

Avaliação do ciclo de vida de fundações de torres eólicas: Estudo Comparativo

Wind Tower Foundation Life Cycle Assessment: Comparative Study

¹Ana Paula de Moraes Barroso, ²João Luiz Calmon

¹Mestra em Engenharia Ambiental – Universidade Federal do Espírito Santo (anapaula.mbarroso@gmail.com.br)

²Professor Emérito da Universidade Federal do Espírito Santo –
Universidade Federal do Espírito Santo (calmonbarcelona@gmail.com)

RESUMO: A energia eólica apesar de ambientalmente benéfica, não está isenta de impactos ambientais. Estudos que utilizam a Avaliação de ciclo de vida (ACV), metodologia capaz de quantificar impactos ambientais de um sistema, usualmente detectam a fundação do aerogerador como seu componente de maior impacto ambiental. Este artigo realiza uma ACV comparativa entre três tipos de fundação para um aerogerador hipotético no Nordeste do Brasil, duas convencionais (direta e indireta) e uma fundação com base no sistema de tensegridade, novo modelo que reduz a demanda por concreto, através da utilização de elementos estruturais de tração e compressão. A ACV fornece evidências que a fundação de tensegridade pode mitigar impactos de aquecimento global, acidificação e ecotoxicidade terrestres, gastos de energia não renovável, extração mineral e ocupação da terra dos aerogeradores. Evidenciou-se ainda que os impactos provenientes do uso do cimento e do transporte apresentam grande influência na viabilidade ambiental dos sistemas de fundações estudados.

Palavras-Chave: Energia Eólica; Tensegridade; Fundação direta; Fundação indireta.

ABSTRACT: Wind energy, although environmentally beneficial, is not free of environmental impacts. Studies that use the Life Cycle Assessment (LCA), a methodology capable of quantifying a system's environmental impacts, usually detect the foundation of the wind turbine as its component with the greatest environmental impact. This article performs a comparative LCA between three types of foundation for a hypothetical wind turbine in Northeast Brazil, two conventional (shallow and deep) and a foundation based on the tensegrity, a new model that reduces the demand for concrete, using structural elements of tension and compression. The LCA provides evidence that the tensegrity can mitigate impacts of global warming, terrestrial acidification and ecotoxicity, non-renewable energy expenditure, mineral extraction and land occupation of wind turbines. It was also evident that the impacts arising from the use of cement and transport have a great influence on the environmental viability of the studied foundation systems.

Keywords: Wind energy; Tensegrity; Shallow foundation; Deep foundation.

1. INTRODUÇÃO

A energia eólica 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 (LI *et al.*, 2021; STAVRIDOU; KOLTSAKIS; BANIOPOULOS, 2019). Apesar de sua natureza renovável, a energia eólica não é isenta de impactos ambientais, isso se deve ao consumo expressivo não só de matérias-primas mas também de componentes manufaturados durante a produção 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 grandes volumes de concreto envolvidos na construção de fundações de um aerogerador, sejam elas diretas ou indiretas, geram preocupações em relação às emissões de CO₂ (BERNDT, 2015).

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, 2014). De

acordo com ISO 14040 (ISO,2006a) e a ISO 14044 (ISO,2006b), a ACV consiste nas quatro etapas:

(a) Definição do objetivo e escopo, onde são estabelecidos o objeto do estudo, a unidade funcional, os limites do sistema e as suposições feitas.

(b) Análise de inventário, onde são investigadas todas as entradas e saídas do sistema (fluxo de materiais, transporte e energia).

(c) Avaliação de impacto, onde os métodos e as categorias de impacto são definidos e os indicadores das categorias de impacto são calculados.

(d) Interpretação, onde os resultados das etapas anteriores são interpretados.

A fim de para compreender o estado da arte de ACV para aerogeradores foi conduzida uma revisão sistemática usando o método ProKnow-C. Sendo assim, um grupo de 79 artigos entre os anos de 2011 a 2021 foram analisados, 62 deles de fato desenvolveram a ACV na temática estudada e 17 eram revisões da literatura.

A partir dos 62 artigos avaliados verificou-se que a maioria dos estudos utilizaram como objeto de estudo torres eólicas *onshore* e turbinas maiores que 1 MW. Em relação as fronteiras dos estudos, a maioria dos estudos avaliaram os impactos do berço ao túmulo, isto é, desde a extração das matérias primas até a destinação final dos componentes. Para a localização geográfica, mais da metade dos artigos estabeleceram cenários de estudo no continente europeu. Para a maioria dos artigos examinados, foi considerado um tempo de vida de 20 anos e a unidade funcional de 1 kWh. No que tange aos resultados, eles são comumente fornecidos em gráficos percentuais e agrupados por fases do ciclo de vida.

Sendo o foco deste artigo 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 parte dos impactos é a fundação, seja ela *onshore* (ABELIOTIS; PACTITI, 2014; BONOU; LAURENT; OLSEN, 2016; GKANTOU; REBELO; BANIOPOULOS, 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 seis e quatro 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 pois os materiais mais utilizados nas fundações, isto é, concreto e aço, são 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 seis e quatro 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% do impacto total na categoria de impacto mudanças climáticas.

Também Kouloumpis, Sobolewski, Yan (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.

Após a análise dos artigos conclui-se que as fundações de torres eólicas têm sido estudadas dentro de um contexto maior, ou seja, junto aos demais componentes dos aerogeradores. 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.

A ACV voltada para aerogeradores, pode não apenas auxiliar as empresas deste setor a realizar projetos mais sustentáveis. 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 (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).

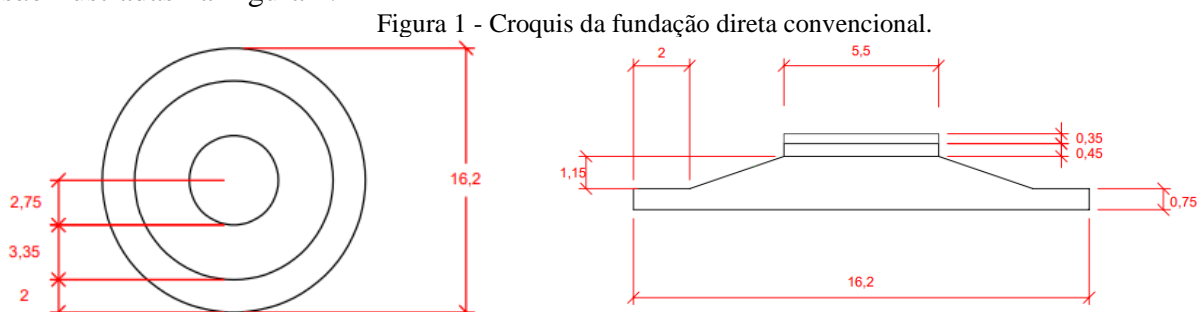
O objetivo da pesquisa é realizar uma Avaliação de Ciclo de Vida comparativa entre três tipos de fundação: fundação direta convencional, fundação indireta convencional e a fundação com base no sistema de tensegridade de um aerogerador hipotético localizado na região Nordeste do Brasil. Ressalta-se que, os dados acerca do aerogerador e das fundações convencionais são reais, contudo, não se tem a permissão para citar o nome do parque eólico de origem. A fim de obter resultados comparáveis, as estruturas das torres consideradas compartilham a mesma altura, potência e têm o mesmo carregamento.

