



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JOSÉ CLÉBER DO NASCIMENTO SALES

**ANÁLISE PRELIMINAR DO DESEMPENHO DE FUNDAÇÕES DO TIPO
MONOPILE OFFSHORE EM SOLOS ARENOSOS CARBONÁTICOS DO LITORAL
CEARENSE ATRAVÉS DE MODELOS NUMÉRICOS**

FORTALEZA

2026

JOSÉ CLÉBER DO NASCIMENTO SALES

ANÁLISE PRELIMINAR DO DESEMPENHO DE FUNDAÇÕES DO TIPO MONOPILE
OFFSHORE EM SOLOS ARENOSOS CARBONÁTICOS DO LITORAL CEARENSE
ATRAVÉS DE MODELOS NUMÉRICOS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alfran Sampaio Moura

FORTALEZA

2026

JOSÉ CLÉBER DO NASCIMENTO SALES

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE FUNDAÇÕES DO TIPO MONOPILE OFFSHORE EM
SOLOS ARENOSOS CARBONÁTICOS DO LITORAL CEARENSE ATRAVÉS DE
MODELOS NUMÉRICOS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alfran Sampaio Moura

Aprovada em: 15/01/2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alfran Sampaio Moura (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Mariana Vella Silveira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

M.Sc. Gabriela França Azevedo
Universidade de Brasília (UnB)

Aos meus pais, pelo suporte e apoio constantes
ao longo de toda a vida, sem vocês, nada disso
teria sido possível.

AGRADECIMENTOS

À minha família, por todo apoio, carinho e amor, que nunca faltaram ao longo de toda a minha trajetória. Aos meus pais, José Cleiton e Diana Maria, dedico toda minha vida, pois, sem vocês, eu não poderia estar onde estou hoje. Aos meus irmãos, José Cleirton e Maria Diana, expresso profunda gratidão, por tornarem minha vida mais leve, sempre com apoio e boas risadas.

Aos meus amigos, agradeço pela companhia ao longo da jornada, pois, sem vocês, o caminho teria sido ainda mais difícil. Em especial, agradeço ao Daniel Bessa por estar comigo desde a infância, atuando como um terceiro irmão.

Ao Humberto Severiano, agradeço por acreditar em mim e no meu potencial, sendo sempre acolhedor e paciente durante meu aprendizado, ensinando da melhor forma possível e transmitindo apoio e confiança.

Ao Professor Alfran Sampaio, que, durante todo o processo de iniciação científica e orientação, mostrou-se presente e companheiro, sempre dividindo seu conhecimento, estimulando e apoiando novas ideias.

Ao Roberto Cordeiro, por ter me apoiado e dividido seu conhecimento durante toda a minha permanência no laboratório, transmitindo não só confiança, mas também carinho.

Ao Anselmo Clemente, por ter compartilhado seu conhecimento, sempre apoiando com palavras e ações, agradeço profundamente.

À Gabriela Azevedo, agradeço por estar sempre presente ao longo da jornada, compartilhando conhecimento e apoio como amiga.

Ao Escritório de Tecnologia Social (ETecS/UFC), agradeço por proporcionar meu primeiro contato com a engenharia prática, contribuindo não apenas para o meu aprendizado técnico, mas também para a ampliação do meu conhecimento de mundo.

Ao Professor Alexandre Bertini, pela orientação e pelo apoio durante minha permanência no ETecS.

Ao Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP/UFC), agradeço por disponibilizar sua infraestrutura para o aprendizado e para a realização de grande parte deste trabalho. Aos técnicos e auxiliares, minha profunda gratidão pela forma acolhedora com que me receberam.

Aos membros do grupo de pesquisa, agradeço pelas trocas de ideias, pela disponibilidade para o ensino e pelo constante apoio.

À Petrobras, pelo seu grande apoio à pesquisa e à universidade, efetivado através de termo de cooperação de P&D (no âmbito do PD-00553-0069/2021) que atende à obrigação ANEEL.

Ao corpo docente do curso de Engenharia Civil, em especial aos professores Alfran Sampaio, Antônio Macário, Rosiel Leme e Iuri Bessa, agradeço pelo acolhimento e pelo apoio ao longo de toda a minha formação.

Por fim, agradeço ao Isaac, ao Pedro, à Aline e à França, pelo apoio e confiança no meu trabalho, dando suporte ao longo de toda essa caminhada.

“Se um homem não sabe a que porto se dirige,
nenhum vento lhe será favorável.”

