÓLICA, 2022). Esta realidade é corroborada ainda com o fato de que os períodos de seca da região Nordeste do Brasil apresentam ventos mais fortes e intensos, possibilitando assim, a operação das usinas eólicas no período em que os reservatórios das hidrelétricas estão baixos (OLIVEIRA NETO; LIMA, 2016).

O bom resultado também é consequência das políticas de incentivo e do aumento na quantidade de parques eólicos em 2021, por exemplo, os estados contemplados com os novos empreendimentos foram Rio Grande do Norte, Bahia, Paraíba, Ceará, Piauí, Pernambuco e Santa Catarina com 42, 33, 15, 9, 8, 2 e 1 parques, respectivamente (ABEEÓLICA, 2022). A Figura 4 apresenta a distribuição dos parques eólicos no Brasil, sendo evidente a predominância dos empreendimentos no Nordeste.

Figura 4- Disposição dos parques eólicos nos estados brasileiros

Fonte: ANEEL, 2021.

No Plano Decenal de Expansão de Energia 2027, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética, prevê-se o esgotamento do potencial hidrelétrico economicamente viável da região em questão, o que corrobora para o incremento da participação da fonte eólica na geração de energia elétrica do Nordeste, prova disso, é que inúmeros projetos de parques eólicos têm sido contemplados nos últimos leilões de energia e outros estão previstos para entrar em operação nos próximos anos (BEZERRA, 2019).

### 3.1.2 Aerogeradores

Os aerogeradores podem ser divididos tipicamente de acordo com a posição do eixo em torno do qual giram as pás (eixo horizontal e de eixo vertical), de acordo com o número de pás e com a orientação do vento (a jusante a montante).

O projeto mais antigo de rotores eólicos, apresenta rotores com eixo vertical de rotação. As vantagens específicas do aerogerador de eixo vertical estão atreladas ao seu *design* simples, que possibilita alojar componentes mecânicos e elétricos, caixa de engrenagens e gerador no nível do solo, o que torna o fácil acesso para a sua manutenção, além de não ser necessário nenhum mecanismo de orientação do rotor com o vento (HAU, 2006).

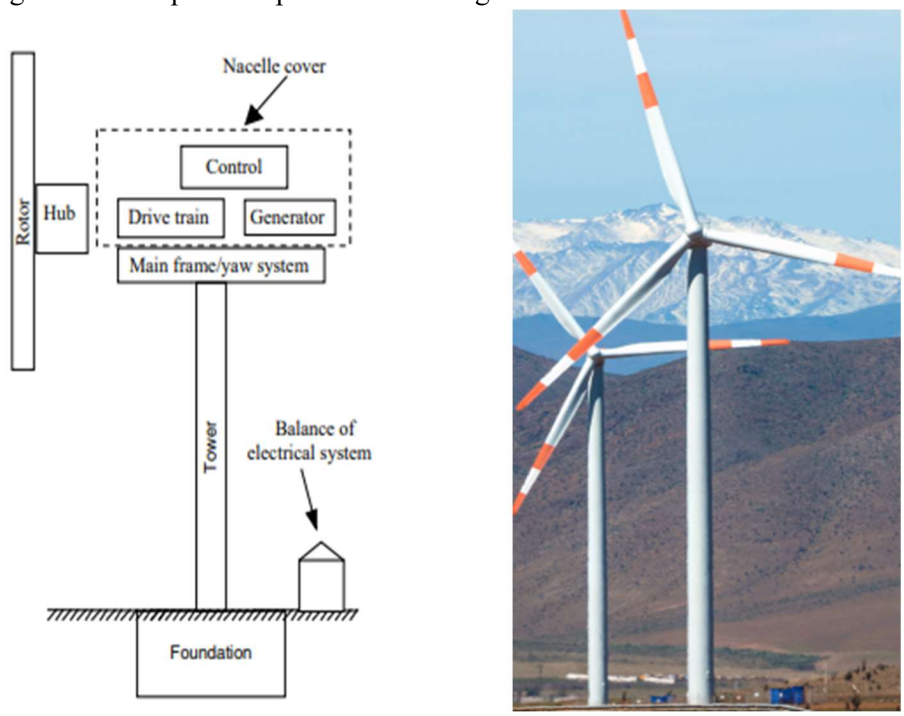
Contudo, nas desvantagens tem-se a baixa altitude do rotor em relação ao solo, o que implica, na baixa taxa de velocidade de ponta, sua incapacidade de iniciar automaticamente e não ser capaz de controlar a potência ou velocidade lançada as pás do rotor (HAU, 2006).

Os aerogeradores de eixo horizontal, por sua vez, são predominantes em parques eólicos no Brasil e no mundo. Em aerogeradores de eixo horizontal, a velocidade do rotor e a saída de potência podem ser controladas pela inclinação das pás do rotor, além disso, tal controle é a proteção mais

eficaz contra o excesso de velocidade, especialmente em grandes aerogeradores. Outra vantagem é a forma da pá do rotor, que pode ser otimizada aerodinamicamente para alcançar sua maior eficiência (HAU, 2006).

O aerogerador de eixo horizontal, o qual possui ênfase no presente trabalho, é constituído por três partes fundamentais: Rotor, Nacele e Torre (Figura 5).

Figura 5- Principais componentes do aerogerador de eixo horizontal




Fonte: Manwell; Mcgowan; Rogers, 2009, p. 4; GWEC, 2021, p. 55.

Segundo Pinto (2013) e Manwell (2009):

- Cubo (*hub*)- estrutura na qual são fixadas as pás.
- Rotor (*rotor*)- formado pelas pás e pelo cubo do rotor, frequentemente considerado o elemento mais importante do aerogerador, por ser o equipamento responsável pela conversão da energia cinética do vento em energia mecânica;
- Sistema de transmissão (*drive train*)- consiste nas partes rotativas do aerogerador à exceção do rotor, isso inclui: o eixo de baixa velocidade (eixo do rotor), a caixa de engrenagem, o eixo de alta velocidade (eixo do gerador), o acoplamento, o freio e as partes rotativas do gerador;
- Sistema de controle (*control*)- ajusta e monitora eletronicamente os parâmetros do sistema para que o aerogerador atinja o rendimento máximo para todo o tipo de condições atmosféricas;
- Gerador (*generator*)- equipamento que converte a energia mecânica em energia elétrica;
- Nacele (*nacelle*)- estrutura montada em cima da torre onde estão contidos o gerador, o sistema de transmissão, sistema de controle e sistema de direção.
- Torre e fundação (*tower and foundation*)- estruturas de sustentação, as torres mais comuns são as tubulares (constituídas em aço, concreto armado ou híbridas de aço e concreto), treliçadas e atirantadas. As fundações por sua vez utilizam tipicamente o concreto armado.

Atualmente, são fabricados aerogeradores com uma, duas e três pás. O uso de um aerogerador com uma ou duas pás tem a vantagem de representar uma possível economia em conformidade do custo e peso do rotor, contudo por ter uma menor eficiência do que um rotor de três pás, é necessário que este rode a uma velocidade muito superior de forma a produzir a mesma energia, o que faz o uso de três pás mais utilizado (PESTANA, 2016).

Quanto à configuração, os sistemas a jusante apresentam a vantagem de serem orientados pelo próprio vento incidente. Contudo, eles apresentam redução da velocidade dos ventos, pois a pá passa por detrás da torre, dessa forma, a torre tornar-se um obstáculo para o vento. Por sua vez os sistemas a montante precisam de um mecanismo mais avançado de orientação, todavia sua operação é mais suave, fornecendo uma potência maior (GAMA, 2015).

Com o passar dos anos a tendência do aumento do tamanho dos aerogeradores é evidente, dado que as pás mais longas permitem uma maior área de varredura e possibilitam captar ventos com velocidades médias mais altas e constantes, com pouca ou nenhuma turbulência. Segundo Junges (2016), em 2001, quando o Atlas Eólico Brasileiro foi desenvolvido, os aerogeradores que existiam no Brasil tinham no máximo 50 m, que é o caso do Parque Eólico de Palmas, no Paraná, pioneiro no Sul do País que tem até hoje máquinas com 48 metros. A autora ainda afirma que graças aos avanços tecnológicos, os atlas eólicos de alguns estados como Rio Grande do Sul e Bahia já consideram torres de 100 e 150 metros.

Além do aperfeiçoamento da altura das torres, houve também o desenvolvimento de equipamentos com maior potência nominal. A tendência atual no mundo para geração de energia a partir dos ventos se baseia na utilização dos grandes aerogeradores, isto é, entre 1,5 MW e 3,0 MW para parques eólicos *onshore* e dado os recentes avanços, aerogeradores ainda maiores se tornam uma realidade (BERNDT, 2015).

No Brasil, em 2018 a média das potências nominais dos aerogeradores de parques eólicos *onshore* nos Leilões de Energia era de 2,7 MW (EPE, 2020). Já no Estado de Pernambuco, região na qual este estudo se baseia, existem atualmente 37 empreendimentos em operação com 899 365 kW de potência outorgada e a média de potência dos aerogeradores é de aproximadamente 2 MW (ANEEL, 2022).

### 3.1.3 Fundações de torres eólicas

A fundação é o elemento construtivo que vai fazer a ligação entre o conjunto da torre e o solo, assim este elemento está sujeito a suportar todas as cargas estáticas, como o peso próprio, e as dinâmicas, como o vento e os sismos (SILVA, 2014). A fundação de um aerogerador deve ser capaz de manter a estrutura vertical e estável sob as condições de projeto mais extremas (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009).

O concreto armado é o material mais comumente utilizado em fundações de torres eólicas. O concreto utilizado normalmente consiste em uma mistura de cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo, água e aditivos que visem melhorar a trabalhabilidade (BERNDT, 2015). Segundo Araújo (2018), estas fundações chegam a demandar mais de 300 metros cúbicos de concreto e 20 toneladas de aço na sua construção.

Justamente pelo grande volume de concreto utilizado na fundação, é que as emissões de $CO_2$ da produção de cimento Portland tornam este elemento construtivo um dos maiores contribuintes para os impactos ambientais dos aerogeradores (BERNDT, 2015). Ressalta-se ainda, que

materiais cimentícios suplementares, como cinzas volantes, escória granulada de alto forno, dentre outros, têm sido utilizados como substitutos parciais do cimento Portland na busca pela redução de emissões de $CO_2$.

De modo geral, as fundações de torres eólicas podem ser divididas em profundas (indiretas) e superficiais (diretas).

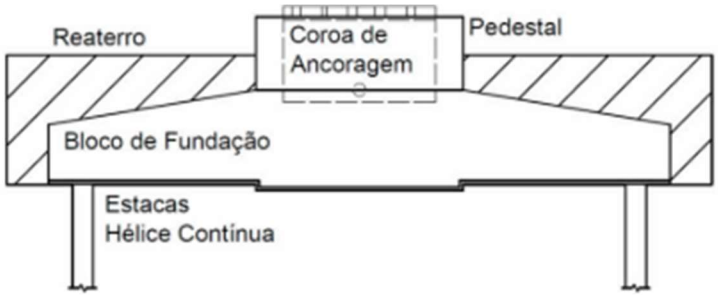
3.1.3.1 Fundações profundas

Este tipo de fundação é empregada em casos onde o solo que apresenta as características geotécnicas, necessárias para suportar as cargas impostas pela torre, se encontram muito abaixo da superfície do terreno (SILVA, 2014). Em fundações profundas, as cargas são transmitidas da superestrutura para o solo, ou rocha, além de sua base, através da sua superfície lateral. A carga resistida através do contato de sua área lateral com o solo, recebe o nome de resistência de fuste ou atrito lateral, enquanto a carga resistida pela base é conhecida por resistência de ponta. A combinação dessas duas resistências representa a carga total resistida por este elemento (CINTRA; AOKI, 2010).

Em fundações de aerogeradores, as estacas empregadas devem suportar todos os efeitos aos quais a estrutura estiver submetida, dessa forma, os tipos de estacas indicadas são as metálicas e pré-moldadas cravadas (armadas ou protendidas), além das estacas escavadas, em especial, a hélice contínua, por sua praticidade (BERTUZZI, 2013). Segundo Cintra e Aoki (2010), à estaca raiz, poderia ser uma solução alternativa por apresentar bons resultados de resistência, contudo os autores ressaltam o custo elevado desta opção de projeto.

A Figura 6 apresenta o desenho esquemático da fundação de uma torre eólica do Complexo Eólico do Corredor do Senandes, no Rio Grande do Sul.

Figura 6- Bloco de fundação sobre estacas




Fonte: Bertuzzi, 2013, p.87.

Segundo Bertuzzi (2013), nessa obra optou-se por estacas hélices contínuas dispostas em uma circunferência, ao todo 24 estacas, cada uma delas com 60 cm de diâmetro e profundidade média de 12,50 m, espalhadas simetricamente a uma distância de 8 m do centro. A Figura 7 apresenta a montagem da armadura do bloco de fundação desta mesma obra.

Figura 7- Montagem da armadura do bloco de fundação.

Fonte: Bertuzzi, 2013, p. 82.

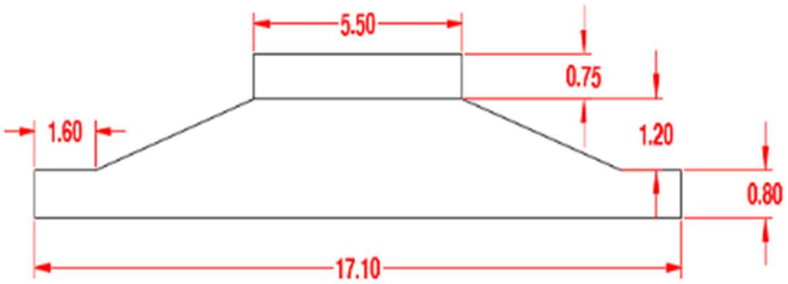
Outro exemplo da utilização de fundação estaqueada, ocorreu na região pantanosa e costeira da Alemanha, próxima ao Mar do Norte. Nessas áreas, as camadas sólidas de areia da plataforma continental, em alguns casos, localizam-se a profundidades de 20 a 25 metros. Desta forma, para aerogeradores de porte médio, estacas de até 20 metros de comprimento foram utilizadas na transferência dos esforços para o solo (HAU, 2006).

3.1.3.2 Fundações superficiais

A fundação mais utilizada é a sapata isolada, cujo dimensionamento dependerá das características do aerogerador e da torre, assim como, da constituição do solo, estas fundações são recomendadas em solos com características geotécnicas com resistência considerável a pouca profundidade da superfície do terreno (GOUVEIA, 2013; SILVA, 2014).

As sapatas utilizadas em torres eólicas têm a forma circular, retangular ou poligonal. Os requisitos de massa e as dimensões das sapatas são determinados pelo momento de tombamento das estruturas, que é resistido pelo peso do rotor, da nacele, da torre e da própria fundação (HAU, 2006). A Figura 8 apresenta a geometria da sapata estudada em Gonçalves (2018) e a Figura 9 apresenta a fase de construção dela.

Figura 8- Vista lateral da fundação




Fonte: Gonçalves, 2018, p. 48. Nota: medida em metros.

Figura 9- Concretagem da sapata

Fonte: Gonçalves, 2018, p. 49.

Segundo Silva (2014), a secção mais utilizada é a circular, tendo em vista a distribuição uniforme das forças na sapata, independentemente da direção do vento, ao contrário das sapatas retangulares ou poligonais, onde ocorrem sobrecargas nas esquinas. O autor ainda cita, que o volume de concreto e quantidade de aço necessários para a execução de sapatas circulares são menores, o que gera economia de materiais.

### 3.1.3.3 Fundações com base no sistema de tensegridade

As estruturas baseadas no sistema de tensegridade, são estruturas espaciais e reticuladas, em que todos os elementos estão sujeitos unicamente a esforços axiais, sejam eles de compressão ou de tração. Os elementos comprimidos são, geralmente, barras ou escoras, enquanto os elementos tracionados são, geralmente, cabos que devem ser pré-esforçados (RODRIGUEZ, 2014).

Estas estruturas são mais esbeltas e leves que as estruturas usuais na engenharia civil, possibilitando a utilização de materiais de forma muito econômica, por isso é necessária uma quantidade reduzida de energia para conseguir obter alterações na geometria ou rigidez das estruturas (ALI; SMITH, 2010).

O modelo de tensegridade tem sido aplicado para diversos tipos de estruturas, um exemplo de sua utilização é a *wind fence,* uma barreira para controlar a velocidade do vento incidente sobre áreas de estocagem, cujo objetivo é evitar a emissão de poeira. Esse sistema permite a redução significativa dos volumes de concreto aplicados nas fundações (METALVIX ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA; MCA TECNOLOGIA DE ESTRUTURAS, 2016). A Figura 10 ilustra esta estrutura em funcionamento.

Figura 10- *Wind fence*

Fonte: Metalvix Engenharia e Consultoria Ltda; MCA Tecnologia de Estruturas 2016, p. 8.

De modo muito similar a estrutura utilizada na *wind fence,* tem-se a *wind tower*, tecnologia com registro de patente nos Estados Unidos (US n. 10,513,866 B2). Adaptando-se aos projetos originais de torres eólicas, nesta tecnologia a torre com base no sistema de tensegridade substitui apenas a seção inferior da original (aproximadamente um terço da altura da torre) e sua fundação, fornecendo a rigidez e estabilidade necessária, tanto na operação do aerogerador, quanto em não operação (BRANDÃO *et al*., 2019). A Figura 11 ilustra a tecnologia estudada.

Figura 11- *Wind tower*

Fonte: Metalvix Engenharia e Consultoria Ltda; MCA Tecnologia de Estruturas, 2016, p. 18.

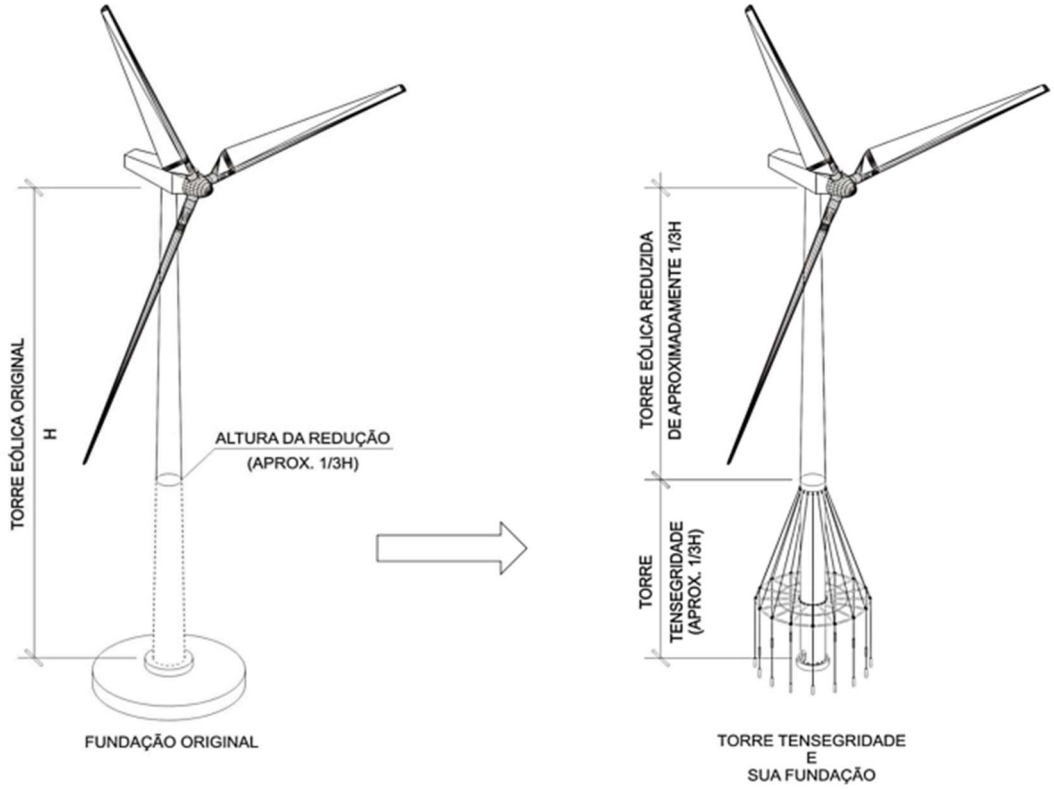
As extremidades superiores dos elementos estruturais de tração inclinados, são fixadas à coluna central através de um anel de conexão, localizado a cerca de 1/3 da altura total da torre, e as inferiores são fixadas às extremidades livres dos braços de uma cruzeta de tubos de compressão (BRANDÃO *et al*., 2019). A extremidade externa de cada uma das barras que compõem a cruzeta de barras de compressão, também possui outra conexão para receber os elementos estruturais verticais de tração, que são tensionados por esticadores e ancorados no solo, em fundações independentes no entorno da fundação do tubo central (BRANDÃO *et al*., 2019).

A fundação no solo é composta por uma base central e pontos de ancoragem. Sobre a coluna central tubular, acima do anel de conexão, é montada a parte superior da torre, em estrutura convencional, complementando os 2/3 superiores da altura total da torre eólica (BRANDÃO *et al*., 2019).

A utilização de tais sistemas, para torres eólicas reduz em até 90% o volume de aterro, reaterro e de concreto da fundação, evitando a necessidade de uma central de concreto, além disso, ocorre a redução no peso de aço em cerca de 90% e redução da área de formas em cerca de 65%, tratando-se de uma estrutura menos intensiva em materiais, se comparada as fundações convencionais (METALVIX ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA; MCA TECNOLOGIA DE ESTRUTURAS, 2016).

A Figura 12 ilustra uma fundação convencional ao lado da fundação com base no sistema de tensegridade.

Figura 12- Fundação direta convencional *versus* fundação com base no sistema de tensegridade.




Fonte: Metalvix Engenharia e Consultoria Ltda; MCA Tecnologia de Estruturas, 2016, p. 20.

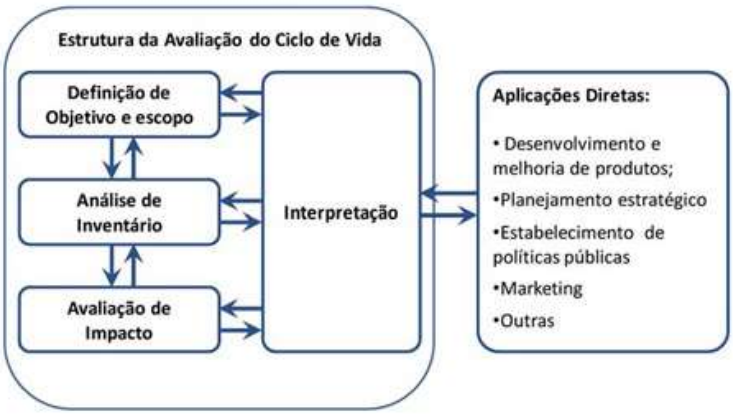
### 3.1.4 Avaliação do ciclo de vida (ACV)

Graças a ênfase dada as questões ambientais, muitas empresas vêm aprimorando suas práticas de desenvolvimento sustentável, sendo estimuladas por órgãos de controle ambiental e pela grande mídia, os quais, refletem o interesse global pela redução dos impactos ambientais (ZANELLATO, 2016).

Nesse contexto, a ACV surgiu a partir da necessidade de desenvolver métodos para melhor compreender e lidar com os diversos e possíveis impactos associados aos produtos e serviços (CONMETRO, 2010). Segundo a NBR 14040 (ABNT, 2014a), a ACV enfoca os aspectos ambientais e os potenciais impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento, pós-uso, reciclagem, até a disposição final. Durante a avaliação das cargas ambientais, é quantificado o fluxo de energia, consumo de material, resíduos e emissões liberadas, avaliando alternativas para melhoria ambiental (CONMETRO, 2010).

Um estudo de ACV é composto por quatro fases: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação, como observado na Figura 13 (ABNT, 2014a).

Figura 13- Fases de uma ACV




Fonte: NBR 14040 (ABNT, 2014a).

3.1.4.1 Definição de objetivo e escopo

Um escopo adequado é aquele que estabelece os sistemas analisados, unidade funcional e o limite do sistema. Segundo a NBR 14044 (ABNT, 2014b), a unidade funcional tem o propósito de fornecer uma referência, à qual os dados de entrada e saída são normalizados, sendo portanto, a unidade de controle que quantifica os impactos ambientais.

Já as fronteiras do sistema, definem os processos elementares a serem considerados na ACV. Os processos industriais, por vezes, englobam centenas de fluxos com uma enorme quantidade de elementos, por isso, a definição dos limites do estudos deve ser feita tendo em vista o objetivo da pesquisa (ZULCÃO, 2018).

As fronteiras para a ACV podem incluir as fases de: extração da matéria-prima (berço), manufatura do material (portão), transporte e construção (canteiro), operação (operação e manutenção), demolição (túmulo) e por fim, considerando o reaproveitamento dos componentes e seu retorno ao início da cadeia de produção (berço).

Ainda nesta etapa, devem ser definidos os objetivos de qualidade dos dados (*Data quality goals* – DQG). O DQG, visa orientar o levantamento de dados de inventário, através do estabelecimento dos objetivos da representatividade desejada (ZULCÃO, 2018). Dentre os objetivos a serem

definidos no DQG tem-se: representatividade temporal, representatividade geográfica, representatividade tecnológica, confiabilidade dos dados e integridade dos dados.

Com base no alinhamento dos dados ao DQG, atribuem-se os indicadores de qualidade dos dados (*Data quality indicator-DQI*) para cada fluxo analisado, usualmente utiliza-se uma matriz de avaliação de qualidade dos dados para este procedimento (WEIDEMA *et al*., 2013).

Vale ressaltar, que em um estudo comparativo, o escopo deve ser definido para garantir a equivalência dos sistemas que estão sendo comparados. Para isso, deve-se utilizar a mesma unidade funcional e considerações metodológicas equivalentes, tais como, fronteira do sistema, qualidade dos dados, procedimentos de alocação, regras para decisões quanto à avaliação de entradas e saídas e avaliação de impacto (ABNT, 2014b, p.11).

#### 3.1.4.2 Análise de inventário de ciclo de vida - ICV

A análise de inventário envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas de um sistema de produto (ABNT, 2014a). O ICV documenta as informações sobre a quantidade de energia, materiais, emissões, dentre outras, ao longo do ciclo de vida do objeto de estudo, as quais, são fundamentais para a realização de estudos de impactos ambientais, (CONMETRO, 2010).

Os dados utilizados em uma ACV, devem ser de primeiro e segundo plano. Os dados de primeiro plano, são específicos de um sistema ou produto em particular, geralmente, são coletados de indústrias específicas, por meio de questionários ou relatórios. Já os dados de segundo plano, são dados de cadeias de fornecedores de materiais genéricos, energia, transporte e gerenciamento de resíduos, estes são usualmente provenientes das bases de dados e da literatura (GOEDKOOP *et al*., 2013).

Para facilitar a coleta de dados de cada processo unitário que compõe o ciclo de vida de um produto ou processo, existem base de dados consolidadas que fornecem informações para a construção do inventário. O Quadro 1, apresenta as principais bases de dados utilizadas, além de seus desenvolvedores, país de origem, principal fonte de dados e representatividade geográfica, ressalta-se que dentre as bases analisadas o GaBi e o Ecoinvent são os que mais se destacam.

Quadro 1- Visão geral das bases de dados

| Base de dados | Desenvolvedor | País de origem | Principal fonte de dados | Representatividade geográfica |
|---|---|---|---|---|
| **GaBi** | PE International | Alemanha | Dados industriais, dados da literatura, outros bancos de dados | Global |
| **Ecoinvent** | Centro Suíço para Inventários de Ciclo de Vida | Suiça | Dados industriais, dados da literatura | Global |
| **IBO** | Instituto Austriaco de Construção Ecologica | Áustria | Dados industriais, dados da literatura, outros bancos de dados | Áustria e países vizinhos |
| **CFP** | Associação das Indústrias do Japão | Japão | Dados estatísticos, dados da literatura | Japão |
| **GEMIS** | Instituto Öko | Alemanha | Pesquisa acadêmica, outros bancos de dados ACV. | Global, Alemanha, outros países |
| **EXIOBASE** | Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia, Organização Holandesa de Pesquisa Científica Aplicada, Sustainable Europe Research Institute, Instituto de Ciências Ambientais , Instituto de Economia Ecológica da Universidade de Economia e Negócios de Viena, 2.-0 LCA Consultants | União Europeia | Pesquisa acadêmica, dados industriais | Global |
| **Synergia** | Instituto Finlandês do Meio Ambiente | Finlândia | Dados industriais, dados da literatura | Finlândia |
| **SICV Brasil** | Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia | Brasil | Pesquisa acadêmica, dados industriais | Brasil |

Fonte: Adaptado de Takano *et al*. (2014).

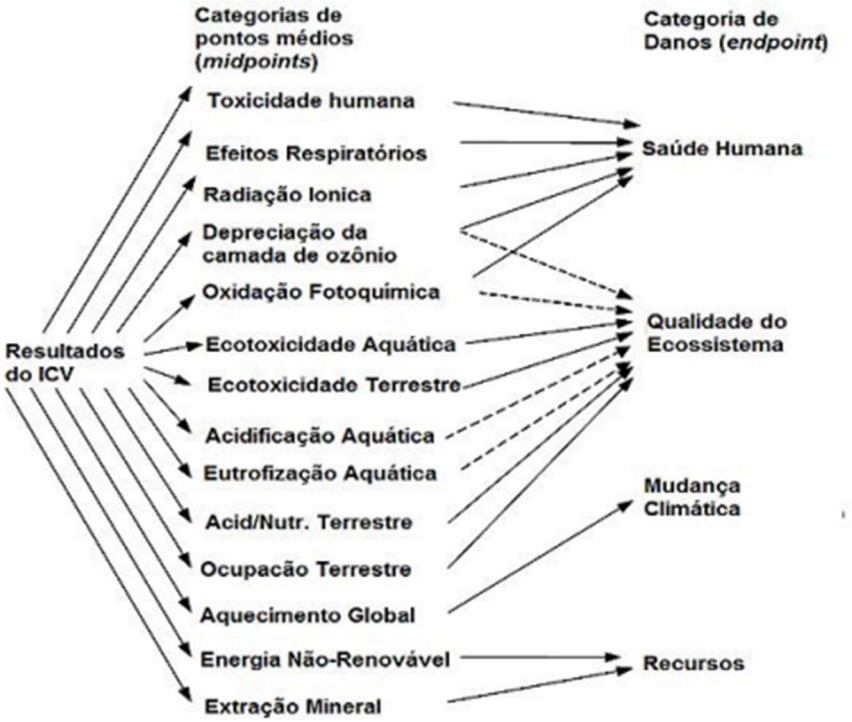
Os estudos nacionais de ACV, por falta de um banco de dados próprio para subsidiar os dados de segundo plano, utilizam banco de dados estrangeiros, o que pode causar problemas de falta de representatividade dos dados (ZULCÃO, 2018).

### 3.1.4.3 Avaliação de impacto de ciclo de vida- AICV

Na avaliação de impacto de ciclo de vida, os resultados da análise de inventário são interpretados em termos dos impactos que eles têm no ambiente (UNEP, 1996). Os métodos de avaliação podem ser classificados em: (1) direcionado a problemas (*midpoints*), em que os impactos são classificados em temas ambientais; e (2) direcionado a danos (*endpoints*), agrupando os impactos sobre questões gerais - saúde humana, ambiente natural e recursos - tornando a compreensão mais simples, mas com menos resultados transparentes (RASHID; YUSOFF, 2015).

As categorias de impacto *midpoints,* geralmente são quantificadas em relação à uma substância referência, por exemplo, para o aquecimento global é utilizado como unidade padrão Kg equivalente de dióxido de carbono na atmosfera, dessa forma, as demais substâncias contribuintes para esse impacto são transformadas em uma unidade equivalente. Por fim, através da multiplicação por fatores de caracterização de danos, provenientes do método de impacto escolhido, os *midpoints* são transformados em *endpoint* (ZANELLATO, 2016), conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14-Categorias de impactos de pontos médios e danos para o método *IMPACT* 2002+.




Fonte: Piekarski *et al*., 2013, p. 7.

Pelo fato dos métodos *endpoint* serem direcionados aos danos, são geralmente considerados mais relevantes perante os tomadores de decisão, contudo, possuem alta subjetividade. Por outro lado, os métodos *midpoint* apresentam menor subjetividade, mas possuem menos relevância no suporte à tomada de decisão (BARE *et al*., 2000). O Quadro 2 apresentam-se todos os midpoints e endpoints, com suas devidas unidades, que pertencem ao método IMPACT 2002+.

Quadro 2- Caracterização das categorias de impacto

| Midpoint categorias | Substância de referência midpoint | Categoria de dano | Unidade do endpoint |
|---|---|---|---|
| Toxicidade humana (cancerígenas + não cancerígenas) | kg eq cloroetileno no ar | Saúde humana | DALY |
| Respiratório (inorgânicos) | kg eq PM2.5 no ar | Saúde humana | |
| Radiações ionizantes | Bq eq carbono-14 no ar | Saúde humana | |
| Destruição da camada de ozônio | kg eq CFC-11 no ar | Saúde humana | |
| Oxidação fotoquímica | Kg eq etileno no ar | Saúde humana | |
| | | Qualidade do ecossistema | _ |
| Ecotoxicidade aquática | kg eq trietilenoglicol na água | Qualidade do ecossistema | PDF*m²*ano |
| Ecotoxicidade terrestre | kg eq trietilenoglicol na água | Qualidade do ecossistema | |
| Acidificação/nutrição terrestre | kg eq SO2 no ar | Qualidade do ecossistema | |
| Acidificação aquática | kg eq SO2 no ar | Qualidade do ecossistema | Ainda não definida pelo método |
| Eutrofização aquática | kgeq $PO_4^{3-}$ na água | Qualidade do ecossistema | |
| Ocupação do solo | m2 eq terra arável orgânica·ano | Qualidade do ecossistema | PDF*m²*ano |
| Aquecimento global | kgeq CO2 no ar | Mudança climática | kg eq CO2 no ar |
| Energia não-renovável | MJ Total primário não renovável ou kg eq de petróleo bruto | Recursos | MJ |
| Extração mineral | MJ energia adicional ou kg eq de ferro (em minério) | Recursos | |

Fonte: Adaptado de Jolliet et. al. (2003).

A fim de facilitar a análise, alguns autores executam a normalização dos resultados que permite a comparação de diferentes categorias de impacto utilizando a mesma unidade. A normalização visa apontar qual parcela do dano total originou-se da categoria avaliada.

Existem diversos métodos de AICV, contudo os principais foram desenvolvidos majoritariamente em países da Europa, é o caso do CML 2002, Eco-indicator 99, Ecological Scarcity, EDIP, EPS 2000, *IMPACT* 2002+, MEEuP e ReCiPe (MENDES; BUENO; OMETTO, 2016). As principais metodologias de AICV, suas origens, desenvolvedores, abordagens e finalidade do método são listadas no Quadro 3.

Quadro 3-Principais metodologias de AICV.

| Método | País de origem | Desenvolvedor | Abordagem | Finalidade do método |
|---|---|---|---|---|
| CML 2002 | Holanda | CML | *Midpoint* | Fornecer melhores práticas para os indicadores *midpoint* para a operacionali.zação da série de Normas da ISO 14040:2009 (FRISCHKNECHT *et al*., 2007) |
| Eco-indicador 99 | Holanda | Pré Consultants | *Endpoint* | Desenvolver um método *endpoint*, que pode ser usado para qualquer ACV (FRISCHKNECHT et al., 2007). |
| EDIP97 / EDIP 2003 | Dinamarca | DTU | *Midpoint* | EDIP97 - Apoiar a análise ambiental e síntese de produtos para ACV industriais, abrangendo três áreas: meio ambiente, recursos e ambiente de trabalho. EDIP 2003 – Fornecer categorias de impactos não abordadas pelo EDIP97 (FRISCHKNECHT et al., 2007) |
| EPS 2000 | Suécia | IVL | *Endpoint* | Auxiliar designers e desenvolvedores de produtos na tomada de decisão (FRISCHKNECHT et al., 2007) |
| IMPACT 2002 + | Suíça | EPFL | Combinado | Proporcionar uma abordagem combinada, ligando todos os tipos de intervenções às categorias de dano: saúde humana, qualidade dos ecossistemas, alterações climáticas e de recursos (JOLLIET et al., 2003) |
| LIME | Japão | AIST | Combinado | Desenvolver categorias *midpoint* e *endpoint* e fatores de ponderação que reflitam as condições ambientais do Japão (FRISCHKNECHT et al., 2007) |
| LUCAS | Canadá | CIRAIG | *Midpoint* | Desenvolver metodologia adaptada ao contexto canadense (BULLE *et a*l., 2007) |
| ReCiPe | Holanda | RUN + PRé + CML + RIVM | Combinado | Combinar metodologias *midpoint* e *endpoint* (HUJIBREGTS et al., 2017). |
| Swiss Ecoscarcity ou Ecological Scarcity | Suíça | E2 + ESU-services | Combinado | Fornecer caracterização e fatores de ponderação de várias emissões e extrações com base em metas de políticas públicas (CAVALETT *et al*., 2012). |
| TRACI | Estados Unidos | US EPA | *Midpoint* | Desenvolver um método de avaliação de impacto que represente as condições nos EUA (BARE *et al*., 2003) |
| IPCC | Reino Unido | IPCC | *Midpoint* | Caracterizar as emissões de gases de efeito estufa baseando-se para isso no potencial de aquecimento gloabl publicado pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (FRISCHKNECHT et al., 2007). |
| MEEuP | Holanda | VhK | *Midpoint* | Fornecer uma metodologia que permita avaliar o grau de consumo de energia pelos produtos, com base nos critérios da Ecodesign of EuP Directive 2005/32/EC (KEMNA et al., 2005). |
| IMPACT World + | Canadá, Estados Unidos, Suíça, Dinamarca, França | CIRAIG da Politécnica de Montreal, Universidade de Michigan, Universidade de Ann Arbor, Quantis, Universidade Técnica da Dinamarca, Escola Politécnica de Lausanne e Cycleco | Combinado | Realizar uma avaliação de impacto regionalizada que cubra todas as regiões do mundo.Dessenvolvido a partir de modelos existentes nos métodos Impact 2002+, EDIP e LUCAS, aparesenta fatores de caracterização para diferentes resoluções geográficas, cada um com sua própria incerteza e variabilidade espacial associadas (BULLE *et al*., 2019). |
| GLAM | 28 países envolvidos | Universidade de Michigan, Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia, Universidade Técnica da Dinamarca | Combinado | Abranger a escala global, cobrindo classificação, *midpoint, endpoint,* normalização e ponderação para avaliar os impactos do ciclo de vida de sobre saúde humana, ecossistema e recursos naturais (ACV, 2021). |

Fonte: Elaborado pela autora com base em Florindo *et al.* (2015); Mendes; Bueno; Ometto (2016); Frischknecht et al. (2007); *Life cycle initiative* (2021).

Cada método de AICV possui uma particularidade, um objetivo e um escopo diferente, portanto, as características e os objetivos pretendidos é que determinarão a escolha entre eles, sendo ela crucial para que os resultados obtidos apresentem maior confiabilidade (ARBAUT *et al*. 2014).

A utilização de um *software* para realização de um estudo de ACV é fundamental, devido a necessidade de manipular grande quantidade de dados, além da concessão que eles têm de acesso as bases de dados e metodologias de análise de impacto.

Segundo Netto e Lucente (2016), os *softwares* mais relevantes disponíveis no Brasil são:

a) SimaPro: criado pela empresa holandesa PreConsultants, vem com uma base de dados completa, Inventário de Ciclo de Vida e diversos métodos de Avaliação do Impacto Ambiental, sendo o software mais usado para a ACV em indústrias e universidades.

b) GaBi: desenvolvido pela empresa alemã PE International, é um dos *softwares* mais completos do mercado, se diferencia por possuir três bases de dados que podem ser escolhidas, sendo que uma delas é própria (GaBi Databases).

c) Umberto: lançado pela empresa alemã Ifu Hamburg GmbH, o *software* possui diversos estudos de casos de sucesso, em indústrias e universidades. Este utiliza duas bases de dados, a Ecoinvent e a GaBi, de modo que possam ser utilizadas em paralelo.

d) OpenLCA: *software* de origem alemã, lançado pela empresa GreenDelta em 2006. Ele é um *software* livre, ou seja, sem custo.

#### 3.1.4.4 Interpretação

A etapa de interpretação e análise de impacto consiste na fase final, nela os resultados das etapas anteriores devem ser interpretados, evidenciando pontos críticos, limitações, as fases do ciclo de vida que mais causam impactos, ações necessárias à sua mitigação e até mesmo sugerir melhorias para futuros estudos baseados nos resultados da avaliação (SARTORI, 2018).

Quando se relata o resultado de medição de uma grandeza física, deve-se dar alguma indicação quantitativa da qualidade do resultado, para que se possa avaliar sua confiabilidade, isto é, para avaliar e expressar sua incerteza (BARATTO *et al*., 2012).