2. MATERIAIS E MÉTODO

2.1 Definição do objetivo e escopo

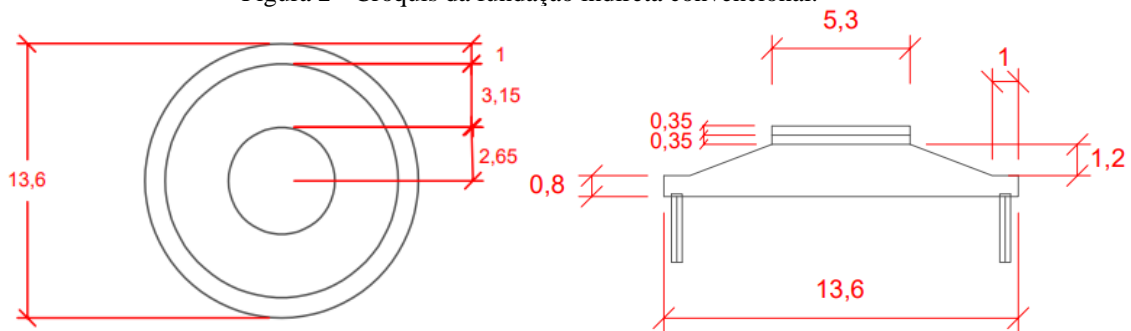
O objetivo desta pesquisa consistiu em realizar uma ACV comparativa para três tipos de fundação: fundação direta convencional, fundação indireta convencional e a fundação com base no sistema de tensegridade de um aerogerador hipotético localizado na região Nordeste do Brasil. O cenário considerado refere-se a uma instalação *onshore*, em que a turbina eólica de eixo horizontal a favor do vento tem a potência 1,7 MW, com configuração de três pás. Por sua vez a torre admitida é tubular em aço e possui a altura 80 m até o eixo do cubo.

Tendo em vista as cargas presentes em tal estrutura, a sapata modelada possui diâmetro da base igual a 16,2 m, altura total de 2,35 m e volume de aproximadamente 250 m³. Na simulação, a sapata foi dividida em dois volumes, sendo o primeiro até a altura de 1,9 m e o segundo para os 0,45 m restantes. Essa divisão se deve à diferença do tipo de concreto empregado em cada volume, no primeiro foi utilizado o concreto de resistência de 30 MPa, enquanto no segundo de resistência de 40 MPa. As vistas superior e lateral da fundação direta são ilustradas na Figura 1.



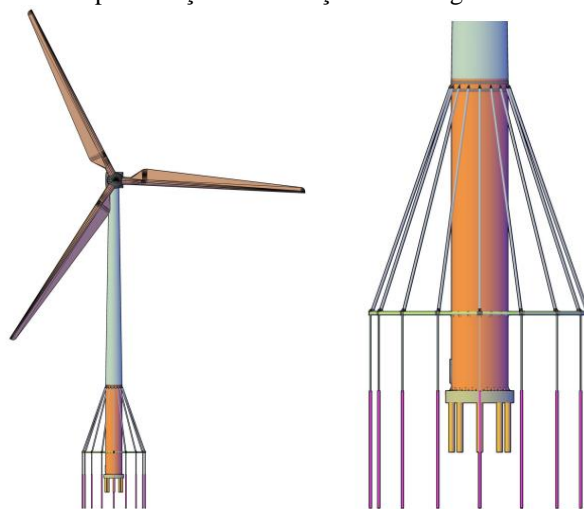
Na fundação indireta convencional, foram consideradas 22 estacas escavadas com 41 cm de diâmetro e 7 m de profundidade. O bloco sobre as estacas possuiu diâmetro de 13,6 m, altura de 2,7 m e volume de aproximadamente 200 m³. Assim como no cenário anterior, o bloco foi dividido em dois volumes, o primeiro até a altura de 2,35 m e o segundo para os 0,35 m restante. As vistas superior e lateral da fundação indireta são ilustradas na Figura 2.

Figura 2 - Croquis da fundação indireta convencional.



Por fim, a fundação com base no sistema de tensegridade é 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, estacas tração são executadas com 2,5 m³ de concreto fck 30MPa. A Figura 3 apresenta um modelo representativo da fundação de tensegridade.

Figura 3- Representação da fundação de tensegridade.



Fonte: Cortesia da MCA Tecnologia de Estruturas, 2021.

2.1.2 Unidade funcional e Fronteiras do sistema

A unidade funcional do estudo foi um elemento fundação, portanto todas as entradas do sistema de estudo são expressos 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, são contabilizadas com o intuito de originar um elemento fundação.

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 (jazidas) e transportados para suas respectivas fábricas, onde passam por processos de beneficiamento e

construção, na sequência são novamente transportados até a central de concreto ou até o 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 caso a operação do parque eólico termine, ocorre a demolição da estrutura, o que gera uma grande quantidade de resíduos que podem ser reciclados ou enviados para aterros.

A fronteira do sistema considerada nesse estudado é denominada do berço ao canteiro (*cradle-to-site*), isto é, nela considerou-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.

2.2 Análise do inventário de ciclo de vida

O banco de dados utilizado neste estudo foi o *Ecoinvent* 3.6, por possuir uma base de dados amplamente utilizada para ACV, contendo mais de 20.000 conjuntos de dados, abrangendo energia, produção de materiais, processamento e tratamento de resíduos (ACV BRASIL, 2020). Para realizar a ACV foi utilizado o software OpenLCA versão 1.11, um software de código aberto disponível gratuitamente.

Para que fosse possível realizar a montagem dos sistemas estudados no *software* foi necessário a elaboração do inventário para insumos. Assim, 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. Para o cenário base, 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 – Traço em peso (kg).

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

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, 23 m³ de areia e 2.250 kg de aço. Na fundação de tensegridade, por sua vez, 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 serão removidas 48 horas após a concretagem. 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 das grandes dimensões das fundações convencionais, a utilização de gelo a fim de evitar fissurações, devido as altas temperaturas atingidas pela reação exotérmica de hidratação do cimento, é usualmente praticada. 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.

2.2.3 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 município do Estado 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 1.

Quadro 1 – Cenário de transporte.

| 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 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 |

2.3 Avaliação de impacto de ciclo de vida

O foco deste estudo 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) Ecotoxicidade terrestre, sendo elas, indicadores amplamente utilizados em estudos de ACV, em especial, aqueles voltados para aerogeradores e concreto.

2.4 Análise de sensibilidade

As cargas ambientais, que associadas a construção civil, são significativamente influenciadas pelo impacto ambiental resultante da utilização do cimento. 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 associado 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).