(Sêneca)

RESUMO

A expansão da energia eólica *offshore* apresenta-se como uma alternativa estratégica para a diversificação da matriz energética brasileira, especialmente diante do elevado potencial eólico do litoral nordestino. No entanto, a implantação dessas estruturas depende de uma avaliação do comportamento geotécnico dos solos marinhos, em particular dos solos arenosos carbonáticos, presentes na Plataforma Continental Cearense (PCCE), que apresentam características mecânicas distintas das areias quartzosas convencionais. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho de fundações do tipo *monopile offshore* instaladas em solos arenosos carbonáticos do litoral cearense, por meio de simulações numéricas tridimensionais. Inicialmente, foram utilizadas duas areias carbonáticas representativas da região, caracterizadas a partir de ensaios de compressão triaxial drenados (CD), cujos resultados serviram de base para a calibração dos parâmetros constitutivos. A retroanálise desses ensaios foi realizada com o auxílio do software PLAXIS 2D, adotando o modelo constitutivo Hardening Soil (HS), de modo a reproduzir adequadamente o comportamento tensão-deformação dos solos. Em seguida, foram desenvolvidos modelos tridimensionais no PLAXIS 3D para simular a interação solo-estrutura de diferentes configurações geométricas de *monopiles* submetidas a carregamentos monotônicos. Os resultados obtidos permitiram avaliar a influência do estado de compactidade das areias, do comprimento embutido e da relação L/D no comportamento carga-deslocamento lateral das fundações. Por fim, o desempenho das *monopiles* foi verificado conforme os critérios normativos aplicáveis, considerando os Estados Limites de Serviço e Último. Os resultados indicam que as areias carbonáticas do litoral cearense apresentam potencial para a implantação de *monopiles offshore*, desde que as particularidades geotécnicas desses solos sejam adequadamente consideradas no processo de dimensionamento.

Palavras-chave: Energia Eólica *Offshore*; Areia Carbonática; Fundação; *Monopiles*.

ABSTRACT

The expansion of *offshore* wind energy represents a strategic alternative for diversifying the Brazilian energy matrix, particularly in view of the high wind potential of the northeastern coastline. However, the implementation of these structures depends on an adequate assessment of the geotechnical behavior of marine soils, especially carbonatic sandy soils present on the Ceará Continental Shelf (CCS), which exhibit mechanical characteristics distinct from those of conventional quartz sands. In this context, this study aims to analyze the performance of *offshore monopile* foundations installed in carbonatic sandy soils along the Ceará coastline through three-dimensional numerical simulations. Initially, two carbonatic sands representative of the region were considered and characterized based on drained triaxial compression (CD) tests, whose results served as the basis for calibrating the constitutive parameters. The back-analysis of these tests was carried out using the PLAXIS 2D software, adopting the Hardening Soil (HS) constitutive model in order to adequately reproduce the stress-strain behavior of the soils. Subsequently, three-dimensional models were developed in PLAXIS 3D to simulate the soil–structure interaction of different *monopile* geometric configurations subjected to monotonic loading. The results allowed the evaluation of the influence of soil density state, embedment length, and L/D ratio on the lateral load-displacement behavior of the foundations. Finally, the performance of the *monopiles* was assessed according to the applicable normative criteria, considering both Serviceability and Ultimate Limit States. The results indicate that the carbonatic sands of the Ceará coastline show potential for the installation of *offshore monopile* foundations, provided that the geotechnical particularities of these soils are properly considered in the design process.