A incerteza está presente em todas as fases de uma ACV e pode ter origem, por exemplo, na variabilidade, erros de medição, lacunas de inventário, escolhas metodológicas e incerteza do modelo (MENDOZA BELTRAN *et al*., 2018). Neste contexto, a análise de Monte Carlo tem sido utilizada com frequência nos estudos de ACV, nela, cada parâmetro de entrada da ACV é representado por uma função de distribuição de probabilidade ao invés de um valor pontual (LAM; ZLATANOVIĆ; VAN DER HOEK, 2020).

Estudos que utilizam *softwares* como SimaPro, Gabi e OpenLCA, tem a funcionalidade da análise de Monte Carlo integrada e estimativas de incerteza em seus bancos de dados de inventário de ciclo de vida, isso pode explicar o aumento da popularidade da abordagem de análise de incerteza (LAM; ZLATANOVIĆ; VAN DER HOEK, 2020).

Além disso, vem sendo muito utilizada nos estudos de ACV a análise de sensibilidade, a fim de reforçar a confiabilidade dos resultados. A análise de sensibilidade envolve a alteração de parâmetros de entrada selecionados, para examinar o quão sensível os resultados da ACV são a cada mudança (CLAVREUL *et al*., 2012).

As análises de incerteza podem ser inviáveis por demandarem de alto poder computacional, nesses casos é importante que minimamente uma ou duas análises de sensibilidade sejam realizadas, em especial, para processos que geram os maiores impactos ambientais do estudo (REBELLO *et al*., 2021).

## 3.2. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

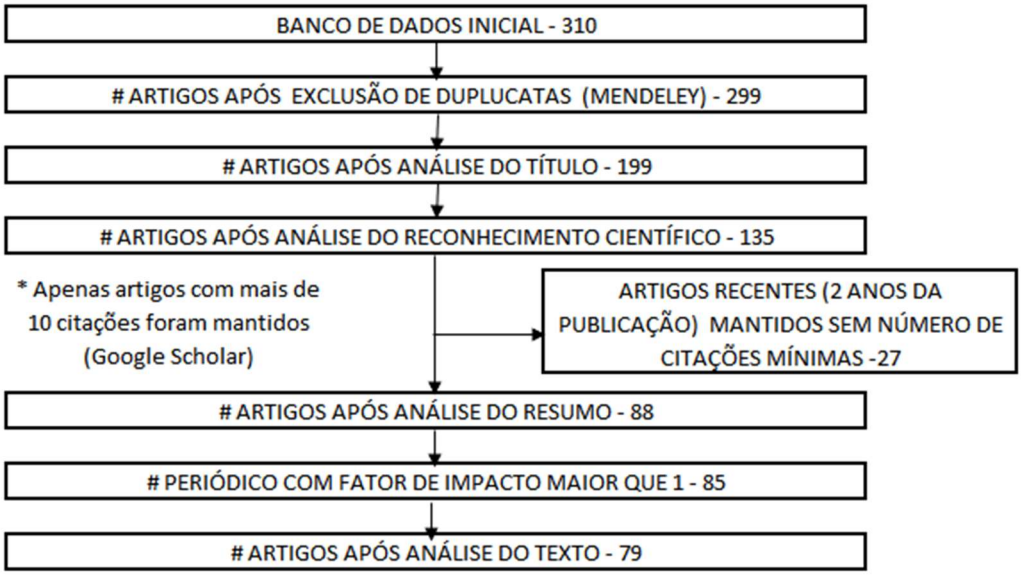
A fim de mapear os trabalhos de ACV de torres eólicas realizados nos últimos anos, foi utilizada a metodologia denominada Processo de Desenvolvimento do Conhecimento - Construtivista (ProKnow-C) para seleção de artigos (VILELA, 2012; WAICZYK; ENSSLIN, 2013). Desenvolvido pelo Laboratório de Metodologias Multicritério em Apoio à Decisão (LabMCDA), a metodologia ProKnow-C, surge devido a grande quantidade de trabalhos disponíveis e a necessidade dos pesquisadores em sistematizar a seleção de publicações relevantes ao tema de pesquisa (BERNARDI, 2014).

Na primeira etapa, foi definido o tema de pesquisa, sendo ele "Avaliação de ciclo de vida de aerogeradores" e as bases de dados científicas utilizadas para pesquisa foram: *Science Direct, Scopus* e *Web of Science*. Definidas as bases de dados, estabeleceram-se as palavras-chave para busca de artigos. Visando ampliar o estudo, utilizaram-se as expressões "*Life cycle assessment*" e "*Wind farm*", "*Wind turbine*" e "*Wind towers*". Ressalta-se, que o termo "*foundation*" foi inserido como terceira palavra-chave para as buscas nas bases de dados, entretanto, todos os artigos derivados destas buscas foram encontrados da mesma forma quando utilizadas apenas as combinações das palavras-chave anteriormente citadas, dessa forma, a seleção dos artigos limitou-se a duas expressões.

Depois disso, foi necessário a utilização de filtros de pesquisa em conformidade com o estabelecido pela metodologia do ProKnow-C. Os filtros selecionados foram: apenas artigos, apenas artigos em inglês, artigos publicados entre 2011 a 2021 e que continham as palavras-chaves no título, ou no resumo, ou nas palavras-chaves. Vale ressaltar, que esta revisão sistemática foi elaborada em junho de 2021, portanto, contabilizando publicações até esta data.

Como resultado, foi gerado um banco de dados de 310 artigos, que posteriormente passaram por um processo de triagem, aonde foram: removidas as duplicatas, mantidos apenas os artigos cujo título tivesse alinhamento com o tema, artigos com no mínimo 10 citações, mantidos artigos que o resumo se alinhasse com o tema, mantidos apenas artigos de periódicos com fator de impacto maior que um e por fim, feita a leitura completa dos artigos. O resultado do banco de dados tratados foi de 79 artigos. A Figura 15 apresenta o passo a passo seguido na revisão sistemática.

Figura 15-Filtros aplicados com base no método ProKnow-C

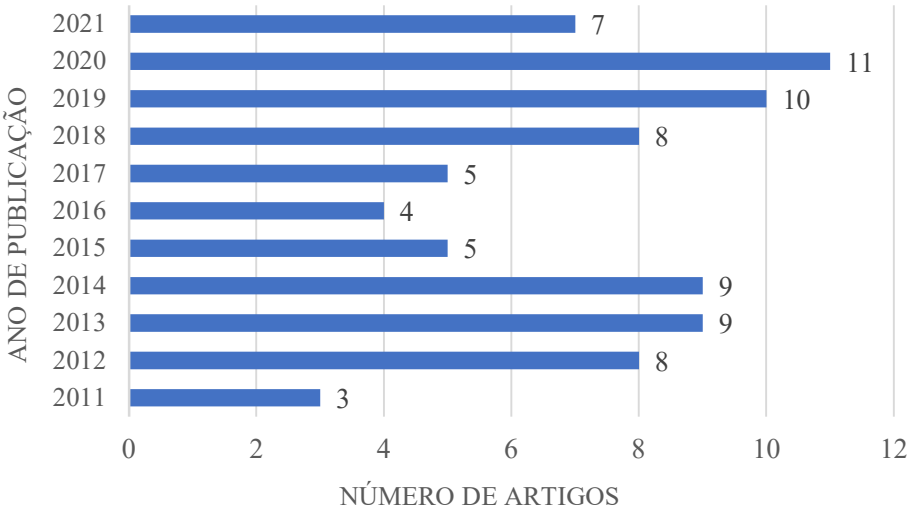



Fonte: Elaborada pela autora.

O conhecimento do ano de publicação é essencial para correlacionar as tendências com o campo científico. O número médio de publicações por ano foi de 7,18. Cerca de 13,92% do total foi publicado em 2020. A menor quantidade de artigos foi publicada em 2011, representando 3,79% do total (Figura 16).

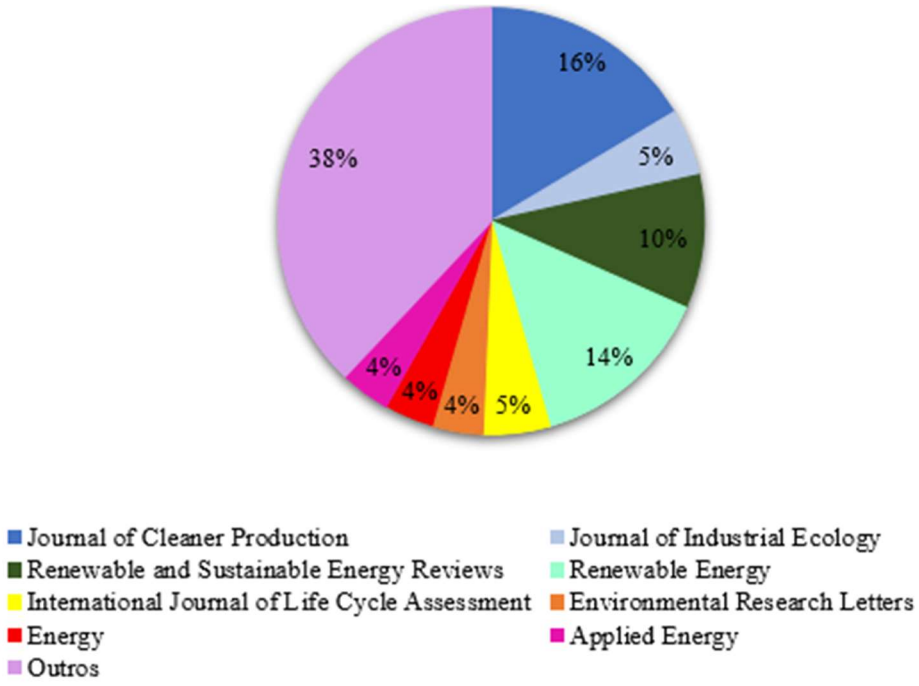
Além disso, para facilitar a localização de pesquisas futuras, os autores devem compreender quais periódicos mais publicam a temática. Os 79 artigos avaliados são provenientes de 33 periódicos. O *Journal of Cleaner Production* teve a maioria das publicações, respondendo por 16% das pesquisas selecionadas, seguido por *Renewable Energy* com 14% (Figura 17). As revistas com menos de 3 publicações nos anos avaliados foram apresentadas no gráfico na categoria "outros".

Figura 16-Publicações por ano




Fonte: Elaborada pela autora.

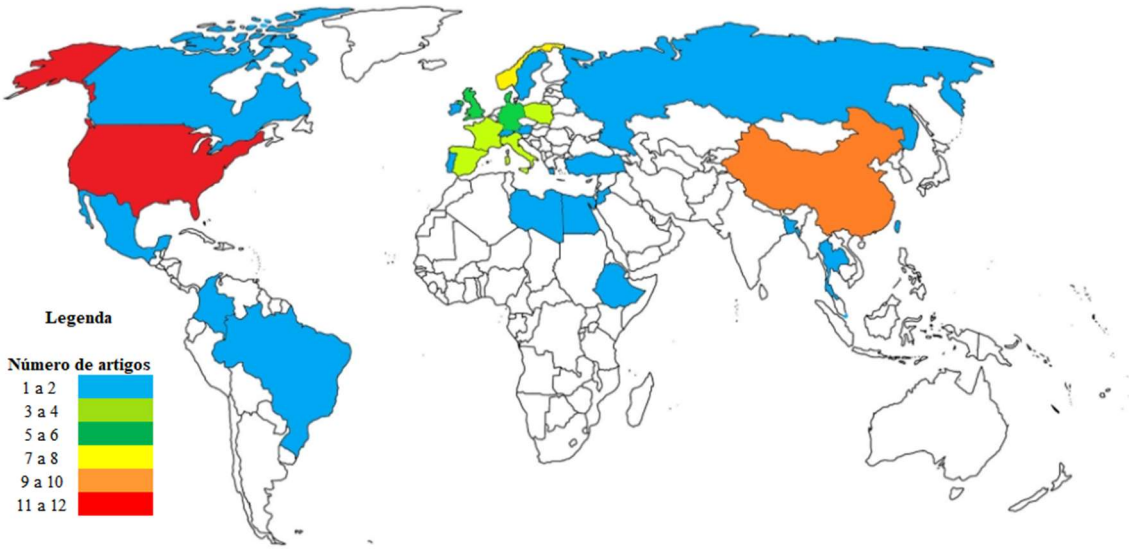
Figura 17-Publicações por periódico




Fonte: Elaborada pela autora.

Os Estados Unidos é o país com maior percentual de artigos selecionados (13,92%), considerando o país do autor principal, seguido pela China (12,65%) e Noruega (8,86%), como mostrado na Figura 18, confirmando o fato de que esses países estão à frente no desenvolvimento dos estudos de ACV. Vale enfatizar, que apenas 1 artigo do Brasil foi encontrado, sendo este publicado na *Renewable Energy*.

Figura 18-Publicações por país do autor principal




Fonte: Elaborada pela autora.

## 3.3 REVISÃO CRÍTICA

Dentre os 79 artigos analisados, foram identificados 17 artigos de revisão de literatura. O Apêndice A, apresenta a lista dos 62 artigos selecionados que executaram a ACV de aerogeradores, estes foram avaliados por suas práticas metodológicas, usando como referência para as análises a norma ISO 14040 (ISO,2006a), que compreende os princípios e estrutura de estudos de ACV incluindo definição de objetivo e escopo, análise de inventário de ciclo de vida, avaliação de impacto de ciclo de vida e interpretação, e a norma ISO 14044 (ISO,2006b), que especifica requisitos e diretrizes para todas as fases da ACV.

### 3.3.1 Definição de objetivo e escopo

Foram considerados escopos completos, aqueles que minimamente, apresentaram o sistema a ser estudado, a unidade funcional, as fronteiras do sistema, a vida útil considerada e a localização geográfica. Deste modo, dos 62 artigos analisados, apenas 67,74% definiram claramente o escopo. Dos artigos que não o fizeram, não definiram: a unidade funcional (11,29%), as fronteiras estudadas (6,45%), o tipo de torre avaliada (9,67%), potência da turbina eólicas (8,06%), a vida útil do sistema (8,06%) e a localização geográfica (1,61%).

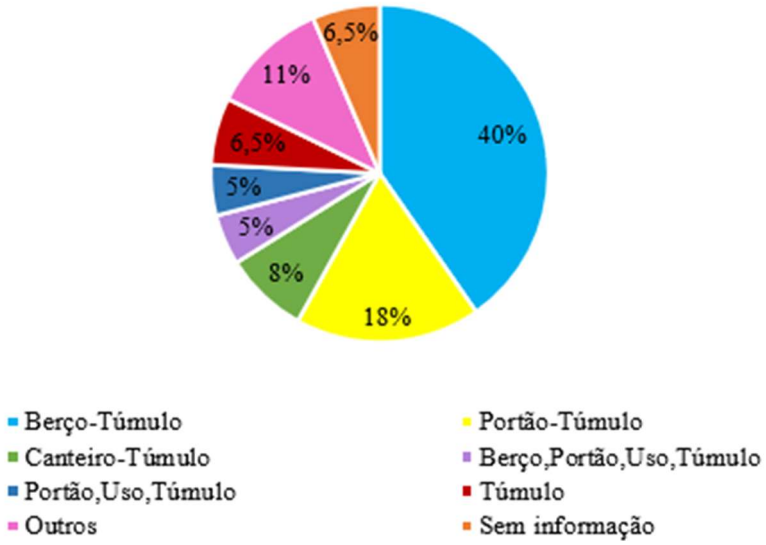
Foi verificado que a maioria dos estudos (53,23%), utilizaram como objeto de estudo torres eólicas *onshore*, 16,13% torres *offshore*, 19,35% torres *onshore* e *offshore*, 1,61% microturbinas e 9,67% dos artigos não definiram o tipo de torres estudada. No que tange a potência das turbinas, 12,9% utilizaram turbinas pequenas (menores que 100 kW), 8,06% turbinas medianas (entre 100kW e 1MW), 61,3% turbinas grandes (maiores que 1MW), 9,68% realizaram simulações com os três tipos de turbina e 8,06% não definiram a potência.

Conforme apresentado no Apêndice A, os estudos de ACV demonstraram unidades funcionais distintas, contudo, na maioria dos trabalhos (62,9%), houve predominância da utilização do kWh de energia produzida como unidade funcional e o restante dos trabalhos (37,1%) optaram por unidades funcionais, que atendessem melhor seus objetivos de pesquisa. Na vida útil, mais da metade dos estudos (62,9%), utilizou 20 anos e os demais trabalhos (37,1%) utilizaram tempos de vida útil distintos uns dos outros.

Em relação as fronteiras dos estudos mais estudadas, 40,3% dos trabalhos utilizaram da ACV para verificar os impactos do berço ao túmulo, ou seja, desde a extração das matérias primas até a destinação final dos componentes e 17,7% do portão ao túmulo, isto é, impactos desde a manufatura até a destinação final e 8,1% do canteiro ao túmulo, ou seja, da construção da estrutura até sua destinação final. Vale ressaltar, que parte majoritária dos artigos confirmou a utilização das bases de dados para completar a cadeia de processos de segundo plano do sistema, os demais artigos não dispuseram de informações que especificassem quais foram suas considerações.

A Figura 19 apresenta todas as fronteiras identificadas nos artigos.

Figura 19-Fronteiras utilizadas nos estudos de ACV.




Fonte: Elaborada pela autora.

Ainda que estas fronteiras tenham sido as mais utilizadas, alguns autores fizeram a escolha de fronteiras que eliminavam algumas etapas do ciclo de vida, tendo em vista o que mais os interessava nos sistemas estudados. Noori, Kucukvar, Tatari (2015a), por exemplo, utilizaram a fronteira do berço a operação, dado que o artigo tem como objetivo inferir sobre o melhor modelo de parque eólico, *onshore* ou *offshore*, para os Estados Unidos, não sendo relevante para os autores o fim da operação.

Oebels, Pacca (2013) de modo semelhante, utilizaram a fronteira do portão a operação, eliminando assim, impactos ambientais da extração de matérias-primas, para avaliar uma amostra de 25 parques eólicos na Espanha. Iribarren, Martín-Gamboa, Dufour (2013), também avaliam os impactos do portão a operação visando identificar a principal fonte de emissões de $CO_2$ das três fases de ciclo de vida que o estudo aborda.

Gervásio *et al*. (2014), por sua vez, selecionaram três fases do ciclo de vida das torres eólicas, sendo elas: portão, canteiro e túmulo. Vargas *et al.* (2015), consideraram estas mesmas fases, porém excluíram o transporte dos componentes dos aerogeradores até o canteiro, pois eles presumiram que a fabricação seria próxima. Doerffer *et al*. (2021), por sua vez, realizam a ACV de um tipo específico de aerogerador, movido a força de arrasto. Os autores desejam compreender os impactos provenientes das fases de manufatura e destinação final, a fim de entender como a escolha dos materiais utilizados influenciam nos impactos ambientais.

Em relação, a localização geográfica dos estudos avaliados se concentrou na China (9,67%) e nos Estados Unidos (9,67%). Contudo, se avaliado o continente, a Europa concentrou 58,06% das localizações geográficas utilizadas pelos autores, essa tendência tem relação direta com a dificuldade na obtenção de dados de outros continentes, uma vez que, a maioria das bases de dados disponibilizadas internacionalmente são alimentadas com dados da realidade europeia.

Ao analisar os artigos, percebeu-se que cerca de 27,42% dos artigos não especificaram as tecnologias construtivas, os materiais e quantidades utilizadas. A falta de transparência do escopo e do inventário impossibilita a reprodução da ACV por outros pesquisadores e a comparação acurada entre estudos.

De modo semelhante, em relação a fundação especificamente, conforme demonstrado no Apêndice A, 29,03% dos artigos não detalham materiais e/ou tipo das fundações estudadas e 17,74% dos artigos não continham o elemento fundação em seu escopo por decisão dos autores de eliminarem este componente (BALDOWSKA-WITOS *et al.*, 2021; DOERFFER *et al.*, 2021; LI, J.; LI; WU, 2020; POUJOL *et al*., 2020), ou pelo fato da ACV abordar: apenas das pás do rotor (CHIESURA; STECHER; PAGH JENSEN, 2020; DEENEY *et al*., 2021; NAGLE *et al*., 2020; TOMPOROWSKI *et al*., 2018), apenas a rede de distribuição (ARVESEN *et al*., 2014), apenas os geradores (GLASSBROOK *et al*., 2014) ou apenas as baterias de armazenamento (IOSIFOV *et al*., 2020).

### 3.3.2 Análise de inventário do ciclo de vida

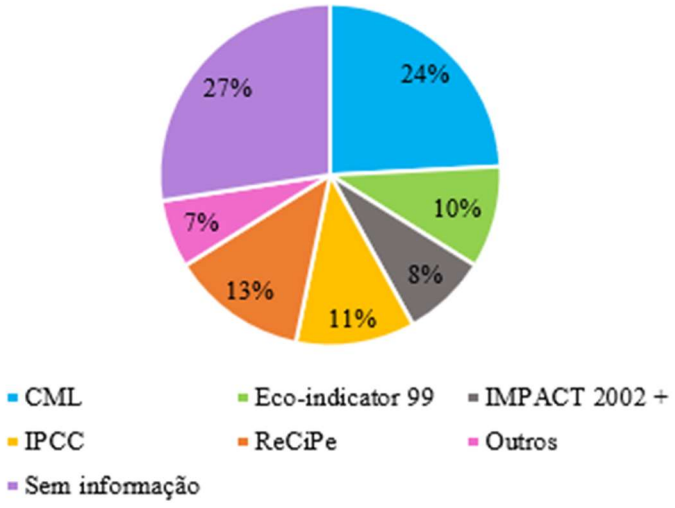
Dos 62 artigos analisados, 51,61% usaram o Ecoinvent como o base de dados, 8,06 % utilizaram o GaBi, 3,23% utilizaram o GEMIS, 1,61% utilizaram ambos Ecoinvent e Gabi, 1,61% utilizaram Ecoinvent e EXIOBASE e 29,03% relataram que os dados de primeiro plano do sistema foram coletados em campo, junto com os responsáveis operacionais dos parques eólicos, utilizando relatórios técnicos provenientes dos fabricantes dos aerogeradores ou se basearam na literatura. Vale ressaltar que 4,84% não definiram a fonte dos dados utilizados.

### 3.3.3 Avaliação de impacto de ciclo de vida

Dos artigos analisados, 33,87% não informaram qual *software* foi usado, 40,32% usaram o *software* SimaPro, 12,9% usaram Gabi, 4,84% utilizaram o modelo ACV híbrido disponível online pelo *Green Design Institute* da *Carnegie Mellon University* (NOORI; KUCUKVAR; TATARI, 2015a; NOORI; KUCUKVAR; TATARI, 2015b; KUMAR; TYNER, SINHA, 2016), 3,23% GEMIS, 1,61% Umberto, 1,61% usaram o *multi-region input output* (MRIO) (VÉLEZ-HENAO; VIVANCO, 2021) e 1,61% não utilizaram *software* para execução da ACV, tendo sido utilizado neste caso o fator de emissões de $CO_2$, proveniente das diretrizes do IPCC para diferentes materiais (WANG; SUN, 2012).

A escolha da AICV tem relação direta ao *software* utilizado. A Figura 20 expõe as metodologias de AICV mais recorrentes nos estudos de ACV de aerogeradores.

Figura 20- Principais metodologias de AICV utilizadas nos estudos.



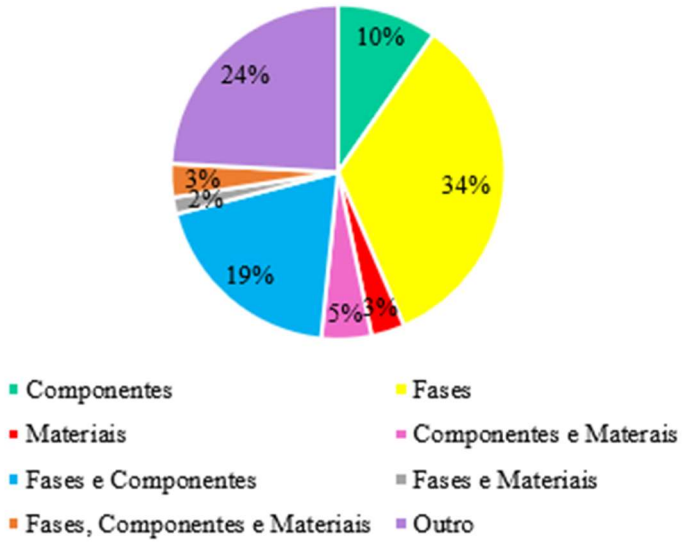

Fonte: Elaborada pela autora.

Vale ressaltar, que o método mais utilizado, o CML, utiliza a abordagem de *midpoints,* assim como, o IPCC. Já Eco-indicator 99, tem a abordagem de *endpoints*, enquanto ReCiPe e o IMPACT 2002+ utilizam uma abordagem combinada. Em relação as categoriais de impacto, as mais recorrentes, foram nos *midpoints*: acidificação presente em mais da metade dos artigos (51,61%), seguida de eutrofização (48,39%), ecotoxidade (45,16%), destruição da camada de ozônio (38,71%), aquecimento global (37,10%) e toxicidade humana (29,03%), e nos *endpoints*: mudanças climáticas (32,26%). Ressalta-se, que apesar da categoria de impacto energia não renovável ter sido encontrada em um número pouco expressivo de estudos, ela representa um indicador muito importante para as análises.

### 3.3.4 Interpretação dos resultados

Na apresentação dos resultados dos artigos, foi perceptível a tendência de atribuir os impactos ambientais com as fases do ciclo de vida. Contudo, existem diversas formas de apresentar os resultados da ACV, a fim de, atender o objetivo do estudo, como por exemplo, relacionar os impactos aos principais componentes do sistema (torre, rotor, nacele, fundação, etc.), aos materiais, dentre outros. A Figura 21 apresenta o modo como foram apresentados os resultados dos estudos analisados.

Figura 21- Apresentação dos resultados de AICV dos estudos.




Fonte: Elaborada pela autora.

Referente as análises de incerteza e sensibilidade, 46,77 % dos artigos revisados não realizou nem uma das duas análises, 38,71% realizaram análise de sensibilidade, 11,29% realizaram análise de incerteza e 71% (dos 11,29% que realizaram análise de incerteza), relataram que o fizeram através da simulação de Monte Carlo. Apenas 3,23% realizaram ambas as análises (GERVÁSIO *et al*., 2014; POUJOL *et al*., 2020). Nas análises de sensibilidade, as alterações de alguns parâmetros foram recorrentes, como: vida útil, fator de capacidade, velocidade dos ventos, taxa de reciclagem dos componentes.

Por fim, sendo o foco dessa dissertação as fundações de torres eólicas, observou-se, que os autores que analisaram os impactos referentes aos componentes dos aerogeradores individualmente relataram que um dos principais componentes responsável pela maior partes dos impactos é a fundação, seja ela *onshore* (ABELIOTIS; PACTITI, 2014; BONOU; LAURENT; OLSEN, 2016;

GKANTOU; REBELO; BANIOTOPOULOS, 2020; KOULOUMPIS; SOBOLEWSKI; YAN, 2020; SAVINO et al., 2017; XIE *et al*., 2020) ou *offshore* (BONOU; LAURENT; OLSEN, 2016; RAADAL *et al*., 2014; YANG *et al*., 2018).

Nas fundações *onshore,* o material comumente utilizado é o concreto armado, enquanto nas fundações *offshore*, identificou-se a recorrência de estruturas de concreto armado e de aço. Gkantou, Rebelo, Baniotopoulos (2020), ao avaliarem a distribuição de massa da estrutura de torres de aço híbridas com apoio de 6 e 4 pernas, identificaram que a maior parcela é proveniente da fundação de concreto (66,2% e 69,2%), condição relacionada com a altura da estrutura.

Dentre as categorias de impactos analisadas, o potencial de aquecimento global destaca-se. Isto ocorre devido aos materiais utilizados nas fundações serem materiais intensivos nas emissões de carbono em seus ciclos de vida (KOULOUMPIS; SOBOLEWSKI; YAN, 2020; RAADAL *et al*., 2014). Gkantou, Rebelo, Baniotopoulos (2020), relataram que para torres de aço híbridas de 5MW com apoio de 6 e 4 pernas, respectivamente, 23,7% e 25,8% do impacto total de aquecimento global da estrutura foi proveniente das fundações. Bonou, Laurent, Olsen (2016) avaliaram quatros aerogeradores de 2.3 MW e 3.2 MW (*onshore*) e 4 MW e 6 MW (*offshore*), onde suas fundações foram detentoras de 18% a 34% da contribuição de mudanças climáticas.

Também Kouloumpis, Laurente, Olsen (2020), estudaram torres de 5 kW e encontram 30% do potencial de aquecimento global advindo da fundação, além de 20% ou mais para as categorias: Potencial de Depleção Abiótica (fóssil), Potencial de Acidificação, Potencial de Destruição da Camada de Ozônio, Potencial de criação de ozônio fotoquímico. Xie *et al* (2020), relata ainda que o consumo de energia primária na fundação chega a 75% de toda a energia primária da construção do aerogerador.

Como conclusão a esta revisão crítica, têm-se que, as fundações de torres eólicas têm sido estudadas dentro de um contexto maior, ou seja, junto aos demais componentes dos aerogeradores, contudo, raramente estas estruturas são estudadas especificamente. Apesar das fundações serem o componente de maior impacto agregado, cenários em que as tecnologias e materiais que ofereçam menores impactos ambientais ainda continuam sendo uma lacuna de pesquisa.

# 4 MATERIAIS E MÉTODOS

No capítulo anterior, a revisão bibliográfica foi apresentada como fundamentação teórica, a fim de embasar tecnicamente esta dissertação, além do estudo do estado da arte desenvolvido por meio da análise bibliométrica e da revisão crítica.

Este capítulo, por sua vez, segue como base uma metodologia amplamente utilizada para avaliação de impacto ambiental, a ACV, como definida pelas normas NBR 14040 (ABNT, 2014a) e NBR 14044 (ABNT, 2014b), apresentada anteriormente no subitem 3.1.4 Avaliação do ciclo de vida (ACV). A partir da seção 4.1, explica-se o escopo da pesquisa, inventários, softwares, métodos de impacto, categorias de impacto e análises, que serão utilizados baseado na estrutura da ACV, a seguir: a) definição de objetivo e escopo; b) análise de inventário de ciclo de vida; c) avaliação de impacto de ciclo de vida; e d) interpretação dos resultados.

## 4.1 DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO

O objetivo dessa dissertação consistiu em realizar uma ACV comparativa entre três tipos de fundação: fundação direta convencional, fundação indireta convencional e a fundação com base no sistema de tensegridade de um aerogerador hipotético, localizado na região Nordeste do Brasil.

A pesquisa pretende apontar qual o sistema de fundação apresenta o melhor desempenho ambiental no cenário proposto. O público-alvo para esta ACV é a comunidade técnica e científica que atua na linha de pesquisa sobre construção sustentável, bem como, o meio empresarial ligado a geração de energia de fonte eólica.

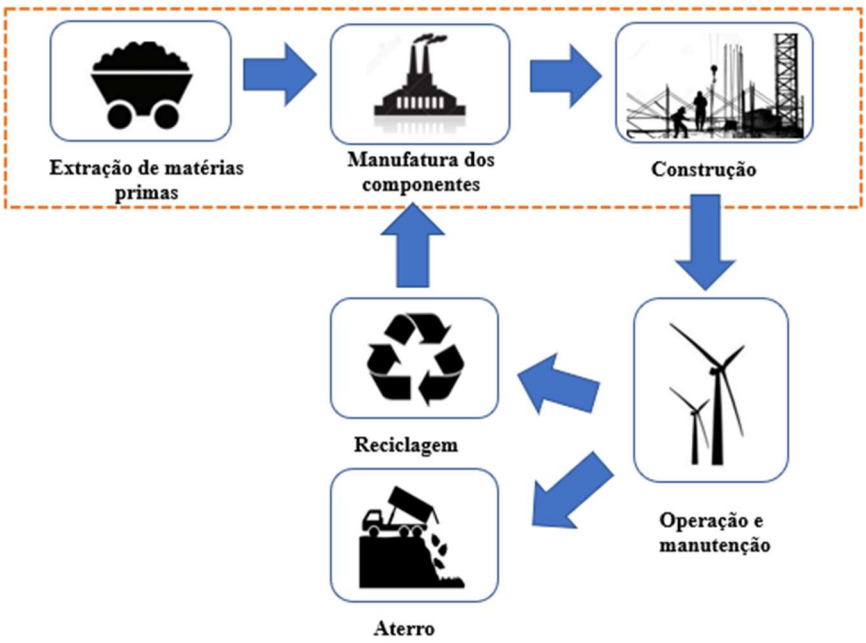
Esta dissertação originou-se do edital FAPES Nº 01/2020 APOIO A PROJETOS INOVADORES E SPIN OFF, sendo oferecida uma bolsa de pesquisa para a modalidade Pós-Graduação – Mestrado.

### 4.1.1 Unidade funcional e fronteira do sistema

A unidade funcional do estudo foi um elemento de fundação para uma torre de 80 m e 1,7 MW de potência, portanto, todas as entradas do inventário de primeiro plano do sistema de estudo foram expressas em relação a esta unidade funcional. Dessa forma, no inventário, entradas como: kg de areia, kg de brita, kg de água, kg de cimento, kg de adições, kg de aço, m² de formas, MJ de energia, dentre outros, foram contabilizadas com o intuito de originar um elemento de fundação. Isso também foi necessário para garantir comparabilidade dos resultados da avaliação do ciclo de vida entre os tipos de fundações avaliadas.

No que se refere ao ciclo de vida das fundações dos aerogeradores, inicialmente, as matérias-primas que compõem os materiais da estrutura são extraídas da natureza e transportadas para suas respectivas fábricas, onde passam por processos de beneficiamento e montagem; na sequência, são novamente transportadas até a central de concreto ou diretamente ao canteiro de obras. Após a estrutura da fundação ser construída, inicia-se a sua fase de utilização e anos depois quando o material já sofreu fadiga com a ação do tempo, ou não é mais necessário utilizá-lo, pode-se executar sua demolição, o que gera uma grande quantidade de resíduos, que podem ser reciclados ou enviados para aterros. A Figura 22 ilustra o ciclo de vida completo das fundações de aerogeradores.

Figura 22- Ciclo de vida das fundações de aerogeradores.




Fonte: Elaborada pela autora.

A fronteira do sistema estudado nessa pesquisa é denominada do berço ao canteiro (*cradle-to-site*), isto é, nela considera-se todas as etapas do ciclo de vida do sistema, cobrindo: extração de matéria-prima, fabricação de componentes, transporte e por fim construção e instalação no canteiro de obras.

### 4.1.2 Objetivos de qualidade dos dados

O DQG utilizado neste estudo é apresentado a seguir:

• Correlação temporal: Ano de 2021;

• Correlação geográfica: Estado do Pernambuco- região Nordeste do Brasil;

• Correlação tecnológica: Tecnologia disponível no mercado brasileiro.

• Confiabilidade dos dados: Preferencialmente dados de primeiro plano, isto é, dados medidos e verificados, informados por empresas da área através de questionários. Em casos de difícil disponibilidade de dados, utiliza-se dados de segundo plano, por meio da base Ecoinvent.

• Completeza dos dados: Dados representativos do mercado de construção civil no ramo de parque eólicos.

Com base no DQG, foram atribuídos os DQI's para os fluxos dos processos, em que os dados foram categorizados de 1 a 5, sendo 1 o dado mais representativo. Para a atribuição dos DQI's foi utilizada a matriz pedigree do Ecoinvent (Quadro 4), esta matriz de avaliação de qualidade dos dados foi escolhida uma vez que este estudo utilizou o banco de dados do Ecoinvent como fonte para dados de secundários.

Quadro 4-Matriz Pedigree Ecoinvent

| Pontuação do indicador | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| $u_{B1}$ Confiança na fonte | Dados verificados baseados em medidas | Dados verificados parcialmente baseados em estimativas ou dados não verificados baseados em medidas | Dados não verificados parcialmente baseados em estimativas qualificadas | Estimativa qualificada ou dados derivados de informações teóricas | Estimativa não qualificada |
| $u_{B2}$ Completeza | Dados representativos para um número relevante de empresas durante um período que permita eliminar flutuações | Dados representativos de > 50% do mercado durante um período que permita eliminar flutuações | Dados representativos para uma fatia pequena de empresas, mas relevante para o mercado em estudo ou dados de mais de 50% de empresas por um curto período de tempo | Dados representativos para somente uma empresa relevante para o mercado considerado | Representatividade desconhecida ou dados de um pequeno numero de empresas em um curto período de tempo |
| $u_{B3}$ Correlação temporal | Menos de 3 anos de diferença para o ano de referência | Menos de 6 anos de diferença para o ano de referência | Menos de 10 anos de diferença para o ano de referência | Menos de 15 anos de diferença para o ano de referência | Data desconhecida ou mais de 15 anos de diferença para o ano de referência |
| $u_{B4}$ Correlação geográfica | Dados da área em estudo | Dados médios de uma área maior que a área de estudo | Dados de uma área menor que a do estudo ou dados de uma área similar | Dados de uma área com pouca similaridade das condições de produção | Dados desconhecidos ou dados de área distinta a área de estudo |
| $u_{B5}$ Correlação tecnológica | Dados de empreendimentos, processos e matérias do estudo | Dados de processos e materiais de mesma tecnologia, mas diferentes empreendimentos | Dado de processos ou materiais correlatos, mas mesma tecnologia ou dados de processos e materiais do estudo, mas de diferente tecnologia | Dado de processos ou materiais correlatos, mas diferente tecnologia ou dados de escala laboratorial e mesma tecnologia | Dados de processos ou materiais correlatos, mas com diferente tecnologia e em escala laboratorial |

Fonte: Weidema et al., 2013.

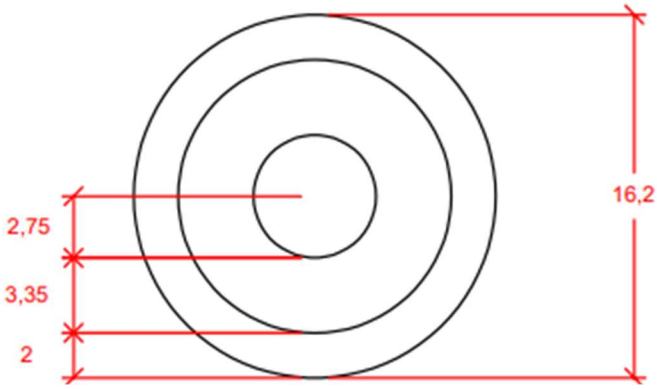
### 4.1.3 Cenários considerados

Nesta seção, serão apresentados os parâmetros e condições das fundações estudadas. Os dados apresentados acerca do aerogerador e das fundações convencionais direta e indireta são reais, derivados de projetos executados, seguindo as normas técnicas vigentes, entretanto, não foi autorizado citar o parque eólico de origem, apenas informar que os dados são da região Nordeste do Brasil. Em relação a fundação com base no sistema de tensegridade, esta foi considerada tendo como base notas de projetos e relatórios técnicos fornecidos pelas empresas Metalvix Engenharia e Consultoria Ltda e MCA Tecnologias de Estruturas.

O cenário considerado referiu-se a uma instalação *onshore*, em que o aerogerador de eixo horizontal a favor do vento tem a potência 1,7 MW, com configuração de três pás. Por sua vez, a torre admitida foi tubular em aço e possui a altura 80 m até o eixo do cubo. O parque eólico em questão apresenta, aproximadamente 126 aerogeradores e 233 MW de potência instalada.

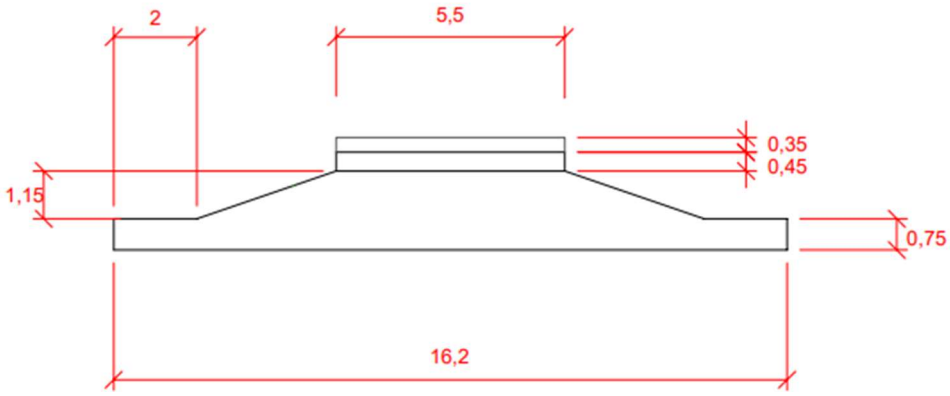
Tendo em vista as cargas presentes em tal estrutura, na fundação direta convencional a sapata modelada possuiu diâmetro da base igual a 16,2 m, altura total de 2,70 m e volume de aproximadamente 250 m³. Na simulação, a sapata foi dividida em dois volumes, sendo o primeiro até a altura de 2,35 m e o segundo para os 0,35 m restantes. Essa divisão se deve à diferença do tipo de concreto empregado em cada volume, sendo o concreto fck 30 MPa para a sessão inferior e o concreto fck 40MPa para a sessão superior. As vistas superior e lateral da fundação são ilustradas, respectivamente, nas Figuras 23 e 24.