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 traços de resistência similares e 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 1- Traços utilizados na análise de sensibilidade

| Traço | Cimento [kg/m ³] | Escória [kg/m ³] | Cinza [kg/m ³] | Brita 0 [kg/m ³] | Brita 1 [kg/m ³] | Pó de pedra [kg/m ³] | Areia [kg/m ³] | Água [kg/m ³] | Plastificante [kg/m ³] |
|-------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------------|
| 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 |

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:

- i. 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, no estado de Pernambuco.
- ii. Cenário 2 (C2): Utilização de fornecedores de cimento, brita 0, brita 1, pó de pedra, areia e aço do estado de São Paulo.
- iii. Cenário 3 (C3): Utilização de fornecedores dos componentes do concreto do Pernambuco e fornecedor do aço de São Paulo.

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

Tabela 2- Cenários de transporte para análise de sensibilidade.

| | Distância 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 |

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 os ganhos ambientais nas categorias de impacto analisadas, mesmo que houvesse uma variação significativa do concreto deste sistema. 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 a, respectivamente, 3,4 e 5,08 vezes o volume da fundação de tensegriedade (cenário de referência).

2.5 Análise de incerteza

O alto grau de especulação que envolve a definição de cenários e uso de dados, muitas vezes incompletos, exige que as questões de incerteza sejam abordadas de maneira quantitativa. Neste estudo, para a atribuição dos indicadores de qualidade dos dados (DQI's- *data quality indicators*) para cada fluxo dos processos, foi utilizada a matriz de pedigree do Ecoinvent. A partir dos DQI's, foi possível obter fatores de incerteza que permitem o cálculo da distribuição dos dados e desvio padrão.

Na sequência foi realizada a análise de incerteza dos dados por meio da simulação de Monte Carlo, que produz curvas de distribuição probabilística que agregam as incertezas de cada parâmetro dos materiais/processos críticos. Devido a capacidade computacional disponível, optou-se por realizar 1.000 iterações e intervalo de confiança de 90% para as simulações.

3. RESULTADOS

3.1 Comparação entre os sistemas de fundações

Os resultados expostos na Tabela 4 referem-se a uma ACV (*cradle-to-site*) para seis categorias *midpoints*: Energia não renovável, Extração mineral, Aquecimento global, Ocupação da terra, Acidificação terrestre e Ecotoxicidade terrestre, para as três fundações avaliadas.

Tabela 4- Resultados das categorias de impacto para um elemento de fundação

| | Direta convencional | Indireta convencional | Tensegriedade |
|---|---------------------|-----------------------|---------------|
| Energia não renovável [MJ primária] | 2,56E+06 | 2,46E+06 | 1,03E+06 |
| Extração mineral [MJ excedente] | 1,46E+04 | 1,62E+04 | 1,15E+04 |
| Aquecimento global [kg CO2 eq.] | 2,16E+05 | 2,10E+05 | 8,89E+04 |
| Ocupação da terra [m ² org.aravél] | 7336,20 | 7165,41 | 3366,30 |
| Acidificação terrestre [kg SO2 eq.] | 2844,69 | 2697,34 | 1085,44 |
| Ecotoxicidade terrestre [kg TEG solo] | 1,36E+07 | 1,29E+07 | 5,19E+06 |

A partir dos resultados obtidos tem-se que a fundação de tensegriedade é a menos impactante em todas as categorias de impacto avaliadas. A principal diferença entre a fundação de tensegriedade 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 tensegriedade 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.

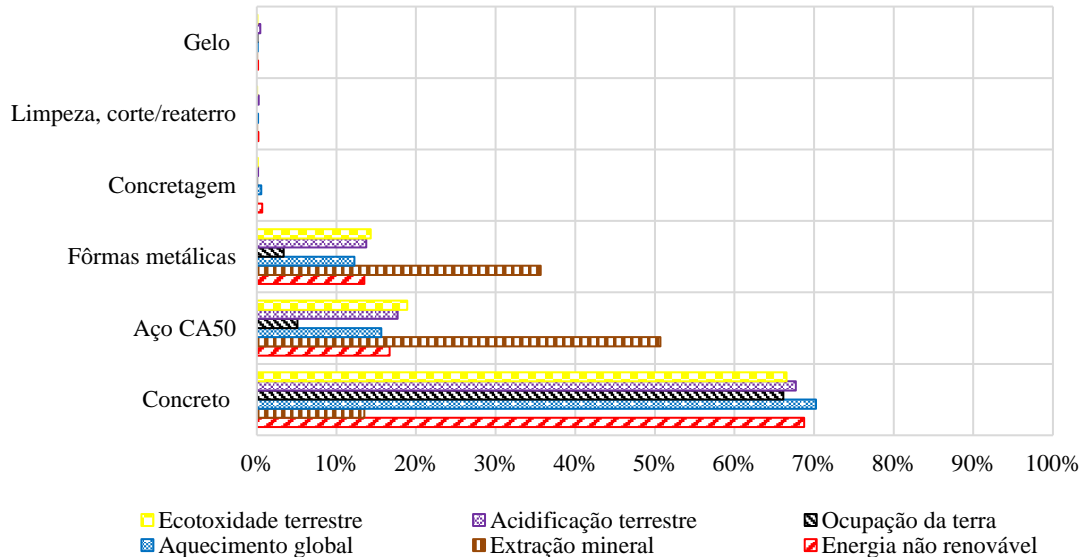
Essa diferença resulta em uma redução média de 58,8% para Energia não renovável, 25,3% para Extração mineral, 58,3% para Aquecimento global, 53,6% para Ocupação da terra, 60,8% para Acidificação terrestre e 60,7% para Ecotoxicidade terrestre.

Já a comparação dos resultados das fundações convencionais demonstra que a fundação indireta é menos impactante para o meio ambiente em todas as categorias, exceto na categoria Extração mineral. 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 a expressividade de seus impactos. A maior demanda de concreto da fundação direta inclui não só o aumento do consumo dos componentes do concreto, 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), 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 concretagem e no caso da fundação de tensegridade na montagem da estrutura metálica) e estruturas metálicas para fundação de tensegridade (todo processo de fabricação dos tirantes e transporte). A Figura 4 apresenta as porcentagens dos impactos totais das seis categorias de impacto correspondentes a cada elemento de construção da fundação direta convencional.

Figura 4- Caracterização das categorias de impacto para a fundação direta.