Keywords: Offshore Wind Energy; Carbonatic Sand; Foundation; Monopiles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perspectivas de novas instalações eólicas no mundo entre 2023 e 2028, em GW..	23
Figura 2 – Matriz Elétrica Brasileira.	24
Figura 3 – Mapeamento dos parques eólicos em operação no Brasil.....	25
Figura 4 – Mapeamento dos parques eólicos offshore no Brasil.....	27
Figura 5 – Mapa de distribuição de sedimentos carbonáticos modernos de origem marinha. Em preto, áreas de carbonatos marinhos de águas rasas, o pontilhado representa vasas de carbonatos marinhos de águas profundas.	28
Figura 6 – Mapa Faciológico da Plataforma Continental do Ceará.	30
Figura 7 – Tipos de fundações utilizadas em turbinas eólicas.....	32
Figura 8 – Representação das cargas transmitidas à monopile.	33
Figura 9 – Superfície de escoamento no espaço das tensões principais para solo sem coesão, conforme o modelo Hardening Soil.....	35
Figura 10 – Modelo tridimensional de uma turbina eólica assente em solo estratificado com malha de elementos finitos gerada no PLAXIS 3D.....	37
Figura 11 – Fluxograma da Metodologia: obtenção de parâmetros, calibração, análise numérica e verificação dos resultados	38
Figura 12 – Curva Granulométrica das Areias Carbonáticas	40
Figura 13 – Curvas características obtidas no ensaio de compressão triaxial para a Areia Carbonática 1, considerando: (a) estado fofo e (b) estado compacto	42
Figura 14 – Curvas características obtidas no ensaio de compressão triaxial para a Areia Carbonática 2, considerando: (a) estado fofo e (b) estado compacto	42
Figura 15 – Modelo axissimétrico simplificado para o ensaio de compressão triaxial.....	44
Figura 16 – Interface inicial do PLAXIS 2D: seleção do modelo e definição dos elementos .	45
Figura 17 – Interface do PLAXIS 2D input	46
Figura 18 – Interface do PLAXIS output e apresentação da malha discretizada	47
Figura 19 – Validação dos resultados simulados com base em Surarak (2012).....	48
Figura 20 – Dimensões do maciço de solo e da monopile utilizada no modelo.....	50
Figura 21 – Comparação dos resultados simulados para a turbina eólica offshore com os obtidos por Brinkgreve et al. (2020).....	51
Figura 22 – Esquema ilustrativo das turbinas eólicas offshore referentes aos modelos 1 ao 4	52
Figura 23 – Nó correspondente ao ponto de análise da sensibilidade da malha	53
Figura 24 – Efeito do refinamento da malha na resposta numérica do modelo	53

Figura 25 – Determinação da carga correspondente ao Estado Limite Último (ELU).	54
Figura 26 – Determinação da carga correspondente ao Estado Limite de Serviço (ELS).	55
Figura 27 – Curvas tensão x deformação retroanalizadas para a Areia Carbonática 1, considerando: (a) estado fofo e (b) estado compactado	56
Figura 28 – Curvas tensão x deformação retroanalizadas para a Areia Carbonática 2, considerando: (a) estado fofo e (b) estado compactado	58
Figura 29 – Comportamento da monopile sob grandes deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 4$ para Areia Carbonática 1 no estado fofo.....	59
Figura 30 – Comportamento da monopile sob pequenos deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 4$ para Areia Carbonática 1 no estado fofo.....	60
Figura 31 – Comportamento da monopile sob grandes deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 4$ para Areia Carbonática 1 no estado compacto.....	61
Figura 32 – Comportamento da monopile sob pequenos deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 4$ para Areia Carbonática 1 no estado compacto.....	62
Figura 33 – Comportamento da monopile sob grandes deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 4$ para Areia Carbonática 2 no estado fofo.....	63
Figura 34 – Comportamento da monopile sob pequenos deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 4$ para Areia Carbonática 2 no estado fofo.....	63
Figura 35 – Comportamento da monopile sob grandes deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 4$ para Areia Carbonática 2 no estado compacto.....	64
Figura 36 – Comportamento da monopile sob pequenos deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 4$ para Areia Carbonática 2 no estado compacto.....	65
Figura 37 – Comportamento da monopile sob grandes deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 2$ para Areia Carbonática 1 no estado fofo.....	66
Figura 38 – Comportamento da monopile sob pequenos deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 2$ para Areia Carbonática 1 no estado fofo.....	66
Figura 39 – Comportamento da monopile sob grandes deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 2$ para Areia Carbonática 1 no estado compacto.....	67
Figura 40 – Comportamento da monopile sob pequenos deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 2$ para Areia Carbonática 1 no estado compacto.....	67
Figura 41 – Comportamento da monopile sob grandes deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 2$ para Areia Carbonática 2 no estado fofo.....	68
Figura 42 – Comportamento da monopile sob pequenos deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 2$ para Areia Carbonática 2 no estado fofo.....	68