Figura 23-Vista superior da fundação direta convencional.




Fonte: Elaborada pela autora.
Nota: medida em metros.

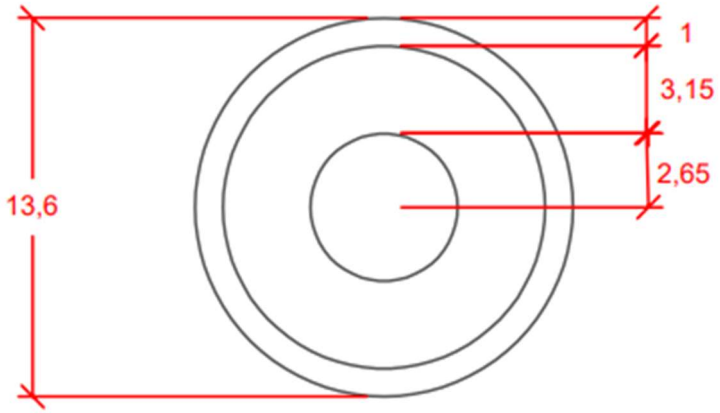
Figura 24-Vista lateral da fundação direta convencional.




Fonte: Elaborada pela autora.
Nota: medida em metros.

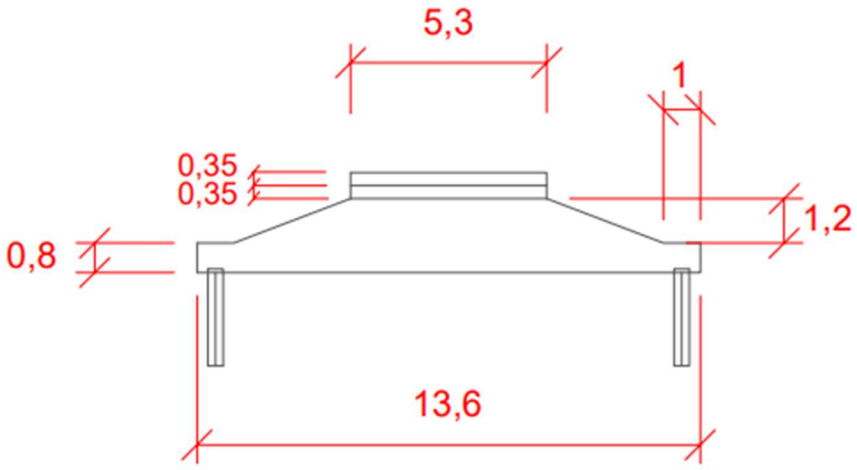
Na fundação indireta convencional, foram consideradas 22 estacas escavadas com 41 cm de diâmetro e 7 m de profundidade. O bloco sobre as estacas possuiu diâmetro de 13,6 m, altura de 2,7 m e volume de aproximadamente 200 m³. Assim como no cenário anterior, o bloco foi dividido em dois volumes, o primeiro até a altura de 2,35 m e o segundo para os 0,35 m restantes, sendo o concreto fck 30 MPa para a sessão inferior e o concreto fck 40 MPa para a sessão superior. As Figuras 25 e 26 apresentam as vistas superior e lateral da fundação.

Figura 25- Vista superior da fundação indireta convencional.




Fonte: Elaborada pela autora.
Nota: medida em metros.

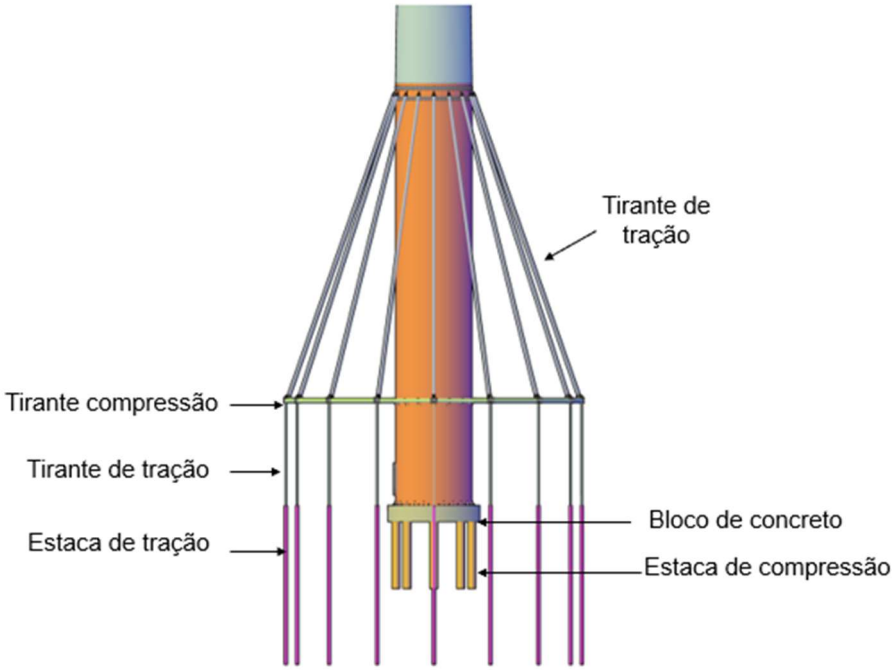
Figura 26-Vista lateral da fundação indireta convencional.




Fonte: Elaborada pela autora.
Nota: medida em metros.

Em relação a fundação de tensegridade, esta foi composta por oito estacas de compressão de 41 cm de diâmetro e 6 m de profundidade, executadas com argamassa (microconcreto) e sob elas apoiado um bloco de 12,8 m³ de concreto fck 30MPa, no qual, é fixado a base da torre eólica. Vale ressaltar, que compondo este sistema tem-se 16 tirantes que são tensionados e ancorados no solo em estacas de tração de 15 cm de diâmetro e 9 m de profundidade. Assim, as estacas tração são executadas com 2,5 m³ de concreto fck 30MPa. A Figura 27 apresenta um modelo representativo da fundação de tensegridade.

Figura 27-Modelo da fundação de tensegridade.




Fonte: Cortesia da MCA Tecnologia de Estruturas, 2021.

## 4.2 ANÁLISE DE INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA

A análise do ICV envolve a compilação e quantificação dos fluxos de entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*). Neste item, serão apresentadas as informações referentes ao *software* e base de dados utilizados, assim como, dados de entrada dos sistemas de produto em estudo.

### 4.2.1 Base de dados e ferramenta computacional

O banco de dados utilizado neste estudo é o *Ecoinvent* 3.6, por possuir uma base de dados amplamente utilizada para ACV, conforme visto no item 3.1.4.2, contendo mais de 20.000 conjuntos de dados, abrangendo energia, produção de materiais, processamento e tratamento de resíduos, além de uma elevada transparência e possibilidade de ajustes para cenários alternativos (ACV BRASIL,2020).

As fontes de informações da base de dados são provenientes de extensos trabalhos estatísticos, medições individuais ou suposições derivadas de descrições de processos, sendo a qualidade dos dados relatada quantitativamente em termos de desvio-padrão das quantidades de fluxos de entrada e saída (FRISCHKNECHT *et al*., 2005). Vale ressaltar que a licença para utilização desta base de dados foi cedida ao Grupo de Avaliação do Ciclo de Vida em Sistemas de Produção e no Ambiente Construído - ACVamb (Grupo e Pesquisa CNPq), para uso acadêmico.

Para realizar a ACV foi utilizado o *software* OpenLCA versão 1.11.0, sendo esse de código aberto disponível gratuitamente, sem custos de licença. O *software* desenvolvido em 2006 pela empresa alemã *GreenDelta*, oferece um sistema de cálculos rápidos, resultados das análises detalhadas e análise de incerteza, que se baseia na simulação de Monte Carlo (OPENLCA, 2021).

### 4.2.2 Materiais componentes do sistema

Para realizar a montagem dos sistemas estudados no *software,* fez-se necessário a elaboração do inventário para insumos (Apêndice B, C e D), ressalta-se que houve a desconsideração de perdas de materiais no canteiro de obras. Desta forma, este item visa discorrer sobre as considerações feitas para os materiais necessários.

Para as três tecnologias, fez-se necessário a utilização de concreto. Para fundação com base no sistema de tensegridade, a resistência exigida para o bloco de fundação foi de 30 MPa, enquanto para as fundações direta e indireta convencionais, o volume total de concreto foi composto três resistências: 20 MPa, concreto magro para camada de regularização, 30 MPa, referente ao volume de aproximadamente 90% da estrutura, e 40 MPa, concreto usado na parte do bloco e da sapata que terão contato com a torre.

Assim, considerou-se como materiais constituintes do concreto: cimento Portland (CP IV 32), brita 0, brita1, pó de pedra, areia, água e plastificante. Os traços de concreto utilizados, tendo em vista as classes de resistência, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1-Traços de concreto

| | **20 MPa** | **30 MPa** | **40 MPa** |
|---|---|---|---|
| Cimento [kg/m³] | 356 | 436 | 531 |
| Areia [kg/m³] | 445 | 393 | 456 |
| Pó de pedra [kg/m³] | 320 | 308 | 163 |
| Brita 0 [kg/m³] | 320 | 342 | 342 |
| Brita 1 [kg/m³] | 694 | 667 | 668 |
| Água [kg/m³] | 225 | 225 | 225 |
| Plastificante [kg/m³] | 2,492 | 3,052 | 3,717 |

Fonte: Elaborada pela autora.

Para a fundação direta, indireta e de tensegridade, foram gastos aproximadamente 250 m³, 200 m³ e 15,5 m³ de concreto, respectivamente. Para atender construção das estacas raiz da fundação indireta, foram utilizados 310 sacos de cimento Portland (50 kg por saco), 23 m³ de areia e 2.250 kg de aço. Na fundação de tensegridade, para as estacas de compressão, foi considerado o consumo de 580 sacos de cimento Portland e 8m³ de areia e, pôr fim, a armação com aproximadamente 1.000 kg de aço.

Além disso, para todos os tipos de fundação foram utilizados aço e fôrmas metálicas de 112 kg/m², estas foram removidas 48 horas após a concretagem e podem ser reutilizadas em outras obras. Na fundação direta convencional, foram gastos aproximadamente 17 t de aço e 105 m² de fôrmas, na fundação indireta convencional 21 t de aço e 86 m² de fôrmas e na fundação de tensegridade 800 kg de aço e 22,17 m² de fôrmas.

No que diz respeito aos materiais exclusivamente utilizados na fundação com base no sistema de tensegridade estes foram os tirantes inco 60D, produzidos a partir de barras de aço maciças, passando por um processo de laminação a frio. Para o projeto estudado foram computadas 144 m da barra que possui massa linear de 16 kg/m.

Em virtude do grande volume de concreto das fundações convencionais, a utilização de gelo a fim de evitar fissurações de origem térmica, devido as altas temperaturas atingidas pela reação exotérmica de hidratação do cimento, é usualmente praticada o que implica na compra deste material de um fornecedor, transporte e estocagem adequada no canteiro de obras, ou fabricação

no próprio canteiro. Neste estudo, para as fundações convencionais, foi considerado o uso do gelo, obtido com um fornecedor em uma cidade vizinha e estocado em uma câmara frigorífica no canteiro de obras.

### 4.2.3 Cenário de transporte

O cenário escolhido para a simulação considerou que a usina de concreto, o canteiro de obras e o estoque estão todos localizados em um mesmo município do Pernambuco, no Nordeste do Brasil. Os insumos necessários foram considerados como transportados por via rodoviária.

A origem de cada insumo, o tipo de transporte e as distâncias dos fornecedores dos componentes do concreto até a usina de concreto e as distâncias entre os fornecedores de armação, fôrmas, escoras e cabos até o canteiro são apresentadas na Quadro 5. Vale ressaltar que o transporte foi considerado apenas em um sentido da viagem, isto é, a ida até o canteiro ou usina de concreto.

Quadro 5-Cenário de transporte dos insumos das fundações de aerogerador avaliadas.

| Material | (Fornecedor) Cidade e Estado de Origem | Distância da usina/canteiro | Tipo de transporte |
|---|---|---|---|
| Cimento Portland | (Indústria) Fortaleza-CE | 771 km | Caminhão truck |
| Areia | (Jazida) Jaboatão-PE | 254 km | Caminhão basculante |
| Brita 0 | (Indústria) Fortaleza-CE | 771 km | Caminhão truck |
| Brita 1 | (Indústria) Fortaleza-CE | 771 km | Caminhão truck |
| Pó de pedra | (Indústria) Fortaleza-CE | 771 km | Caminhão basculante |
| Água | Rede de abastecimento de água local | – | – |
| Plastificante | (Indústria) Santana da Parnaíba-SP | 2452 km | Caminhão truck |
| Aço | (Gerdau) Cabo de Santo Agostinho- PE | 245 km | Caminhão truck |
| Fôrmas | (Fábrica) Natal-RN | 512 km | Caminhão truck |
| Tirantes inco 60D | (Fábrica) Guarulhos-SP | 2452 km | Caminhão truck |
| Gelo | (Fábrica) Garanhuns - PE | 36,3 km | Caminhão frigorífico |
| Armação montada | Do canteiro de obras até local da fundação | 25 km | Caminhão munck |
| Concreto | Da usina de concreto até local da fundação | 25 km | Caminhão misturador de concreto |

Fonte: Elaborada pela autora.

Os caminhões considerados enquadram-se no sistema EURO 5, informações sobre carga máxima transportada encontram-se nos Apêndices B, C e D.

## 4.3 AVALIAÇÃO DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA

### 4.3.1 Métodos de avaliação de impacto e categorias de impacto

O emprego de diferentes métodos de impacto em estudos de ACV, torna-se importante para reduzir a limitação que a escolha de apenas um método de impacto pode causar nas conclusões da avaliação. A utilização de todas as categorias existentes nos métodos de impacto torna-se inviável. Dessa forma, o foco desta dissertação esteve em seis principais categorias de impacto, que contabilizaram 99% dos impactos totais na normalização para o método *IMPACT* 2002+, a saber: a) Energia não renovável b) Aquecimento global, c) Extração mineral, d) Acidificação terrestre, e) Ocupação da terra f) Ecotoxidade terrestre, sendo elas, indicadores amplamente utilizados em estudos de ACV, em especial, aqueles voltados para aerogeradores e concreto.

Em um segundo momento, algumas destas categorias foram calculadas para diferentes métodos de impacto quando possível, isto é, quando apresentavam as mesmas unidades:

a) Energia não renovável: *IMPACT* 2002+;
b) Aquecimento global: *IMPACT* 2002+, CML, IPCC, ReCiPe;
c) Extração mineral: *IMPACT* 2002+;
d) Acidificação terrestre: *IMPACT* 2002+, ReCiPe;
e) Ocupação da terra: *IMPACT* 2002+;
f) Ecotoxidade terrestre: *IMPACT* 2002+.

Os métodos selecionados, apresentam representatividade frente aos estudos de ACV de aerogeradores, como visto no item 3.3.3. Destaca-se que estes métodos apresentam a abordagem de *midpoints* (CML 2002, IPCC) e a abordagem combinada, isto é, *midpoint* e *endpoint* (*IMPACT* 2002+, ReCiPe).

## 4.4 INTERPRETAÇÃO

Na etapa de interpretação, foram feitas constatações acerca das etapas de análise de inventário e avaliação de impactos do ciclo de vida, evidenciando pontos críticos, limitações e as fases do ciclo de vida e elementos da fundação, responsáveis por atribuírem mais impactos. Neste estudo, após a interpretação dos resultados específicos de cada tecnologia de fundação, foi realizada ainda a comparação entre os resultados obtidos para os sistemas a fim de compreender qual tecnologia causarou menos impactos ambientais.

Além disso, houve a comparação entre os resultados obtidos para diferentes métodos de análise de impacto, visando compreender se a escolha da metodologia de impacto pode interferir nas conclusões da ACV.

### 4.4.1 Análise de sensibilidade

As cargas ambientais associadas a construção civil são significativamente influenciadas pelo impacto ambiental resultante da utilização do cimento. Na busca por tornar o concreto mais sustentável, várias pesquisas têm visado diminuir a quantidade de cimento Portland, por meio de adições minerais e subprodutos industriais.

Este estudo, realizou uma análise de sensibilidade para o traço de 30 MPa, traço que equivale a cerca de 90% das estruturas de fundações estudadas, a fim de avaliar os efeitos sob os resultados

associados ao consumo do cimento. Para isso, foram utilizados traços com resistências equivalente ao traço original, com adição de cinza volante (Traço 1 e 2) e adição de escória de alto forno (Traço 3 e 4). No transporte foi considerado que o fornecedor de ambos os subprodutos está localizado em São Gonçalo do Amarante-CE, aproximadamente 820 km para a cinza volante e 827 km para escória de alto forno. Além disso, no inventário foi utilizado o procedimento de alocação de subdivisão de processo para desconsiderar a carga ambiental da produção dos materiais residuais.

Vale ressaltar, que apesar destes traços não terem sido empregados no projeto das fundações estudadas, eles foram escolhidos dentre alguns dos traços utilizados na hidrelétrica de Furnas (FURNAS, 1997), a fim de garantir que sejam que atendam as normas técnicas vigentes e aos requisitos de qualidade da construção civil. A Tabela 2 apresenta os quatro traços que serão utilizados na análise de sensibilidade.

Tabela 2- Traços utilizados na análise de sensibilidade

| Traço | Cimento [kg/m³] | Escória [kg/m³] | Cinza [kg/m³] | Brita 0 [kg/m³] | Brita 1 [kg/m³] | Pó de pedra [kg/m³] | Areia [kg/m³] | Água [kg/m³] | Adição química (Plast.) [kg/m³] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Ref.** | 436,0 | | | 342,0 | 667,0 | 308,0 | 393,0 | 225,0 | 3,052 |
| **1** | 59,0 | | 138,0 | | 1452,0 | | 731,0 | 130,0 | |
| **2** | 235,0 | | 39,0 | | 1032,0 | | 812,0 | 193,0 | 4,4 |
| **3** | 60,0 | 60,0 | | | 1240,0 | | 899,0 | 140,0 | |
| **4** | 80,0 | 120,0 | | | 1177,0 | | 929,0 | 123,0 | 2,2 |

Fonte: Elaborada pela autora.

A análise de sensibilidade, permitiu ainda conduzir a maior compreensão da parte logística do ciclo de vida estudado, através da variação das distâncias de transporte e localização geográfica dos fornecedores, esclarecendo o impacto destas alterações na viabilidade ambiental nos cenários:

Cenário 1 (C1): Utilização de fornecedores de cimento, brita 0, brita 1, pó de pedra, areia e aço próximos ao município onde estão as instalações do parque eólico em Pernambuco.

Cenário 2 (C2): Utilização de fornecedores de cimento, brita 0, brita 1, pó de pedra, areia e aço do estado de São Paulo.

Cenário 3 (C3): Utilização de fornecedores dos componentes do concreto localização em Pernambuco e fornecedor do aço de localizados em São Paulo.

A Tabela 3 apresenta as novas distâncias de transporte utilizadas em cada um dos cenários avaliados.

Tabela 3- Cenários de transporte para análise de sensibilidade.

| | Distância de transporte de referência | Cenário 1 | Cenário 2 | Cenário 3 |
|---|---|---|---|---|
| **Cimento** | 771 km-CE | 219 km | 2399 km | 219 km-PE |
| **Brita 0** | 771 km-CE | 215 km | 2417 km | 215 km-PE |
| **Brita 1** | 771 km-CE | 215 km | 2417 km | 215 km-PE |
| **Pó de pedra** | 771 km-CE | 215 km | 2417 km | 215 km-PE |
| **Areia** | 254 km-PE | 249 km | 2294 km | 249 km-PE |
| **Aço** | 245 km-PE | 245 km | 2430 km | 2430 km-SP |

Fonte: Elaborada pela autora.

Por fim, foi analisado o que aconteceria no sistema da fundação de tensegridade caso o volume do concreto fosse maior do que no cenário de referência, a fim de assegurar que mesmo com uma variação significativa do concreto este sistema ainda teria menos impactos que as fundações convencionais. Além disso, entende-se que a estrutura de fundação ganha maiores dimensões ao ser aplicada para aerogeradores de maiores potências e maiores alturas, logo a repercussão do maior volume do concreto prevê a aplicação deste sistema para outros empreendimentos.

Assim, foram considerados cenários onde a fundação de tensegridade apresentaria 20% e 30% da média do volume do concreto das fundações convencionais, o que corresponde, respectivamente, a 3,4 e 5,08 vezes o volume da fundação de tensegridade (cenário de referência).

### 4.4.2 Análise de incerteza

O alto grau de especulação que envolve a definição de cenários e uso de dados, muitas vezes incompletos, uma vez que os dados de primeiro plano, isto é, fornecido pelas empresas por trás da construção do parque eólico, não abrangem todas as esferas do estudo, torna necessário utilizar dados de segundo plano, que são provenientes de outros empreendimentos e da literatura, para completar as lacunas. Isso exige que as questões de incerteza sejam abordadas de maneira quantitativa. Como quase nenhum dado, independentemente da fonte, é exato, a análise de incerteza é uma abordagem para melhorar a confiabilidade dos resultados e estimar um limite de como os resultados obtidos podem ser imprecisos, através de uma faixa provável de valores para os processos unitários.

Neste estudo, para a avaliação da qualidade dos dados e atribuição dos DQI's, para cada fluxo dos processos, foi utilizada a matriz de pedigree do Ecoinvent, como citado anteriormente no item 4.1.3. A partir dos DQI's, foi possível obter fatores de incerteza que permitem o cálculo da distribuição dos dados e desvio padrão (DESCHAMPS *et al.*, 2018). Na sequência, a partir da saída da matriz Pedigree, foi realizada a análise de incerteza dos dados por meio da simulação de Monte Carlo.

A simulação de Monte Carlo, produz curvas de distribuição probabilística que agregam as incertezas de cada parâmetro dos materiais/processos críticos, e representam a incerteza de parâmetro total envolvida (BAIOCH; SILVA, 2021). Nos moldes sugeridos pela Ecoinvent, assume-se que as incertezas de cada parâmetro seguem uma distribuição log-normal – aquela na

qual o logaritmo dos valores assume uma distribuição normal (WEIDEMA *et al.,* 2013). A distribuição normal, é umas das mais conhecidas das distribuições de probabilidade, sendo ela, contínua e simétrica em ambos os lados da média, isto é, a maioria dos valores de dados nesta distribuição tendem a se agrupar em torno da média.

Devido a capacidade computacional disponível para esta dissertação, optou-se por realizar 1.000 iterações e intervalo de confiança de 90% para as simulações.

# 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No capítulo anterior foram apresentados aspectos metodológicos para dar suporte ferramental no desenvolvimento da ACV proposta nesta dissertação. Assim, definiu-se o objetivo e escopo do estudo, as considerações feitas para cada um dos tipos de fundações abordados e seus respectivos inventários, a ferramenta computacional, o banco de dados utilizado, os métodos de análise de impacto, as categorias de impacto e os critérios para análise de incerteza e sensibilidade.

Este capítulo, apresenta a quarta fase da ACV, que tem como objetivo interpretar os resultados da avaliação de ciclo de vida.

Na seção 5.1, serão apresentados resultados para os três tipos de fundações analisados, utilizando o método IMPACT 2002+. Para apresentar os resultados na abordagem *midpoint,* serão enfatizadas as categorias: Energia não renovável, Extração mineral, Aquecimento global, Ocupação da terra, Acidificação terrestre e Ecotoxidade terrestre, pois juntas representam aproximadamente 99% do impacto total dos sistemas de fundação, de acordo com a normalização realizada pelo método IMPACT 2002+.

Os resultados serão expostos em forma de tabelas e gráficos para comparar o desempenho ambiental, não só entre os tipos de fundações, como também, dos elementos que as compõe. A análise individual de cada uma dessas etapas é fundamental para compreender a sua influência no contexto geral.

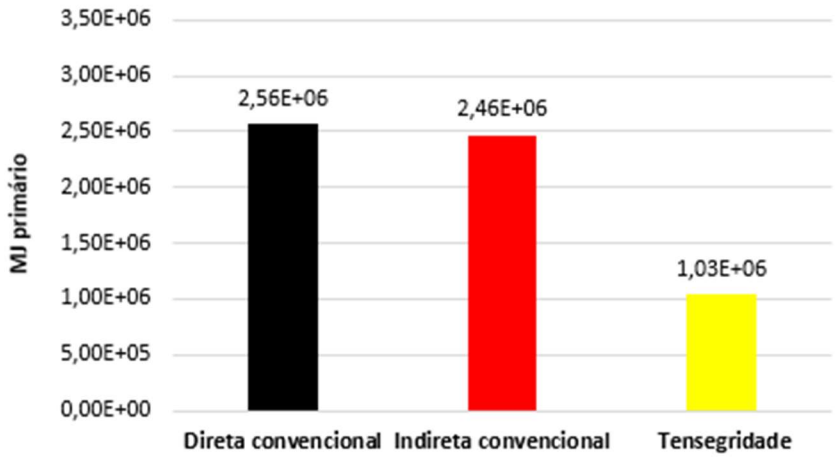
Na seção 5.2, os resultados anteriormente apresentados serão comparados com os resultados de outros métodos de impacto para as mesmas categorias. Na seção 5.3, será apresentada a análise de sensibilidade, que abordará três parâmetros: traço de concreto, distâncias de transporte e volume de concreto na fundação com base no sistema de tensegridade, por fim, na seção 5.4 será apresentada uma análise de incerteza.

## 5.1 COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS DE FUNDAÇÃO

Em uma ACV do berço ao canteiro (*cradle-to-site*) para fundações de aerogeradores, considera-se todas as etapas do ciclo de vida do sistema desde a extração de matéria-prima até a construção no canteiro de obras. Ao iniciar as análises, encontraram-se os resultados para as seis categorias *midpoints* estudadas, sendo elas, apresentadas da categoria mais impactante, isto é, aquela que apresentou maior valor na normalização, para a menos impactante. Apresentam-se nas Figuras 28 a 33 os gráficos gerados a partir dos resultados obtidos.

Na categoria Energia não renovável, o impacto pode ser traduzido em MJ total de energia primária não renovável, ou seja, energia disponível na natureza antes de ser convertida ou transformada, ou em kg $_{eq.}$ de petróleo bruto.

Figura 28-Resultado da categoria Energia não renovável para os três tipos de fundações.

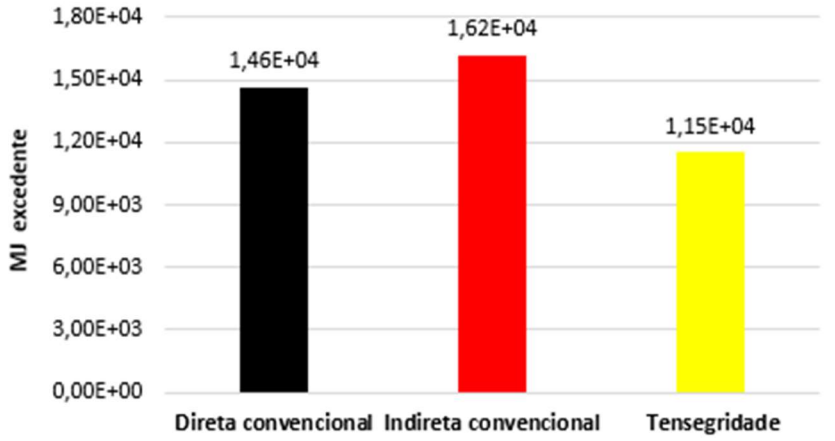



Fonte: Elaborada pela autora.

A fundação de tensegridade gerou menor demanda de energia primária, poupando assim recursos não renováveis. Já as fundações convencionais apresentaram os resultados nessa categoria de impacto próximos entre si.

A categoria Extração mineral utiliza a unidade MJ de energia excedente ou kg $_{eq.}$ de ferro, quantificando à energia necessária para extrações futuras de minerais.

Figura 29-Resultado da categoria Extração mineral para os três tipos de fundações.

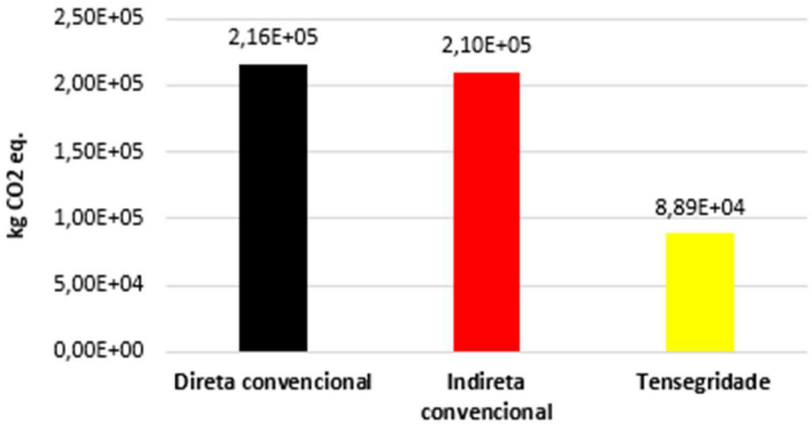



Fonte: Elaborada pela autora.

Para essa categoria a menor geração de impacto ocorreu na fundação de tensegridade, ainda que neste sistema exista a particularidade da presença de tirantes, que compõe a estrutura metálica ao redor da torre, a redução de aço na fundação (bloco e estacas) permitiu a redução da extração de ferro frente as fundações convencionais. Para as fundações convencionais, a fundação direta gerou menor impacto do que a indireta.

Na categoria Aquecimento global são medidas as emissões de $CO_{2\ eq.}$, dentre outros gases que contribuem para o efeito estufa, sendo estes transformados em uma quantidade equivalente de $CO_2$.

Figura 30-Resultado da categoria Aquecimento global para os três tipos de fundações.

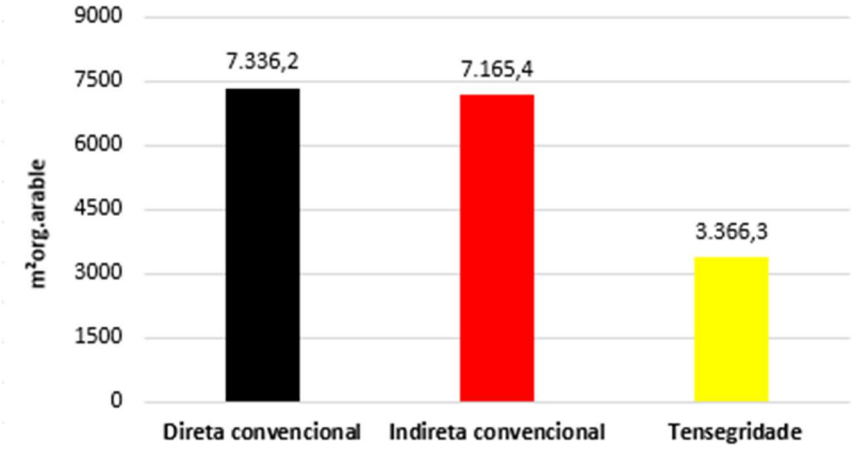



Fonte: Elaborada pela autora.

A fundação de tensegridade apresentou significativa redução na geração de $CO_2$ perante os sistemas convencionais. Já as fundações convencionais apresentaram resultados similares entre si, ainda assim, a fundação direta foi a mais impactante nessa categoria.

A categoria Ocupação da terra, por sua vez, utiliza a unidade m² de terra arável orgânica, que considera a ocupação deste espaço por uma determinada atividade.

Figura 31-Resultado da categoria Ocupação da terra para os três tipos de fundações

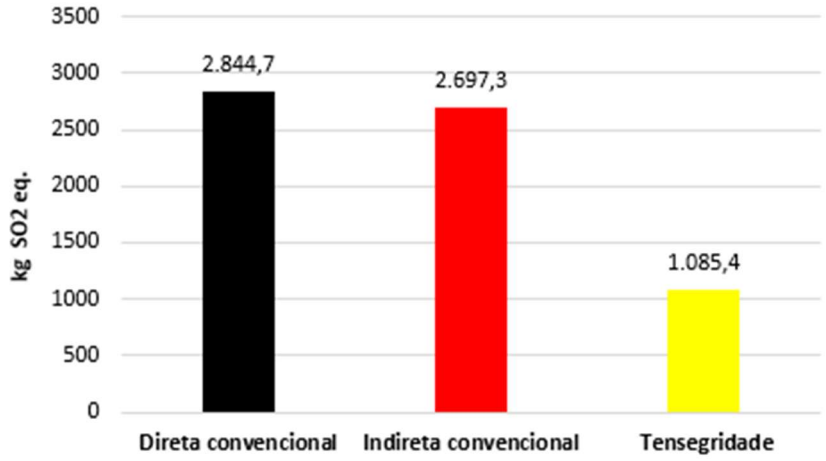



Fonte: Elaborada pela autora.

A fundação de tensegridade gerou menor ocupação de terras aráveis, sendo avaliada desde a extração das matérias-primas até a instalação da fundação, novamente as fundações convencionais tiveram resultados semelhantes, sendo a fundação direta a mais impactante.

A deposição atmosférica de substâncias inorgânicas, como sulfatos, nitratos e fosfatos, causam uma mudança na acidez do solo. Na categoria Acidificação terrestre são contabilizadas as emissões de $NO_x$, $NH_3$ e $SO_2$ e os resultados são expressos em kg $SO_2$ eq. no ar.

Figura 32-Resultado da categoria Acidificação terrestre para os três tipos de fundações

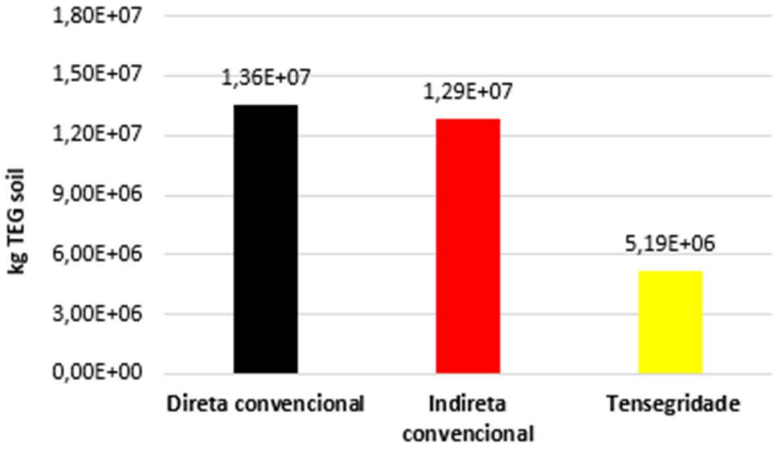



Fonte: Elaborada pela autora.

A fundação de tensegridade apresentou significativa redução de emissões de $SO_2$ na atmosfera quando comparadas as fundações convencionais. Em contrapartida a fundação direta e indireta tiveram pouca variação em seus resultados.

A categoria Ecotoxidade terrestre é medida a contaminação em kg Trietilenoglicol (TEG) no solo, dentre outras substâncias que contribuem com efeitos de ecotoxidade, sendo estas transformadas em uma quantidade equivalente de TEG no solo.

Figura 33- Resultado da categoria Ecotoxidade terrestre para os três tipos de fundações




Fonte: Elaborada pela autora.

Novamente a fundação de tensegridade foi mais vantajosa do ponto de vista ambiental, dado que reduziu a contaminação do solo que seria causada pelos demais sistemas.

A partir dos resultados obtidos tem-se que dentre os tipos de fundações analisados, a fundação de tensegridade é a menos impactante em todas as categorias de impacto avaliadas. A principal diferença entre a fundação de tensegridade e as fundações convencionais é a significativa redução

na demanda de concreto, sendo necessário, para isso, a utilização de tirantes acoplados a torre eólica.

O sistema de fundação de tensegridade tem seus esforços de compressão exercidos pelos tirantes da cruzeta, fazendo que o bloco de concreto da fundação seja menor que os das fundações convencionais, dado que é menos solicitado em termos de esforços. Já as estacas de tração, executadas em concreto para fixação os tirantes verticais, apesar de profundas, apresentam um diâmetro pequeno, que faz com que o volume de concreto seja pouco expressivo.

Essa diferença resulta em uma redução média de 58,8% para Energia não renovável, 25,3% para Extração mineral, 58,3% para Aquecimento global, 53,6% para Ocupação da terra, 60,8% para Acidificação terrestre e 60,7% para Ecotoxidade terrestre.

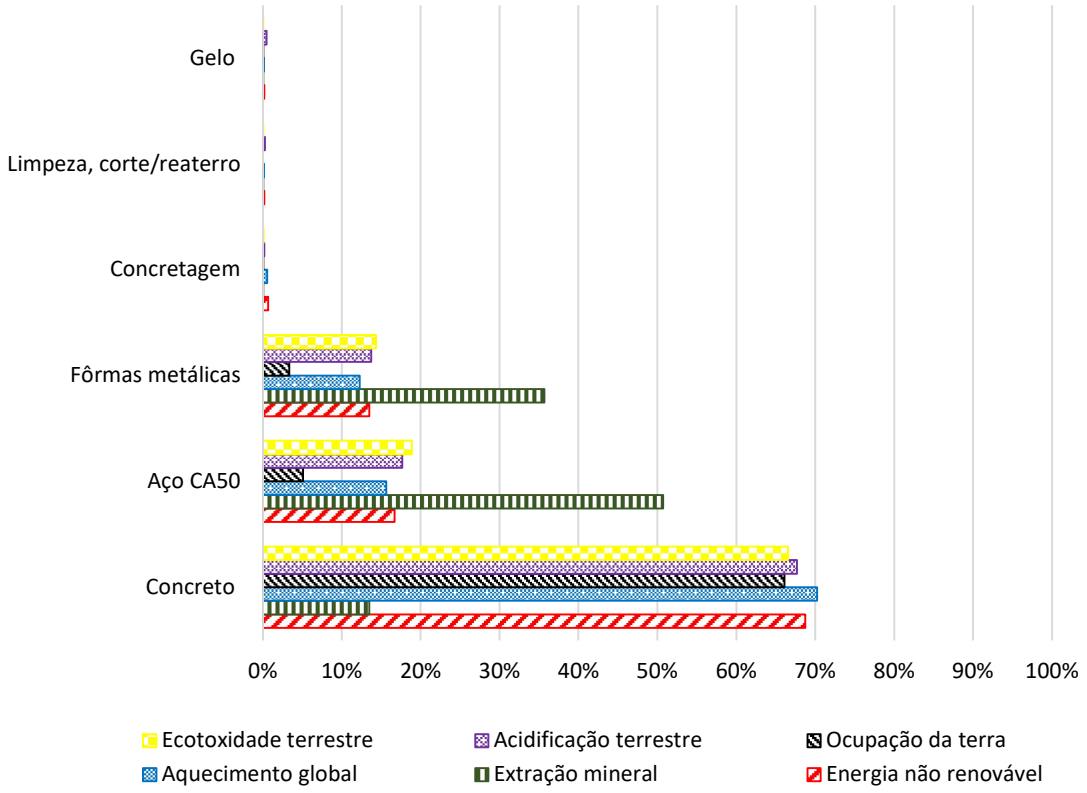
Já a comparação dos resultados das categorias de impacto da fundação direta convencional e da fundação indireta convencional mostra que a fundação indireta é menos impactante para o meio ambiente em todas as categorias, exceto na categoria Extração mineral (Figura 29). Isto se deve a maior massa de aço empregada nas armaduras da estrutura indireta (bloco de fundação e estacas). Ainda que a fundação direta utilize maior área de as fôrmas metálicas que a fundação indireta, ou seja, demande de maior massa de aço no que diz respeito as fôrmas, o excedente de aço total, considerando armação e fôrmas, na fundação indireta chega a aproximadamente 3.900 kg.

No que tange a fundação direta, o maior consumo de concreto, portanto, o maior consumo de cimento, 5,18% em relação a fundação indireta e 215,12%, em relação a fundação de tensegridade, ocasiona um aumento significativo de seus impactos. A maior demanda de concreto da fundação direta inclui não só o aumento do consumo dos componentes do concreto (cimento, brita, pó de pedra, areia, plastificante, água), como também maior demanda por transporte destes componentes, energia na fabricação, gelo para resfriamento da temperatura etc.

A fim de facilitar a interpretação do impacto total de um elemento de fundação, optou-se por atrelar os resultados as fases de construção e aos principais componentes da estrutura, como: preparação do terreno (limpeza, corte e aterro), concreto (extração, manufatura, transporte e preparação do concreto na usina montada próxima ao parque eólico, para as três resistências utilizadas na estrutura), fôrmas metálicas (extração, manufatura e transporte), armadura em aço CA50 (extração, manufatura e transporte), aplicação de gelo (fabricação, transporte e armazenamento), concretagem (equipamentos utilizados na aplicação do concreto e no caso da fundação de tensegridade também são considerados equipamentos utilizados na montagem da estrutura metálica) e estruturas metálicas para fundação de tensegridade (todo processo de fabricação dos tirantes e transporte).