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

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

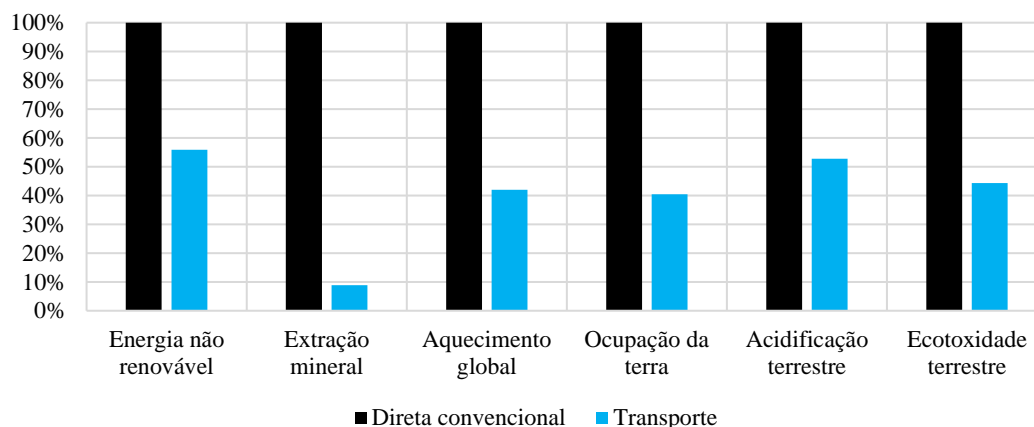
| Constituintes do concreto | Energia não renovável | Extração mineral | Aquecimento global | Ocupação da terra | Acidificação terrestre | Ecotoxicidade terrestre |
|---------------------------|-----------------------|------------------|--------------------|-------------------|------------------------|-------------------------|
| 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% |

Conforme observado na Tabela 5, 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 CO₂ e particulados na atmosfera. Os demais componentes do concreto têm processos de extração e produção menos poluentes, dessa forma seus impactos estão diretamente ligados às distâncias de transporte até a usina de concreto, no caso da brita 1, brita 0 e pó de pedra, cerca de 90% do impacto foi proveniente do transporte.

Em relação ao aço e as formas 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 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. À vista disso, a Figura 5 expõe a parcela do resultado proveniente do transporte para a fundação direta.

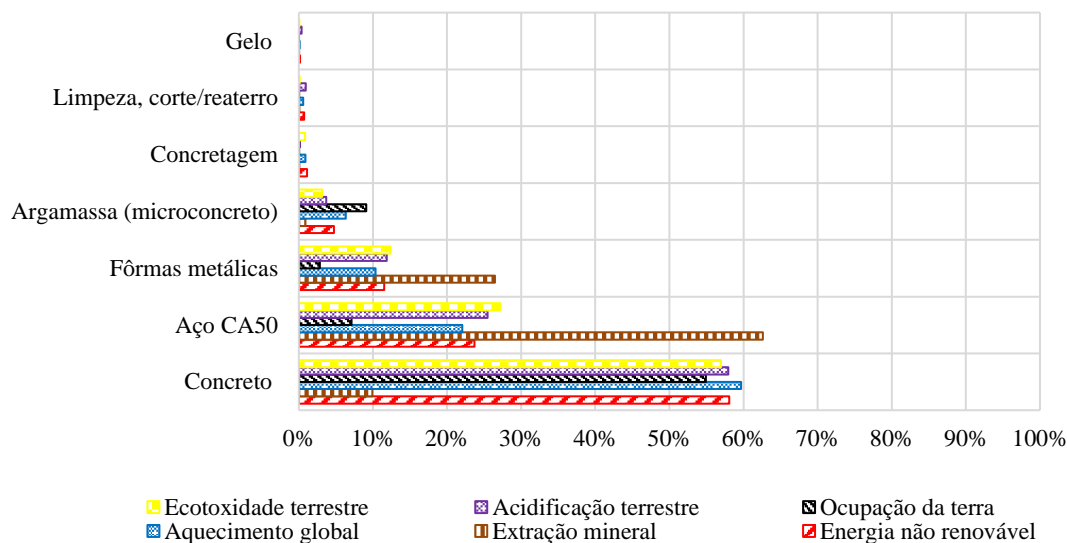
Figura 5- Resultado correspondente ao transporte para a fundação direta



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 6 apresenta as porcentagens dos impactos para os elementos de construção da fundação indireta convencional.

Figura 6- Caracterização das categorias de impacto para a fundação indireta.



Na fundação indireta convencional, assim como na fundação direta, o concreto é o componente mais impactante em todas as categorias de impacto, contribuindo com uma média de 57,5% do impacto total, sendo exceção a categoria Extração mineral, onde representa 9,91% do resultado, o que o torna o terceiro componente mais impactante. A Tabela 6 expõe qual porcentagem do impacto total é atrelada a cada material constituinte do concreto.

Tabela 6- 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 | Ecotoxicidade 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% |

Novamente o cimento foi o material mais impactante do traço de concreto, com exceção da areia e brita nas categorias de ocupação da terra, acidificação terrestre e ecotoxicidade terrestre.

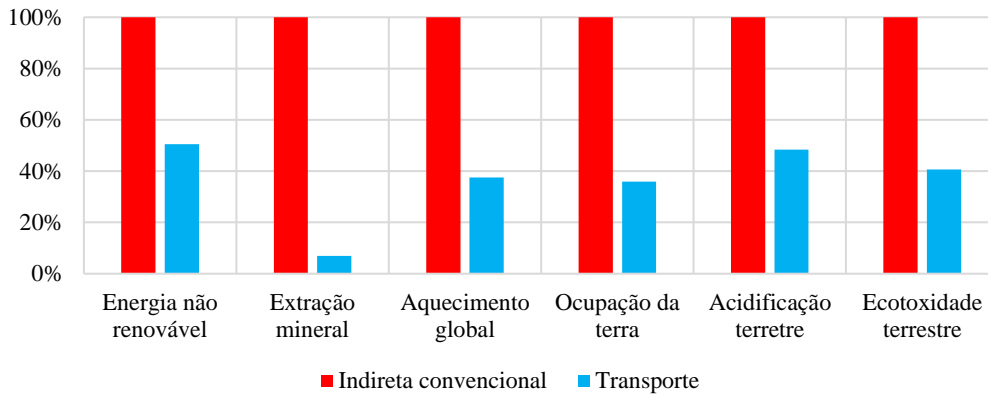
Na fundação indireta, o aço apresenta uma participação mais expressiva no impacto total das categorias se comparada a fundação direta, pois a massa de aço da armadura do bloco de fundação e das estacas supera a utilizada nas armaduras das outras fundações. O aço é responsável por 62,5% do impacto da 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. 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.

As etapas de concretagem, limpeza, corte/aterro e aplicação de gelo apresentaram os menores resultados do sistema perante os demais componentes. Contudo, a participação no impacto total, assim como os valores absolutos, das fases de concretagem e limpeza, corte/aterro foram superiores as da fundação direta, devido a utilização de maquinários necessários para este tipo de fundação. Para a fundação indireta, o transporte também assume uma parcela expressiva do impacto total, conforme apresentado na Figura 7.