Figura 43 – Comportamento da monopile sob grandes deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 2$ para Areia Carbonática 2 no estado compacto.....	69
Figura 44 – Comportamento da monopile sob pequenos deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 2$ para Areia Carbonática 2 no estado compacto.....	69
Figura 45 – Cargas horizontais no Estado Limite de Serviço (ELS) para AC 1 nos estados fofo e compacto.....	74
Figura 46 – Cargas horizontais no Estado Limite de Serviço (ELS) para AC 2 nos estados fofo e compacto.....	74
Figura 47 – Cargas horizontais no Estado Limite Último (ELU) para AC 1 nos estados fofo e compacto.....	76
Figura 48 – Cargas horizontais no Estado Limite Último (ELU) para AC 1 nos estados fofo e compacto.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos sedimentos em função do teor de CaCO_3	30
Tabela 2 – Propriedades das Areias Carbonáticas	41
Tabela 3 – Parâmetros de resistência das Areias Carbonáticas obtidos pelo ensaio de compressão triaxial	43
Tabela 4 – Módulo de elasticidade correspondente a 50% da tensão de ruptura das Areias Carbonáticas obtidos pelo ensaio de compressão triaxial	43
Tabela 5 – Parâmetros de entrada considerados para a argila mole de Bangkok, de acordo com Surarak (2012)	47
Tabela 6 – Parâmetros de entrada da areia de Dunkirk para o modelo HS Small, com base em Brinkgreve et al. (2020).....	49
Tabela 7 – Parâmetros geométricos dos modelos de monopiles analisados.....	51
Tabela 8 – Parâmetros de resistência e de deformabilidade obtidos através da retroanálise do ensaio de compressão triaxial	58
Tabela 9 – Resultados das cargas horizontais associadas aos Estados Limite de Serviço (ELU) para AC1 e AC 2.....	70
Tabela 10 – Resultados das cargas horizontais associadas aos Estados Limite de Serviço (ELS) para AC 1 e AC 2.	72
Tabela 11 – Cargas características atuantes em turbinas eólicas offshore.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEEólica – Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias

AC 1 – Areia Carbonática 1

AC 2 – Areia Carbonática 2

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

API – *American Petroleum Institute*

CaCO₃ – Carbonato de Cálcio

CD – Ensaio de Compressão Triaxial Drenado

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

DNV – *Det Norske Veritas*

ELU – Estado Limite Último

ELS – Estado Limite de Serviço

GWEC – *Global Wind Energy Council*

HS – Hardening Soil

h/L – Relação entre a altura da torre e o comprimento embutido da *monopile*

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IEA – *International Energy Agency*

L/D – Relação entre o comprimento embutido e o diâmetro da *monopile*

MC – Modelo Mohr-Coulomb

MEF – Método dos Elementos Finitos

MME – Ministério de Minas e Energia

PCCE – Plataforma Continental do Ceará

SW – Areia bem graduada (*Well Graded Sand*)

WWEA – *World Wind Energy Association*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Problema de pesquisa	20
1.2 Justificativa	20
1.3 Questões motivadoras	20
1.4 Objetivos.....	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 <i>Energia Eólica</i>	22
2.1.1 <i>Contexto global</i>	22
2.1.2 <i>Matriz elétrica brasileira</i>	23
2.1.3 <i>Energia eólica no Brasil</i>	25
2.1.4 <i>Perspectiva de energia eólica offshore no Brasil</i>	26
2.2 <i>Areias Calcárias</i>	28
2.2.1 <i>Sedimentos</i>	28
2.2.2 <i>Origem das areias</i>	29
2.3 <i>Fundações de Turbinas Eólicas Offshore</i>	31
2.3.1 <i>Fundações por gravidade</i>	32
2.3.2 <i>Fundações tripod</i>	32
2.3.3 <i>Fundações jacket</i>	32
2.3.4 <i>Fundações monopiles offshore</i>	33
2.4 <i>Análise Numérica</i>	34
2.4.1 <i>Software</i>	34
2.4.2 <i>Modelos constitutivos</i>	34
2.4.3 <i>Simulações</i>	36
3. MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1 <i>Levantamento Geotécnico</i>	39
3.1.1 <i>Amostras</i>	39
3.1.2 <i>Caracterização das areias</i>	40
3.1.3 <i>Ensaio de compressão triaxial drenado (CD)</i>	41
3.2 <i>Modelagem Numérica</i>	43
3.2.1 <i>Retroanálise do ensaio de compressão triaxial</i>	43
3.2.2 <i>Análise tridimensional de uma monopile offshore</i>	48
3.3 <i>Avaliação conforme as Diretrizes Normativas</i>	54

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1 Retroanálise do Ensaio de Compressão Triaxial	56
4.2 Modelagem Tridimensional de <i>Monopiles Offshore</i>	59
4.3 Avaliação conforme as diretrizes normativas.....	70
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	77
REFERÊNCIAS	80

1 INTRODUÇÃO

No âmbito da engenharia, busca-se constantemente a otimização dos diversos processos na execução de atividades em suas diversas áreas. Tal processo é acompanhado pela inovação, refletida na criação de produtos, máquinas ou dispositivos cada vez mais eficientes. No entanto, o desenvolvimento e a incorporação dessas inovações resultam no aumento da demanda energética, devido ao alto consumo associado aos maquinários para exercer funções de maior complexidade.