A Figura 34 apresenta as porcentagens dos impactos totais das seis categorias de impacto, correspondentes a cada elemento de construção da fundação direta convencional. O apêndice E apresenta separadamente os resultados para cada categoria expressos na Figura 34.

Figura 34-Caracterização das categorias de impacto para a fundação direta.




Fonte: Elaborada pela autora.

Como observado na Figura 34, na fundação direta convencional o concreto é o componente mais impactante em todas as categorias de impacto, contribuindo com uma média de 68% do impacto total, sendo a única exceção a categoria Extração mineral, onde representa 13,5% do resultado. A Tabela 4 expõe a contribuição de cada material constituinte do concreto no impacto total.

Tabela 4- Participação dos constituintes do concreto no impacto total da fundação direta.

| Constituintes do concreto | Energia não renovável | Extração mineral | Aquecimento global | Ocupação da terra | Acidificação terrestre | Ecotoxidade terrestre |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Cimento | 23,52% | 5,77% | 37,44% | 17,35% | 17,22% | 14,58% |
| Brita 1 | 18,36% | 2,81% | 13,85% | 13,65% | 21,22% | 23,65% |
| Brita 0 | 9,37% | 1,43% | 7,07% | 6,96% | 10,84% | 12,07% |
| Pó de pedra | 8,35% | 1,27% | 6,30% | 6,21% | 9,66% | 10,76% |
| Areia | 3,79% | 0,53% | 2,87% | 19,24% | 3,36% | 2,89% |
| Plastificante | 3,20% | 1,34% | 2,10% | 1,30% | 3,74% | 1,03% |
| Água | 0,0% | 0,01% | 0,0% | 0,01% | 0,01% | 0,0% |

Fonte: Elaborada pela autora.

Conforme observado na Tabela 4, o principal responsável pela alta contribuição do concreto nos resultados das categorias de impacto é o cimento. Isto ocorre pois as etapas de produção do cimento Portland, isto é, extração, tratamento das matérias primas e calcinação, são altamente consumidoras de energia, além de gerarem grandes emissões de $CO_2$ e particulados na atmosfera. Os demais componentes do concreto têm processos de extração e produção menos poluentes, dessa forma seus impactos estão mais ligados às distâncias de transporte até a usina de concreto.

Contudo, vale ressaltar que nas categorias Ocupação da terra, Acidificação terrestre e Ecotoxidade terrestre, o cimento assume o segundo lugar como componente mais impactante. No caso da Ocupação da terra, a operação de extração de areia é responsável pela ocupação de uma grande área arável, o que faz com que a areia seja significativamente impactante nesta categoria. Já na categoria Acidificação terrestre, a produção de diesel para o transporte, a pavimentação de rodovias e as emissões dos veículos de carga são os processos que mais influenciam nos impactos, assim pelo fato da brita 1 e 0 serem materiais que demandam não só de muitos caminhões para seu transporte, mas também estão sujeitas a grandes distâncias, acabam sendo os componentes mais danosos ao meio. Para Ecotoxidade terrestre, o processo de degradação da pedreira e os métodos utilizados de explosivos tem o maior impacto do que os demais processos de manufatura.

Ressalta-se que, no caso da água os impactos de seu processo de captação até distribuição, considerando uma estação de tratamento convencional no Brasil, são mínimos se comparados aos demais materiais e fases da fundação.

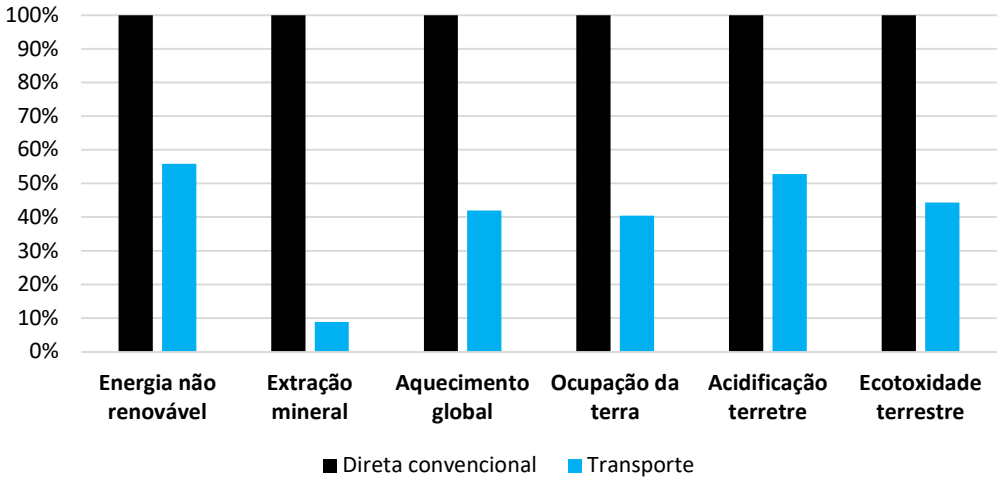
Em relação ao aço e as fôrmas metálicas, estes são o segundo e o terceiro componente mais impactante respectivamente, contribuindo com a média de 14,8% e 11,8% nas categorias de analisadas, sendo a única exceção Extração mineral, onde assumem a primeira (50,7%) e segunda posição (35,7%). Nas etapas de concretagem, limpeza, corte/aterro e fabricação e aplicação de gelo foram considerados os maquinários necessários para execução da fundação, contudo perante os demais componentes do sistema, os resultados encontrados foram pouco significativos.

Outro fator determinante nos impactos deste sistema foi o transporte, isso porquê os parques eólicos normalmente estão distantes das cidades e até por isso exigem o uso de uma usina de concreto no local do empreendimento. Vale ressaltar que, as maiores distâncias de transporte do sistema da fundação direta são relacionadas ao concreto, sendo o cimento, a brita 0, a brita 1 e o pó de pedra provenientes de um fornecedor de Fortaleza, o que corresponde a 771 km percorridos por caminhões, e o plastificante tem origem de uma fábrica no estado de São Paulo, o que equivale a 2452 km.

Além disso, a massa demandada destes materiais na construção da estrutura exige que sejam empregados, apenas para o transporte dos componentes do concreto, aproximadamente 60 caminhões. Justamente por isso encontra-se resultados tão elevados nos impactos referentes a brita 1, brita 0 e pó de pedra, em média 90% de seus impactos foram provenientes do transporte. Isso ocorreu, pois além destes materiais não passarem processos de manufatura que se sobressaem em emissões de gases, contaminação do ambiente e gastos energéticos, fazendo que seus impactos sejam relativamente baixos, os locais de origem dos mesmos encontram-se em distâncias maiores que as médias de transporte até um canteiro de obras típico.

À vista disso, a Figura 35 expõe a parcela do resultado proveniente do transporte para a fundação direta.

Figura 35- Resultado correspondente ao transporte para a fundação direta.

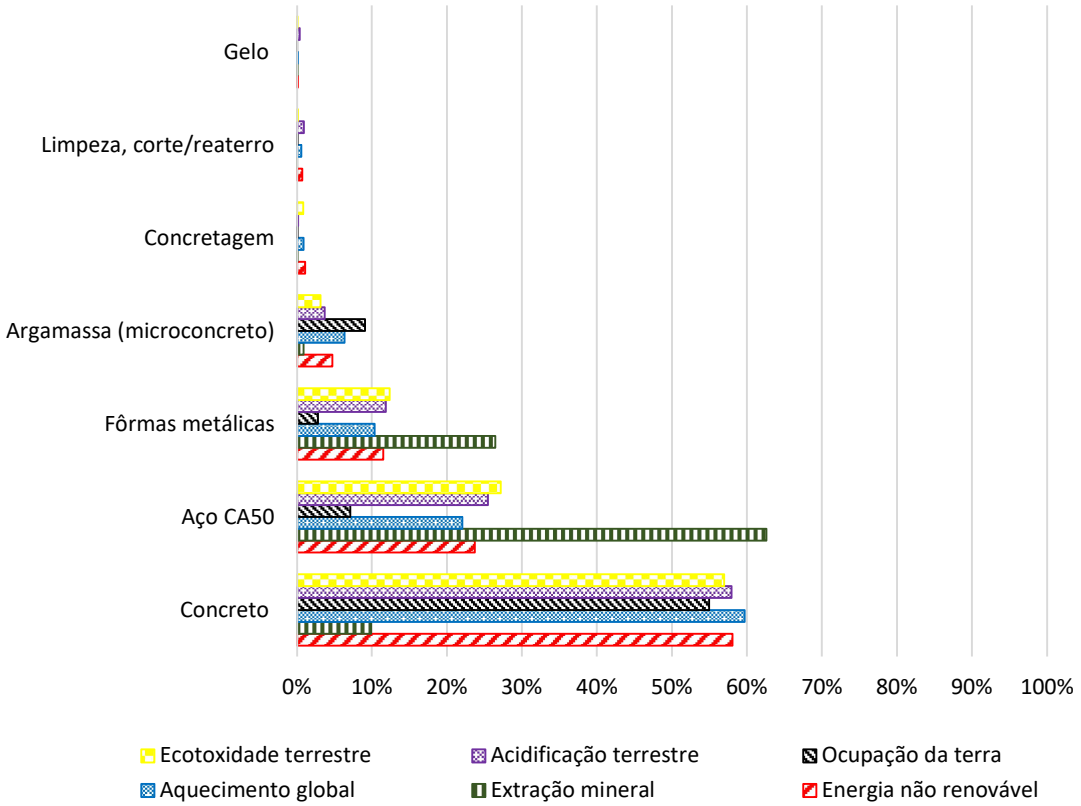



Fonte: Elaborada pela autora.

A partir da análise da interferência do transporte sobre o impacto total é perceptível que o transporte influenciou fortemente em todas as categorias de impacto estudadas, em especial para Energia não renovável e Acidificação terrestre, onde mais da metade do impacto foi originado do transporte.

Na sequência, a Figura 36 apresenta as porcentagens dos impactos para os elementos de construção da fundação indireta convencional. O apêndice E apresenta separadamente os resultados para cada categoria expressos na Figura 36.

Figura 36-Caracterização das categorias de impacto para a fundação indireta.




Fonte: Elaborada pela autora.

Como observado na Figura 36, na fundação indireta convencional, assim como na fundação direta, o concreto é o um dos componentes mais impactante em todas as categorias de impacto, contribuindo com uma média de 57,5% do impacto total, sendo exceção da Extração mineral, onde representa 9,91% do resultado, sendo o terceiro componente de maior impacto. A Tabela 5 expõe qual porcentagem do impacto total é atrelada a cada material constituinte do concreto.

Tabela 5- Participação dos constituintes do concreto no impacto total da fundação indireta.

| Constituintes do concreto | Energia não renovável | Extração mineral | Aquecimento global | Ocupação da terra | Acidificação terrestre | Ecotoxidade terrestre |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Cimento | 19,90% | 4,24% | 31,41% | 14,44% | 14,76% | 12,49% |
| Brita 1 | 15,51% | 2,06% | 11,60% | 11,34% | 18,15% | 20,24% |
| Brita 0 | 7,92% | 1,05% | 5,92% | 5,79% | 9,27% | 10,34% |
| Pó de pedra | 7,04% | 0,93% | 5,25% | 5,14% | 8,23% | 9,18% |
| Areia | 3,20% | 0,40% | 2,39% | 15,98% | 2,88% | 2,47% |
| Plastificante | 2,71% | 0,99% | 1,76% | 1,08% | 3,20% | 0,89% |
| Água | 0,0% | 0,01% | 0,0% | 0,01% | 0,0% | 0,0% |

Fonte: Elaborada pela autora.

Dado que o mesmo traço é utilizado para as três fundações estudadas, a relação de impacto entre os materiais componentes do concreto se mantém, sendo a única mudança a magnitude proveniente deles no impacto total da fundação. Dessa forma assim como para a fundação direta, o cimento foi o material mais impactante do traço de concreto, salve as exceções da areia e brita nas categorias de ocupação da terra, acidificação terrestre e ecotoxidade terrestre.

Na fundação indireta, o aço apresenta uma participação mais expressiva no impacto total das categorias se comparada a fundação direta, pois a massa de aço da armadura do bloco de fundação e das estacas supera a utilizada nas armaduras das outras fundações. O aço é responsável por 62,5% do impacto da categoria Extração mineral, além de corresponder a cerca de 21,1% do impacto em cada uma das categorias, sendo o segundo componente mais impactante neste sistema de fundação.

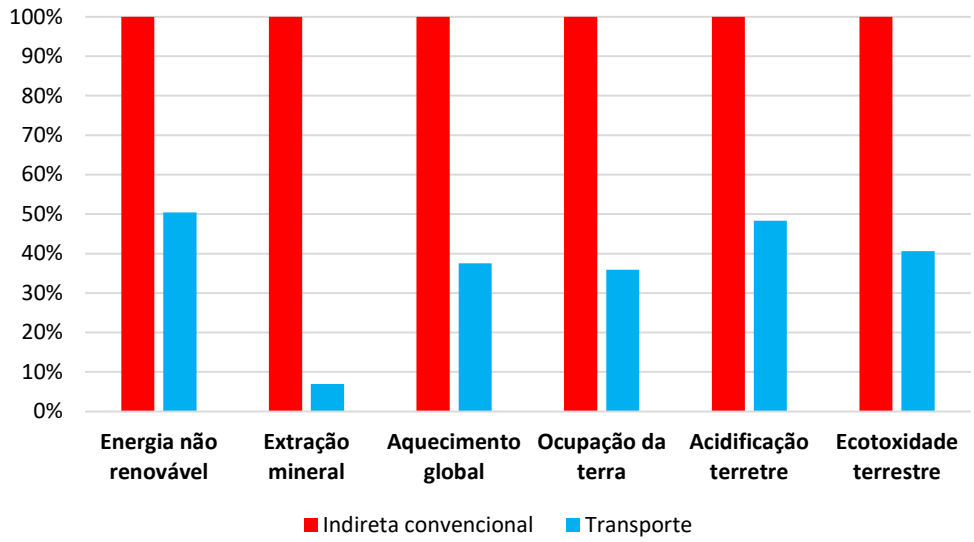
Em contrapartida, as fôrmas metálicas obtiveram menor parcela no impacto total nas seis categorias analisadas se comparados aos resultados da fundação direta, isto se deve a menor área de fôrmas utilizadas na fundação indireta. Elas contribuem com 26,45% da categoria Extração mineral e uma média de 9,8% nas demais categorias de impacto.

Referente a argamassa (microconcreto), utilizada nas 22 estacas que compõe este sistema de fundação, cerca de 73% dos resultados deste item nas seis categorias analisadas são provenientes do cimento utilizado na pasta.

Em relação a etapas de concretagem, limpeza, corte/aterro e aplicação de gelo, novamente elas apresentaram os menores resultados do sistema perante os demais componentes. Contudo, a participação no impacto total das fases de concretagem e limpeza, corte/aterro foram superiores as da fundação direta, como também em termos de valores absolutos o resultado foi superior. Isso se deve a utilização de maquinários necessários para este tipo de fundação como: perfuratriz, gerador e bomba lança para produção e lançamento da argamassa (microconcreto).

Para a fundação indireta, o transporte também assume uma parcela expressiva do impacto total, conforme apresentado na Figura 37.

Figura 37-Resultado correspondente ao transporte para a fundação indireta.



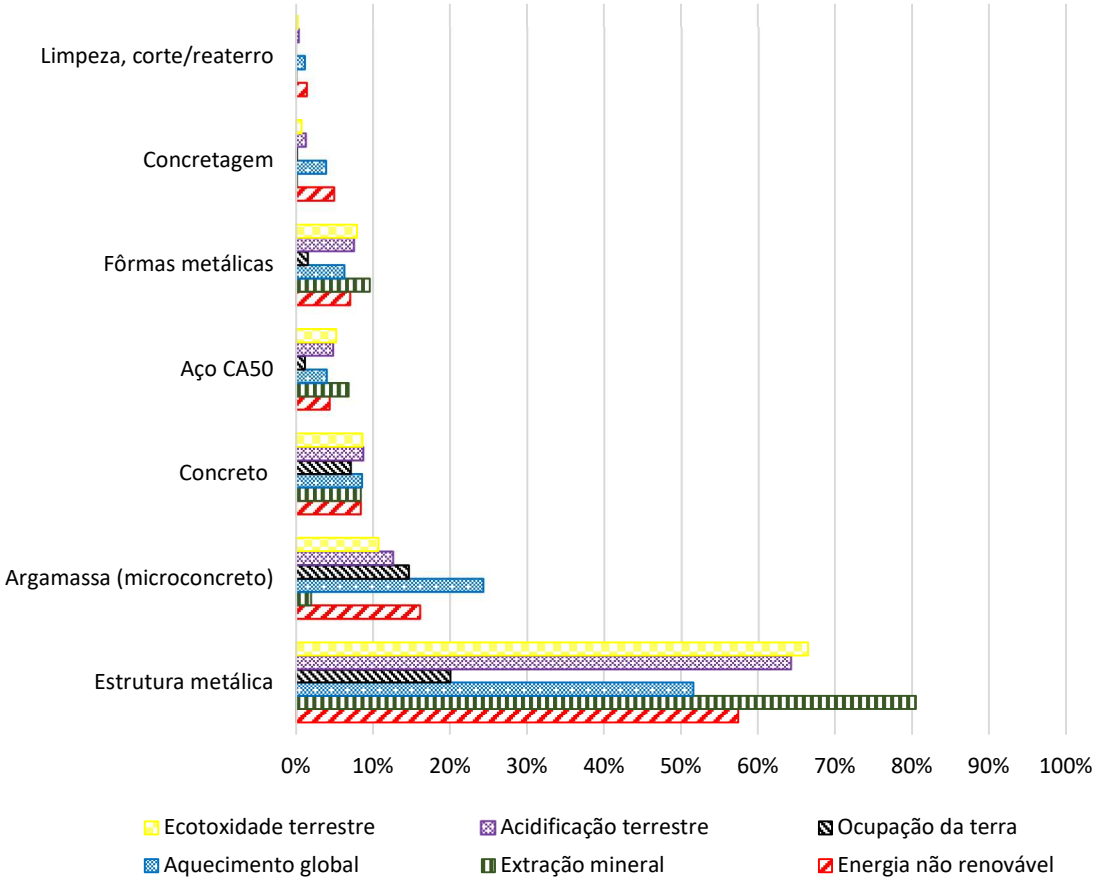

Fonte: Elaborada pela autora.

É importante perceber que, ainda que os fornecedores dos componentes da fundação indireta sejam os mesmos da fundação direta, devido a massa de material transportado ser menor, especialmente pelo menor consumo de componentes constituintes do concreto, as parcelas de impacto nas categorias estudadas foram inferiores, permitindo que os impactos de transporte nas categorias avaliadas fossem inferiores a 50% do impacto total, com exceção da categoria Energia não renovável.

Deste modo, é possível compreender que o aumento de um determinado material no sistema de fundação pode se tornar menos impactante do ponto de vista ambiental caso seja adquirido de um fornecedor próximo. Um exemplo é aço na fundação indireta, pois neste caso ainda que a massa de aço seja maior que na fundação direta, ele é proveniente de uma fábrica localizada no mesmo estado do parque eólico, por outro lado na fundação indireta obtém-se o menor consumo dos materiais componentes do concreto, cujos fornecedores estão mais distantes, fazendo com que esse sistema de fundação seja mais vantajoso ambientalmente que a fundação direta.

Por fim, a Figura 38 apresenta as porcentagens dos impactos para os principais elementos da construção da fundação com base no sistema de tensegridade. O apêndice E apresenta separadamente os resultados para cada categoria expressos na Figura 38.

Figura 38-Caracterização das categorias de impacto para a fundação com base no sistema de tensegridade.




Fonte: Elaborada pela autora.

Conforme dito anteriormente, a fundação com base no sistema de tensegridade apresenta melhor desempenho do ponto de vista ambiental que as fundações convencionais estudadas. É necessário compreender que nas fundações convencionais o concreto é responsável por uma parcela expressiva do impacto total, como visto nas Figuras 34 e 36. Cabe destacar que a fundação de tensegridade, que apresenta apenas 5,95% do volume de concreto da fundação direta e 7,33% do volume da fundação indireta, obtém ganhos ambientais não só pela redução da massa dos materiais do concreto, mas também redução do aço empregado na armadura, área de fôrmas metálicas, eliminação no uso de gelo para resfriamento do bloco de concreto, diminuição dos caminhões empregados em toda cadeia produtiva e redução do tempo de uso dos equipamentos de mistura e lançamento do concreto (energia).

Assim, na fundação de tensegridade os impactos do concreto, para todas as categorias de impacto analisadas, são inferiores a 10%, conforme visto na Figura 38. A Tabela 6 apresenta a parcela de impacto de cada material componente do concreto no impacto total do sistema.

Tabela 6-Participação dos constituintes do concreto no impacto total da fundação com base no sistema de tensegridade.

| Constituintes do concreto | Energia não renovável | Extração mineral | Aquecimento global | Ocupação da terra | Acidificação terrestre | Ecotoxidade terrestre |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Cimento | 2,89% | 0,36% | 4,52% | 1,88% | 0,24% | 1,89% |
| Brita 1 | 2,25% | 0,18% | 1,67% | 1,47% | 2,75% | 3,06% |
| Brita 0 | 1,16% | 0,09% | 0,86% | 0,75% | 1,41% | 1,57% |
| Pó de pedra | 1,04% | 0,08% | 0,77% | 0,68% | 1,27% | 1,41% |
| Areia | 0,46% | 0,03% | 0,34% | 2,06% | 0,43% | 0,37% |
| Plastificante | 0,39% | 0,08% | 0,25% | 0,14% | 0,49% | 0,13% |
| Água | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% |

Fonte: Elaborada pela autora.

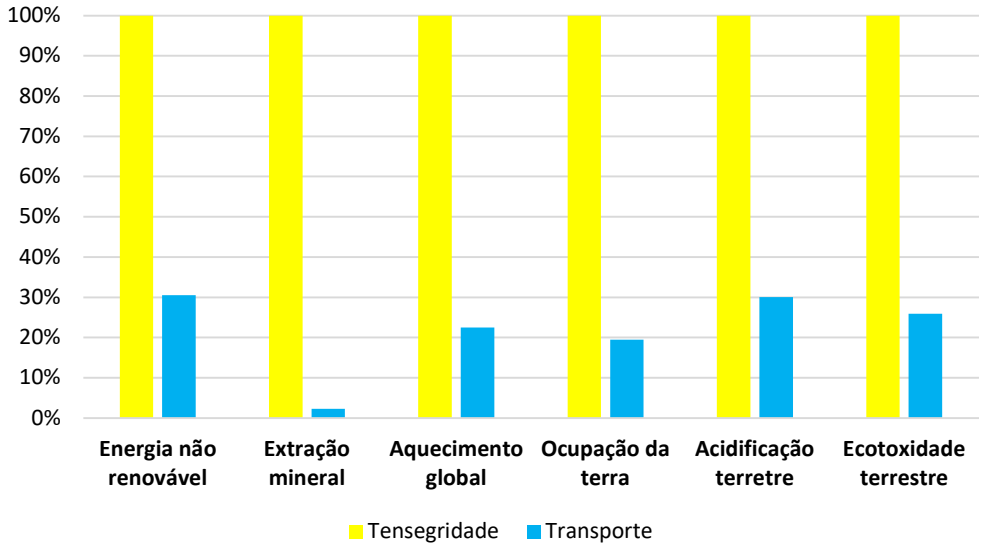
Conforme observado, o impacto proveniente materiais dos componentes do concreto foram muito menos expressivos do que os para as fundações convencionais. Para a fundação com base no sistema de tensegridade, o componente mais impactante é a estrutura metálica, constituída por tirantes que estão sujeitos a esforços axiais de tração ou compressão. Esta estrutura metálica demanda aproximadamente 18 t de aço, o que gera impactos não só para extração, mas também para sua produção, assim, com exceção da categoria Ocupação da terra, em todas as categorias mais da metade do impacto é proveniente deste componente, chegando até a contribuir com 80% da categoria Extração mineral.

O segundo componente de maior expressividade é a argamassa (microconcreto), cujo maior destaque ocorre na categoria Aquecimento global onde atinge cerca de 24,3% de impacto, isso ocorre devido à presença do cimento na pasta, dado que sozinho este material é responsável 23,48% do impacto total nesta categoria.

Na sequência tem-se as fôrmas metálicas e a armadura, que apresentam uma média de respectivamente 6,6% e 4,4% do impacto total das seis categorias. Vale ressaltar que a massa de aço na armadura da estrutura (1.800 kg) e nas fôrmas metálicas (2.704 kg) sofreu uma redução tão expressiva perante as fundações convencionais que, ainda que considerada aproximadamente 18 t de estrutura metálica, a massa de aço total na fundação de tensegridade será menor que as demais.

Por fim, a Figura 39 expõe a repercussão do transporte na fundação com base no sistema de tensegridade.

Figura 39-Resultado atrelado ao transporte para fundação com base no sistema de tensegridade.




Fonte: Elaborada pela autora.

A fundação de tensegridade teve menor repercussão do transporte em seu impacto total em comparação as fundações convencionais. Esta condição está ligada diretamente aos quantitativos de materiais envolvidos neste sistema, dado que para todos os materiais houve a redução se comparados aos quantitativos das fundações convencionais.

## 5.2 COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE IMPACTO

Conforme dito anteriormente nesta dissertação, existem vários métodos AICV, cada um deles com suas particularidades de escopo e de cálculo, ainda não havendo padronização neste campo da ACV. Assim, nesta seção objetivou-se comparar os resultados obtidos na ACV com os resultados de outros métodos de impacto para as mesmas categorias.

A fim de realizar tais comparações, foram estabelecidas duas premissas: seriam comparados entre si apenas os resultados de mesmas categorias de impactos e de categorias que possuíssem mesma unidade, uma vez que é muito comum entre os métodos de impacto a adoção de unidades variadas para as categorias. Ao longo do estudo, percebeu-se a dificuldade em realizar tais comparações, dado que existem muitas abordagens distintas, não existe uma padronização para as unidades das categorias de impacto e por vezes os métodos de avaliação de impacto apresentam divergências sobre suas categorias de impactos ambientais.

Dessa forma, serão apresentados os resultados para a categoria de impacto Aquecimento global para os métodos: IMPACT 2002+, CML, IPCC e ReCiPe, e para Acidificação terrestre: IMPACT 2002+ e ReCiPe. A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos nesta análise.

Tabela 7-Resultados obtidos por diferentes métodos de AICV

| | IMPACT 2002+ | IPCC (GWP 100 a) | CML | ReCiPe |
|---|---|---|---|---|
| **FUNDAÇÃO DIRETA** | | | | |
| Aquecimento global [kg CO2 eq.] | 2,16E+05 | 2,22E+05 | 2,22E+05 | 2,24E+05 |
| Acidificação terrestre [kg SO2 eq] | 2844,69 | | | 547,75 |
| **FUNDAÇÃO INDIRETA** | | | | |
| Aquecimento global [kg CO2 eq.] | 2,10E+05 | 2,15E+05 | 2,15E+05 | 2,17E+05 |
| Acidificação terrestre [kg SO2 eq] | 2697,34 | | | 533,05 |
| **FUNDAÇÃO TENSEGRIDADE** | | | | |
| Aquecimento global [kg CO2 eq.] | 8,89E+04 | 9,16E+04 | 9,15E+04 | 9,26E+04 |
| Acidificação terrestre [kg SO2 eq] | 1085,44 | | | 233,75 |

Fonte: Elaborada pela autora.

Na categoria Aquecimento global os resultados foram muito próximos para os métodos avaliados, especialmente para o IPCC e CML. É importante destacar que o IPCC, CML, ReCiPe e IMPACT 2002 + possuem abordagens globais para esta categorias de impacto.

É perceptível que nesta categoria de impacto o IMPACT 2002+ e ReCiPe apresentam respectivamente os menores e os maiores resultados. Vale ressaltar que, curiosamente, estes dois métodos são derivados do Eco-indicador 99 e CML 2000/2002, onde os autores efetuaram adaptações nas categorias de impacto que justificaram a criação de novos métodos.

A proximidade nos resultados obtidos na categoria Aquecimento global indica que os métodos avaliados utilizam valores similares de caracterização do potencial de aquecimento global das emissões de gases de efeito estufa. Usualmente os valores de caracterização das emissões são baseados nas publicações do IPCC, contudo os métodos utilizam anos de referência diferentes, podendo ainda ajustar os valores de entrada em casos específicos.

Na categoria Acidificação terrestre, ambos os métodos possuem sua abordagem direcionada a Europa. Os resultados, por sua vez, tiveram uma variação significativa, isso implica que cada método utiliza seus próprios potenciais de acidificação das emissões e considera uma parcela diferente que será direcionada a deposição ácida, fenômeno responsável pela mudança de acidez no solo. Essa diferença nos resultados pode conferir um grande potencial de interferência nos resultados finais da AICV.

## 5.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Nesta dissertação a análise de sensibilidade foi realizada para três parâmetros. Os dois primeiros parâmetros mostraram-se importantes durante a interpretação dos resultados, sendo eles: traço do concreto e distâncias de transporte. Já o terceiro parâmetro avaliado foi volume de concreto na fundação de tensegridade, a fim de compreender sua influência neste sistema.

### 5.3.1 Cenários de traços de concreto

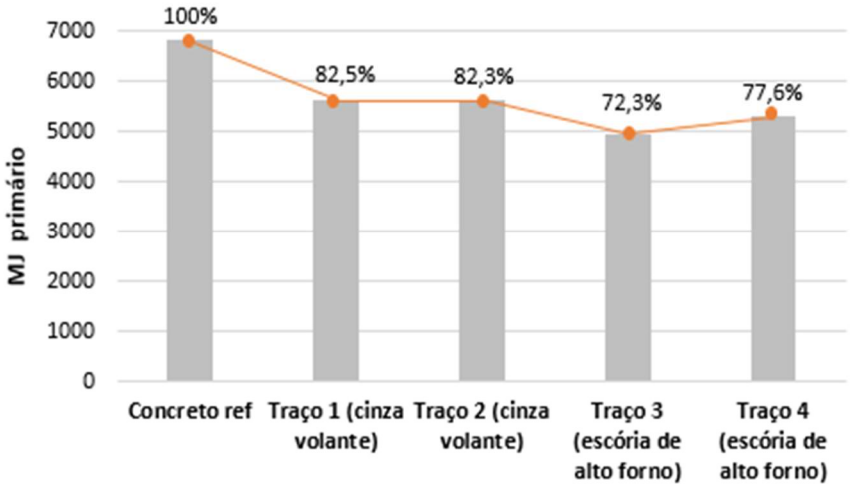
As cargas ambientais atreladas ao concreto são fortemente influenciadas pelo impacto ambiental resultante da produção do cimento. Nos sistemas de fundações convencionais estudados, o

cimento representa sozinho uma média de 16% dos impactos nas categorias avaliadas, demonstrado assim que o traço de concreto influencia diretamente na magnitude das emissões.

Assim, optou-se por avaliar quatro traços que utilizam subprodutos industriais, que têm sido frequentemente utilizados como substitutos parciais para o cimento Portland: cinza volante e escória de alto forno. Os traços estudados foram apresentados no item 4.4.1 na Tabela 2.

As Figuras 40 a 45 apresentam os impactos por m³ dos traços de concreto estudados na análise de sensibilidade, sendo a linha laranja a porcentagem equivalente dos traços em relação ao impacto do concreto de referência.

Figura 40-Resultados por m³ dos traços na categoria Energia não renovável



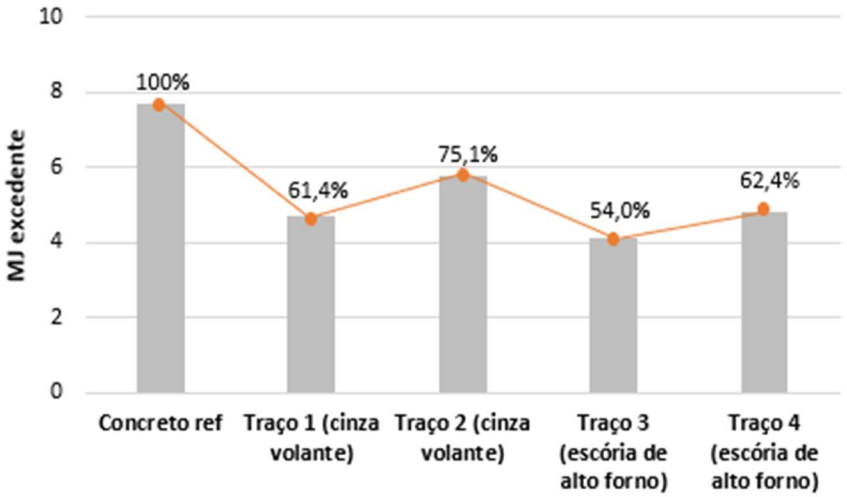

Fonte: Elaborada pela autora.

É possível observar que na categoria Energia não renovável, o traço de referência obteve o maior impacto. Isto se deve ao alto consumo de cimento, material que possui elevados gastos energéticos em sua extração e produção, além de estar sujeito a extensas distâncias de transporte. Assim, os traços que utilizaram adições de subprodutos como substituição parcial ao cimento obtiveram diminuições consideráveis no impacto total.

Os traços 1 e 2, que utilizam como adição a cinza volante, obtiveram os maiores impactos por m³ que os traços 3 e 4, condição que neste caso está relacionada ao alto consumo de agregado graúdo (traço 1) e cimento (traço 2), devido não só a energia gasta no processo de extração e produção, mas também ao transporte de dois materiais que percorrem grandes extensões através do transporte rodoviário. Os demais traços apresentaram diferenças sutis entre si no consumo de agregados e cimento, o que ocasiona resultados próximos nesta categoria de impacto, dado que os outros materiais são menos poluentes.

De modo geral, seja para o traço de pior (concreto ref.) ou melhor (traço 3) desempenho ambiental, o transporte dos agregados representou uma grande parcela do impacto, aproximadamente 71%. Em relação a escolha de qual subproduto industrial utilizar como adição, sob a ótica da avaliação de ciclo de vida, ambos os materiais apresentam resultados similares para 1 kg consumido, sendo a escória levemente menos impactante.

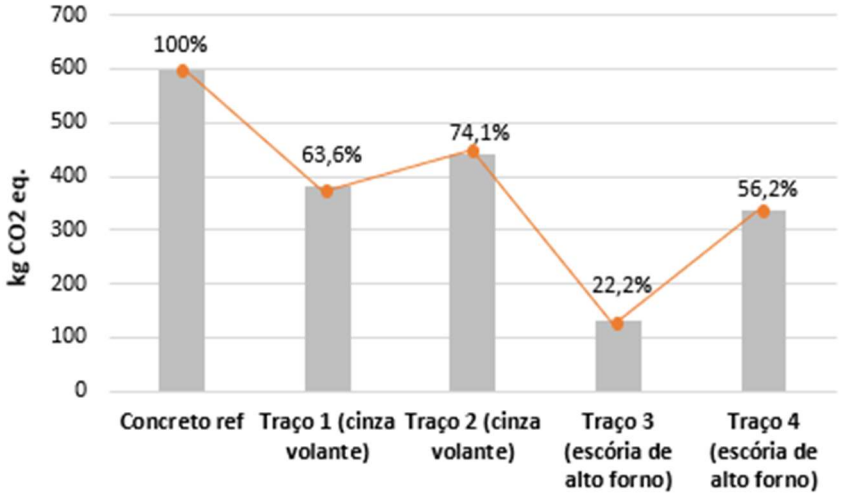
Figura 41-Resultados por m³ dos traços na categoria Extração mineral




Fonte: Elaborada pela autora.

Para categoria de extração mineral, o traço de referência teve o maior impacto por m³, isso porque a maior demanda por extrações minerais dos materiais componentes do concreto é proveniente do cimento. Assim, os demais traços apresentam suas taxas de diminuição de impactos relacionadas ao consumo de cimento e ao transporte. Em relação aos subprodutos industriais, os resultados nesta categoria foram quase iguais, uma vez que os usuários destes subprodutos ficam isentos de encargos ambientais dos mesmos, assim foram considerados no caso da cinza volante apenas o transporte ao canteiro e o tratamento térmico, e no caso da escória de alto forno o transporte ao canteiro e uma parcela da eletricidade, do consumo de água e do transporte atrelados a geração do subproduto.

Figura 42-Resultados por m³ dos traços na categoria Aquecimento global

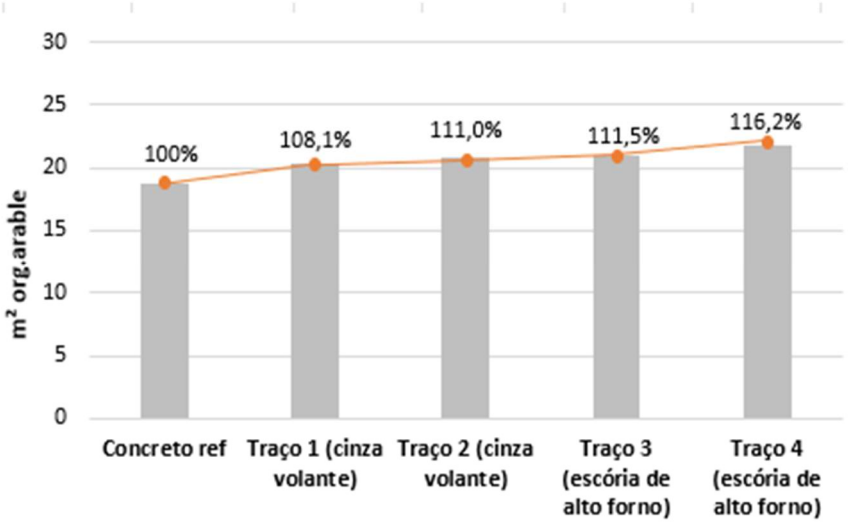



Fonte: Elaborada pela autora.

Na categoria Aquecimento global, novamente o traço de referência obteve o pior desempenho ambiental, havendo reduções de impacto próximas para os traços 1, 2 e 4, dado que as emissões provenientes do transporte, da extração e produção do cimento apresentam maior magnitude perante as demais contribuições, e estas sofrem pouca variação nos três traços.

Contudo, destaca-se a elevada redução nos impactos para o traço 3, uma vez que o consumo de cimento deste traço é inferior ao traço de referência, 2 e 4, e as distâncias de transporte das adições são inferiores ao traço 1, devido a menor demanda do material.

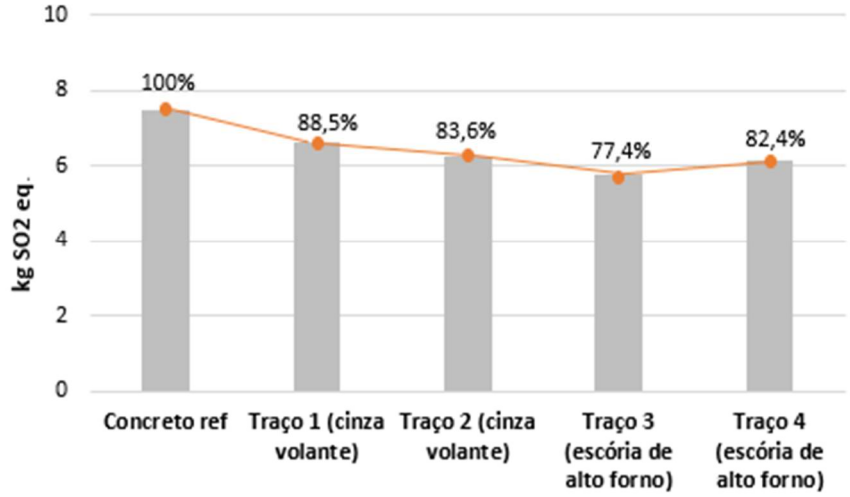
Figura 43-Resultados por m³ dos traços na categoria Ocupação da terra




Fonte: Elaborada pela autora.

Na categoria Ocupação da terra, os resultados obtidos revelaram que o traço de referência apresentou o melhor desempenho perante os demais. Isto ocorre pois os dois processos significativamente mais impactantes nesta categoria, isto é, operação de extração de areia e construção de rodovias, ocorrerão com maior intensidade nos traços 1, 2, 3 e 4, já que o consumo de agregado miúdo aproxima-se do dobro do que o traço de referência e devido a inserção de um novo componente do concreto (subproduto industrial) uma nova distância foi adicionada ao sistema, aumentando os impactos indiretos de pavimentação.