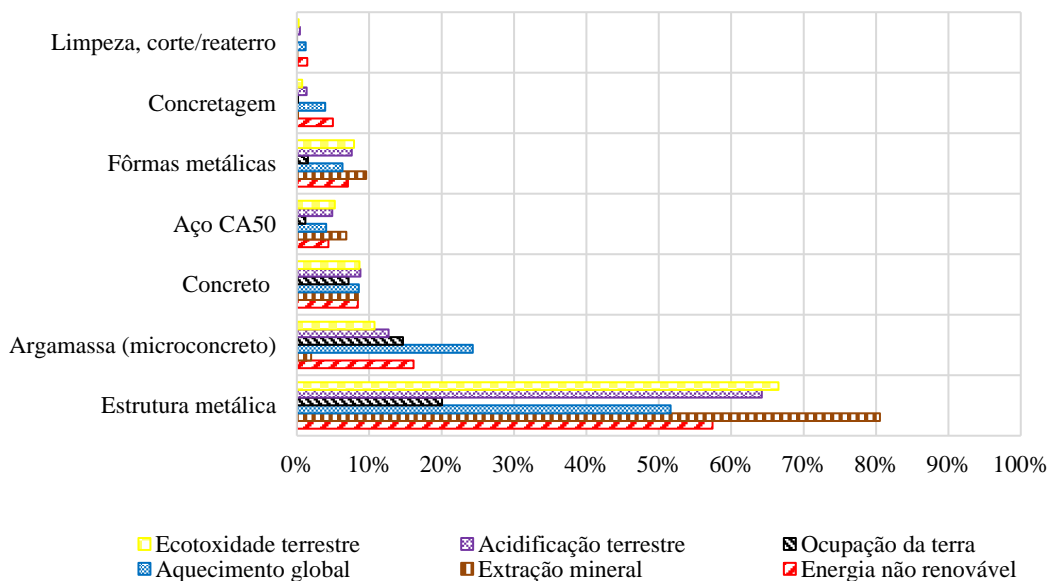
Figura 7- Resultado correspondente ao transporte para a fundação indireta



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.

Por fim, a Figura 8 apresenta as porcentagens dos impactos para os principais elementos da construção da fundação de tensegridade.

Figura 8- Caracterização das categorias de impacto para a fundação de tensegridade.



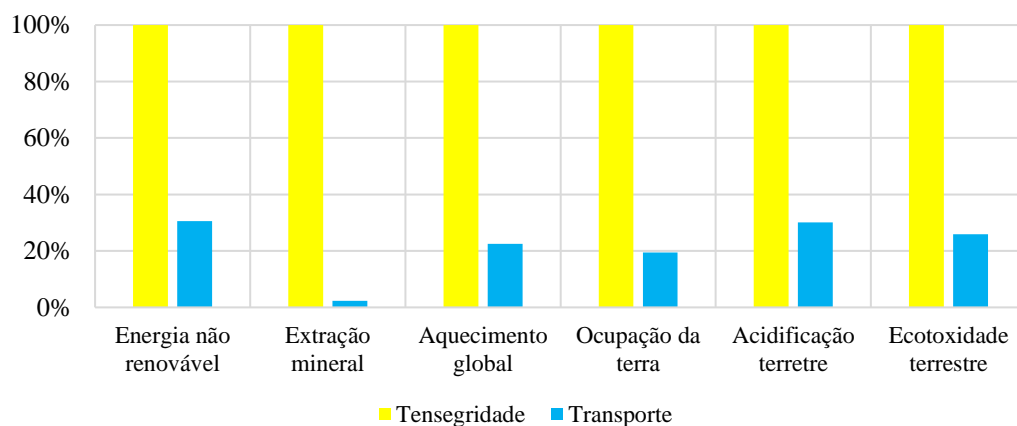
Conforme dito anteriormente, nas fundações convencionais o concreto é responsável por uma parcela expressiva do impacto total das categorias de impacto, enquanto na fundação de tensegridade, ele representa menos de 10%. Isso pois, esse sistema apresenta apenas 5,95%

do volume de concreto da fundação direta e 7,33% do volume da fundação indireta. Assim, 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 uso dos equipamentos (energia).

Para a fundação 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 de aproximadamente 18 t de aço, assim, com exceção da categoria Ocupação da terra, em todas as categorias mais da metade do impacto é proveniente deste componente. 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.

Por fim, a Figura 9 expõe a repercussão do transporte na fundação com base no sistema de tensegridade.

Figura 9- Resultado correspondente ao transporte para a fundação de tensegridade



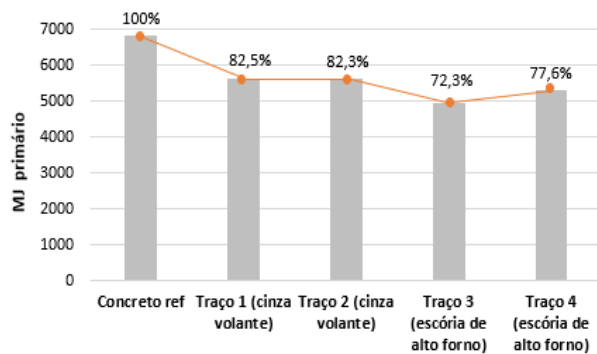
A fundação de tensegridade teve menor repercussão do transporte em seu impacto total em comparação as fundações convencionais. Esta condição está ligada diretamente aos quantitativos de materiais envolvidos neste sistema, dado que para todos os materiais houve a redução se comparados aos quantitativos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

3.2 Análise de sensibilidade

3.2.1 Cenários de traços de concreto

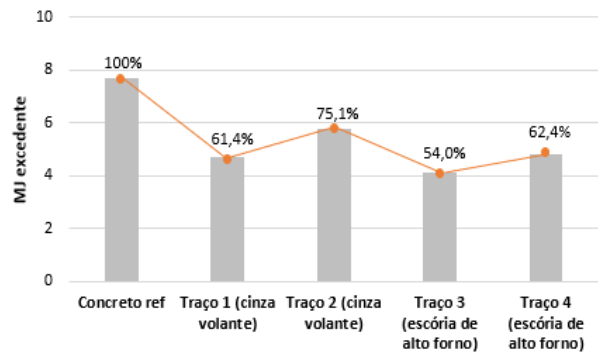
As cargas ambientais atreladas ao concreto são fortemente influenciadas pelo impacto ambiental resultante da produção do cimento. Assim, foram avaliados quatro traços que utilizam subprodutos industriais: cinza volante e escória de alto forno. As Figuras 10 a 15 apresentam os impactos por m³ dos traços de concreto, sendo a linha laranja a porcentagem equivalente dos traços em relação ao impacto do concreto de referência.