Nesse contexto, a busca por novas fontes de energia tornou-se essencial, considerando que a maior parcela da produção energética mundial ainda depende de combustíveis fósseis, cujos impactos e limitações são amplamente reconhecidos. Dentre os diversos impactos ambientais causados pelos combustíveis fósseis, o aquecimento global se destaca como o mais preocupante, especialmente no que se refere às emissões de dióxido de carbono (CO₂), oriundas do processo de queima das fontes de energia não renováveis. Com o intuito de reduzir essas emissões e mitigar os efeitos do aquecimento global, conforme estabelecido pelo Protocolo de Kyoto, a busca por fontes renováveis de energia tornou-se um dos pilares das sociedades contemporâneas.

Diante dessa necessidade, a energia eólica se destaca como uma das alternativas promissoras, capaz de suprir de maneira sustentável. Além de ser uma energia renovável e limpa, seu uso contribui diretamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa. No entanto, sua implementação exige uma análise completa das condições locais tanto ambientais quanto geotécnicas, sobretudo em projetos *offshore*, onde os desafios relacionados às estruturas das fundações podem comprometer o funcionamento do sistema, chegando até a ruína.

No Brasil, a energia eólica tem apresentado crescimento expressivo nos últimos anos, consolidando-se como a segunda maior fonte da matriz elétrica nacional (ABEEólica, 2023), com destaque também no cenário internacional (GWEC, 2024). Com o aumento contínuo da capacidade instalada de usinas eólicas, novas tecnologias têm sido desenvolvidas para ampliar a eficiência da geração energética.

Nesse contexto, a energia eólica *offshore* destaca-se por sua elevada capacidade de captar energia de forma mais efetiva e regular, aproveitando as características favoráveis dos ventos oceânicos, consolidando-se como uma das soluções mais promissoras, conforme apresentado no Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (Cepel, 2013). Apesar do seu grande potencial e das condições geográficas favoráveis do litoral brasileiro, não há ainda parques eólicos *offshore* em operação no país.

Atualmente, no Brasil, todas as usinas eólicas instaladas são *onshore*, mas diversos projetos e acordos vêm sendo aprovados nos últimos anos, ampliando significativamente a perspectiva de implantação dessa tecnologia em alto-mar. Esse avanço tem impulsionado uma exploração mais intensa dos potenciais locais destinados à instalação de usinas eólicas *offshore*. Com atualizações mais recentes, até o mês de março de 2025, estão abertos 104 projetos de usinas eólicas *offshore* em processo de licenciamento ambiental no Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), distribuídos nas regiões Nordeste, Sul e Sudeste. (IBAMA, 2025).

Antes da execução dos parques eólicos, é necessário o estudo geotécnico da área de implantação da fundação, a fim de entender o comportamento do solo e qual o tipo de material presente na região. No Brasil, a presença de sedimentos calcários nas regiões litorâneas resulta na formação de solos ricos em carbonatos, caracterizados como solos carbonáticos.

Os solos carbonáticos apresentam características peculiares, como alta porosidade, elevado índice de vazios, e maior susceptibilidade à quebra de grãos (Murff & Asce, 1987; Wang et al., 2011). Essas particularidades os tornam mais complexos do ponto de vista geotécnico, exigindo uma investigação mais criteriosa, sobretudo no que se refere à resposta dinâmica do solo diante dos carregamentos impostos pela estrutura, oriundo dos ventos e das ondas, sendo aspecto essencial para uma maior estabilidade e segurança das fundações sob condições severas. McClelland (1988) ressalta que os sedimentos calcários apresentam desafios significativos voltados à implantação e à estabilidade em projetos *offshore*, especialmente no que se refere à instalação de estacas cravadas e ao comportamento do solo sob ações dinâmicas.

Frente à dificuldade técnico-econômica de representar todas as condições de campo, a análise numérica surge como uma solução promissora para suprir essa necessidade. A partir de parâmetros obtidos a partir de ensaios geotécnicos, é possível simular o comportamento do sistema em diferentes cenários, avaliando tanto a resposta estrutural quanto a interação solo-estrutura. Diversos autores (Brinkgreve et al., 2020; Cheng et al., 2021; David Dilas, 2018; Elkhawas & Salem, 2021; Hearn & Edgers, 2010; Jung et al., 2015; Migueis, 2021; Murphy et al., 2018; Tiwari, 2016;) utilizaram a análise numérica para investigar o desempenho de fundações do tipo *monopile*, comparando os resultados obtidos com critérios normativos.

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo analisar, por meio de simulações numéricas, o comportamento de fundações do tipo *monopile* instaladas em solos carbonáticos característicos das regiões do litoral cearense em áreas promissoras para a instalação de parques eólicos.