Figura 44-Resultados por m³ dos traços na categoria Acidificação terrestre

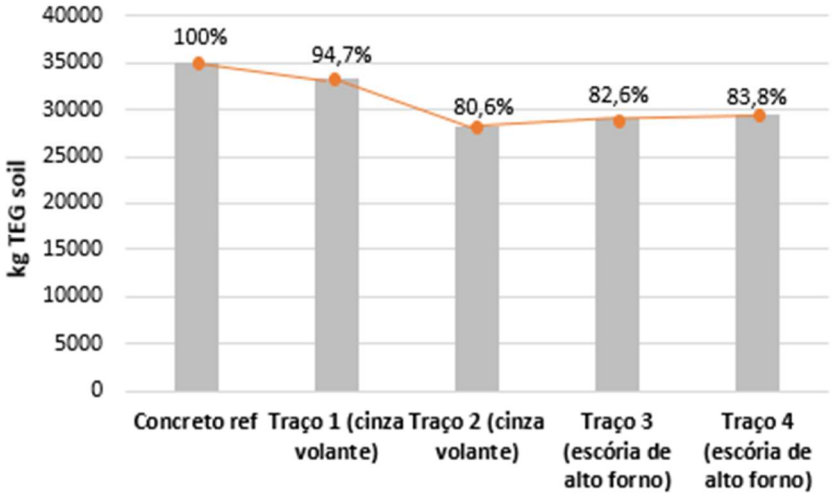



Fonte: Elaborada pela autora.

Na categoria Acidificação terrestre, novamente o traço de referência teve o pior desempenho ambiental, dentre os demais traços o traço 1 obteve a menor redução de impactos. Este cenário está atrelado diretamente ao maior consumo de cimento no traço de referência e alto consumo de agregado graúdo no traço 1, isso porque a categoria de Acidificação terrestre se beneficia da

redução da necessidade de diesel para o transporte, da pavimentação e das emissões de veículos de carga.

Figura 45-Resultados por m³ dos traços na categoria Ecotoxidade terrestre




Fonte: Elaborada pela autora.

Por fim, na categoria Ecotoxidade terrestre os resultados foram similares a categoria de acidificação, com menor redução de impactos no traço 1 e a maior redução no traço 2. Contudo a redução, nos quatro traços, foi muito sutil, isso ocorre porque o processo de degradação da pedreira e os métodos utilizados de explosivos causam sérios impactos de ecotoxidade e nos cenários avaliados esses componentes não têm drástica diminuição. O traço 3 apresenta maior consumo de agregados que o traço 4, contudo o maior consumo de cimento e o uso de aditivos do traço 4 ocasionam maiores demandas de transporte o que gera desgaste de pneus, outro grande vilão para a ecotoxidade terrestre.

Em conclusão, a análise de sensibilidade direcionada ao traço de concreto evidenciou que o controle do teor de cimento das misturas de concreto e substituição parcial por escória de alto-forno e/ou cinzas volantes podem reduzir significativamente os impactos ambientais. O traço 3 que utiliza a escória de alto-forno, se mostrou particularmente benéfico por ter obtido maior índice de reduções nas seis categorias de impactos. Contudo, vale ressaltar que em média 95% e 97% dos impactos da cinza volante e da escória de alto forno, respectivamente, foram provenientes do transporte.

Além disso foi perceptível que o aumento do consumo de agregados graúdos neste sistema, onde a pedreira está longe do canteiro, fez com que o aumento de agregados no traço não permitisse a diminuição considerável nos impactos.

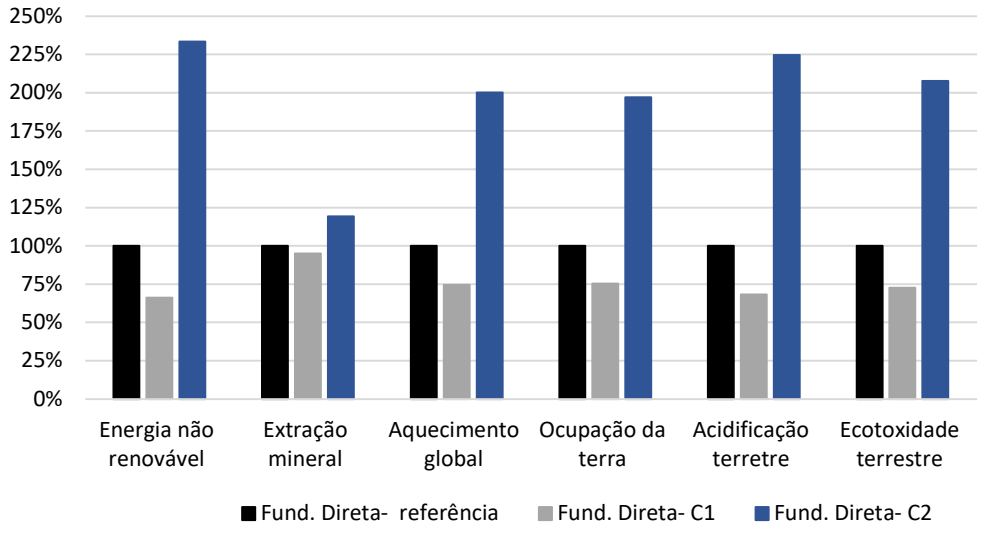
O apêndice F expõe o impacto total dos três sistemas de fundações estudados, isto é, referente ao volume total de concreto utilizado, a fim de representar a magnitude dos impactos entre os traços.

### 5.3.2 Cenários de distâncias de transporte

Na seção 5.1, constatou-se que a contribuição do transporte varia entre 2,31% e 55,84% do total de impactos nos sistemas de fundações estudados, a menor e a maior contribuição ocorrendo, respectivamente, para as categorias de impacto de Extração mineral e Energia não renovável.

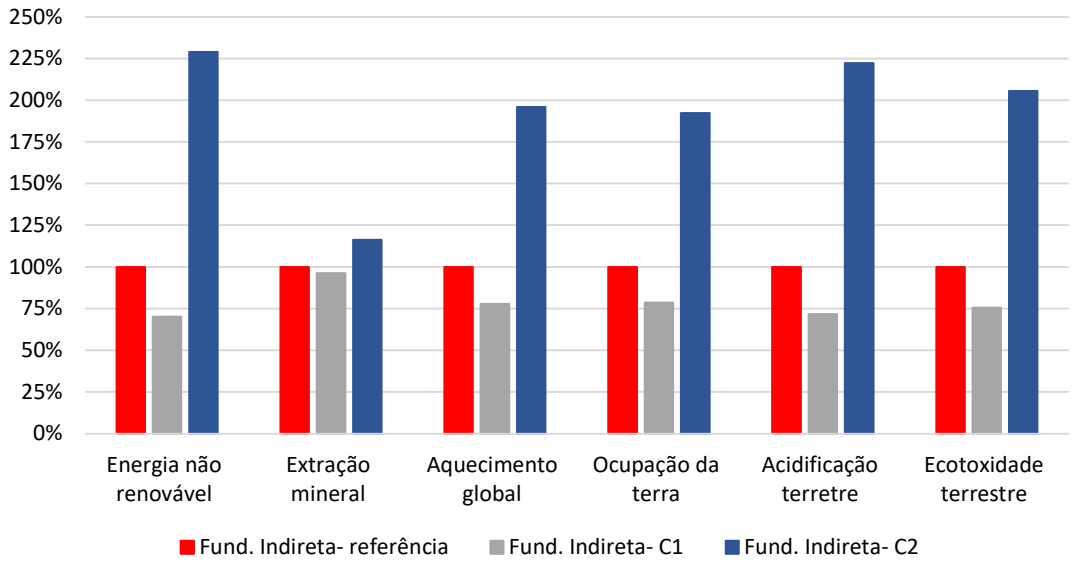
A fim de compreender a implicação das distâncias de transporte nos resultados das categorias de impacto, foram analisados três cenários (C1-C3): C1 que assume que os componentes do concreto e o aço vieram do estado do Pernambuco (em média de 200 km); C2 que assume que os componentes do concreto e o aço vieram do estado de São Paulo (em média 2.500 km); e o C3 que assume que os componentes do concreto vieram de Pernambuco e o aço, utilizado na armação da fundação, de São Paulo. As Figura 46 a 48 apresentam o cenário de referência, o cenário 1 e 2 para os três tipos de fundações.

Figura 46-Resultado para fundação direta no C1 e C2 da análise de sensibilidade



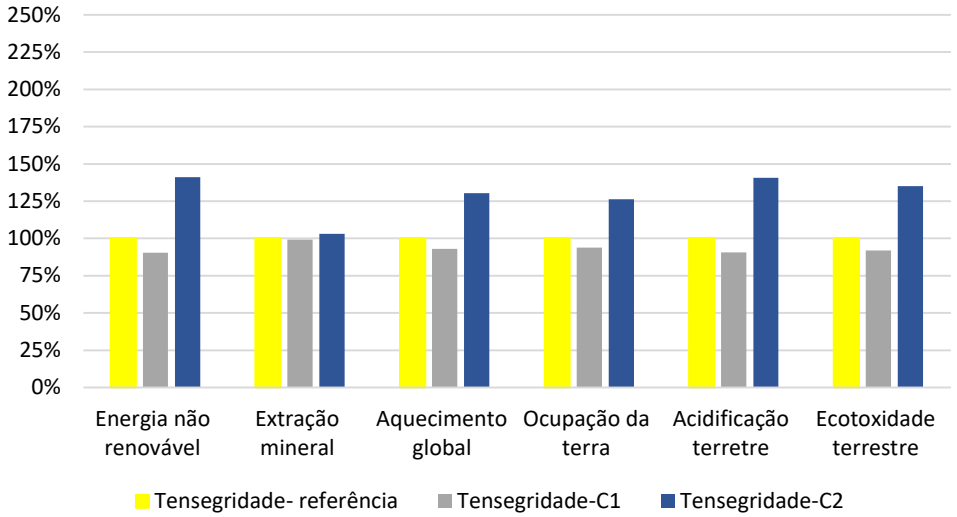

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 47- Resultado para fundação indireta no C1 e C2 da análise de sensibilidade




Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 48- Resultado para fundação com base no sistema de tensegridade no C1 e C2 da análise de sensibilidade




Fonte: Elaborada pela autora.

Conforme observado nas Figuras 46 a 48, as categorias Energia não renovável, Acidificação terrestre, Ecotoxidade terrestre e Aquecimento global são mais sensíveis a mudanças nas distâncias de transporte em comparação com as demais categorias avaliadas.

Isso se deve ao fato que de alguns dos processos mais impactantes do sistema nestas categorias estão atrelados diretamente ao transporte, na categoria de Energia não renovável cita-se: produção de petróleo e gás (*onshore* e *offshore)*, na categoria Acidificação terrestre: transporte em caminhão de carga 7,5-16 toneladas e transporte marítimo (petroleiro), na categoria Ecotoxidade terrestre: emissões de desgaste de pneus para caminhões e tratamento das emissões de desgaste dos pneus de caminhão, e na categoria Aquecimento global: transporte em caminhão de carga 7,5-16 toneladas EURO5 (consumo de combustível e emissões).

No C1, a fundação que apresentou maior redução no impacto total foi a fundação direta convencional, variando de 4,9% a 33,9% a menos do que no resultado do cenário de referência, uma vez que esta fundação utiliza maior volume de concreto que as demais. A fundação indireta convencional, por sua vez, também se beneficia com a diminuição das distâncias de transporte, tendo seu impacto total reduzido de 3,7% a 29,8%. Por outro lado, a fundação com base no sistema de tensegridade, por ter menor volume de concreto que as demais, teve uma redução menos expressiva que as demais fundações, variando de 0,7% a 9,56%.

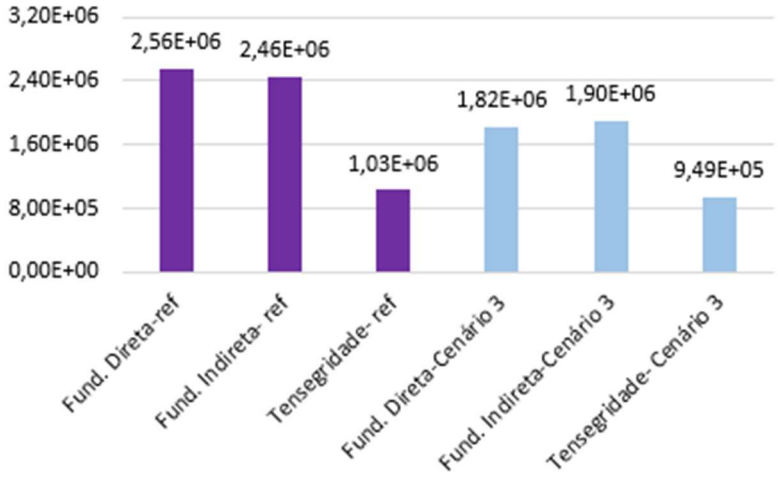
Dessa forma, percebe-se que a redução nas distâncias de transporte dos componentes do concreto (C1) impacta de modo expressivo no resultado da ACV das fundações convencionais, comprovando, mais uma vez, a necessidade de utilizar materiais, em especial o cimento, produzidos na área próxima ao canteiro de obras na busca pela redução de impactos ambientais.

No C2, ao aplicar maiores distância de transporte para os componentes do concreto e para o aço tem-se o aumento dos resultados dos três tipos de fundações estudadas. Para fundação direta convencional houve o aumento de 19,34% a 133,3%, para fundação indireta convencional de 16,26% a 128,9% e para fundação com base no sistema de tensegridade de 3,05% a 41,11%. Vale ressaltar que, a fundação com base no sistema de tensegridade teve a faixa de variação dos resultados das categorias de impacto no C2 superior ao C1, isso porque a distância de transporte do aço tem maior influência neste sistema do que o concreto.

Ao analisar os resultados do C2 conclui-se que a viabilidade ambiental de uma fundação cujos materiais fossem extraídos ou produzidos em regiões muito distantes seria significativamente afetada. É importante salientar que a realidade brasileira para transporte de cargas é muito particular, isto porque o Brasil é um país de dimensões continentais que depende predominantemente do transporte rodoviário, o que acaba sendo um limitador para na tentativa por sugerir cenários que poderiam minimizar impactos.

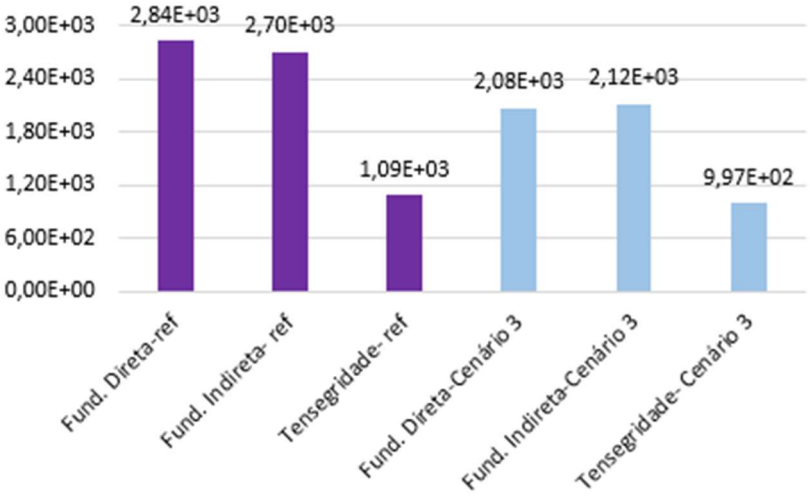
O C3, por sua vez, tem como objetivo verificar se a mudança das distâncias de transporte poderia tornar a fundação indireta convencional mais impactante do que a fundação direta convencional. Para isso optou-se por aumentar a distância apenas do aço, material encontrado em maior quantidade na fundação indireta, e diminuir a distância dos componentes do concreto, cujo maior volume encontra-se na fundação direta. Assim, as Figuras 49 a 52 apresentam as quatro categorias de impacto que mais são influenciadas pelo transporte, conforme visto anteriormente: Energia não renovável, Acidificação terrestre, Ecotoxidade terrestre e Aquecimento global.

Figura 49- Resultados para o C3 da análise de sensibilidade na categoria Energia não renovável



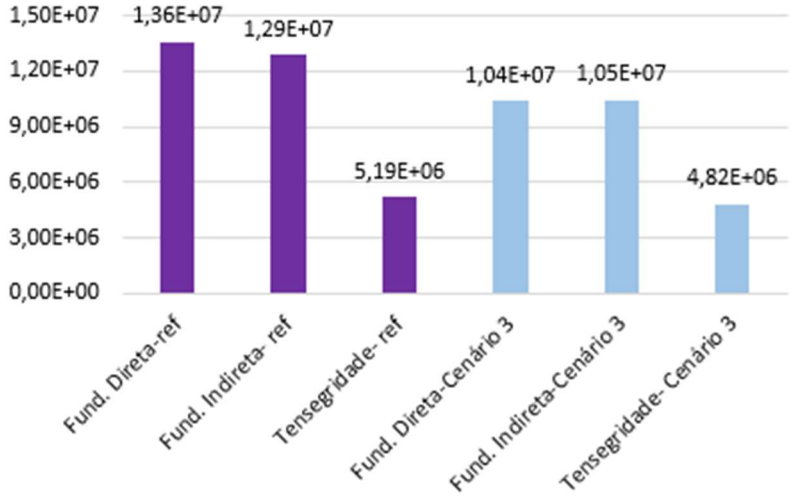

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 50- Resultados para o C3 da análise de sensibilidade na categoria Acidificação terrestre



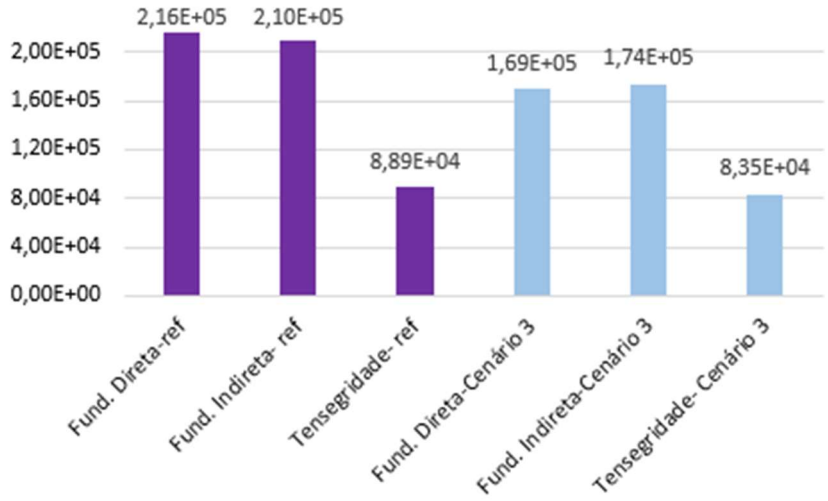

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 51- Resultados para o C3 da análise de sensibilidade na categoria Ecotoxidade terrestre




Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 52- Resultados para o C3 da análise de sensibilidade na categoria Aquecimento global




Fonte: Elaborada pela autora.

A partir dos resultados encontrados percebe-se que a fundação com base no sistema de tensegridade continua a gerar menos impacto que as fundações convencionais, além de ter havido uma pequena diminuição nos resultados para a condição de transporte avaliada. Isso demonstra que mesmo em um sistema onde o aço tem sua massa muito mais expressiva que os demais materiais, o impacto total pode ser reduzido através da diminuição das distâncias de transporte dos componentes do concreto, em especial do cimento.

Em relação as fundações convencionais, percebe-se que houve a diminuição do impacto em ambos os casos, o que já era esperado. Entretanto, destaca-se que neste cenário de transporte, a fundação direta apresenta menor impacto ambiental que a fundação indireta, ou seja, a determinação de qual fundação convencional apresenta melhor desempenho sob o ponto de vista ambiental depende diretamente da localização do parque eólico e dos fornecedores de materiais.

Assim percebe-se que a escolha de indústrias e fornecedores que se atendam as distâncias médias de transporte metropolitano até o canteiro de parque eólico é essencial para viabilizar tal empreendimento sob a ótica ambiental.

### 5.3.3 Cenários de volume do concreto na fundação de tensegridade

Na análise dos resultados, na seção 5.1, foi evidente que o concreto é o insumo de maior influência no impacto ambiental. Ainda que os dados da fundação de tensegridade sejam reais, provenientes de projetos fornecidos por empresas que a executam, essa análise de sensibilidade analisa qual a repercussão do aumento de volume de concreto no sistema.

Assim, foram analisados os resultados para fundação de tensegridade caso o volume de concreto da mesma fosse de 20% e 30% do volume de concreto das fundações convencionais, o que corresponde a 3,4 e 5,08 vezes o volume do cenário de referência da fundação de tensegridade. A Tabela 8 apresenta os resultados para os dois cenários avaliados, os resultados da fundação de tensegridade, direta convencional e indireta convencional no cenário de referência.

Tabela 8- Resultados dos cenários de concreto para fundação de tensegridade

| | Tensegridade (20%) | Tensegridade (30%) | Tensegridade (ref.) | Direta convencional (ref.) | Indireta convencional (ref.) |
|---|---|---|---|---|---|
| Energia não renovável [MJ primário] | 1,24E+06 | 1,39E+06 | 1,03E+06 | 2,56E+06 | 2,46E+06 |
| Extração mineral [MJ excedente] | 1,17E+04 | 1,19E+04 | 1,15E+04 | 1,46E+04 | 1,62E+04 |
| Aquecimento global [kg CO2 eq.] | 1,07E+05 | 1,20E+05 | 8,89E+04 | 2,16E+05 | 2,10E+05 |
| Ocupação da terra [m²org.arável] | 3940,36 | 4347,33 | 3366,30 | 7336,20 | 7165,41 |
| Acidificação terrestre [kg SO2 eq] | 1313,79 | 1475,67 | 1085,44 | 2844,69 | 2697,34 |
| Ecotoxidade terrestre [kg TEG solo] | 6,26E+06 | 7,02E+06 | 5,19E+06 | 1,36E+07 | 1,29E+07 |

Fonte: Elaborada pela autora.

Os resultados dos cenários que consideram o aumento do volume de concreto no sistema de tensegridade, evidenciam que ainda que haja o aumento dos impactos ambientais, este sistema ainda seria menos impactante ambientalmente nas seis categorias de impacto analisadas, se comparado aos sistemas de fundações convencionais. Comprovando que o sistema de tensegridade comportaria o aumento de concreto, caso necessário, sem deixar de ser ambientalmente vantajoso.

## 5.4 ANÁLISE DE INCERTEZA

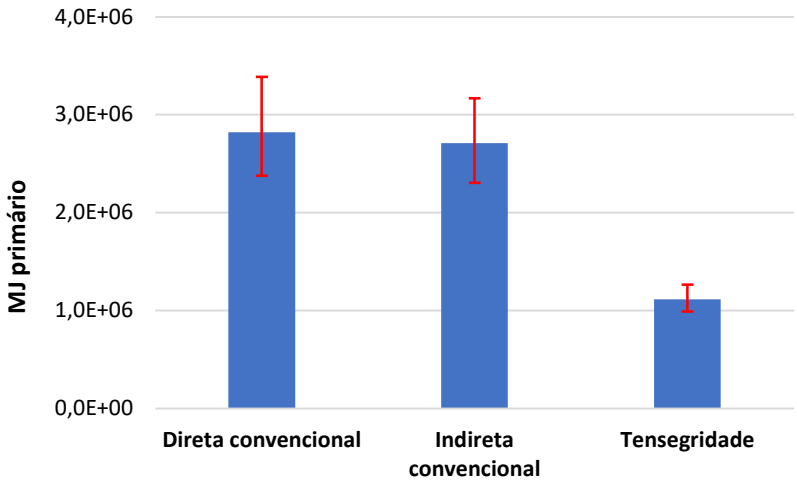
Neste item, a simulação de Monte Carlo foi empregada para melhorar a confiabilidade desta ACV, avaliando os sistemas de fundações para aerogeradores para diferentes *midpoints*. Ao apresentar o resultado do impacto como um valor médio, acompanhado de um intervalo de possíveis resultados, a abordagem probabilística fornece mais elementos para a comparação dentre alternativas.

A literatura recomenda a realização de 10.000 iterações na simulação de Monte Carlo, contudo para realização deste procedimento no *software* OpenLCA é necessária uma máquina de grande memória e processamento. Deste modo, com os recursos disponíveis na época da elaboração desta dissertação, a fim de realizar a análise de incerteza, foi necessário reduzir a simulação para 1.000 iterações, utilizando o intervalo de confiança de 90% dos resultados.

Dentre as seis categorias de impacto abordadas nessa avaliação de ciclo de vida, cinco obtiveram resultados coerentes, isto é, razoáveis para os valores obtidos durante as análises. Entretanto, para a categoria Ecotoxidade terrestre seria necessário que houvesse mais iterações e análises mais aprofundadas para obter a faixa probabilística para seus resultados, assim, compreendendo que esta é uma categoria de menor significância frente as demais, optou-se por excluir essa categoria da análise.

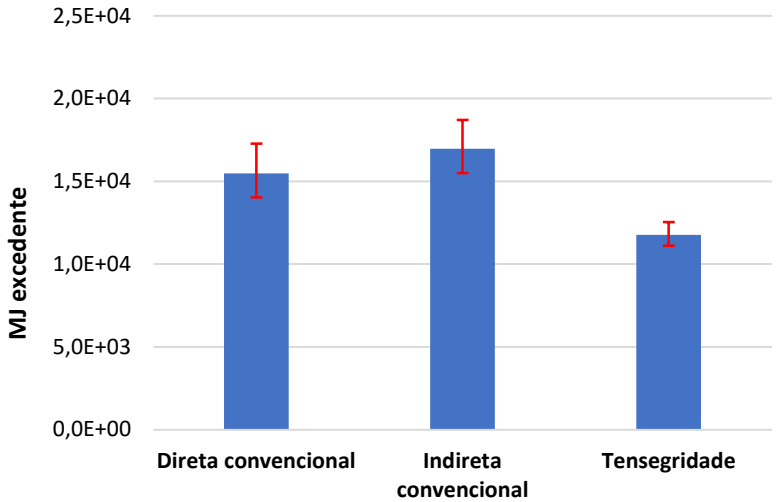
As Figuras 53 a 57 retratam os resultados da análise de Monte Carlo para as categorias: Energia não renovável, Extração mineral, Aquecimento global, Ocupação da terra e Acidificação terrestre.

Figura 53-Resultados de incerteza para Energia não renovável



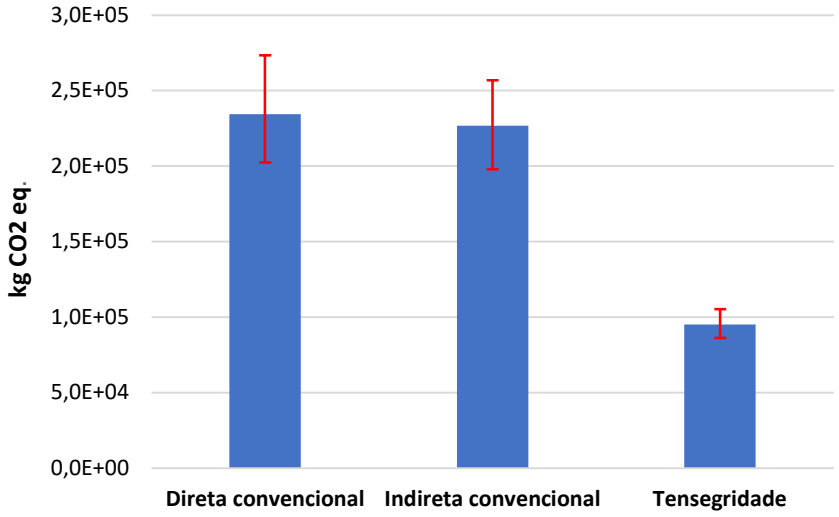

Fonte: Elaborada para autora.
Nota: O intervalo de abrangência é representado pela barra vermelha.

Figura 54-Resultados de incerteza para Extração mineral



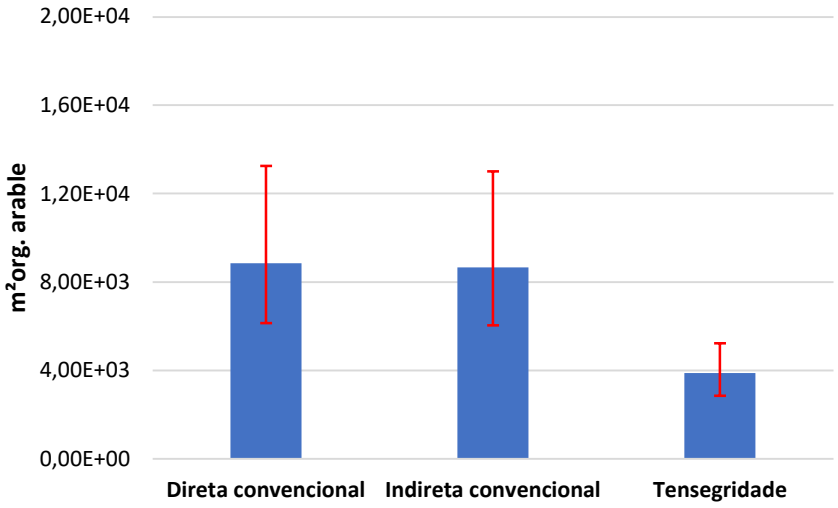

Fonte: Elaborada para autora.
Nota: O intervalo de abrangência é representado pela barra vermelha.

Figura 55-Resultados de incerteza para Aquecimento global



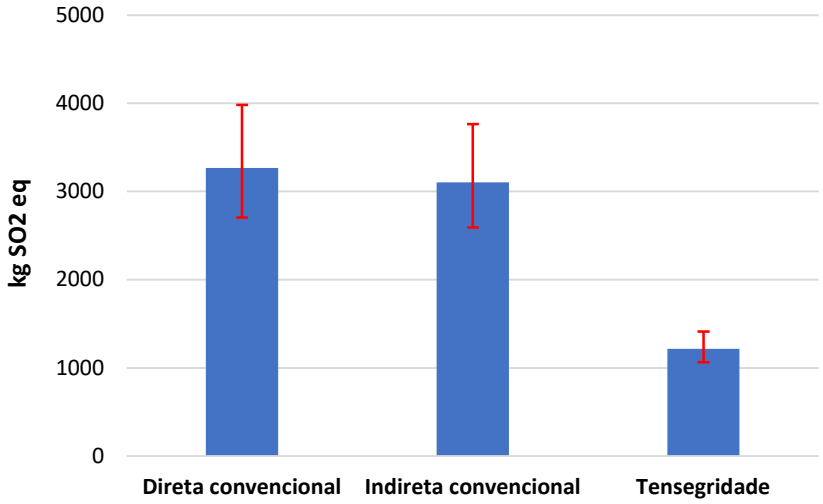

Fonte: Elaborada para autora.
Nota: O intervalo de abrangência é representado pela barra vermelha.

Figura 56-Resultados de incerteza para Ocupação da terra




Fonte: Elaborada para autora.
Nota: O intervalo de abrangência é representado pela barra vermelha.

Figura 57-Resultados de incerteza para Acidificação terrestre




Fonte: Elaborada para autora.
Nota: O intervalo de abrangência é representado pela barra vermelha.

É evidente que em todas as categorias a fundação com base no sistema de tensegridade tem o melhor desempenho ambiental. No entanto, comparando a fundação direta e indireta convencionais percebe-se que elas apresentam intervalos de abrangência que permitem afirmar que seus resultados são iguais, não sendo possível inferir que um sistema é melhor que o outro.

Dentre as cinco categorias de impacto apresentadas a que obteve nitidamente a maior variação relativa foi Ocupação da terra, com o desvio padrão geométrico de 1,47 para as fundações direta e indireta convencionais e de 1,35 para a fundação de tensegridade. Do ponto de vista da tomada de decisão, caso esta categoria fosse essencial seriam recomendados esforços de melhoria dos dados que tem maior relevância para este *midpoint.*

Por outro lado, as demais categorias tiveram variações de seus intervalos de abrangência menos discrepantes do valor da média, o desvio padrão para a fundação direta convencional, indireta convencional e fundação de tensegridade foram, respectivamente: 1,19, 1,17 e 1,13 para Energia não renovável, 1,11, 1,10 e 1,06 para Extração mineral, 1,16, 1,14 e 1,11 para Aquecimento global e 1,21, 1,20 e 1,15 para Acidificação terrestre.

# 6.0 CONCLUSÃO

No capítulo anterior foram apresentados os resultados da ACV, além de terem sido realizadas análises de sensibilidade e incerteza. O objetivo da pesquisa foi realizar uma Avaliação de Ciclo de Vida comparativa entre três tipos de fundação: fundação direta convencional, fundação indireta convencional e a fundação com base no sistema de tensegridade de um aerogerador hipotético localizado na região Nordeste do Brasil.

## 6.1 CONCLUSÕES GERAIS

Após terem sido realizadas a análise e a discussão dos resultados observou-se que a fundação com base no sistema de tensegridade teve ganhos ambientais significativos, quando comparada as fundações convencionais nas seis categorias de impacto analisadas, sendo uma opção viável para redução dos impactos ambientais de parques eólicos.

A fundação de tensegridade apresentou a redução de impacto quando comparada as fundações convencionais de 58,8% na categoria Energia não renovável, 25,3% na categoria Extração mineral, 58,3% na categoria Aquecimento global, 53,6% na categoria Ocupação da terra, 60,8% na categoria Acidificação terrestre e 60,7% na categoria Ecotoxidade terrestre.

## 6.2 CONCLUSÕES ESPECÍFICAS

### 6.2.1 Conclusões relativas ao tipo de fundação

A diminuição de impactos ambientais na fundação de tensegridade, esteve diretamente atrelada a redução de concreto nesse sistema de fundação, dado que seu volume total de concreto corresponde a 5,95% do volume de concreto da fundação direta convencional e 7,33% do volume de concreto da fundação indireta convencional.

Desse modo, com a redução do consumo dos materiais do concreto, tem-se consequentemente a minimização dos impactos de extração e manufatura dos mesmos, além da redução do aço, fôrmas metálicas, eliminação no uso de gelo para resfriamento do bloco de concreto, diminuição das distâncias de transporte percorrida, menor número de caminhões utilizados e redução de energia utilizada.

Ainda que a fundação com base no sistema de tensegridade demande a utilização de aproximadamente 18 toneladas de aço, para a constituição da estrutura metálica acoplada no 1/3 inferior da torre, a massa de aço utilizada na armadura da estrutura e nas fôrmas metálicas sofreu uma redução tão expressiva, se comparada às fundações convencionais, que a massa de aço total na fundação de tensegridade, ainda assim, será menor.

Já a comparação dos resultados entre categorias de impacto da fundação direta convencional e da indireta convencional, mostram que a fundação indireta é menos impactante para o meio ambiente em todas as categorias, exceto a de Extração mineral.

### 6.2.2 Conclusões relativas à sensibilidade do transporte

Os resultados correspondentes ao transporte em cada sistema de fundação variaram de acordo as distâncias relativas aos materiais mais consumidos. Na fundação direta, por exemplo, o transporte foi responsável por mais de 40% dos impactos em todas as categorias, exceto Extração mineral, isso porque o concreto é o elemento mais consumido nessa fundação e seus componentes foram derivados de fornecedores à 771 km.

Na fundação indireta houve a redução de concreto e aumento do aço, contudo o aço é proveniente de um fornecedor mais próximo (245 km), o que fez os impactos de transporte ultrapassarem 40% em apenas três categorias de impacto. Já na fundação de tensegridade, os impactos de transporte não chegaram a 40% em nenhuma categoria, tendo em vista a forte diminuição de materiais neste sistema, consequentemente a diminuição de distâncias percorridas por caminhões.

Na análise de sensibilidade acerca as distâncias de transporte, percebeu-se que a fundação direta poderia se tornar menos impactante do que a fundação indireta, se as distâncias de transporte dos componentes do concreto fossem menores e as do aço fossem maiores, do que as consideradas no cenário de referência.

Evidenciando que os impactos em decorrência da logística dos materiais podem interferir na viabilidade ambiental de um sistema. Vale ressaltar, que durante a análise de sensibilidade para o transporte dos componentes da fundação de tensegridade, constatou-se que esse sistema permaneceu causando menos impactos em todas as categorias analisadas, do que os outros tipos de fundação.

### 6.2.3 Conclusões relativas à sensibilidade de uso de materiais

Ao avaliar os materiais constituintes do concreto, percebeu-se que o cimento foi o componente de maior impacto. Isso ocorre, pois os impactos desse material são influenciados pelas etapas de extração, tratamento da matéria-prima e calcinação, sendo esses processos responsáveis por grandes quantidades de emissões de gases estufa, além de consumirem muita energia não renovável.

O controle do teor de cimento Portland nas misturas de concreto e a substituição parcial dele por subprodutos industriais, neste caso: a cinza volante e a escória de alto forno, se mostraram uma excelente alternativa na busca pela redução dos impactos ambientais das fundações de aerogeradores, além de poder contribuir para minimizar fissuração de origem térmica, podendo em alguns casos eliminar a necessidade de utilizar gelo.

### 6.2.4 Conclusões relativas à sensibilidade do volume do concreto na fundação de tensegridade

Ao avaliar o aumento do volume do concreto na fundação de tensegridade, cerca de 3,4 e 5,08 vezes, isto é, 20% e 30% do da média volume do concreto das fundações convencionais, percebe-se que ainda que fosse extrapolado o volume original da fundação de tensegridade, o impacto total desse sistema de fundação nas seis categorias de impacto analisadas ainda é inferior as fundações convencionais.

Os resultados gerados nesta análise geram a segurança na afirmação que a fundação com base no sistema de tensegridade é eficaz na busca pela melhoria ambiental.

### 6.2.5 Conclusões relativas aos métodos de impacto

Em relação aos métodos de impacto, nota-se que a falta de padronização para os métodos de impacto de ciclo de vida inviabiliza a comparação entre as categorias de impacto, visto que além de diferentes unidades, os métodos também têm escopos distintos.

Dentre as categorias de impactos avaliadas nesta pesquisa, foi possível realizar comparações para Aquecimento global e Acidificação terrestre. Notou-se que para categoria Aquecimento global os resultados foram muito próximos para os métodos avaliados, o que indica que os métodos utilizam valores similares de caracterização do potencial de aquecimento global das emissões de gases de efeito estufa.

Em contrapartida para categoria Acidificação terrestre, os resultados tiveram uma variação significativa, fazendo com que a escolha do método utilizado possa causar interferência nos resultados da ACV.

### 6.2.6 Conclusões relativas aos métodos de incerteza

Conforme dito anteriormente nesta dissertação, pesquisas de ACV cujo foco principal são as fundações de aerogeradores ainda são muito escassas, fazendo com que dados e informações para abastecimento do inventário de ciclo de vida sejam coletados em campo ou fornecidas por empresas do setor, o que torna a incerteza inerente a esse tipo de estudo.

Na análise de incerteza, constatou-se que os intervalos que contém os valores prováveis dos resultados apresentaram uma variação considerada aceitável pela literatura, garantindo assim a confiança nos resultados. Todavia, para a categoria de Ecotoxidade terrestre, faz necessário que o número de iterações da simulação de Monte Carlo seja maior, para que fosse avaliada a necessidade de melhorar a qualidade dos dados do estudo.

Além disso, a análise de incerteza reafirma que a fundação de tensegridade apresenta o melhor desempenho ambiental, dado que o intervalo de abrangência dos resultados se manteve menor, em valores absolutos, do que as fundações convencionais.

## 6.3 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Como sugestão de novas pesquisas aponta-se:

- Elaborar novos inventários, contemplando: diversos parques eólicos, diferentes regiões de instalações dos aerogeradores e informações sobre todos os fornecedores;

- Expandir a fronteira utilizada na presente pesquisa para uma abordagem do berço ao berço (*cradle-to-cradle*), considerando desde a extração das matérias-primas até a desativação do uso da fundação, com o reaproveitamento de seus componentes e seu retorno ao início da cadeia de produção.

- Realizar ACV para sistemas de aerogeradores contemplando todos os seus componentes.

- Realizar um estudo mais completo com relação aos diferentes tipos de adições e substituição e suas repercussões no desempenho ambiental do concreto;

- Ampliar a qualidade da simulação de Monte Carlo, através do aumento do número de iterações rodadas e do intervalo de confiança dos dados;

- Realizar análise de custo de ciclo de vida da fundação com base no sistema de tensegridade;

- Realizar teste de implantação de torre eólica piloto real baseado no sistema de tensegridade.

## REFERÊNCIAS


ABEEÓLICA [Associação Brasileira de Energia Eólica]. **Boletim Anual Dados 2021.** Disponível em: <http://abeeolica.org.br/dados-abeeolica/>. Acesso em: 01 set. 2022.

ABELIOTIS, K.; PACTITI, D. Assessment of the environmental impacts of a wind farm in central Greece during its life cycle. **International Journal of Renewable Energy Research.** v. 4, n. 3, p. 580-585, 2014.

ACV BRASIL. Ecoinvent 3.6 conexões internas. 2020. Disponível em:<https://acvbrasil.com.br/artigo/ecoinvent >. Acesso em: 22 nov. 2021.

ACV BRASIL. Orientação Global para Indicadores e Métodos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (GLAM). 2021. Disponível em:< https://acvbrasil.com.br/artigo/aicv-glam>. Acesso em: 28 jan. 2022.

ALI, N. B. H.; SMITH, I. F. C.; Dynamic behavior and vibration control of a tensegrity structure. **International Journal of Solids and Structures.** n. 47, p. 1285– 1296, 2010.