Figura 10- Resultados por m³ dos traços na categoria Energia não renovável



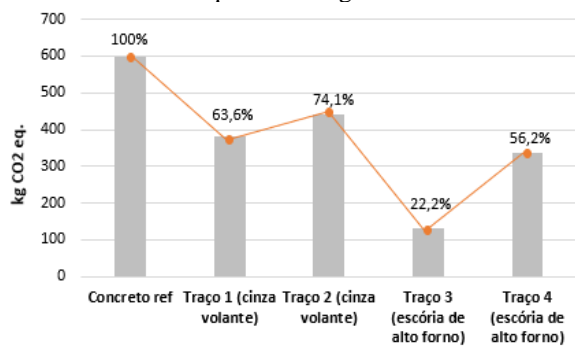
Fonte: Elaborada pela autora

Figura 11- Resultados por m³ dos traços na categoria Extração mineral



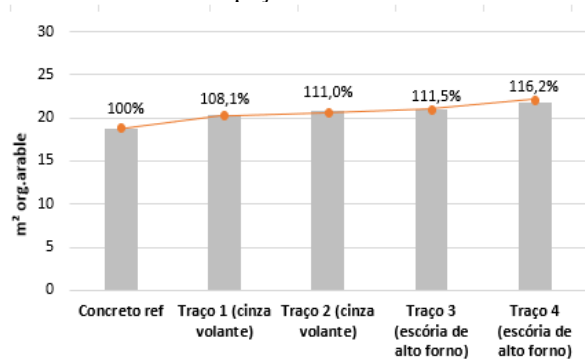
Fonte: Elaborada pela autora

Figura 12- Resultados por m³ dos traços na categoria Aquecimento global



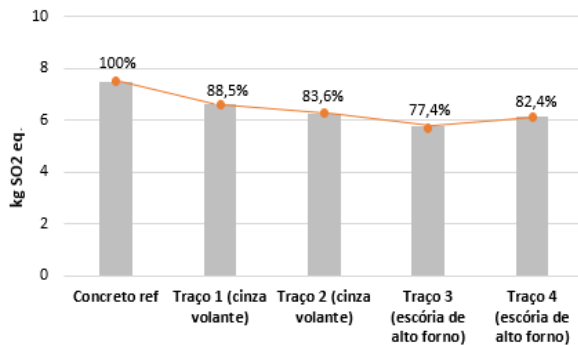
Fonte: Elaborada pela autora

Figura 13- Resultados por m³ dos traços na categoria Ocupação da terra



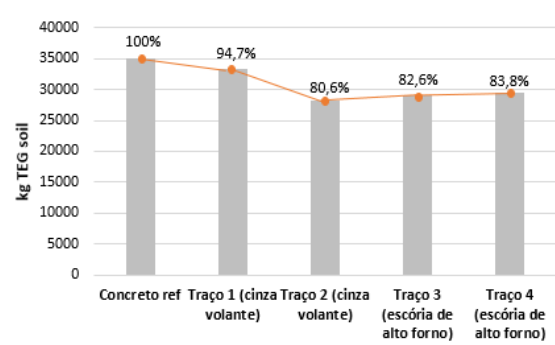
Fonte: Elaborada pela autora

Figura 14- Resultados por m³ dos traços na categoria Acidificação terrestre



Fonte: Elaborada pela autora

Figura 15- Resultados por m³ dos traços na categoria Ecotoxicidade terrestre



Fonte: Elaborada pela autora

Na categoria Energia não renovável, os traços que utilizaram adições de subprodutos obtiveram diminuições consideráveis no impacto, dado que o cimento é um material que possui elevados gastos energéticos em sua extração e produção, além de estar sujeito a extensas distâncias de transporte. Os traços 1 e 2 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 a energia gasta no processo de produção e ao transporte de dois materiais que percorrem grandes extensões através do transporte rodoviário.

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.

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. 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.

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 à adição das distâncias de transporte dos subprodutos ao sistema.

Na categoria Acidificação terrestre, o traço de referência teve o pior desempenho ambiental e para os demais traços o traço 1 obteve a menor redução de impactos. Isto se deve ao maior consumo de cimento no traço de referência e alto consumo de agregado graúdo no traço 1, uma vez que essa categoria se beneficia da redução de diesel, de pavimentação e das emissões de veículos de carga. Por fim, na categoria Ecotoxicidade terrestre os resultados foram similares à 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 pedra e os métodos utilizados de explosivos causam sérios impactos de ecotoxicidade e nos cenários avaliados esses componentes não têm drástica diminuição.

Assim, foi perceptível que o controle do teor de cimento das misturas de concreto e substituição parcial por subprodutos 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.

3.2.2 Cenários de distâncias de transporte

Conforme apresentado na seção 3.1 a contribuição do transporte varia entre 2,31% e 55,84% do total de impactos nos sistemas de fundações estudados, assim foram avaliados três cenários de transporte, apresentados na seção 2.4. As Figuras 16 a 18 apresentam o cenário de referência, o cenário 1 e 2 para os três tipos de fundações.

Figura 16- Resultado para fundação direta no C1 e C2 da análise de sensibilidade

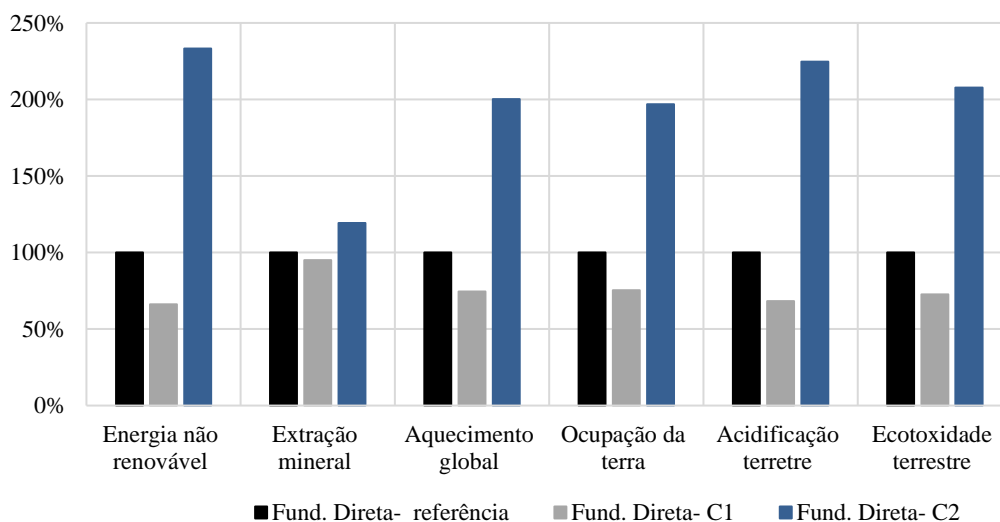


Figura 17- Resultado para fundação indireta no C1 e C2 da análise de sensibilidade