1.1 Problema de pesquisa

O problema central desta pesquisa consiste na ausência de parques eólicos *offshore* em operação no Brasil, associada à necessidade de implantação dessas estruturas em solos arenosos carbonáticos, os quais podem apresentar comportamento geotécnico significativamente distinto dos solos convencionais. Soma-se a esse cenário a carência de estudos nacionais que investiguem o comportamento desses materiais, particularmente no contexto do litoral cearense, o que limita a adequada compreensão e o dimensionamento seguro dessas fundações.

1.2 Justificativa

Considerando o avanço das tecnologias de geração de energia eólica *offshore* e o potencial do litoral nordestino para a implementação desses projetos, este trabalho busca contribuir com a análise do comportamento de fundações do tipo *monopile offshore* em solos carbonáticos. Através da modelagem numérica, pretende-se investigar o comportamento carga x deslocamento lateral em um cenário geotécnico ainda pouco explorado no contexto brasileiro, oferecendo subsídios técnicos que possam apoiar projetos futuros na região.

1.3 Questões motivadoras

Diante da crescente demanda por fontes renováveis de energia e da expansão dos projetos de energia eólica *offshore* no Brasil, especialmente no litoral nordestino, surgem questionamentos técnicos fundamentais sobre o comportamento das fundações em solos não convencionais. Assim, este trabalho é guiado pelas seguintes questões motivadoras:

- (a) Como os parâmetros geotécnicos das areias carbonáticas influenciam no desempenho de fundações do tipo *monopile offshore*?
- (b) Dentre as diferentes configurações geométricas das turbinas eólicas (*monopile* + torre), quais oferecem um melhor desempenho para as areias carbonáticas do litoral cearense?
- (c) As areias carbonáticas do litoral cearense apresentam condições adequadas para o assentamento de turbinas eólicas, atendendo aos critérios de desempenho dos estados de limite de serviço (ELS) e último (ELS) exigidos pelas diretrizes normativas da *Det Norske Veritas* (DNV) e *American Petroleum Institute* (API)?

1.4 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho geotécnico de fundações do tipo *monopile* submetidas a carregamentos típicos de turbinas eólicas *offshore*, instaladas em solos arenosos carbonáticos do litoral cearense, por meio de simulações numéricas tridimensionais.

A seguir, estão os objetivos específicos que serão abordados neste trabalho, a fim de cumprir o objetivo geral.

- (a) Calibrar modelos numéricos a partir de dados experimentais e da literatura, de modo a representar adequadamente o comportamento dos solos carbonáticos e permitir previsões mais confiáveis e realistas do desempenho das fundações;
- (b) Analisar, por meio de simulações numéricas, o comportamento de diferentes configurações estruturais de turbinas eólicas, avaliando a influência de parâmetros geométricos na resposta do sistema solo-estrutura;
- (c) Avaliar o desempenho das fundações conforme os critérios normativos da *Det Norske Veritas* (DNV) e *American Petroleum Institute* (API), verificando estados limites de serviço (ELS) e último (ELU) e a adequação das soluções propostas para aplicações *offshore*.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são abordados os principais tópicos para a compreensão da energia eólica no contexto energético global e nacional, o tipo de solo onde se pretende implantar os parques eólicos, as alternativas de fundações comumente adotadas nesse tipo de estrutura, bem como o modelo de análise empregado para avaliar o comportamento dessas fundações sob a ação das cargas atuantes, por meio de simulações numéricas.

2.1 Energia Eólica

2.1.1 *Contexto global*

Dentre os diversos impactos ambientais, o aquecimento global se destaca como o mais preocupante, especialmente no que se refere às emissões de dióxido de carbono (CO₂) provenientes da queima de combustíveis fósseis, que figuram entre os principais agravantes desse fenômeno. Com o intuito de reduzir essas emissões e mitigar seus efeitos — conforme estabelecido pelo Protocolo de Kyoto — a busca por fontes renováveis de energia tornou-se um dos pilares das sociedades contemporâneas.

Diante do crescente investimento em tecnologias e do aumento constante da demanda energética, a energia eólica tem se consolidado como uma alternativa renovável estratégica, capaz de atender às novas necessidades energéticas de forma eficiente. Sua implementação tem contribuído significativamente para a diversificação da matriz energética. Entre todas as fontes renováveis, ela se sobressai por sua versatilidade, sendo considerada a mais limpa e uma das mais acessíveis. Diversos autores (Tabassum et al., 2014; Welch & Venkateswaran, 2009; Terciote, 2002) defendem que se trata de uma fonte segura e eficaz para atender à crescente demanda energética global, causando impactos ambientais menos significativos para a natureza, o que contribui para um futuro mais sustentável. Sua facilidade de acesso também reforça seu papel como alternativa promissora.