ANEEL [Agência Nacional de Energia Elétrica]**. Atlas da Energia Elétrica do Brasil.** Brasília: ANEEL, 2008.

ANEEL [Agência Nacional de Energia Elétrica]. Download de dados. Disponível em: <https:// sigel.aneel.gov.br/Down/>. Acesso em: 21 dez. 2021.

ANEEL [Agência Nacional de Energia Elétrica]. Banco de informações de geração. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 02 fev. 2022

ARAUJO, K. Y. M. **Análise do comportamento estrutural de blocos de concreto armado sobre estacas como fundação para aerogerador onshore.** 2018. 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia. Natal, 2018.

ARBAULT, D.; RIVIÈRE, M., RUGANI, B., BENETTO, E., TIRUTA-BARNA, L. Integrated earth system dynamic modeling for life cycle impact assessment of ecosystem services. **Science of The Total Environment,** v. 472, p. 262-272, 2014.

ARPS [Agência de Regulação de Serviços Públicos do Espírito Santo]. **Boletins e Balanços Energéticos**. 2021. Disponível em: <https://arsp.es.gov.br/boletins-e-balancos-energeticos>. Acesso em: 01 dez. 2021

ARVESEN, A.; HERTWICH, E. G. Environmental implications of large-scale adoption of wind power: a scenario-based life cycle assessment. **Environmental Research Letters**, v. 6, n. 4, p. 045102, 2011.

ARVESEN, A., NES, R. N., HUERTAS-HERNANDO, D., HERTWICH, E. G. Life cycle assessment of an offshore grid interconnecting wind farms and customers across the North Sea. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 4, p. 826-837, 2014.

ASPE [Agência de Serviços Públicos de Energia do estado do Espírito Santo]. Atlas eólico: Espírito Santo. Vitória, ES, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2009: Versão Corrigida:2014a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**: **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 2009: Versão Corrigida:2014b.

BAŁDOWSKA-WITOS, P., DOERFFER, K., PYSZ, M., DOERFFER, P., TOMPOROWSKI, A., & OPIELAK, M. Manufacturing and Recycling Impact on Environmental Life Cycle Assessment of Innovative Wind Power Plant Part 2/2. **Materials**, v. 14, n. 1, p. 204, 2021.

BAIOCHI, A. G.; SILVA, V. G. Análise de incerteza de parâmetros com base em processos críticos em avaliação do ciclo de vida de edificações. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 12, p. e021027-e021027, 2021.

BARATTO, A.C.; DAMASCENO, J. C.; ALVES, J. A. P.; TROTA FILHO, J.; COUTO, P. R. G.; OLIVEIRA, S. P; **Avaliação de dados de medição-Guia para a Guia para a expressão de incerteza de medição–GUM**. 2012.

BARBOSA FILHO, W. P.; AZEVEDO, A. C. S. Impactos ambientais em usinas eólicas. **Anais Agrener GD, Belo Horizonte**, v. 1, p. 1-17, 2013.

BARE, J. C., HOFSTETTER, P., PENNINGTON, D. W., HAES, H. A. U. Midpoints versus endpoints: the sacrifices and benefits. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 5, n. 6, p. 319-326, 2000.

BARE J.C., NORRIS, G.A., PENNINGTON D.W., MCKONE T. TRACI, The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts. **Journal of Industrial Ecology**, v. 6, n. 3–4, 2003.

BERNARDI, V. F. **A sustentabilidade com a recuperação e valorização de cacos e casqueiros provenientes de mármore e granito.** 2014. 102f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

BERNDT, M. L. Influence of concrete mix design on $CO_2$ emissions for large wind turbine foundations. **Renewable Energy**, v. 83, p. 608-614, 2015.

BERTUZZI, P. J. **Estudos de aspectos de engenharia para implantação de torres eólicas.** 2013. 102 p. Monografia (Engenharia Civil) -Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil. Florianópolis, 2013, p. 82-87.

BEZERRA, F. D. Energia eólica no Nordeste. Caderno Setorial ETENE. n. 66, p.11 2019.

BLAABJERG F., TEODORESCU R., CHEN Z, LISERRE M. Power converters and control of renewable energy systems. In: Proceedings of 6th International Conference on Power Electronics (ICPE'04), Busan, Korea, October 18–22; 2004.

BONOU, A.; LAURENT, A.; OLSEN, S. I. Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy-from theory to application. **Applied Energy**, v. 180, p. 327-337, 2016.

BRANDÃO, J. E., MONTENEGRO, C. A. P., GAMA, C. A. C. N. **Wind turbine tower and respective foundation base**, US n. 10,513,866 B2, 24 dec. 2019.

BULLE, C., TOFFOLETTO, L., GODIN, J., REID, C., DESCHÊNES, L. A new LCIA method used for a Canadian-specific context. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 12, p. 93-102, 2007.

BULLE, C., MARGNI, M., PATOUILLARD, L., BOULAY, A. M., BOURGAULT, G., De BRUILLE, V., CAO, V., HAUSCHILD, M., HENDERSON, A., HUMBERT, S., KASHEF-HAGHIGHI, S., KOUNINA, A., LAURENT, levasseur, A., LIARD, G., ROSENBAUM, R. K., ROY, P.O., SHAKED, S., FANTKE, P., JOLLIET, O. IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, p. 1653-1674. 2019.

CATTAN, R. Por que não há energia eólica no Espírito Santo? Uma análise dos desafios e perspectivas do setor no estado. Blog de ambiente de negócios. 2019. Disponível em: <

http://www.blogdoideies.org.br/por-que-nao-ha-energia-eolica-no-espirito-santo-uma-analise-dos-desafios-e-perspectivas-do-setor-no-estado/ > Acesso em: 27 jan. 2022.

CAVALETT, O.; CHAGASM, M. F.; SEABRA, J. E. A.; BONOMI, A. Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 2012.

CEPEL [Centro de Pesquisas de Energia Elétrica]. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro: Simulações 2013.** Rio de Janeiro. p. 19. 2017.

CHIESURA, G.; STECHER, H.; JENSEN, J. Pagh. Blade materials selection influence on sustainability: a case study through LCA. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing. p. 012011. 2020.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N. **Fundações por estacas: projeto geotécnico**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

CLAVREUL, J., GUYONNET, D., CHRISTENSEN, T.H. Quantifying uncertainty in LCA-modelling of waste management systems. **Waste Management.** v.32, n.12, p. 2482-2495, 2012.

CONMETRO [Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial]. **Resolução nº 03:** Dispõe sobre a Aprovação do Termo de Referência do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida e dá outras providências. 2010.

DEENEY, P.; NAGLE, A. J.; GOUGH, F.; LEMMERTZ, H.; DELANEY, E. L; MCKINLEY, J. M.; MULLALLY, G. End-of-Life alternatives for wind turbine blades: Sustainability Indices based on the UN sustainable development goals. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 171, p. 105642, 2021.

DESCHAMPS, J.; SIMON, B.; TAGNIT-HAMOU, A.; AMOR, B. Is open-loop recycling the lowest preference in a circular economy? Answering through LCA of glass powder in concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 185, p. 14–22, 2018.

DOERFFER, K.; BAŁDOWSKA-WITOS, P.; PYSZ, M.; DOERFFER, P.; TOMPOROWSKI, A. Manufacturing and Recycling Impact on Environmental Life Cycle Assessment of Innovative Wind Power Plant Part 1/2. **Materials**, v. 14, n. 1, p. 220, 2021.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **ROADMAP Eólica Offshore Brasil. Perspectivas e caminhos para a energia eólica marítima**. Rio de Janeiro, Brasil, 2020.

FANG, L. L.; VALVERDE-PÉREZ, B.; DAMGAARD, A.; PLÓSZ, B.G.; RYGAARD, M. Life cycle assessment as development and decision support tool for wastewater resource recovery technology. **Water Research**, v. 88, p. 538-549, 2016.

FLORINDO, T. J.; MEDEIROS, G. I. B.; RUVIARO, C. F.; COSTA, J. S. Avaliação do impacto do ciclo de vida: uma discussão metodológica. 2015.

FRISCHKNECHT, R.; JUNGBLUTH, N.; ALTHAUS, H. J.; DOKA, G.; DONES, R.; HECK, T.; HELLWEG, S.; HISCHIER, R.; NEMECEK, T.; REBITZER, G.; SPIELMANN, M. The ecoinvent database: overview and methodological framework (7 pp). **The international journal of life cycle assessment**, v. 10, n. 1, p. 3-9, 2005.

FRISCHKNECHT R., JUNGBLUTH N., ALTHAUS H.-J., BAUER C., DOKA G., DONES R., HISCHIER R., HELLWEG S., HUMBERT S., KÖLLNER T., LOERINCIK Y., MARGNI M., NEMECEK T. **Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. ecoinvent report**. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf. n. 3, v 2.0. 2007.

FURNAS, Equipe de. Laboratório de Concreto. **Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades.** Pacelli de Andrade, W., ed. São Paulo, Pini, 1997.

GAMA, P. V. C. N. **Contribuições ao dimensionamento de torres eólicas de concreto.** 2015. 203 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, São Paulo, 2015.

GERVÁSIO, H.; REBELO, C.; MOURA, A.; VELJKOVIC, M.; SIMÕES DA SILVA, L. Comparative life cycle assessment of tubular wind towers and foundations–Part 2: Life cycle analysis. **Engineering structures**, v. 74, p. 292-299, 2014.

GKANTOU, M.; REBELO, C.; BANIOTOPOULOS, C. Life cycle assessment of tall onshore hybrid steel wind turbine towers. **Energies**, v. 13, n. 15, p. 3950, 2020.

GLASSBROOK, K. A.; CARR, A. H.; DROSNES, M. L.; OAKLEY, T. R.; KAMENS, R. M.; GHEEWALA, S. H. Life cycle assessment and feasibility study of small wind power in Thailand. **Energy for sustainable development**, v. 22, p. 66-73, 2014.

GONÇALVEZ, L. F. **Avaliação de propriedades térmicas do concreto com cinza volante em fundação de aerogeradores.** 2018. 79 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Fortaleza, p. 48-49. 2018.

GOEDKOOP, M.; OELE, M.; LEIJTING, J.; PONSIOEN, T.; MEIJER, E. **Introduction to LCA with SimaPro**. Pré Consultants, 2013

GOUVEIA, Y. C. S. **Construção de um Parque Eólico Industrial**. 2013. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Área Departamental de Engenharia Civil Tipificação, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2013.

GWEC: Global Wind Energy. **Global wind report 2020**. Global Wind Energy Council: Brussels, Belgium. 2021.

GWEC: Global Wind Energy. **Global wind report 2021**. Global Wind Energy Council: Brussels, Belgium. 2022.

HAU, E. **Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics**. 2nded. Berlin: Springer, 2006. cap. 3; cap.12.

HUIJBREGTS, M. A. J., STEINMANN, Z. J.N., ELSHOUT, P. M. F., STAM, G., VERONES, F., VIERA, M., ZIJP, M., HOLLANDER, A., ZELM, R. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, p. 138-147, 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **Environmental Management e Life Cycle Assessment e Principles and Frameworks**, ISO 14.040, 2006a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **Environmental Management e Life Cycle Assessment e Requirements and Guidelines,** ISO 14.044, 2006b.

IOSIFOV, V. V.; KHRUSTALEV, E. Y.; LARIN, S. N.; KHRUSTALEV, O. E. Strategic planning of regional energy system based on life cycle assessment methodology. **International Journal of Energy Economics and Policy**, v. 10, n. 3, p. 62, 2020.

IRIBARREN, D.; MARTÍN-GAMBOA, M.; DUFOUR, J. Environmental benchmarking of wind farms according to their operational performance. **Energy**, v. 61, p. 589-597, 2013.

JOLLIET, O.; MARGNI, M.; CHARLES, R.; HUMBERT, S.; PAYET, J.; REBITZER, G. Presenting a New Method IMPACT 2002 + : A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. **International Journal of Life Cycle Assesment**, v. 8, n. 6, p. 324–330, 2003.

JUNGES, C. Com torres mais altas, potencial eólico brasileiro pode ser seis vezes maior. Gazeta do Povo. 2016. Disponível em:<https://www.gazetadopovo.com.br/economia/energia-e-sustentabilidade/com-torres-mais-altas-potencial-eolico-brasileiro-pode-ser-seis-vezes-maior-0okrpq8ctzr2e3p6h8utsi7rk/ >. Acesso em: 03 nov. 2021.

KEMNA, R., VAN ELBURG, M., LI, W., VAN HOLSTEIN, R. MEEuP – The methodology Report. EC, Brussels, 2005.

KOULOUMPIS, V.; SOBOLEWSKI, R. A.; YAN, X. Performance and life cycle assessment of a small scale vertical axis wind turbine. **Journal of Cleaner Production**, v. 247, p. 119520. 2020.

KUMAR, I.; TYNER, W. E.; SINHA, K. C. Input–output life cycle environmental assessment of greenhouse gas emissions from utility scale wind energy in the United States. **Energy Policy**, v. 89, p. 294-301, 2016.

LAGE, E. S.; PROCESSI, L. D. **Panorama do setor de energia eólica**. 2013.

LAM, K. L.; ZLATANOVIĆ, L.; VAN DER HOEK, J. P. Life cycle assessment of nutrient recycling from wastewater: A critical review. **Water Research**, v. 173, p. 115519. 2020.

LI, J.; LI, S.; WU, F. Research on carbon emission reduction benefit of wind power project based on life cycle assessment theory. **Renewable Energy**, v. 155, p. 456-468, 2020.

LI, Q.; DUAN, H.; XIE, M.; KANG, P.; MA, Y.; ZHONG, R.; GAO, T.; ZHONG, W.; WEN, B.; BAI, F.; VUPPALADADIYAM, A.K. Life cycle assessment and life cycle cost analysis of a 40 MW wind farm with consideration of the infrastructure.**Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 138, p. 110499. 2021.

LIFE CYCLE INITIATIVE. **Life cycle initiative progress report 2021.** Disponível em:< https://www.lifecycleinitiative.org/our-2021-progress-report-is-now-available/>. Acesso em: 24 jan. 2022.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind Energy Explained: Theory, Design and Application.** 2nd ed. United Kingdom: John Wiley & Sons, 2009. p.4.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, v. 26, p. 160-175, 2016.

MENDOZA BELTRAN, A.; PRADO, V.; VIVANCO, D. F.; HENRIKSSON, P.J.G.; GUINEE, J.B.; HEIJUNGS, R. Quantified uncertainties in comparative life cycle assessment: what can be concluded?. **Environmental science & technology**, v. 52, n. 4, p. 2152-2161, 2018.

METALVIX ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA; MCA TECNOLOGIAS DE ESTRUTURAS. **Wind Tower.** Vitória, 2016. p.8-20.

NAGLE, A. J., DELANEY, E. L., BANK, L. C., LEAHY, P. G. A Comparative Life Cycle Assessment between landfilling and Co-Processing of waste from decommissioned Irish wind turbine blades. **Journal of Cleaner Production**, v. 277, p. 123321. 2020.

NETTO, C. A. A.; LUCENTE, F. S. Análise comparativa e seleção de ferramentas para implementação de um laboratório didático de avaliação de ciclo de vida. XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção. João Pessoa, Paraíba, 03 a 06 out. 2016. p.5.

NOORI, M.; KUCUKVAR, M.; TATARI, O. A macro-level decision analysis of wind power as a solution for sustainable energy in the USA. **International Journal of Sustainable Energy**, v. 34, n. 10, p. 629-644, 2015a.

NOORI, M.; KUCUKVAR, M.; TATARI, O. Economic input–output based sustainability analysis of onshore and offshore wind energy systems. **International journal of green energy**, v. 12, n. 9, p. 939-948, 2015b.

OEBELS, K. B.; PACCA, S. Life cycle assessment of an onshore wind farm located at the northeastern coast of Brazil. **Renewable Energy**, v. 53, p. 60-70, 2013.

OLIVEIRA NETO, C.R.; LIMA, E. C. Novas perspectivas de desenvolvimento: uma análise da energia eólica no Brasil. **Revista Grifos**, n.41, p. 304 -324, 2016.

OPENLCA. **A free software for everything you need in sustainability modeling.** Disponível em:< https://www.openlca.org/openlca/>. Acesso em: 24 jan. 2022.

PESTANA, D. A. C. **Sistemas estruturais para torres eólicas.** 2016. 118f. Dissertação (Mestrado)- Engenharia Civil, Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia, Funchal, 2016.

PIEKARSKI, C. M.; FRANCISCO, A. C.; LUZ, L. M.; BASTIANI, J. A.; ZOCCHE, L. Aplicação da ACV na matriz elétrica Brasileira: Uma análise multi cenários em termos de mudança climática, qualidade de ecossistema, saúde humana e recursos. **Revista Espacios**. Caracas. v. 34, n. 4, p. 1-9, 2013.

PINTO, M. O. **Fundamentos de energia Eólica.** 1ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

POUJOL, B.; PRIEUR-VERNAT, A.; DUBRANNA, J.; BESSEAU, R.; BLANC, I.; PÉREZ-LÓPEZ, P. Site-specific life cycle assessment of a pilot floating offshore wind farm based on suppliers' data and geo-located wind data. **Journal of Industrial Ecology**, v. 24, n. 1, p. 248-262, 2020.

RAADAL, H. L.; VOLD, B. I.; MYHR, A.; NYGAARD, T. A. GHG emissions and energy performance of offshore wind power. **Renewable energy**, v. 66, p. 314-324, 2014.

RASHID, A. F. A.; YUSOFF, S. Uma revisão do método de avaliação do ciclo de vida para a construção indústria. **Revisões de energia renovável e sustentável**. n. 45, p. 244–248. 2015.

REBELLO, T. A.; Roque, R. P., Gonçalves, R. F., Calmon, J. L., & Queiroz, L. M. Life cycle assessment of urban wastewater treatment plants: a critical analysis and guideline proposal. **Water Science and Technology**, v. 83, n. 3, p. 501-514, 2021.

RODRIGUES, A. F. T. **Estudo de uma estrutura adaptativa baseada no conceito de tensegridade**. 2014. 107 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Estudo de Uma Estrutura Adaptativa Baseada no Conceito de Tensegridade, Lisboa, 2014.

SARTORI, T. G. **Medidas de retrofit em edifícios típicos existentes de um bairro: desempenho e avaliação do ciclo de vida energético.** 2018. 177f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

SAVINO, M. M., MANZINI, R., DELLA SELVA, V., & ACCORSI, R. A new model for environmental and economic evaluation of renewable energy systems: The case of wind turbines. **Applied energy**, v. 189, p. 739-752, 2017.

SILVA, M. D. **Tipificação de fundações de torres eólicas em parques industriais, para diversos tipos de solos**. 2014. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Área Departamental de Engenharia Civil Tipificação, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2014.

STAVRIDOU, N.; KOLTSAKIS, E.; BANIOTOPOULOS, C. C. A comparative life-cycle analysis of tall onshore steel wind-turbine towers. **Clean Energy**, v. 20, n. 20, p. 1-10, 2019.

STAVRIDOU, N.; KOLTSAKIS, E.; BANIOTOPOULOS, C. C. A comparative life-cycle analysis of tall onshore steel wind-turbine towers. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 410. 2020.

TAKANO, A.; WINTER, S.; HUGHES, M.; LINKOSALMI, L. Comparison of life cycle assessment databases: A case study on building assessment. **Building and Environment**, v. 79, p. 20-30, 2014.

TOMPOROWSKI, A.; PIASECKA, I.; FLIZIKOWSKI, J.; KASNER, R.; KRUSZELNICKA, W.; MROZIŃSKI, A.; BIELIŃSKI, K. Comparison analysis of blade life cycles of land-based and offshore wind power plants. **Polish Maritime Research**, 2018.

UNEP. **Life Cycle Assessment: What it is and How to do it.** Paris, 1996.

VARGAS, A. V.; ZENÓN, E.; OSWALD, U.; ISLAS, J. M.; GÜERECA, L. P.; MANZINI, F. L. Life cycle assessment: A case study of two wind turbines used in Mexico. **Applied Thermal Engineering**, v. 75, p. 1210-1216, 2015.

VÉLEZ-HENAO, J. A.; VIVANCO, D. F. Hybrid life cycle assessment of an onshore wind farm including direct and indirect services: A case study in Guajira, Colombia. **Journal of Environmental Management**, v. 284, p. 112058. 2021.

VILELA, L.O. Aplicação do PROKNOW-C para seleção de um portifólio bibliográfico e análise bibliométrica sobre avaliação de desempenho da gestão do conhecimento. **Revista Gestão Industrial**. v.8, n.1, p. 76–92, 2012.

WAICZYK, C., ENSSLIN, E. R. Avaliação de produção científica de pesquisadores: Mapeamento das publicações científicas. **Revista Contemporânea De Contabilidade**. v.10, n. 20, p. 97–112, 2013.

WANG, Y.; SUN, T. Life cycle assessment of $CO_2$ emissions from wind power plants: Methodology and case studies. **Renewable Energy**, v. 43, p. 30-36, 2012.

WEIDEMA, B. P.; BAUER, C.; HISCHIER, R.; MUTEL, C.; NEMECEK, T.; REINHARD, J.; VADENBO, C. O.; WENET, G. Data quality guideline for the ecoinvent. **Swiss Center For Life Cycle Inventories**. 2013.

XIE, J. B., FU, J. X., LIU, S. Y., HWANG, W. S.Assessments of carbon footprint and energy analysis of three wind farms. **Journal of Cleaner Production**, v. 254, p. 120159, 2020.

YANG, J.; CHANG, Y.; ZHANG, L.; HAO, Y.; YAN, Q.; WANG, C. The life-cycle energy and environmental emissions of a typical offshore wind farm in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 180, p. 316-324, 2018.

ZANELLATO, F.C. Avaliação do ciclo de vida cradle-to-gate de traços de concretos autoadensáveis com incorporação de resíduos e subprodutos industriais. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 174p., 2016.

ZULCÃO, R. Avaliação do ciclo de vida da utilização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em materiais de construção civil à base de cimento. 160p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2018.

# APÊNDICES

# APÊNDICE A- VISÃO GERAL DOS ARTIGOS SELECIONADOS SOBRE ACV DE AEROGERADORES

| Autor | Unidade funcional | Fronteiras | Vida útil | Localização | Torre | Potência da torre | Inventário | Software | Método AICV | Categoria de impacto | Materiais da torre | Altura e Massa da Torre | Materiais da Fundação | Especificações da Fundação |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Arvesen; Hertwich (2011)** | 1 kWh | Canteiro ao Túmulo | 20 anos (onshore) e 25 anos (offshore) | Europa | onshore e offshore | 2,5 MW | Ecoinvent | NI | ReCiPe | MC, EuM, FOxF, AT | Aço de baixa liga | onshore- 105 m e 78 t; offshore- 80 m e 52 t | Concreto, reforço de aço, aço de baixa liga, alumínio. | Fundações onshore baseadas na gravidade feitas de concreto armado e subestruturas offshore feitas de aço (lâmina d'água de aproximadamente 20 m). Suposições para massas da fundação (1000 t onshore e 300 t offshore). |
| **Wagner et al. (2011)** | 1 kWh | Portão, Operação e Túmulo | 20 anos | Alemanha | offshore | 5 MW | Ecoinvent | GaBi | NI | PAG, PEu, PTH, PFOzF, PA | NI | NI | NI | NI |
| **Zhong; Song; Loh (2011)** | 1 kWh | Túmulo | 20 anos | Suiça | onshore | 600 kW | Ecoinvent | SimaPro | Eco-indicator 99 | THC, ERI, ERO, MC, R, DCO, A, Eu, Ec, UT, DRM, DRF | NI | NI | NI | NI |
| **Caduff et al. (2012)** | NI | Berço, Portão*, Operação e Túmulo | NI | Europa | onshore | 30 kW a 3 MW | Ecoinvent | SimaPro | ReCiPe | MC, EcAD, OTU,DM | NI | Variando de (22 m e 3.43 t) a (80 m e 512 t) | NI | NI |
| **Guezuraga; Zauner; Pölz (2012)** | GWh/year | Portão ao Túmulo | 20 anos | Alemanha, Dinamarca e China | onshore | 1.8 MW e 2 MW | GEMIS | GEMIS | NI | PAG | Aço | 105 m e 65 m | Concreto armado e aço reforçado | A fundação é concretada in situ, após a escavação o furo é preenchido com concreto e aço reforçado. |
| **Padey et al. (2012)** | 1 kWh | Túmulo | 20 anos (peças móveis) e 40 anos (peças fixas) | Europa | onshore | 800 kW | Ecoinvent | NI | NI | GEE | Aço de baixa liga | 60 m | 338 $m^3$ de concreto e 30 t de reforço de aço | NI |
| **Kabir et al. (2012)** | 1 kWh | Berço ao Túmulo | 25 anos | Canada | onshore | 5 kW; 20 kW e 100kW | Literatura e fornecedores | NI | NI | AG, A, FOzF | Aço inoxidável | 36.6 m, 36.7 m e 37 m | Concreto e vergalhão de aço | Peso: concreto (350 t, 352.5 t, 346.8 t); vergalhão de aço (1.5 t, 5.7 t, 9.1 t) |
| **Wang; Sun (2012)** | 1 kWh | Portão*, Operação e Túmulo | 20 anos | Dinamarca, Portugal, Espanha e China | onshore e offshore | 3 MW; 1.65 MW e 800 kW | Estudo de caso | Não utiliza software | IPCC | GEE | NI | NI | NI | Em apenas um dos quatros cenários é dado o peso da fundação (sem descrição de materiais utilizados) |
| **Demir; Taskin (2013)** | 1 kWh | Berço ao Túmulo | 20 anos | Turquia | offshore | 330kW; 500 kW; 810 kW; 2050 kW e 3020 kW | GaBi | GaBi | CML | PA, PEu, PAG, PEcAD, PTH,PFOzF, PEcT | Aço, alumínio, cobre e plástico | 50 m, 80 m e 100 m (os pesos dos 15 cenários são listados) | Concreto, aço e ferro | Os materiais da fundação e seus pesos são listados para os 15 cenários estudados (5 potências e 3 alturas). |

# APÊNDICE A- VISÃO GERAL DOS ARTIGOS SELECIONADOS SOBRE ACV DE AEROGERADORES (CONTINUAÇÃO)

| Autor | Unidade funcional | Fronteiras | Vida útil | Localização | Torre | Potência da torre | Inventário | Software | Método AICV | Categoria de impacto | Materiais da torre | Altura e Massa da Torre | Materiais da Fundação | Especificações da Fundação |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Rashedi; Sridhar; Tseng (2013)** | 50 MW, 1kWh, 1 kg | Berço ao Túmulo | 20 anos | Europa | onshore e offshore | 5 MW | Ecoinvent | SimaPro | Eco-indicator 99 | THC, ERI,ERO, MC, R, DCO, Ec, A, Eu, UT, DRM, DRF | Aço,tinta alquídica (além de alumínio na offshore) | onshore- 3450 t offshore- 2000 t onshore (vertical)-1478 t | Concreto, aço, alumínio e tinta alquídica | Onshore - fundação composta por 1300 m³ de concreto e 180 t de aço. Offshore- instalada no mar com 30 m de profundidade, ao contrário da fundação onshore, a subestrutura do tipo *jacket* com pernas, braçadeiras e estacas é usada para apoiar a torre. Total de oito estacas, cada uma com 50 m de comprimento e 1,07 m de diâmetro,que somam 315 t. |
| **Greening; Azapagic (2013)** | 1 kWh | Berço ao Túmulo | 20 anos | Reino Unido | Micro-wind turbines | 6 kW | Ecoinvent | GaBi | CML | PDA, PA, PEu, PEcAD, PAG, PTH, PEcM, PDO, PFOzF,PEcT | Aço galvaniza-do tubular | 9 m e 2031,49 kg | Concreto e aço de baixa liga | Bloco de concreto com âncora. O concreto reforçado com aço é usado para a fundação, que tem um volume de 9 m³ e 901,19 kg de aço. |
| **Garrett; Rønde (2013)** | 1 kWh | Berço ao Túmulo | 20 anos | Europa e Ásia | onshore | 2 MW | GaBi e literatura | GaBi | CML | DRA, DRF, PA, Peu, PEcAD, PAG, PTH, PEcM, FOxF, PEcT, UER, UENR, DA | NI | NI | NI | NI |
| **Oebels; Pacca (2013)** | 1 kWh | Portão a Operação | 20 anos | Brasil | onshore | 1.5 MW | Estudo de caso e literatura | NI | IPCC | GEE | Aço(cenário 1) Concreto (cenário 2) | 80 m e 161,06 t (aço), 769,9 t (concreto) | Concreto e aço CA 50 | Sapata, 756,66 t de concreto e 22,5 t de aço |
| **Iribarren; Martín-Gamboa; Dufor (2013)** | 1 MWh | Portão a Operação | 20 anos | Espanha | onshore | NI | Ecoinvent | SimaPro | CML | AG,DCO, FOxF, A, Eu | Aço com uma camada de tinta | Os pesos são dados para as 25 cenários analisados | Concreto e aço | NI |
| **Rajaei; Tinjum (2013)** | 1 kWh | Berço ao Túmulo | 26 anos | EUA | onshore | 1.8 MW | Ecoinvent | SimaPro | NI | GEE | Aço | 80 m e 155 kg (peso do projeto) | Concreto e aço | Foram utilizadas fundações octogonais rasas de 16 m de diâmetro, 2,5 m embutidas para cada torre. O volume de concreto do projeto para cada fundação foi de 240 m³ |
| **Arvesen; Birkeland; Hertwich (2013)** | 1 kWh | Canteiro ao Túmulo | 20 a 30 anos | Noruega | offshore | 5 MW | Ecoinvent | NI | ReCiPe | MC, EcAD, EuAD, TH, EuM, DM, FMP, FOxF, AT, EcT, DA | Tubular de aço | NI | NI | NI |
| **Arvesen et al. (2014)** | 1 kWh | Canteiro ao Túmulo | 30 anos | Mar Norte | offshore | 450 kW | Ecoinvent, EXIOBASE | NI | ReCiPe | MC, DRF, EcAD, EuAD, TH, EcM, EuM, DM, UT, DO, FMP, FOxF, AT, EcT, DA | **ACV da rede de distribuição de um parque eólico offshore** | **ACV da rede de distribuição de um parque eólico offshore** | **ACV da rede de distribuição de um parque eólico offshore** | **ACV da rede de distribuição de um parque eólico offshore** |
| **Abeliotis, Pactiti (2014)** | 1 MWh | Portão ao Túmulo | 20 anos | Grécia | onshore | 850 MW | Literatura | SimaPro | CML | DRA, PDO, PAG, PEcAD, PEcT, PTH, PFOzF, PA, PEu | Aço | 45 t | Concreto e aço | Uma escavação de 500 m³, com 2,5 m de profundidade por 8 m de diâmetro, realizada por um escavador hidráulico é necessário para cada torre, juntamente com 125 m³ de concreto (297,5 toneladas) junto com 11,5 toneladas de ferro. |

# APÊNDICE A- VISÃO GERAL DOS ARTIGOS SELECIONADOS SOBRE ACV DE AEROGERADORES (CONTINUAÇÃO)

| Autor | Unidade funcional | Fronteiras | Vida útil | Localização | Torre | Potência da torre | Inventário | Software | Método AICV | Categoria de impacto | Materiais da torre | Altura e Massa da Torre | Materiais da Fundação | Especificações da Fundação |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Glassbrook et al. (2014)** | 50 kWh/mês | Berço, Portão, Operação e Túmulo | 20 anos | Tailândia | NI | 400 W; 2.5 kW; 5 kW e 20 kW | Literatura | NI | IPCC | PAG | **ACV apenas da turbina** | **ACV apenas da turbina** | **ACV apenas da turbina** | **ACV apenas da turbina** |
| **Raadal et al. (2014)** | 1 kWh | Berço, Canteiro e Túmulo | 20 anos | Reino Unido | offshore | 5 MW | Ecoinvent | NI | NI | PAG | Aço | 90 m e 250 t | Concreto e aço | O artigo simula cinco fundações de flutuação(SWAY, UMaine Semi-S, UMaine Spar, UMaine TLP, MIT TLB) e uma de base fixa (OC4 Jacket), os materiais e massas utilizados são apresentados para cada uma das fundações. |
| **Angelakoglou; Botsaris; Gaidajis (2014)** | todo o ciclo de vida | Berço ao Túmulo | 25 anos | Grécia e região do Mediter-râneo | onshore e offshore | 3 MW | Literatura | SimaPro | ReCiPe | MC,DO, TH,FOxF, FMP,RI,AT, EuAD, EuM,EcT, EcAD,EcM, OTA,OTU, TTN,DA,DM,DRF | Aço | onshore-85 m, 550 t coastal-95 m, 620t offhsore-105m, 680t | Concreto e aço | As massas dos materiais foram dadas para as três fundações. |
| **Gervásio et al. (2014)** | estrutura de uma torre eólica | Portão, Canteiro e Túmulo | 20 / 40 anos | NI | onshore | 2 MW; 3.6 MW e 5 MW | GaBi | GaBi | CML | DRA, PA, PEu, PAG,PDCO, PFOzF | Tubular de aço, tubular de concreto e tubular híbrida de aço-concreto | 80 m, 100 m, 150 m | Concreto e aço | Fundações de laje de concreto (placa octogonal). Os materiais e massas foram detalhados na parte 1 do artigo (Rebelo et al). |
| **Reimers; Ozdirik; Kaltschmitt (2014)** | 1 kWh | Berço ao Túmulo | 20 anos | Mar Norte | offshore | 5 MW | Ecoinvent | Umberto | IPCC | GEE | Aço | 90 m e 259 t | Aço (fixada por concreto no solo) | Foram simuladas três tipos de fundação: monoestaca, sapata e tipo *jacket*. O artigo apresenta materiais e massas para todos os cenários. |
| **Uddin; Kumar (2014)** | 1 kWh | Berço ao Túmulo | 20 anos | Tailândia | onshore (vertical e horizontal) | 300 W e 500W | Fornecedores | SimaPro | CML | PAG,A, Eu | Aço galvaniza-do | 6 m | NI | NI |
| **Noori; Kucukvar; Tatari (2015)** | 1 kWh | Berço a Operação | 20 anos | EUA | onshore e offshore | 2 MW e 3MW | Fornecedores | Modelo do Green Design Institut | NI | GEE, UE, DA, UT | Aço | Onshore- 78m, 105 t e 105 m, 235 t. Offshore-60 m, 140 t e 80 m, 156 t | Concreto, aço e ferro | Concreto e ferro formam o concreto armado da sapata e ancoragem é feita de aço. Pesos: onshore-832 t, 1200 t; offshore-203 t, 203 t. |
| **Vargas et al. (2015)** | 1 kWh | Portão, Canteiro* e Túmulo | 20 anos | México | onshore | 2 MW | Ecoinvent | SimaPro | CML | PAG, PDCO, PTH, PEcAD, PEcM,PEcT, PDA, PFOzF, PA, PEu | Aço | 143 t e 164,20 t | Concreto armado | Turbina A: Sapata - concreto 700 t, ferro 25 t. Ancoragem- Aço 15 t. Turbina B: concreto 805 t, aço 27 t |
| **Noori; Kucukvar; Tatari (2015)** | 1 kWh | Portão ao Túmulo | 20 anos | EUA | onshore e offshore | 2 MW e 3MW | Fornecedores | Modelo do *Green Design Institute* | NI | GEE, UE, EPA, DA, RP | Aço | Onshore- 78m, 105 t e 105 m, 235 t. Offshore-60 m, 140 t e 80 m, 156 t | Concreto, aço e ferro | Concreto e ferro formam o concreto armado da sapata e ancoragem é feita de aço. Pesos: onshore-832 t, 1200 t; offshore-203 t, 203 t. |
| **Al-Behadili; El-Osta (2015)** | 1 kWh | Berço ao Túmulo | 20 anos | Líbia | onshore | 1.65 MW | Estudo de caso e literatura | NI | IPCC | GEE, EPA | Tubular de aço | 71 m | NI | NI |

# APÊNDICE A- VISÃO GERAL DOS ARTIGOS SELECIONADOS SOBRE ACV DE AEROGERADORES (CONTINUAÇÃO)

| Autor | Unidade funcional | Fronteiras | Vida útil | Localização | Torre | Potência da torre | Inventário | Software | Método AICV | Categoria de impacto | Materiais da torre | Altura e Massa da Torre | Materiais da Fundação | Especificações da Fundação |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Xue et al. (2015)** | 1 kWh | Berço ao Túmulo | 20 anos | China | offshore | 1.25 MW | Estudo de caso | NI | NI | GEE, EPA | Aço | 68 m, 87.5 t | Concreto e aço | Concerto: 345,83 t |
| **Bonou; Laurent; Olsen (2016)** | 1 kWh | Berço ao Túmulo | 20 anos (2.3 MW/3.2 MW/4MW) /25 anos (6MW) | Europa | onshore e offshore | 2.3 MW; 3.2 MW; 4 MW e 6MW | Ecoinvent e fornecedores | SimaPro | ReCiPe | MC,DO,THC, THNC,FOzF, FMP,A,EuAD,Eu M,EuT,Ec, EcAD,UT,DRM,D RF,DRR,RI | NI | Onshore-99,5 m; 92,5 m (2.3MW e 3.2 MW), offshore-68,25 m; 87,72 m (4MW e 6MW) | Onshore-Concreto armado; offshore-aço | Concreto armado é usado para fundações onshore enquanto monoestacas de aço são usadas offshore. (Não foram descritas demias informações como os pesos de materiais). |
| **García-Gusano et al. (2016)** | 1 kWh | NI | 20 anos | Noruega | onshore e offshore | 1 a 3 MW | Ecoinvent | NI | IMPACT 2002 + | MC, QE, SH | NI | NI | NI | NI |
| **Ji; Chen (2016)** | 1 kWh | Canteiro ao Túmulo | 20 anos | China | onshore | 2000 kW | Estudo de caso | NI | NI | GEE | NI | NI | NI | NI |
| **Kumar; Tyner; Sinha (2016)** | 1 GWh | Canteiro ao Túmulo | 25 anos | EUA | onshore | 1.5MW | Literatura e Greenhouse Gas Reporting Program | Modelo do Green Design Institut | NI | GEE | NI | NI | NI | NI |
| **Savino et al. (2017)** | NI | Berço ao Túmulo | 20 anos | Europa | onshore | 100 kW; 200kW; 480kW; 600kW e 660kW | Ecoinvent | SimaPro | CML | PAG | Aço | 6 t (100kW); 12 t (200kW); 33 t (660kW); 45 t (600kW); 60 t (480kW) | Concreto e aço | Materiais e pesos são dados para todos os cenários. |
| **Siddiqui; Dincer (2017)** | 1 kWh | Portão, Operação e Túmulo | NI | Canada | onshore | 2 MW | GaBi | GaBi | CML | PAG, PA, PEu, PFOzF, PTH | NI | NI | NI | NI |
| **Wang; Teah (2017)** | 1 kWh | Berço ao Túmulo | NI | Taiwan | onshore | 600 W | Ecoinvent | SimaPro | IPCC | PAG | Tubular de aço | 12 m, 2500 g | NI | NI |
| **Chipindula et al. (2018)** | 1 KWh | Berço ao Túmulo | 20 anos | EUA | onshore e offshore | 1MW; 2MW; 2.3MW e 5MW | Ecoinvent | SimaPro | IMPACT 2002 + | THC, THNC,ERI, RI, DCO,ERO, EcA, EcT, AT,OT, AA, Eu, AG, UENR, DM | Tubular de aço | os pesos são dados para as 5 cenários analisados | Concreto e aço | Onshore - utiliza concreto e pequena parcela de aço. Offshore- fundação monoestaca de aço; Os pesos e volumes dos materiais são dados para os 5 cenários analisados. |
| **Lombardi et al. (2018)** | 1 kWh | Berço, Portão, Operação e Túmulo | 20 anos | Itália e Polônia | onshore | 1 MW e 3 MW | Ecoinvent e fornecedores | NI | CML | DRA, MC,DO, FOxF, A, Eu, TH, EcAD, EcM, EcT | Aço | 6,75 m, 202,5 kg (1MW) e 9 m 476,6 kg (3MW) | Concreto e aço | 1MW-a base padrão tem uma dimensão igual a 0,8 X 1,8 X 1,8 m com um peso de 5,6 toneladas de concreto e 150,6 kg do aço. 3 MW-a base padrão é de 1,0 X 2,7 X 2,7 m com um peso do concreto de 15,8 toneladas e 328 kg do aço. |
| **Tomporowski et al. (2018)** | NI | Portão ao Túmulo | 25 anos | Europa | Lâmina de turbina | 10 kW-1MW | NI | SimaPro | Eco-indicator 99 | DO, ERO, ERI, R, MC, THC, UT, A, Eu, Ec, DRM, DRF, EPS, EPAg, EPA | **ACV das pás da turbina** | **ACV das pás da turbina** | **ACV das pás da turbina** | **ACV das pás da turbina** |
| **Martínez et al. (2018)** | NI | Portão ao Túmulo | 20 anos | Espanha | onshore | 660 kW e 2 MW | Fornecedores | SimaPro | CML | DRA, AG, DCO, TH,EcAD, EcM, EcT, FOxF, A, Eu | Aço | 70 m, 143 t | Concreto, ferro e aço | Sapata- concreto 700 t, ferro 25 t; Ancoragem- aço 15 t |