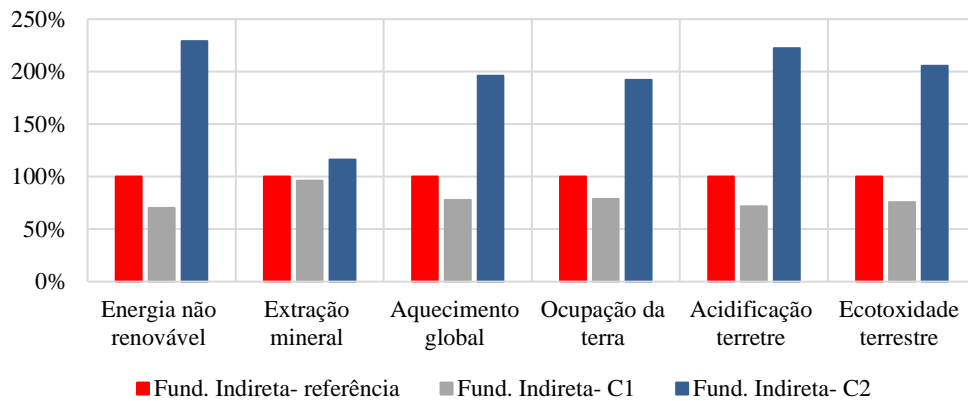
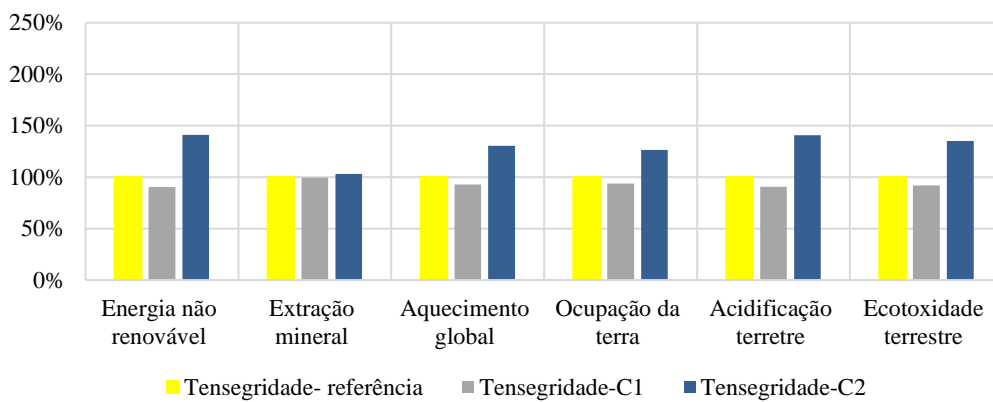


Figura 18- Resultado para fundação indireta no C1 e C2 da análise de sensibilidade



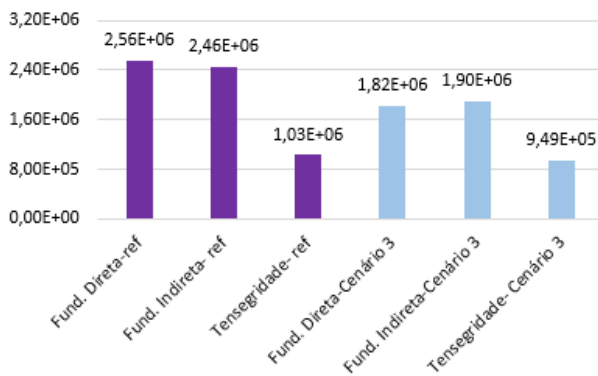
Observa-se que as categorias Energia não renovável, Acidificação terrestre, Ecotoxicidade terrestre e Aquecimento global são mais sensíveis a mudanças nas distâncias de transporte em comparação com as demais categorias avaliadas.

Ao analisar os resultados, 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, sendo a fundação direta a apresentar a maior redução no impacto total, 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. 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.

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. Concluindo-se que a viabilidade ambiental de uma fundação cujos materiais fossem extraídos ou produzidos em regiões muito distantes seria significativamente afetada. 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.

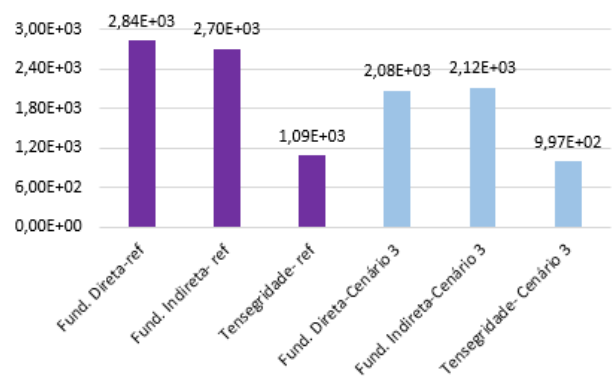
O C3, por sua vez, tem como objetivo verificar se a mudança das distâncias de transporte poderia tornar a fundação indireta convencional menos impactante do que a fundação direta convencional. As Figuras 19 a 22 apresentam as quatro categorias de impacto que mais são influenciadas pelo transporte.

Figura 19- Resultados para o C3 da análise de sensibilidade na categoria Energia não renovável



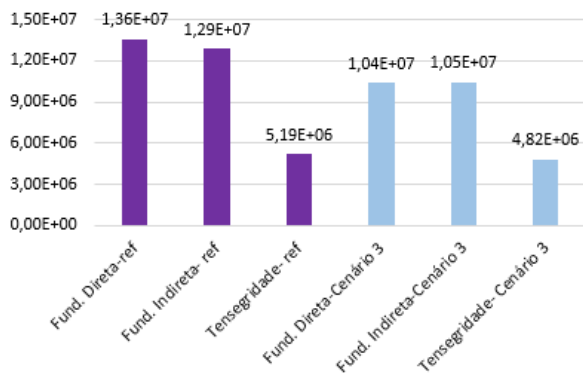
Fonte: Elaborada pela autora

Figura 20- Resultados para o C3 da análise de sensibilidade na categoria Acidificação terrestre



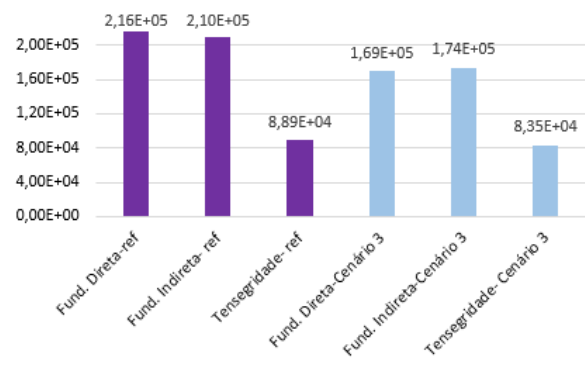
Fonte: Elaborada pela autora

Figura 21- Resultados para o C3 da análise de sensibilidade na categoria Ecotoxicidade terrestre



Fonte: Elaborada pela autora

Figura 22- Resultados para o C3 da análise de sensibilidade na categoria Aquecimento global



Fonte: Elaborada pela autora

No C3, a fundação com base no sistema de tensegriidade continua a gerar menos impacto que as fundações convencionais, além de ter havido uma pequena diminuição nos resultados para a condição de transporte de referência. 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.

3.2.3 Cenários de volume do concreto na fundação de tensegriidade

A partir da verificação que o concreto é o insumo de maior influência no impacto ambiental para fundações, foram analisados os resultados para fundação de tensegriidade caso o volume de concreto da mesma fosse de 20% e 30% do volume de concreto das fundações convencionais. A Tabela 7 apresenta os resultados para os dois cenários avaliados, os resultados da fundação de tensegriidade, direta convencional e indireta convencional no cenário de referência.

Tabela 7- 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 [m ² org.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 |
| Ecotoxicidade terrestre [kg TEG solo] | 6,26E+06 | 7,02E+06 | 5,19E+06 | 1,36E+07 | 1,29E+07 |

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.