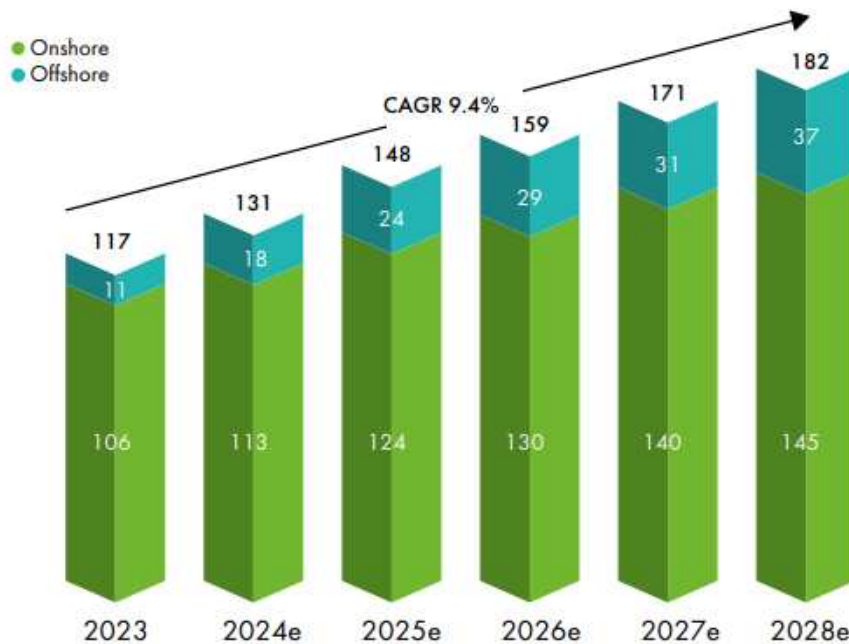
Com o avanço técnico e tecnológico das turbinas eólicas, os custos de geração de energia tendem a diminuir, tornando o processo mais eficiente e reduzindo a necessidade de operações secundárias. Esse progresso pode ser observado na crescente instalação de parques eólicos em diversas regiões do mundo (Welch & Venkateswaran, 2009).

Segundo a Wind World Energy Association (WWEA, 2024), a capacidade eólica instalada mundialmente já é suficiente para suprir cerca de 10% da demanda global por eletricidade. Em alguns países, esse percentual é ainda maior, como, por exemplo, na

Dinamarca, onde aproximadamente 50% da matriz elétrica é proveniente da energia eólica, o que demonstra a viabilidade de ampliar sua participação em escala global, conforme apontam projeções futuras (IEA, 2023)

Com as metas estabelecidas durante a COP28, um dos principais objetivos foi triplicar a capacidade instalada de energias renováveis até 2030, reduzindo significativamente as emissões de CO₂. Nesse contexto, a energia eólica, devido ao seu elevado potencial de crescimento a curto prazo, tem se consolidado como uma das principais alternativas, ganhando destaque no cenário energético mundial. A partir de estudos sobre a perspectiva de mercado, com base em metas governamentais, iniciativas regionais e dados históricos de instalações, a Global Wind Energy Council (GWEC, 2024) estima uma taxa média de crescimento anual de aproximadamente 10% para os próximos cinco anos, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Perspectivas de novas instalações eólicas no mundo entre 2023 e 2028, em GW.



Fonte: Global Wind Energy Council (2024).

2.1.2 Matriz elétrica brasileira

A matriz elétrica representa o conjunto de fontes responsáveis pela geração de eletricidade interna de um país. Ela é utilizada como elemento de análise para acompanhar a distribuição e a proporção da produção elétrica nacional, permitindo também compreender, por

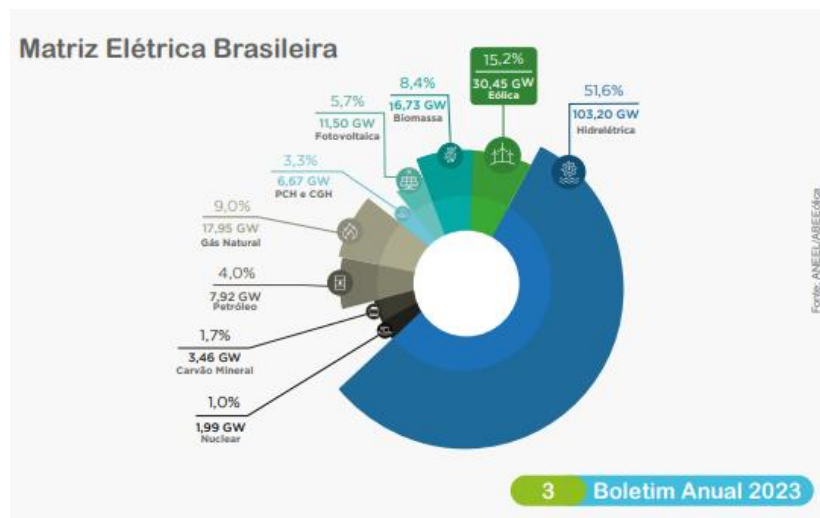
meio das fontes majoritárias, aspectos como os planos políticos, a geografia e as estratégias energéticas adotadas por cada país.