# APÊNDICE A- VISÃO GERAL DOS ARTIGOS SELECIONADOS SOBRE ACV DE AEROGERADORES (CONTINUAÇÃO)

| Autor | Unidade funcional | Fronteiras | Vida útil | Localização | Torre | Potência da torre | Inventário | Software | Método AICV | Categoria de impacto | Materiais da torre | Altura e Massa da Torre | Materiais da Fundação | Especificações da Fundação |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Yang et al. (2018)** | 1 kWh | Berço ao Túmulo | 25 anos | China | offshore | 3.6 MW e 50 MW | Ecoinvent | NI | NI | GEE | Aço | 90 m, 376 t (3.6MW); 100m, 436 t (5MW) | Concreto, aço | Desing da fundação de topo de estaca elevada, cada unidade de turbina eólica usa oito estacas de tubos de aço de 84 m de comprimento e 25-30 mm de espessura e uma de concreto de 3-4,5 m de espessura cilindro com um diâmetro de 14 m (a unidade protótipo de turbina de 5 MW tem doze estacas de tubos de aço). Concreto marinho de alto desempenho (C40) foi usado para permitir suficiente resistência à compressão e aumenta a durabilidade das fundações, e o aço exposto foi revestido com materiais resistentes à corrosão para proteção. |
| **Ozoemena; Cheung; Hasan (2018)** | 1 kWh | Berço ao Túmulo | 25 anos | Reino Unido | onshore | 1.5 MW | Ecoinvent | NI | CML | PDO, PEcM, PTH, PEcT | Aço | 65 m, 153 kg | Concreto normal, aço, PVC. | Fundação profunda. Concreto normal 575.000 kg; Aço (construção) 26.300 kg; Aço (sem liga) 13.243 kg; PVC 166 kg |
| **Wang; Wang; Liu (2019)** | 1 MJ | Portão ao Túmulo | 20 anos | Dinamarca | onshore e offshore | 2 MW | Literatura | NI | NI | GEE | Aço, ligas de zinco/ resina epoxi | Onshore-367 kg ; offshore- 660,21 kg | Concreto e aço | Onshore- Sapata, concreto 805 t; aço de baixo carbono 27 t. Offshore- monoestaca, concreto 2095,2 t, aço reforçado 80 t |
| **Gao et al. (2019)** | NI | Portão ao Túmulo | 20 anos | China | onshore | 1500 kW | NI | NI | IPCC | AG,FOzF, A, SH,ER EPA, Eu, Rs | Aço | 61,5 m, 70 m | NI | NI |
| **Gomaa et al. (2019)** | 1 kWh | Berço ao Túmulo | 20 anos | Jordânia | onshore | 3 MW | Literatura | SimaPro | TRACI | AG, A, SH, Eu, DO, Ec, FOzF | Tubular de aço | 119m, 108 t | Concreto e aço | A fundação da turbina onshore consiste em fundações de placas feitas de concreto armado. O tamanho da fundação das turbinas eólicas era de 20 × 20 m com uma profundidade de 2,65 m. Peso da Fundação 1.175 t. |
| **Schreiber; Marx; Zapp (2019)** | 1 kWh | Berço ao Túmulo | 20 anos | Alemanha | onshore | 3 MW | Ecoinvent | GaBi | ILCD/PEF | A, MC, EcAD, EuAD, EuM, EuT, TH, RI, UT, DO, FMP,ERI, FOzF, DA, DRA, DRM, DRF, DRR | Aço | 84 m, 148 t | Concreto e aço | Uma fundação plana é assumida para cada turbina eólica. Com base em informações da turbina eólica fabricantes os pesos de fundação, totalizam 1.747 t de concreto e 1.244 t de aço. Todos os inputs da simulação (materiais e transporte) são listados no artigo. |
| **Alsaleh; Sattler (2019)** | 1 kWh | Berço ao Túmulo | 20 anos | EUA | onshore | 2 MW | Ecoinvent | SimaPro | TRACI | AG, DO,FozF, A, Eu, Ec, THC, THNC, ER, DRF, DA | Tubular de aço | 78 m, 189 kg | Concreto e aço | Peso da base 1.175 t (aço baixa liga 14,537 t, aço corrugado 44 t, concreto 1.116 t). O tamanho da fundação de 450 m³ (15m X 15m X 2m). |
| **Piasecka et al. (2019)** | energia elétrica durante um ano | NI | 25 anos | Polônia | onshore e offshore | NI | NI | SimaPro | Eco-indicator 99 | ERO, ERI, R, THC, Ec, UT, DRM, DRF | NI | NI | NI | Offhsore-Monoestaca, A fundação consiste em uma pilha de fundação, uma peça de transição, uma plataforma de desembarque de barco, uma plataforma e proteção catódica ; onshore- sapata, fundações de placas feitas de concreto armado. A fundação é concretada no local. (sem materiais e pesos no artigo) |
| **Nagle et al. (2020)** | Disposição final de 5,7 t de lâminas na Irlanda | Túmulo | NI | Irlanda | NI | 850 kW | Ecoinvent | SimaPro | IMPACT 2002 + | SH, QE, MC, Rec | **ACV das pás da turbina** | **ACV das pás da turbina** | **ACV das pás da turbina** | **ACV das pás da turbina** |

# APÊNDICE A- VISÃO GERAL DOS ARTIGOS SELECIONADOS SOBRE ACV DE AEROGERADORES (CONTINUAÇÃO)

| Autor | Unidade funcional | Fronteiras | Vida útil | Localização | Torre | Potência da torre | Inventário | Software | Método AICV | Categoria de impacto | Materiais da torre | Altura e Massa da Torre | Materiais da Fundação | Especificações da Fundação |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Kouloumpis; Sobolewski; Yan (2020)** | 1 kWh | Berço ao Túmulo | 20 anos | Polônia | onshore (vertical) | 5 kW | Ecoinvent, GaBi e estudo de caso | GaBi | CML | PDRA, PDRF, PA, PEu, PEcAD, PAG, PTH,PEcM, PDCO, PFOxF, PEcT | Aço | 15,6 m, 1,2 t | Concreto e aço | As fundações que sustentam a estrutura são constituídas por uma base, sapata e reforço. O underlay é feito de 2.450 kg de concreto, de brita do tipo C12 / 15 e protegido contra água / umidade subterrânea com selantes betuminosos ABIZOL P e ABIZOL R . A base é construída com aproximadamente 19 toneladas de concreto pré-misturado C20 / 25 reforçado com aproximadamente 530 kg de aço de reforço tipo A-IIIN B500SP. |
| **Xie et al. (2020)** | NI | Portão ao Túmulo | 20 anos | Taiwan | NI | 600 kW; 660 kW e 1.75 MW | Literatura e fornecedores | NI | NI | GEE | Concreto e aço galvanizado | 55 m, 36,5 t (600kW); 65m, 31,3 t (660kW); 67m, 100 t (1.75MW) | Concreto e aço | Massa total das fundações:240 t (600kW) ; 220 t (660kw); 500 t (1.75MW). Materiais e pesos individuais foram relatados no artigo. |
| **Iosifov et al. (2020)** | 1 kg | NI | 10 anos | Rússia | NI | NI | Ecoinvent | NI | CML | PA, PEu, MC, EcAD, TH, EcM | **ACV das baterias de armazena-mento do parque eólico** | **ACV das baterias de armazenamento do parque eólico** | **ACV das baterias de armazenamento do parque eólico** | **ACV das baterias de armazenamento do parque eólico** |
| **Gkantou; Rebelo; Baniotopoulos (2020)** | Structure of a wind tower | Portão ao Túmulo | 20 anos | Portugal | onshore | 5 MW | GEMIS | GEMIS | NI | DRA, PAG | Híbrida (treliçada e tubular) de aço | 185 m, 786,42 t (torre 6 pernas); 185 m, 645,54 t (torre 4 pernas) | Concreto e barras de reforço de aço | A fundação para as duas torres é a mesma, concreto- 2160 t e aço- 69,3 t. |
| **Chiesura; Stecher; Jensen (2020)** | NI | Berço ao Túmulo | 25 anos | Europa | offshore | 8 MW | Ecoinvent | SimaPro | IMPACT 2002 + | GEE | **ACV das pás da turbina** | **ACV das pás da turbina** | **ACV das pás da turbina** | **ACV das pás da turbina** |
| **Li; Li; Wu (2020)** | 1 kWh | Portão ao Túmulo | 20 anos | China | onshore | 1.54 MW | Estudo de caso | NI | NI | GEE | Aço | 126,38 t | **Fundação não faz parte do estudo** | **Fundação não faz parte do estudo** |
| **Poujol et al. (2020)** | 1 KWh | Berço ao Túmulo | 20 anos | Mar Mediterrâneo | offshore | 6 MW | Ecoinvent | SimaPro | ReCiPe | MC, Rec, DA,EcM, QA | Aço | 100 m | **Fundação não faz parte do estudo** | **Fundação não faz parte do estudo** |
| **Vélez-Henao; Vivanco (2021)** | 1 kWh | Portão ao Túmulo | 20 anos | Colômbia | onshore | NI | Ecoinvent, Literatura e Global Trade Analysis Project | MRIO | NI | AA,AT,MC,Ec,EuM,THC,NC,DCO, FOzF,ER,ERI, EuT | Aço | 60 m | NI | NI |
| **Tefera et al. (2021)** | 1 kWh | Berço ao Túmulo | 20 anos | Etiópia | onshore | 1.5 MW; 1.6 7MW | Ecoinvent | SimaPro | ReCiPe | MC,DO,AT, EuAD,EuM,TH, FoxF,FMP,EcT, EcAD, EcM, RI,OTA,OTU, TTN,DA,DM,DRF | Aço | 80 m (1.67MW); 65 m (1.5MW); 70 m (1.5MW) | Concreto e aço | Dados de materiais, terreno necessário, e energia no artigo são em função de 1kWh de energia gerada |
| **Li et al. (2021)** | 1 kWh | Berço ao Túmulo | 20, 40, 60, 80 e 100 anos | China | onshore | 2 MW | GaBi | Não utiliza software | Método próprio (explicado no artigo) | PAG | Aço inoxidável | NI | Concreto, aço e ferro | Fundação de estacas. Sem informação de massas. |

## APÊNDICE A- VISÃO GERAL DOS ARTIGOS SELECIONADOS SOBRE ACV DE AEROGERADORES (CONCLUSÃO)

| Autor | Unidade funcional | Fronteiras | Vida útil | Localização | Torre | Potência da torre | Inventário | Software | Método AICV | Categoria de impacto | Materiais da torre | Altura e Massa da Torre | Materiais da Fundação | Especificações da Fundação |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Doerffer et al. (2021)** | Produtivi-dade de uma usina eólica | Portão e Túmulo | 25 anos | Polônia | onshore | 5 kW | Ecoinvent | SimaPro | Eco-indicator 99 | THC, ERO, ERI, MC,R, DCO, Ec, A, Eu, UT, DRM, DRF | Aço | 9,5 m, 6,67 ton | **Fundação não faz parte do estudo** | **Fundação não faz parte do estudo** |
| **Deeney et al. (2021)** | 1 ton | Túmulo | 20 anos | Irlanda | NI | NI | Ecoinvent | SimaPro | IMPACT 2002 + | MC, QE, SH, Rec | **ACV das pás da turbina** | **ACV das pás da turbina** | **ACV das pás da turbina** | **ACV das pás da turbina** |
| **Bałdowska-Witos et al. (2021)** | Uma planta eólica | NI | NI | Polônia | onshore | 15 kW | Ecoinvent | SimaPro | Eco-indicator 99 | THC, ERO, ERI, MC, R, DCO, Ec ,A, Eu, UT, DRM, DRF | Aço | NI | **Fundação não faz parte do estudo** | **Fundação não faz parte do estudo** |

Notas: Acidificação (A), Acidificação Aquática (AA), Acidificação Terrestre (AT), Aquecimento Global (AG), Saúde Humana (SH), Danos ao Ecossistema (E), Demanda Cumulativa de Energia (DCE), Demanda Energética Cumulativa (DEC), Depleção de Recursos Abiótica (DRA), Depleção de Recursos Fósseis (DRF), Depleção de Metal (DM), Depleção de Recursos Minerais (DRM), Depleção de Recursos Renováveis (DRR), Depleção de Água (DA), Destruição da Camada de Ozônio (DCO), Destruição de Ozônio (DO), Ecotoxicidade (Ec), Ecotoxicidade de Água Doce (EcAD), Ecotoxicidade Marinha (EcM), Ecotoxicidade Terrestre (EcT), Ecotoxicidade Aquática (EcA), Emissões de Poluentes no Ar (EPA), Emissões de Poluentes no Solo (EPS), Emissões de Poluentes na Água (EpAg), Eutrofização de Água Doce (EuAD), Eutrofização Marinha (EuM), Eutrofização Terrestre (EuT), Efeitos Respiratórios (ER), Formação de Material Particulado (FMP), Formação de Oxidante Fotoquímico (FOxF), Formação de Ozônio Fotoquímico (FOzF), Gases de Efeito Estufa (GEE), Efeitos Respiratórios Inorgânicos (ERI), Efeitos Respiratórios Orgânicos (ERO), Mudanças Climáticas (MC), Ocupação de Terras Agrícolas (OTA), Ocupação de Terras Urbanas (OTU), Potencial de Acidificação (PA), Potencial de Ecotoxicidade de Água Doce (PEcAD), Potencial de Ecotoxidade Marinha (PEcM), Potencial de Ecotoxicidade Terrestre (PEcT), Potencial de Eutrofização (PEu), Potencial de Toxicidade Humana (PTH), Potencial de Formação de Oxidante Fotoquímico (PFOxF), Potencial de Formação de Ozônio Fotoquímico (PFOzF), Potencial de Destruição da Camada de Ozônio (DCO), Potencial Destruição de Ozônio (DO), Potencial de Aquecimento Global (PAG), Potencial de Depleção de Recursos Abióticos (PDRA), Qualidade do Ecossistema (QE), Qualidade do ar (QA), Recursos (Rec), Radiação Ionizante (RI), Radiação (R), Resíduos Perigosos (RP), Resíduos Sólidos (Rs), Toxicidade Humana (TH), Toxicidade Humana Efeitos Cancerígenos (THC), Toxicidade Humana Efeitos Não Cancerígenos (THNC), Transformação Terra Natural (TTN), Uso da Terra

(UT), Uso de Energia Não Renovável (UENR), Uso de Energia Renovável (UER), Uso de Energia (UE), NI (Não Informado) e Portão* (considerado o transporte até o canteiro), Canteiro* (não foi considerado transporte).

# APÊNDICE B- INVENTÁRIO FUNDAÇÃO DIRETA

| ENTRADAS | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nome | Quantidade | Unidade | Origem, Fornecedor e Comentários do Dado | Método de coleta | Indicador Pedigree | Nome no do fluxo no software | Nome do fornecedor no software |
| ***OCUPAÇÃO DO SOLO*** | | | | | | | |
| Uso do solo | 18400 | m² | | Aproximação com base no material da obra | 1,3,2,1,1 | Occupation, shrub land, sclerophyllous | sem fornecededor |
| ***RECURSOS ENERGÉTICOS*** | | | | | | | |
| Gerador a diesel | 2,5 | min | 125 cv (91,93 kW), consumo de 0,15 l/h por cv (18,75l/h), 1litro de diesel tem 36 MJ. (20 min carrega-se um caminhão de 8m³, então 2,5 min por m³) | Outras obras | 3,3,2,2,2 | machine operation, diesel, >= 74.57 kW, generators | market for machine operation, diesel, >= 74.57 kW, generators \| machine operation, diesel, >= 74.57 kW, generators \| Cutoff, U - GLO |
| ***INSUMOS/RECURSOS MATERIAIS*** | | | | | | | |
| **Concreto 20 MPa** | | | | | | | |
| Cimento Portland (CPIV) | 356,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | cement, pozzolana and fly ash 15-50% | cement production, pozzolana and fly ash 15-50% \| cement, pozzolana and fly ash 15-50% \| Cutoff, U - BR |
| Areia | 445,0 | kg | Jazida na cidade de Prazeres -Jaboatão/PE | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | sand | sand quarry operation, extraction from river bed \| sand \| Cutoff, U - BR |
| Pó de pedra | 320,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | gravel, crushed | gravel production, crushed \| gravel, crushed \| Cutoff, U-BR |
| Brita 0 | 320,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | gravel, crushed | gravel production, crushed \| gravel, crushed \| Cutoff, U-BR |
| Brita 1 | 694,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | gravel, crushed | gravel production, crushed \| gravel, crushed \| Cutoff, U-BR |
| Água | 225,0 | kg | | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | tap water | tap water production, conventional treatment \| tap water \| Cutoff, U-BR |
| Plastificante | 2,492 | kg | Santana de Parnaíba - SP | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde | plasticiser production, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde \| plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldeh\| Cutoff, U-GLO |

# APÊNDICE B- INVENTÁRIO FUNDAÇÃO DIRETA (CONTINUAÇÃO)

| ENTRADAS | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nome | Quantidade | Unidade | Origem, Fornecedor e Comentários do Dado | Método de coleta | Indicador Pedigree | Nome no do fluxo no software | Nome do fornecedor no software |
| **Concreto 30 MPa** | | | | | | | |
| Cimento Portland (CPIV) | 436,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | cement, pozzolana and fly ash 15-50% | cement production, pozzolana and fly ash 15-50% \| cement, pozzolana and fly ash 15-50% \| Cutoff, U - BR |
| Areia | 393,0 | kg | Jazida na cidade de Prazeres -Jaboatão/PE | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | sand | sand quarry operation, extraction from river bed \| sand \| Cutoff, U - BR |
| Pó de pedra | 308,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | gravel, crushed | gravel production, crushed \| gravel, crushed \| Cutoff, U-BR |
| Brita 0 | 342,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | gravel, crushed | gravel production, crushed \| gravel, crushed \| Cutoff, U-BR |
| Brita 1 | 667,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | gravel, crushed | gravel production, crushed \| gravel, crushed \| Cutoff, U-BR |
| Água | 165,0 | kg | | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | tap water | tap water production, conventional treatment \| tap water \| Cutoff, U-BR |
| Plastificante | 3,052 | kg | Santana de Parnaíba - SP | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde | plasticiser production, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde \| plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldeh\| Cutoff, U-GLO |
| **Concreto 40 MPa** | | | | | | | |
| Cimento Portland (CPIV) | 531,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | cement, pozzolana and fly ash 15-50% | cement production, pozzolana and fly ash 15-50% \| cement, pozzolana and fly ash 15-50% \| Cutoff, U - BR |
| Areia | 456,0 | kg | Jazida na cidade de Prazeres -Jaboatão/PE | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | sand | sand quarry operation, extraction from river bed \| sand \| Cutoff, U - BR |
| Pó de pedra | 163,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | gravel, crushed | gravel production, crushed \| gravel, crushed \| Cutoff, U-BR |
| Brita 0 | 342,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | gravel, crushed | gravel production, crushed \| gravel, crushed \| Cutoff, U-BR |
| Brita 1 | 668,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | gravel, crushed | gravel production, crushed \| gravel, crushed \| Cutoff, U-BR |
| Água | 225,0 | kg | | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | tap water | tap water production, conventional treatment \| tap water \| Cutoff, U-BR |
| Plastificante | 3,717 | kg | Santana de Parnaíba - SP | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde | plasticiser production, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde \| plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldeh\| Cutoff, U-GLO |

# APÊNDICE B- INVENTÁRIO FUNDAÇÃO DIRETA (CONTINUAÇÃO)

| ENTRADAS | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nome | Quantidade | Unidade | Origem, Fornecedor e Comentários do Dado | Método de coleta | Indicador Pedigree | Nome no do fluxo no software | Nome do fornecedor no software |
| | | | | | | | |
| Concreto 20 MPa (magro) | 10,30 | m³ | Usina instalada para a obra | Dados engenheiro | 2,3,2,1,1 | | Concreto 20 MPa |
| Concreto 30 MPa | 239,41 | m³ | Usina instalada para a obra | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | | Concreto 30 MPa |
| Concreto 40 MPa | 8,31 | m³ | Usina instalada para a obra | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | | Concreto 40 MPa |
| Aço | 16966,0 | kg | Gerdau- Ponte dos Carvalhos, Cabo de Santo Agostinho- PE | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | steel, low-alloyed, hot rolled | steel production, low-alloyed, hot rolled \| steel, low-alloyed, hot rolled \| Cutoff, U - RoW |
| | | kg | | | | section bar rolling steel | section bar rolling, steel \| section bar rolling, steel \| Cutoff, U-Row |
| Fôrmas-aço | 105,00 | m² | Natal-RN | Outras obras | 3,3,2,2,2 | steel, low-alloyed, hot rolled | steel production, low-alloyed, hot rolled \| steel, low-alloyed, hot rolled \| Cutoff, U - RoW |
| | | m² | | | | sheet rolling, steel | sheet rolling, steel \| sheet rolling, steel \| Cutoff, U - RoW |
| Gelo | 14364,60 | kg | Garanhuns - PE | Outras obras | 3,3,2,2,2 | tap water | market for tap water \| tap water \| Cutoff, U - BR |
| | | kg | | | | operation, reefer, freezing | market for operation, reefer, freezing \| operation, reefer, freezing \| Cutoff, U - GLO |
| ***EQUIPAMENTOS*** | | | | | | | |
| Retroescavadeira | 6,0 | hora de operação | 8 l/h, potência varia de 75 a 100 cv (55,92 a 74,57 kW) | Outras obras | 3,3,2,4,3 | machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, high load factor | market for machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, high load factor \| machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, high load factor \| Cutoff, U - GLO |
| Escavadeira | 267,58 | m³ | 14 l/h | Outras obras | 3,3,2,4,2 | excavation, hydraulic digger | market for excavation, hydraulic digger \| excavation, hydraulic digger \| Cutoff, U - GLO |
| Compactador de placa | 2,0 | hora de operação | 1 l/h | Outras obras | 3,3,2,4,3 | machine operation, diesel, < 18.64 kW, high load factor | market for machine operation, diesel, < 18.64 kW, high load factor \| machine operation, diesel, < 18.64 kW, high load factor \| Cutoff, U - GLO |
| Bomba de água | 8,55 | MJ | | Ecoinvent | 3,3,2,4,3 | water pump operation, diesel | water pump operation, diesel \| water pump operation, diesel \| Cutoff, U - BR |

## APÊNDICE B- INVENTÁRIO FUNDAÇÃO DIRETA (CONTINUAÇÃO)

| ENTRADAS | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nome | Quantidade | Unidade | Origem, Fornecedor e Comentários do Dado | Método de coleta | Indicador Pedigree | Nome no do fluxo no software | Nome do fornecedor no software |
| | | | | | | | |
| Bomba lança (no caminhão) | 8 | hora de operação | 205 kW | Outras obras | 3,3,2,4,3 | machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor | market for machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor |
| Mangote vibrador (motor acionador) | 8 | hora de operação | 3 l/h | Outras obras | 3,3,2,4,3 | machine operation, diesel, < 18.64 kW, high load factor | market for machine operation, diesel, < 18.64 kW, high load factor \| machine operation, diesel, < 18.64 kW, high load factor \| Cutoff, U - GLO |
| Câmara frigorífica | 14364,6*1 | kg*d | 8,8 kW/dia | Outras obras | 3,3,2,4,3 | operation, reefer, freezing | market for operation, reefer, freezing \| operation, reefer, freezing \| Cutoff, U - GLO |
| ***TRANSPORTE*** | | | | | | | |
| Caminhão truck / caçamba basculante | 771 | kg.km | Valor refrente a 1kg de cimento | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| | 771 | kg.km | Valor refrente a 1kg de brita 0 | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| | 771 | kg.km | Valor refrente a 1 kg de brita 1 | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| | 2452 | kg.km | Valor refrente a 1kg de plastificante | Google Maps | 3,3,2,2,1 | transport, freight, light commercial vehicle | transport, freight, light commercial vehicle \| transport, freight, light commercial vehicle \| Cutoff, U - RoW |
| | 254 | kg.km | Valor referente a 1 kg de areia | Google Maps | 3,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| | 771 | kg.km | Valor referente a 1kg de pó de pedra | Google Maps | 3,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| Caminhão pipa | 771 | kg.km | Valor refrente a 1kg de água | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |

# APÊNDICE B- INVENTÁRIO FUNDAÇÃO DIRETA (CONCLUSÃO)

| ENTRADAS | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nome | Quantidade | Unidade | Origem, Fornecedor e Comentários do Dado | Método de coleta | Indicador Pedigree | Nome no do fluxo no software | Nome do fornecedor no software |
| | | | | | | | |
| Caminhão truck | 245 | kg.km | Valor referente a 1kg de ferragem (barras de aço) | Outras obras | 1,3,2,1,2 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| | 112*512 | kg.km | Valor refrente a 1 m² de fôrmas | Outras obras | 1,3,2,1,2 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| Caminhão misturador de concreto | 2362,5*25 | kg.km | Valor referente a 1 m³ de concreto 20MPa | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| Caminhão misturador de concreto | 2314,05*25 | kg.km | Valor referente a 1m³ de concreto 30MPa | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| Caminhão misturador de concreto | 2388,7*25 | kg.km | Valor referente a 1m³ de concreto 40MPa | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| Caminhão munck | 16966*25 | kg.km | Valor referente a 1kg de armação montada | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| Caminhão frigorífico | 36,3 | kg.km | Valor referente a 1kg gelo | Outras obras | 3,3,2,1,1 | transport, freight, lorry with refrigeration machine, 7.5-16 ton, EURO5, R134a refrigerant, freezing | transport, freight, lorry with refrigeration machine, 7.5-16 ton, EURO5, R134a refrigerant, freezing \| Cutoff, U-GLO |

# APÊNDICE C- INVENTÁRIO FUNDAÇÃO INDIRETA

| ENTRADAS | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nome | Quantidade | Unidade | Origem, Fornecedor e Comentários do Dado | Método de coleta | Indicador Pedigree | Nome no do fluxo no software | Nome do fornecedor no software |
| ***OCUPAÇÃO DO SOLO*** | | | | | | | |
| Uso do solo | 18400 | m² | | Aproximação com base no material da obra | 1,3,2,1,1 | Occupation, shrub land, sclerophyllous | |
| ***RECURSOS ENERGÉTICOS*** | | | | | | | |
| Gerador a diesel (concreto) | 2,5 | min | 125 cv (91,93 kW), consumo de 0,15 l/h por cv (18,75l/h), 1litro de diesel tem 36 MJ. (20 min carrega-se um caminhão de 8m³, então 2,5 min por m³) | Outras obras | 3,3,2,2,2 | machine operation, diesel, >= 74.57 kW, generators | market for machine operation, diesel, >= 74.57 kW, generators \| machine operation, diesel, >= 74.57 kW, generators \| Cutoff, U - GLO |
| Gerador a diesel (argamassa) | 50,82 | min | Volume 1 estaca=0,924; 22 estacas= 20,33m³ (20,33m³/8m³=2,54, então 2,54 * 20min= 50,82 min) | Outras obras | 3,3,2,2,2 | machine operation, diesel, >= 74.57 kW, generators | market for machine operation, diesel, >= 74.57 kW, generators \| machine operation, diesel, >= 74.57 kW, generators \| Cutoff, U - GLO |
| ***INSUMOS/RECURSOS MATERIAIS*** | | | | | | | |
| **Concreto 20 MPa** | | | | | | | |
| Cimento Portland (CPIV) | 356,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | cement, pozzolana and fly ash 15-50% | cement production, pozzolana and fly ash 15-50% \| cement, pozzolana and fly ash 15-50% \| Cutoff, U - BR |
| Areia | 445,0 | kg | Jazida na cidade de Prazeres -Jaboatão/PE | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | sand | sand quarry operation, extraction from river bed \| sand \| Cutoff, U - BR |
| Pó de pedra | 320,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | gravel, crushed | gravel production, crushed \| gravel, crushed \| Cutoff, U-BR |
| Brita 0 | 320,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | gravel, crushed | gravel production, crushed \| gravel, crushed \| Cutoff, U-BR |
| Brita 1 | 694,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | gravel, crushed | gravel production, crushed \| gravel, crushed \| Cutoff, U-BR |

# APÊNDICE C- INVENTÁRIO FUNDAÇÃO INDIRETA (CONTINUAÇÃO)

| ENTRADAS | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nome | Quantidade | Unidade | Origem, Fornecedor e Comentários do Dado | Método de coleta | Indicador Pedigree | Nome no do fluxo no software | Nome do fornecedor no software |
| Água | 225,0 | kg | | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | tap water | tap water production, conventional treatment \| tap water \| Cutoff, U-BR |
| Plastificante | 2,492 | kg | MATCHEM-SP Produtos Químicos LTDA,Santana de Parnaíba - SP | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde | plasticiser production, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde \| plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldeh\| Cutoff, U-GLO |
| **Concreto 30 MPa** | | | | | | | |
| Cimento Portland (CPIV) | 436,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | cement, pozzolana and fly ash 15-50% | cement production, pozzolana and fly ash 15-50% \| cement, pozzolana and fly ash 15-50% \| Cutoff, U - BR |
| Areia | 393,0 | kg | Jazida na cidade de Prazeres -Jaboatão/PE | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | sand | sand quarry operation, extraction from river bed \| sand \| Cutoff, U - BR |
| Pó de pedra | 308,0 | kg | Companhia Industrial de - Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | gravel, crushed | gravel production, crushed \| gravel, crushed \| Cutoff, U-BR |
| Brita 0 | 342,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | gravel, crushed | gravel production, crushed \| gravel, crushed \| Cutoff, U-BR |
| Brita 1 | 667,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | gravel, crushed | gravel production, crushed \| gravel, crushed \| Cutoff, U-BR |
| Água | 165,0 | kg | | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | tap water | tap water production, conventional treatment \| tap water \| Cutoff, U-BR |
| Plastificante | 3,052 | kg | Santana de Parnaíba - SP | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde | plasticiser production, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde \| plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldeh\| Cutoff, U-GLO |

# APÊNDICE C- INVENTÁRIO FUNDAÇÃO INDIRETA (CONTINUAÇÃO)

| ENTRADAS | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nome | Quantidade | Unidade | Origem, Fornecedor e Comentários do Dado | Método de coleta | Indicador Pedigree | Nome no do fluxo no software | Nome do fornecedor no software |
| | | | | | | | |
| **Concreto 40 MPa** | | | | | | | |
| Cimento Portland (CPIV) | 531,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | cement, pozzolana and fly ash 15-50% | cement production, pozzolana and fly ash 15-50% \| cement, pozzolana and fly ash 15-50% \| Cutoff, U - BR |
| Areia | 456,0 | kg | Jazida na cidade de Prazeres -Jaboatão/PE | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | sand | sand quarry operation, extraction from river bed \| sand \| Cutoff, U - BR |
| Pó de pedra | 163,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | gravel, crushed | gravel production, crushed \| gravel, crushed \| Cutoff, U-BR |
| Brita 0 | 342,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | gravel, crushed | gravel production, crushed \| gravel, crushed \| Cutoff, U-BR |
| Brita 1 | 668,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | gravel, crushed | gravel production, crushed \| gravel, crushed \| Cutoff, U-BR |
| Água | 225,0 | kg | | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | tap water | tap water production, conventional treatment \| tap water \| Cutoff, U-BR |
| Plastificante | 3,717 | kg | Santana de Parnaíba - SP | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde | plasticiser production, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde \| plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldeh\| Cutoff, U-GLO |
| **Fundação** | | | | | | | |
| Concreto 20 MPa (magro) | 7,26 | m³ | Usina instalada para a obra | Dados engenheiro | 2,3,2,1,1 | | Concreto 20 MPa |
| Concreto 30 MPa | 194,35 | m³ | Usina instalada para a obra | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | | Concreto 30 MPa |
| Concreto 40 MPa | 7,72 | m³ | Usina instalada para a obra | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | | Concreto 40 MPa |

## APÊNDICE C- INVENTÁRIO FUNDAÇÃO INDIRETA (CONTINUAÇÃO)

| ENTRADAS | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nome | Quantidade | Unidade | Origem, Fornecedor e Comentários do Dado | Método de coleta | Indicador Pedigree | Nome no do fluxo no software | Nome do fornecedor no software |
| | | | | | | | |
| Aço | 20891,0 | kg | Gerdau- Ponte dos Carvalhos, Cabo de Santo Agostinho- PE | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | steel, low-alloyed, hot rolled | steel production, low-alloyed, hot rolled \| steel, low-alloyed, hot rolled \| Cutoff, U - RoW |
| | | kg | | | | section bar rolling steel | section bar rolling, steel \| section bar rolling, steel \| Cutoff, U-Row |
| Fôrmas-aço | 86,00 | m² | Natal-RN | Outras obras (Paulo Vitor) | 3,3,2,2,2 | steel, low-alloyed, hot rolled | steel production, low-alloyed, hot rolled \| steel, low-alloyed, hot rolled \| Cutoff, U - RoW |
| | | m² | | | | sheet rolling, steel | sheet rolling, steel \| sheet rolling, steel \| Cutoff, U - RoW |
| Gelo | #REF! | kg | Garanhuns - PE | Outras obras | 3,3,2,2,2 | tap water | market for tap water \| tap water \| Cutoff, U - BR |
| | | kg | | | | operation, reefer, freezing | market for operation, reefer, freezing \| operation, reefer, freezing \| Cutoff, U - GLO |
| **Estacas** | | | | | | | |
| Cimento Portland | 15500,0 | kg | Companhia Industrial de Cimento Apodi -Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | cement, pozzolana and fly ash 15-50% | cement production, pozzolana and fly ash 15-50% \| cement, pozzolana and fly ash 15-50% \| Cutoff, U - BR |
| Aço | 2250,0 | kg | Gerdau- Ponte dos Carvalhos, Cabo de Santo Agostinho- PE | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | steel, low-alloyed, hot rolled | steel production, low-alloyed, hot rolled \| steel, low-alloyed, hot rolled \| Cutoff, U - RoW |
| | | | | | | section bar rolling steel | section bar rolling, steel \| section bar rolling, steel \| Cutoff, U-Row |
| Areia | 34500,0 | kg | Jazida na cidade de Prazeres -Jaboatão/PE | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | sand | sand quarry operation, extraction from river bed \| sand \| Cutoff, U - BR |
| Água | 7750,0 | kg | | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | tap water | tap water production, conventional treatment \| tap water \| Cutoff, U-BR |
| Argamassa total | 1 | item | Usina instalada para a obra | Dados engenheiro | 2,3,2,1,1 | | Argamassa total |
| ***EQUIPAMENTOS*** | | | | | | | |
| Retroescavadeira | 6,0 | hora de operação | 8 l/h, potência varia de 75 a 100 cv (55,92 a 74,57 kW) | Outras obras | 3,3,2,4,3 | machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, high load factor | market for machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, high load factor \| machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, high load factor \| Cutoff, U - GLO |

## APÊNDICE C- INVENTÁRIO FUNDAÇÃO INDIRETA (CONTINUAÇÃO)

| ENTRADAS | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nome | Quantidade | Unidade | Origem, Fornecedor e Comentários do Dado | Método de coleta | Indicador Pedigree | Nome no do fluxo no software | Nome do fornecedor no software |
| | | | | | | | |
| Escavadeira | 161,10 | m³ | 14 l/h | Outras obras | 3,3,2,4,2 | excavation, hydraulic digger | market for excavation, hydraulic digger \| excavation, hydraulic digger \| Cutoff, U - GLO |
| Perfuratriz | 6,5 | hora de operação | 298 kW ou 81 kW | Ecoinvent | 3,3,2,4,3 | machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor | market for machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor |
| Compactador de placa | 2,0 | hora de operação | 1 l/h | Outras obras | 3,3,2,4,3 | machine operation, diesel, < 18.64 kW, high load factor | market for machine operation, diesel, < 18.64 kW, high load factor \| machine operation, diesel, < 18.64 kW, high load factor \| Cutoff, U - GLO |
| Bomba de água (argamassa) | 173,82 | MJ | | Ecoinvent | 3,3,2,4,3 | water pump operation, diesel | water pump operation, diesel \| water pump operation, diesel \| Cutoff, U - BR |
| Bomba de água (concreto) | 8,55 | MJ | | Ecoinvent | 3,3,2,4,3 | water pump operation, diesel | water pump operation, diesel \| water pump operation, diesel \| Cutoff, U - BR |
| Bomba lança (argamassa) | 5,0 | hora de operação | 205 kW | Outras obras | 3,3,2,4,3 | machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor | market for machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor |
| Bomba lança (concreto) | 7,0 | hora de operação | 205 kW | Outras obras | 3,3,2,4,3 | machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor | market for machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor |
| Mangote vibrador (motor acionador) | 7 | hora de operação | 3 l/h | Outras obras | 3,3,2,4,3 | machine operation, diesel, < 18.64 kW, high load factor | market for machine operation, diesel, < 18.64 kW, high load factor \| machine operation, diesel, < 18.64 kW, high load factor \| Cutoff, U - GLO |
| Câmara frigorífica | 11661*1 | kg*d | 8,8 kW/dia | Outras obras | 3,3,2,4,3 | operation, reefer, freezing | market for operation, reefer, freezing \| operation, reefer, freezing \| Cutoff, U - GLO |

# APÊNDICE C- INVENTÁRIO FUNDAÇÃO INDIRETA (CONTINUAÇÃO)

| ENTRADAS | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nome | Quantidade | Unidade | Origem, Fornecedor e Comentários do Dado | Método de coleta | Indicador Pedigree | Nome no do fluxo no software | Nome do fornecedor no software |
| | | | | | | | |
| ***TRANSPORTE*** | | | | | | | |
| Caminhão truck / caçamba basculante | 771 | kg.km | Valor refrente a 1kg de cimento | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| | 771 | kg.km | Valor refrente a 1kg de brita 0 | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| | 771 | kg.km | Valor refrente a 1 kg de brita 1 | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| | 2452 | kg.km | Valor refrente a 1kg de plastificante | Google Maps | 3,3,2,2,1 | transport, freight, light commercial vehicle | transport, freight, light commercial vehicle \| transport, freight, light commercial vehicle \| Cutoff, U - RoW |
| Caminhão truck / caçamba basculante | 254 | kg.km | Valor referente a 1 kg de areia | Google Maps | 3,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| | 771 | kg.km | Valor referente a 1kg de pó de pedra | Google Maps | 3,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| Caminhão pipa | 771 | kg.km | Valor refrente a 1kg de água | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| Caminhão truck | 245 | kg.km | Valor referente a 1kg de ferragem (barras de aço) | Outras obras | 1,3,2,1,2 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| | 112*512 | kg.km | Valor refrente a 1 m² de fôrmas | Outras obras | 1,3,2,1,2 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |

## APÊNDICE C- INVENTÁRIO FUNDAÇÃO INDIRETA (CONCLUSÃO)

| ENTRADAS | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nome | Quantidade | Unidade | Origem, Fornecedor e Comentários do Dado | Método de coleta | Indicador Pedigree | Nome no do fluxo no software | Nome do fornecedor no software |
| | | | | | | | |
| Caminhão misturador de concreto | 2362,5*25 | kg.km | Valor referente a 1 m³ de concreto 20MPa | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| Caminhão misturador de concreto | 2314,05*25 | kg.km | Valor referente a 1m³ de concreto 30MPa | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| Caminhão misturador de concreto | 2388,7*25 | kg.km | Valor referente a 1m³ de concreto 40MPa | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| Caminhão munck | 23141*25 | kg.km | Valor referente a 1kg de armação montada | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| Caminhão frigorífico | 36,3 | kg.km | Valor referente a 1kg gelo | Outras obras | 3,3,2,1,1 | transport, freight, lorry with refrigeration machine, 7.5-16 ton, EURO5, R134a refrigerant, freezing | transport, freight, lorry with refrigeration machine, 7.5-16 ton, EURO5, R134a refrigerant, freezing \| transport, freight, lorry with refrigeration machine, 7.5-16 ton, EURO5, R134a refrigerant, freezing \| Cutoff, U-GLO |