3.3 Análise de incerteza

Dentre as seis categorias de impacto abordadas nessa ACV, cinco obtiveram resultados coerentes para os valores obtidos durante as análises. Entretanto, para a categoria Ecotoxicidade 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 23 a 27 retratam os resultados da análise de Monte Carlo.

Figura 23- Resultados de incerteza para Energia não renovável

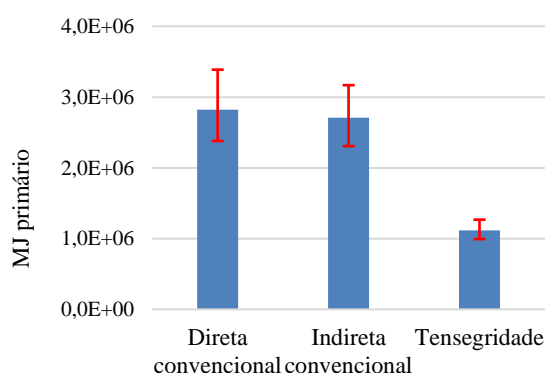


Figura 24- Resultados de incerteza para Extração mineral

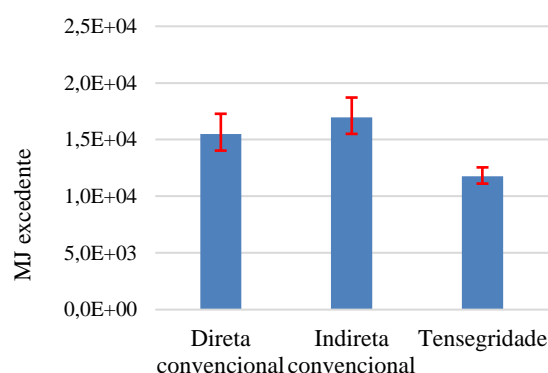


Figura 25- Resultados de incerteza para Aquecimento global

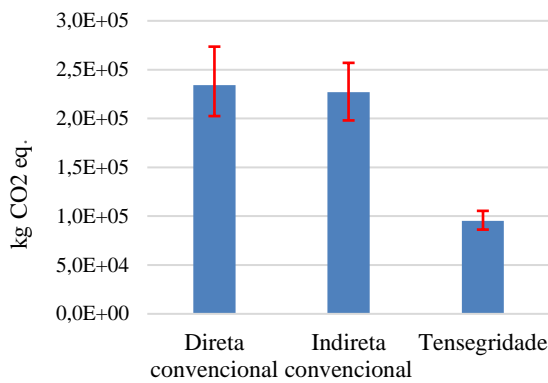


Figura 26- Resultados de incerteza para Ocupação da terra

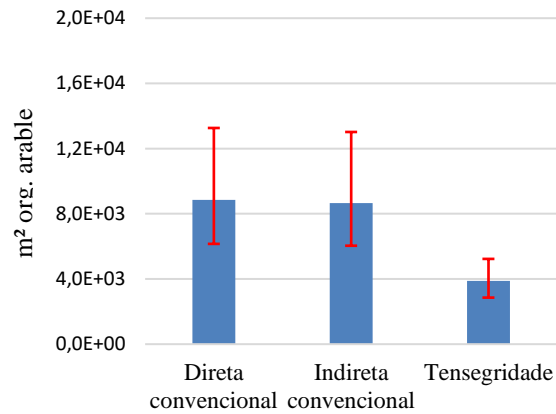
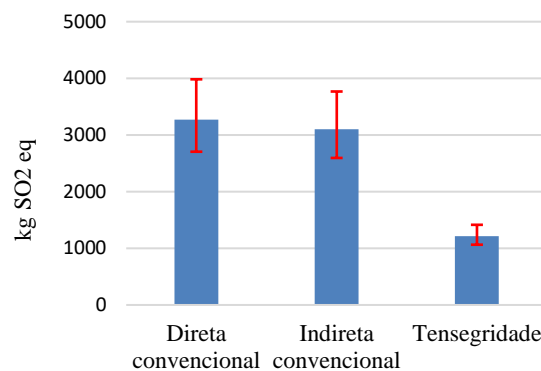


Figura 27- Resultados de incerteza para Acidificação terrestre



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. As categorias Energia não renovável, Extração mineral, Aquecimento global e Acidificação terrestre tiveram variações de seus intervalos de abrangência pouco discrepantes do valor da média e se analisados proporcionalmente próximos entre si, $\pm 15,36\%$, $8,68\%$, $12,75\%$ e $17,63\%$ da média, respectivamente. A maior variação relativa foi Ocupação da terra, com uma variância de $\pm 37,04\%$ da média, 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*.

4. CONCLUSÃO

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 Ecotoxicidade terrestre.

As principais conclusões específicas deste artigo são as seguintes:

- (1) A diminuição de impactos ambientais na fundação de tensegridade, esteve diretamente atrelada a redução de concreto nesse sistema de fundação. Desse modo, com a redução do consumo dos materiais do concreto, tem-se conseqüentemente 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.
- (2) 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.
- (3) Na análise de sensibilidade acerca as distâncias de transporte, constatou-se que a fundação de tensegridade permaneceu causando menos impactos em todas as categorias analisadas para os cenários analisados. Percebeu-se que a fundação direta poderia se tornar menos impactante, 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 pode interferir na viabilidade ambiental de um sistema.
- (4) Ao avaliar os materiais constituintes do concreto, percebeu-se que o cimento foi o componente de maior impacto. 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.
- (5) Ao avaliar o aumento do volume do concreto nas fundações de tensegridade, considerando 20% e 30% do da média volume do concreto das fundações convencionais, o que corresponde a cerca de 3,4 e 5,08 vezes o volume real da fundação de tensegridade, percebe-se que ainda que fosse extrapolado o volume original, o impacto total desse sistema de fundação nas seis categorias de impacto analisadas ainda é inferior as fundações convencionais.
- (6) Na análise de incerteza, constatou-se que os intervalos que contém provavelmente os valores verdadeiros resultados apresentaram uma variação considerada aceitável para confiança nos resultados. Todavia, para a categoria de Ecotoxicidade terrestre, se faz necessário que o número de iterações da simulação de Monte Carlo seja maior, para que avaliasse a necessidade possíveis melhorias na qualidade dos dados do estudo.

5. REFERÊNCIAS

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.

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.

BERNDT, M. L. Influence of concrete mix design on CO₂ emissions for large wind turbine foundations. **Renewable Energy**, v. 83, p. 608-614, 2015.

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.

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.

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

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.

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.

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.

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

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.

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.

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

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.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao incentivo da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), que por meio do edital FAPES Nº 01/2020 APOIO A PROJETOS INOVADORES E SPIN OFF ofertou uma bolsa de pesquisa para a modalidade Pós-Graduação – Mestrado, e a colaboração da MCA Tecnologia de Estruturas.



O conteúdo deste trabalho pode ser usado sob os termos da licença Creative Commons Attribution 4.0. Qualquer outra distribuição deste trabalho deve manter a atribuição ao(s) autor(es) e o título do trabalho, citação da revista e DOI.