# APÊNDICE D- INVENTÁRIO FUNDAÇÃO COM BASE NO SISTEMA DE TENSEGRIDADE

| ENTRADAS | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nome | Quantidade | Unidade | Origem, Fornecedor e Comentários do Dado | Método de coleta | Indicador Pedigree | Nome no do fluxo no software | Nome do fornecedor no software |
| ***OCUPAÇÃO DO SOLO*** | | | | | | | |
| Uso do solo | 18400 | m² | | Aproximação com base no material da obra | 1,3,2,1,1 | Occupation, shrub land, sclerophyllous | |
| ***RECURSOS ENERGÉTICOS*** | | | | | | | |
| Gerador a diesel (concreto) | 2,5 | min | 32 kW | Outras obras | 3,3,2,2,2 | machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, generators | market for machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, generators\| machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, generators \| |
| Gerador a diesel (argamassa) | 15,82 | min | Volume estaca= (pi*0,205^2)*48=6,33m³; Se para 8m³ gasta 20min, para 6,33m³ gasta-se 15,82min | Outras obras | 3,3,2,2,2 | machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, generators | market for machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, generators\| machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, generators \| Cutoff, U - GLO |
| ***INSUMOS/RECURSOS MATERIAIS*** | | | | | | | |
| **Concreto 30 MPa** | | | | | | | |
| Cimento Portland (CPII) | 436,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | cement production, Portland | cement production, Portland \| cement, Portland \| Cutoff, U - BR |
| Areia | 393,0 | kg | Jazida na cidade de Prazeres - Jaboatão/PE | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | sand | sand quarry operation, extraction from river bed \| sand \| Cutoff, U - BR |
| Pó de pedra | 308,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | gravel, crushed | gravel production, crushed \| gravel, crushed \| Cutoff, U-BR |
| Brita 0 | 342,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | gravel, crushed | gravel production, crushed \| gravel, crushed \| Cutoff, U-BR |
| Brita 1 | 667,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | gravel, crushed | gravel production, crushed \| gravel, crushed \| Cutoff, U-BR |
| Água | 225,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | tap water | tap water production, conventional treatment \| tap |
| Plastificante | 3,052 | kg | Santana de Parnaíba - SP | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde | plasticiser production, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde \| plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldeh\| Cutoff, U-GLO |

# APÊNDICE D- INVENTÁRIO FUNDAÇÃO COM BASE NO SISTEMA DE TENSEGRIDADE (CONTINUAÇÃO)

| ENTRADAS | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nome | Quantidade | Unidade | Origem, Fornecedor e Comentários do Dado | Método de coleta | Indicador Pedigree | Nome no do fluxo no software | Nome do fornecedor no software |
| **Fundação** | | | | | | | |
| Concreto 30 MPa | 12,8 | m³ | Usina instalada para a obra | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | | Concreto 30 MPa |
| Aço | 800,0 | kg | Gerdau- Ponte dos Carvalhos, Cabo de Santo Agostinho- PE | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | steel, low-alloyed, hot rolled | steel production, low-alloyed, hot rolled \| steel, low-alloyed, hot rolled \| Cutoff, U - RoW |
| | | kg | | | | section bar rolling steel | section bar rolling, steel \| section bar rolling, steel \| Cutoff, U-Row |
| Fôrmas-aço | 22,17 | kg | Natal-RN | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | steel, low-alloyed, hot rolled | steel production, low-alloyed, hot rolled \| steel, low-alloyed, hot rolled \| Cutoff, U - RoW |
| | | kg | | | | sheet rolling, steel | sheet rolling, steel \| sheet rolling, steel \| Cutoff, U - RoW |
| **Estacas raiz** | | | | | | | |
| Cimento Portland | 29000,0 | kg | Fortaleza | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | cement production, Portland | cement production, Portland \| cement, Portland \| Cutoff, U - BR |
| Areia | 12000,0 | kg | Jazida na cidade de Prazeres - Jaboatão/PE | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | sand | sand quarry operation, extraction from river bed \| sand \| Cutoff, U - BR |
| Água | 14500,0 | kg | | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | tap water | tap water production, conventional treatment \| tap |
| Aço | 1000,0 | kg | Gerdau- Ponte dos Carvalhos, Cabo de Santo Agostinho- PE | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | steel, low-alloyed, hot rolled | steel production, low-alloyed, hot rolled \| steel, low-alloyed, hot rolled \| Cutoff, U - RoW |
| | | | | | | section bar rolling steel | section bar rolling, steel \| section bar rolling, steel \| Cutoff, U-Row |
| Tirante inco 60D | 2304,0 | kg | Incotep-Cumbica, Guarulhos - SP (2452 km) | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | steel, low-alloyed | steel production, converter, low-alloyed \| steel, low-alloyed \| Cutoff, U - RoW |
| | | | | | | section bar rolling steel | section bar rolling, steel \| section bar rolling, steel \| Cutoff, U-Row |
| **Tubulação torre** | | | | | | | |
| Tirante inco 60D | 1536,0 | kg | Incotep-Cumbica, Guarulhos - SP (2452 km) | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | steel, low-alloyed | steel production, converter, low-alloyed \| steel, low-alloyed \| Cutoff, U - RoW |
| | | | | | | section bar rolling steel | section bar rolling, steel \| section bar rolling, steel \| Cutoff, U-Row |

## APÊNDICE D- INVENTÁRIO FUNDAÇÃO COM BASE NO SISTEMA DE TENSEGRIDADE (CONTINUAÇÃO)

| ENTRADAS | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nome | Quantidade | Unidade | Origem, Fornecedor e Comentários do Dado | Método de coleta | Indicador Pedigree | Nome no do fluxo no software | Nome do fornecedor no software |
| | | | | | | | |
| Tubulação sch 40 - (6" e 8") | 14139,5 | kg | Incotep-Cumbica, Guarulhos - SP (2452 km) | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | steel, low-alloyed, hot rolled | steel production, low-alloyed, hot rolled \| steel, low-alloyed, hot rolled \| Cutoff, U - RoW |
| | | | | | | section bar rolling, steel \| section bar rolling, steel \| Cutoff, U-Row | section bar rolling, steel \| section bar rolling, steel \| Cutoff, U-Row |
| ***EQUIPAMENTOS*** | | | | | | | |
| Retroescavadeira | 6,0 | hora de operação | 8 l/h, potência varia de 75 a 100 cv (55,92 a 74,57 kW) | Outras obras | 3,3,2,4,3 | machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, high load factor | market for machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, high load factor \| machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, high load factor \| Cutoff, U - GLO |
| Escavadeira | 12,80 | m³ | 14 l/h | Outras obras | 3,3,2,4,2 | excavation, hydraulic digger | market for excavation, hydraulic digger \| excavation, hydraulic digger \| Cutoff, U - GLO |
| Perfuratriz | 2,0 | hora de operação | 298 kW ou 81 kW | Ecoinvent | 3,3,2,4,3 | >= 74.57 kW, high load factor | market for machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor |
| Guindaste | 12,00 | hora de operação | 65 kW | Ecoinvent | 3,3,2,4,3 | >= 74.57 kW, high load factor | market for machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor |
| Carregadeira | 12,00 | hora de operação | 103 kW | Ecoinvent | 3,3,2,4,3 | machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor | market for machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor |
| Bomba de água (argamassa) | 54,12 | MJ | | Ecoinvent | 3,3,2,4,3 | water pump operation, diesel | water pump operation, diesel \| water pump operation, diesel \| Cutoff, U - BR |
| Bomba de água (concreto) | 8,55 | MJ | | Ecoinvent | 3,3,2,4,3 | water pump operation, diesel | water pump operation, diesel \| water pump operation, diesel \| Cutoff, U - BR |
| Bomba lança (argamassa) | 3,0 | hora de operação | 205 kW | Outras obras | 3,3,2,4,3 | >= 74.57 kW, high load factor | market for machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor |
| Bomba lança (concreto) | 3,0 | hora de operação | 205 kW | Outras obras | 3,3,2,4,3 | >= 74.57 kW, high load factor | market for machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor |
| Mangote vibrador (motor acionador) | 1,0 | hora de operação | 3 l/h | Outras obras | 3,3,2,4,3 | machine operation, diesel, < 18.64 kW, high load factor | market for machine operation, diesel, < 18.64 kW, high load factor \| machine operation, diesel, < 18.64 kW, high load factor \| Cutoff, U - GLO |

## APÊNDICE D- INVENTÁRIO FUNDAÇÃO COM BASE NO SISTEMA DE TENSEGRIDADE (CONTINUAÇÃO)

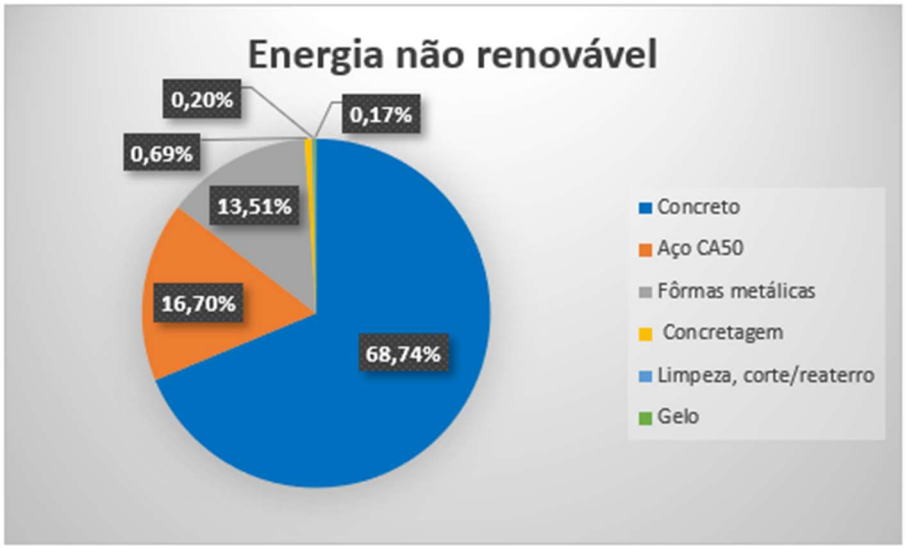
| ENTRADAS | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nome | Quantidade | Unidade | Origem, Fornecedor e Comentários do Dado | Método de coleta | Indicador Pedigree | Nome no do fluxo no software | Nome do fornecedor no software |
| | | | | | | | |
| Compactador de placa | 1,0 | hora de operação | 1 l/h | Outras obras | 3,3,2,4,3 | machine operation, diesel, < 18.64 kW, high load factor | market for machine operation, diesel, < 18.64 kW, high load factor \| machine operation, diesel, < 18.64 kW, high load factor \| Cutoff, U - GLO |
| ***TRANSPORTE*** | | | | | | | |
| Caminhão truck / caçamba basculante | 771 | kg.km | Valor refrente a 1kg de cimento | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| | 771 | kg.km | Valor refrente a 1kg de brita 0 | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| | 771 | kg.km | Valor refrente a 1 kg de brita 1 | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| | 2452 | kg.km | Valor refrente a 1kg de plastificante | Google Maps | 3,3,2,2,1 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| | 254 | kg.km | Valor referente a 1 kg de areia | Google Maps | 3,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| | 771 | kg.km | Valor referente a 1kg de pó de pedra | Google Maps | 3,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| Caminhão pipa | 771 | kg.km | Valor refrente a 1kg de água | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| Caminhão truck | 245 | kg.km | Valor referente a 1kg de ferragem (barras de aço) | Outras obras | 1,3,2,1,2 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| | 112*512 | kg.km | Valor refrente a 1 m² de fôrmas | Outras obras | 1,3,2,1,2 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |

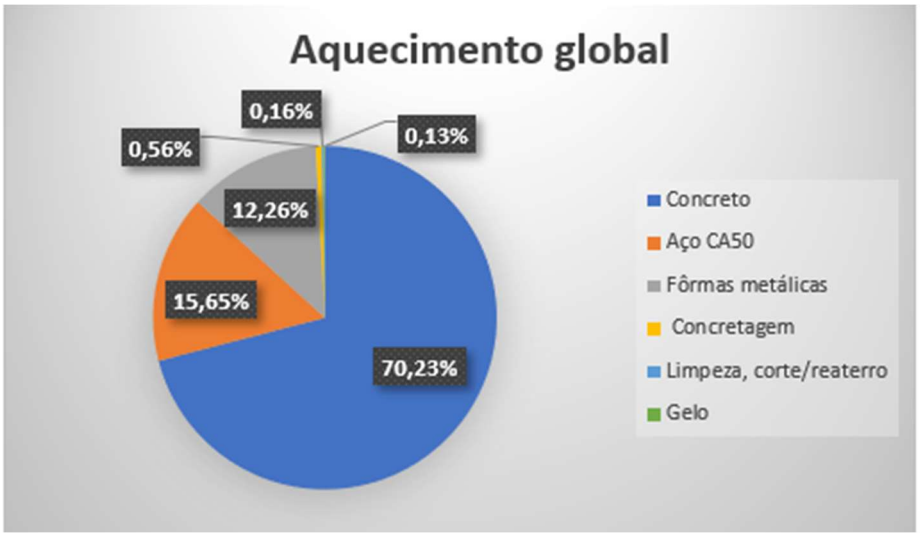
## APÊNDICE D- INVENTÁRIO FUNDAÇÃO COM BASE NO SISTEMA DE TENSEGRIDADE (CONCLUSÃO)

| ENTRADAS | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nome | Quantidade | Unidade | Origem, Fornecedor e Comentários do Dado | Método de coleta | Indicador Pedigree | Nome no do fluxo no software | Nome do fornecedor no software |
| | | | | | | | |
| Caminhão truck | 2452 | kg.km | Valor referente a 1kg de tirante | Dados engenheiro | 1,3,2,1,2 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| | 2452 | kg.km | Valor referente a 1kg de tubulação sch 40 | Dados engenheiro | 1,3,2,1,2 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| Caminhão misturador de concreto | 2374,05*25 | kg.km | Valor referente a 1m³ de concreto 30MPa | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |
| Caminhão munck | 1800*25 | kg.km | Valor referente a armação montada | Dados engenheiro | 1,3,2,1,1 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 \| Cutoff, U - RoW |

# APÊNDICE E- RESULTADOS DAS CATEGORIAS DE IMAPCTOS PARA OS SISTEMAS DE FUNDAÇÃO

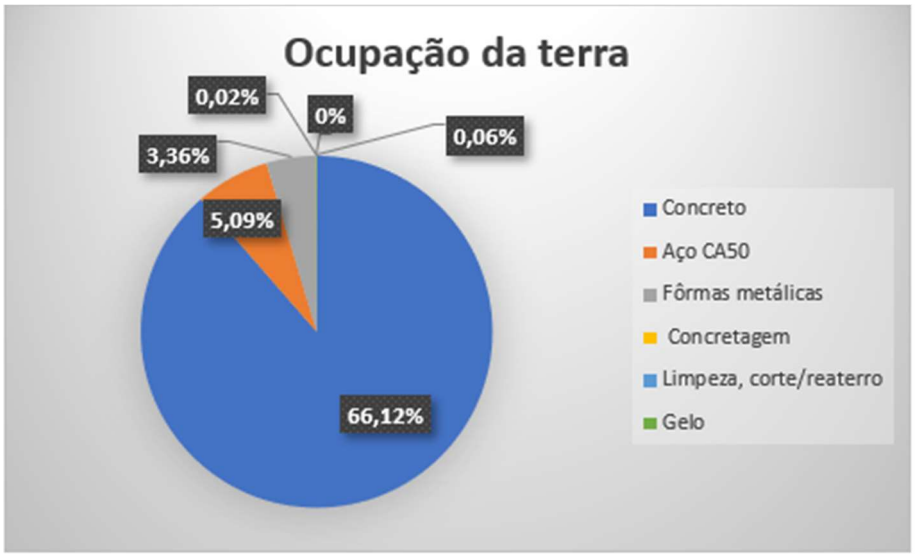
**Fundação direta convencional**

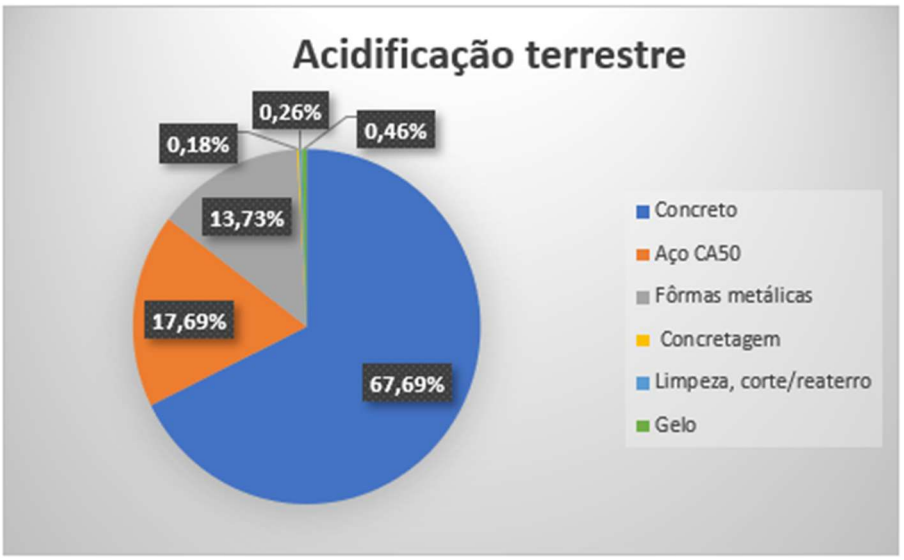


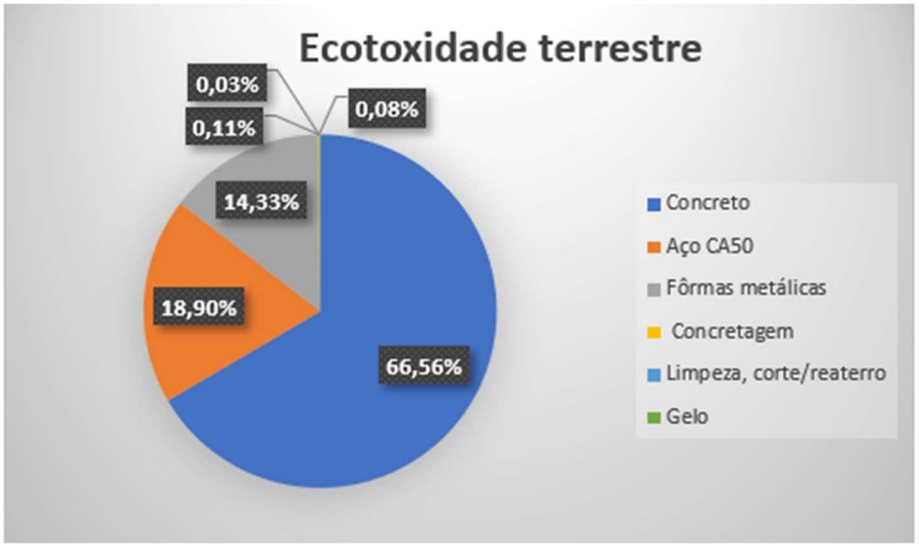


## APÊNDICE E- RESULTADOS DAS CATEGORIAS DE IMAPCTOS PARA OS SISTEMAS DE FUNDAÇÃO

**Fundação direta convencional**

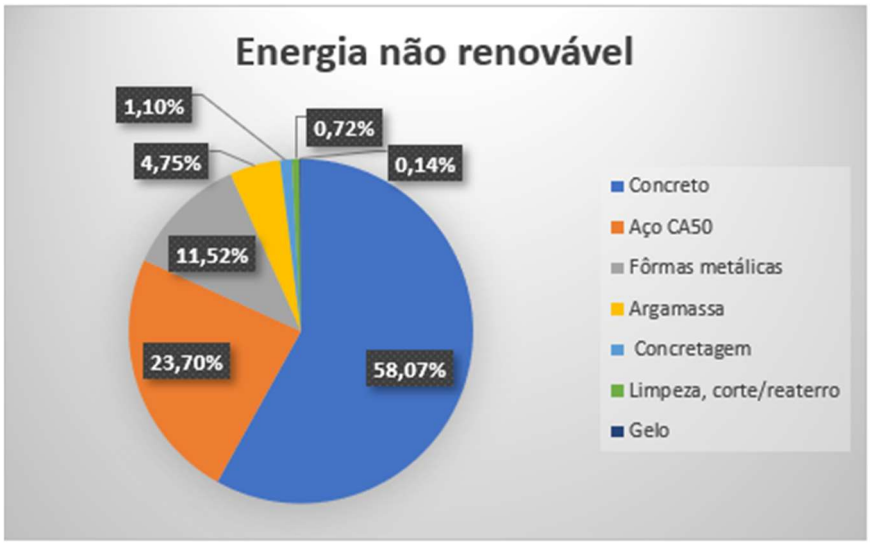


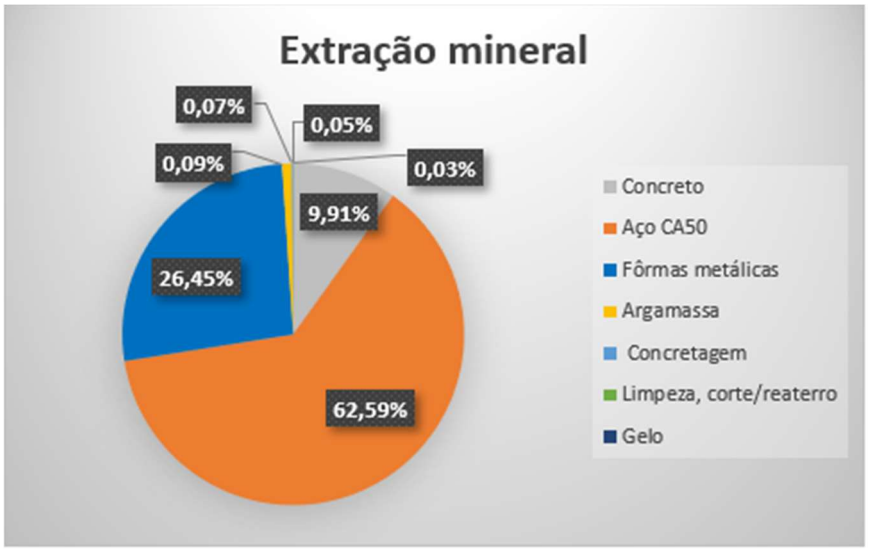



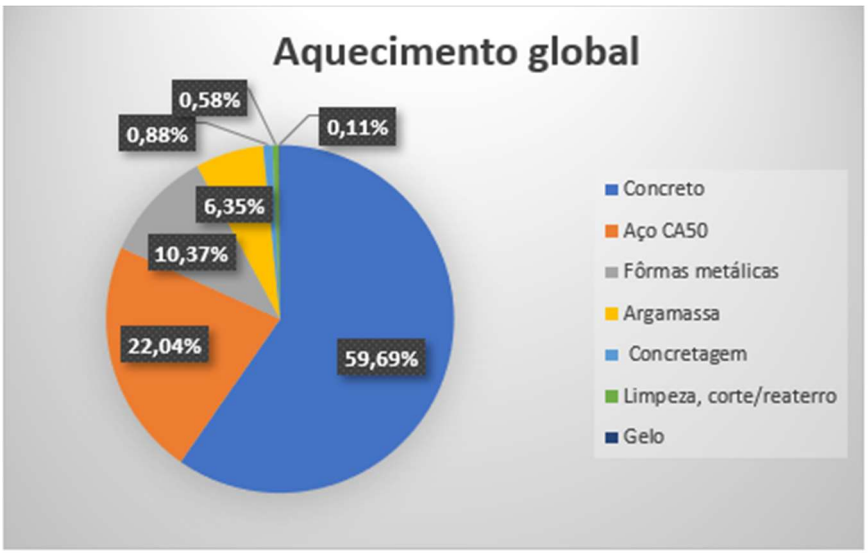



# APÊNDICE E- RESULTADOS DAS CATEGORIAS DE IMAPCTOS PARA OS SISTEMAS DE FUNDAÇÃO

## Fundação indireta convencional

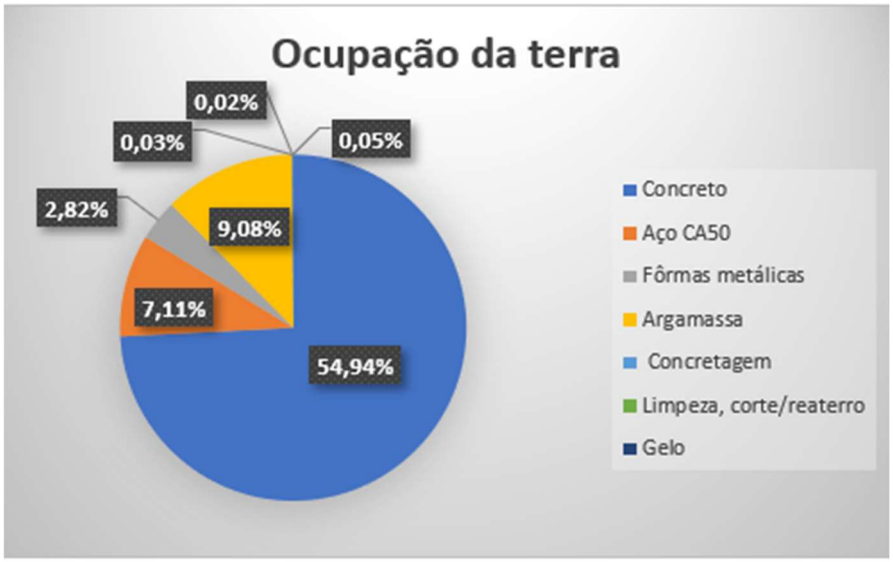


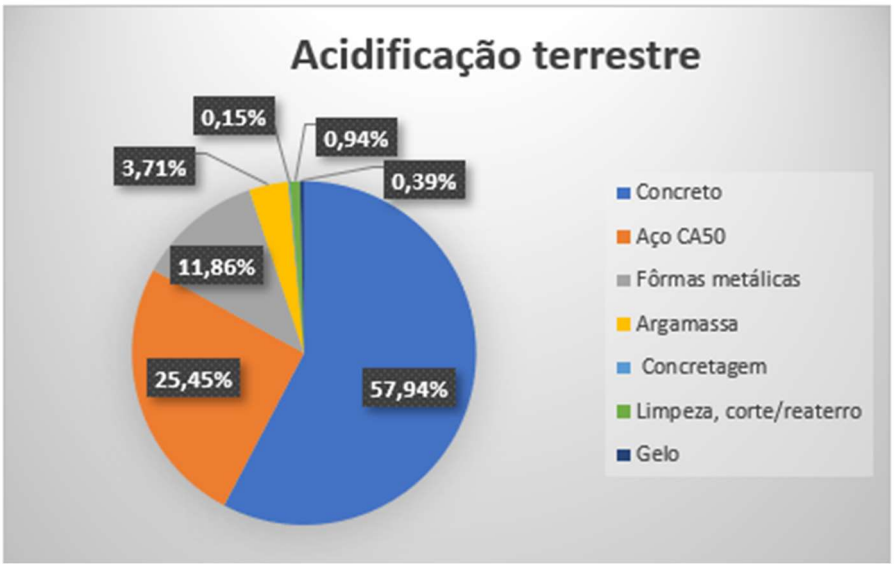



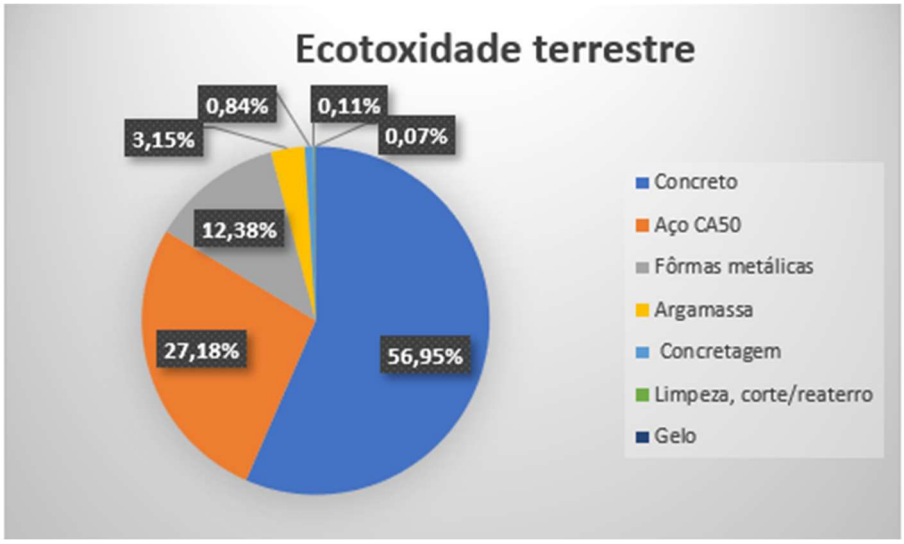



## APÊNDICE E- RESULTADOS DAS CATEGORIAS DE IMAPCTOS PARA OS SISTEMAS DE FUNDAÇÃO

**Fundação indireta convencional**

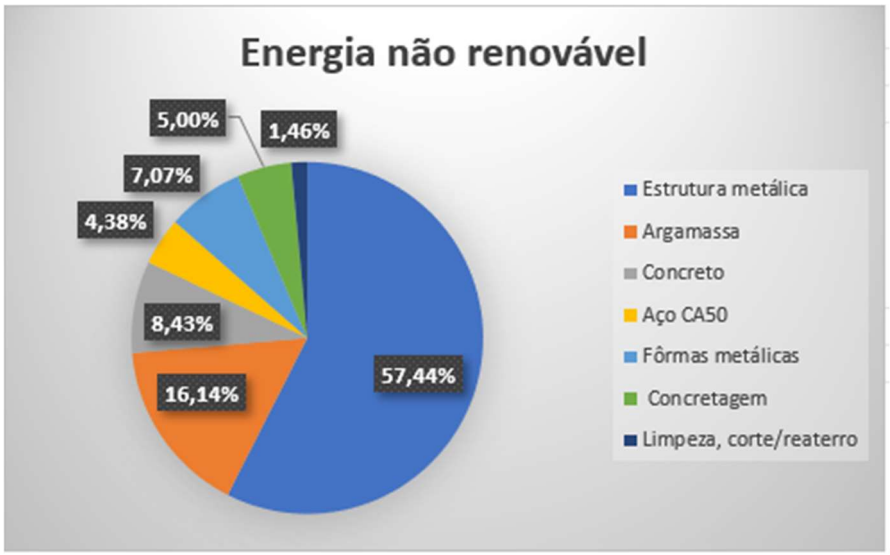


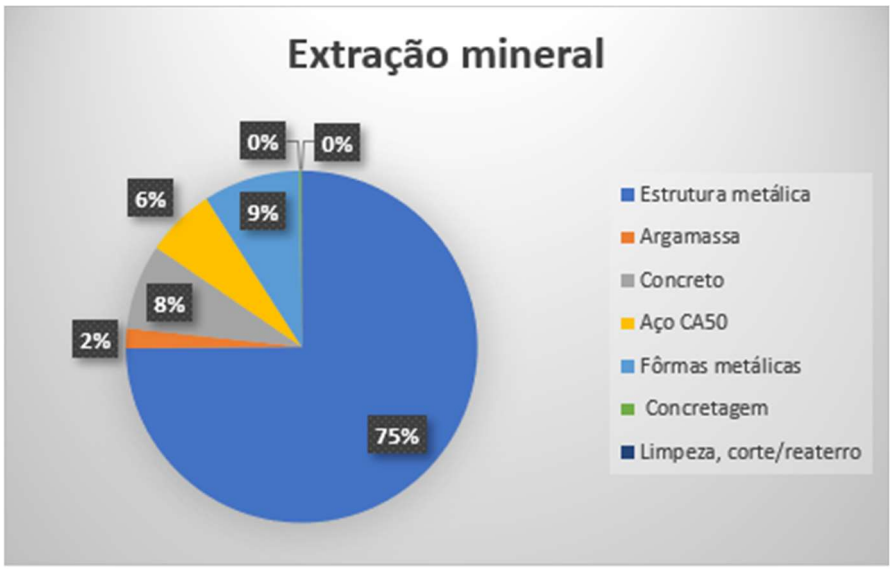



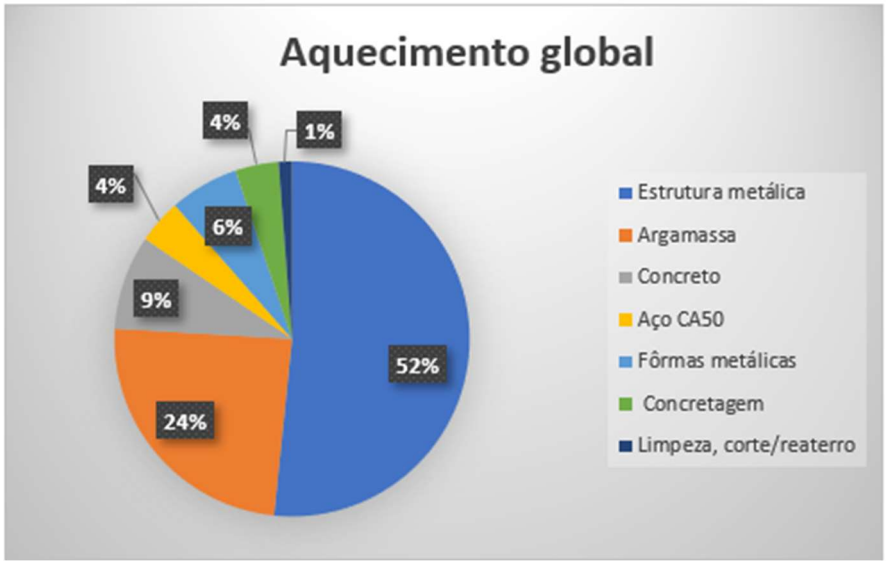



## APÊNDICE E- RESULTADOS DAS CATEGORIAS DE IMAPCTOS PARA OS SISTEMAS DE FUNDAÇÃO

**Fundação com base no sistema de tensegridade**

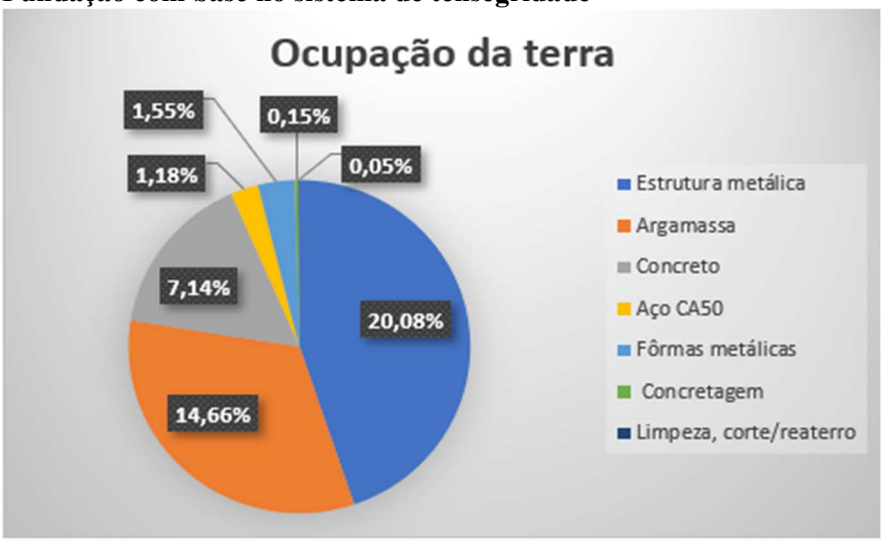


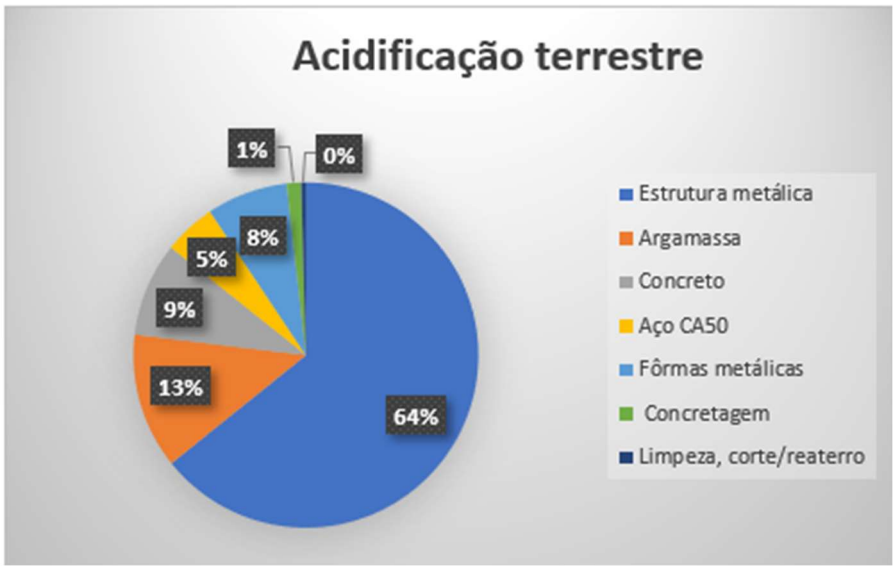



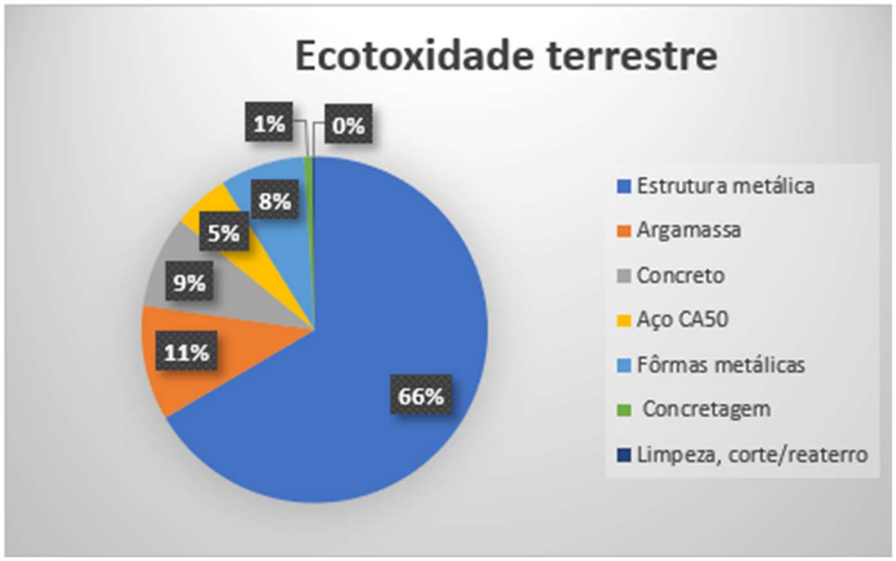



## APÊNDICE E- RESULTADOS DAS CATEGORIAS DE IMAPCTOS PARA OS SISTEMAS DE FUNDAÇÃO

**Fundação com base no sistema de tensegridade**



## APÊNDICE F- IMPACTO POR SISTEMA DE FUNDAÇÃO PARA OS TRAÇOS AVALIADOS NA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

| IMPACTO TOTAL | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Traços** | **Energia não renovável** | **Extração mineral** | **Aquecimento global** | **Ocupação da terra** | **Acidificação terrestre** | **Ecotoxidade terrestre** |
| **FUNDAÇÃO DIRETA** | | | | | | |
| Concreto ref. | 1,64E+06 | 1836,15 | 1,43E+05 | 4493,35 | 1789,25 | 8,39E+06 |
| Traço 1 (cinza volante) | 1,35E+06 | 1128,17 | 9,11E+04 | 4858,53 | 1584,82 | 7,95E+06 |
| Traço 2 (cinza volante) | 1,63E+06 | 1774,03 | 1,29E+05 | 5688,38 | 1764,45 | 7,40E+06 |
| Traço 3 (escória de alto forno) | 1,18E+06 | 991,93 | 3,19E+04 | 5010,91 | 1386,22 | 6,94E+06 |
| Traço 4 (escória de alto forno) | 1,27E+06 | 1146,77 | 8,05E+04 | 5223,93 | 1475,24 | 7,04E+06 |
| **FUNDAÇÃO INDIRETA** | | | | | | |
| Concreto ref. | 1,33E+06 | 1490,13 | 1,16E+05 | 3647,55 | 1452,42 | 6,81E+06 |
| Traço 1 (cinza volante) | 1,10E+06 | 915,834 | 7,39E+04 | 3944,09 | 1286,53 | 6,46E+06 |
| Traço 2 (cinza volante) | 1,33E+06 | 1440,13 | 1,05E+05 | 4617,76 | 1432,36 | 6,00E+06 |
| Traço 3 (escória de alto forno) | 9,61E+05 | 805,23 | 2,59E+04 | 4067,79 | 1125,32 | 5,63E+06 |
| Traço 4 (escória de alto forno) | 1,03E+06 | 930,94 | 6,53E+04 | 4240,72 | 1197,58 | 5,71E+06 |
| **FUNDAÇÃO TENSEGRIDADE** | | | | | | |
| Concreto ref. | 8,71E+04 | 97,56 | 7622,78 | 240,26 | 95,57 | 4,49E+05 |
| Traço 1 (cinza volante) | 7,22E+04 | 60,32 | 4869,21 | 259,76 | 84,73 | 4,25E+05 |
| Traço 2 (cinza volante) | 8,74E+04 | 94,85 | 6915,46 | 304,13 | 94,34 | 3,95E+05 |
| Traço 3 (escória de alto forno) | 6,33E+04 | 53,03 | 1704,20 | 267,91 | 74,11 | 3,71E+05 |
| Traço 4 (escória de alto forno) | 6,80E+04 | 61,31 | 4303,23 | 279,30 | 78,87 | 3,76E+05 |