No caso do Brasil, a matriz elétrica permanece entre as mais limpas do mundo. Em 2023, cerca de 93,1% da energia elétrica gerada teve origem em fontes renováveis, com destaque para as hidrelétricas, a energia eólica e a energia solar fotovoltaica, que juntas garantem uma produção energética limpa e sustentável (ENEL, 2024).

Nesse mesmo ano, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o país atingiu um novo recorde de geração, com a adição de mais de 10 GW à capacidade instalada, provenientes da entrada em operação de 291 novas usinas. Dentre essas, os parques eólicos contribuíram com, aproximadamente, 4.9 GW e as usinas fotovoltaicas com, aproximadamente, 4.1 GW, superando a meta prevista de 10 GW (ANEEL, 2024).

O boletim anual da Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias (ABEEólica, 2024) apresenta a distribuição percentual das fontes na matriz elétrica. Conforme ilustrado na Figura 2, as hidrelétricas ocupam a primeira posição, com 51,6% da matriz, sendo, portanto, a principal fonte de geração elétrica no país. Em segundo lugar, a energia eólica aparece com uma participação de 15,2%.

Figura 2 – Matriz Elétrica Brasileira.



Fonte: ANEL/ABEEólica (2024).

O setor elétrico brasileiro tem enfrentado, ao longo dos anos, diversas crises de significativa duração e abrangência. Em grande parte dos casos, essas crises estiveram associadas a condições climáticas adversas, como a escassez de chuvas e períodos prolongados de estiagem, em função da elevada dependência do país da geração de energia hidrelétrica.

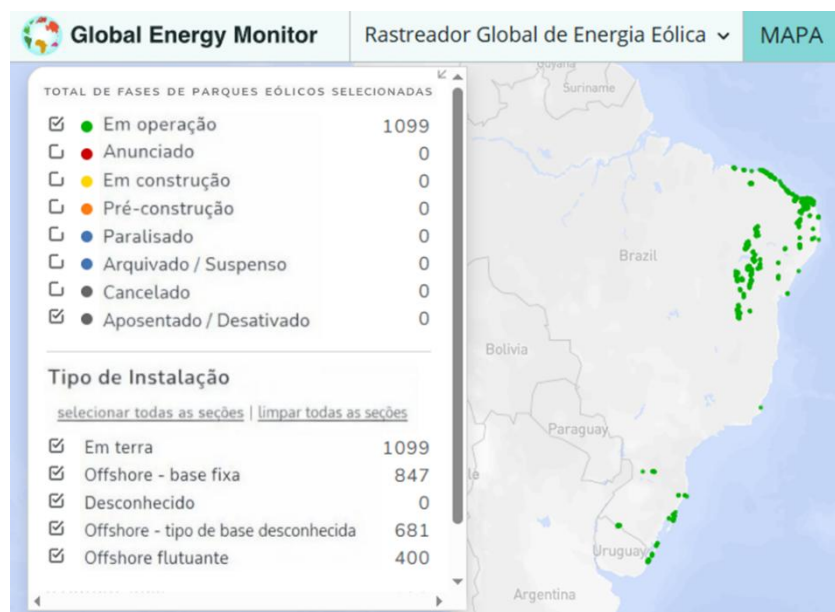
(Hunt; Stilpen; Freitas, 2018). A dependência de uma fonte com elevada variabilidade climática apresenta uma limitação, dificultando a distribuição regular de energia em todo o território nacional.

Diferentemente da energia hidrelétrica, a energia eólica *offshore* apresenta uma produção mais estável, pois é menos suscetível às variações climáticas (Cepel, 2013). Essa característica reforça o papel estratégico da energia *offshore* na matriz elétrica brasileira, ao atuar como complemento à geração hidrelétrica, especialmente diante da possibilidade de redução de sua confiabilidade futura.

2.1.3 Energia eólica no Brasil

Anualmente, os boletins e relatórios divulgados pelos órgãos de fiscalização da matriz elétrica brasileira evidenciam o crescimento contínuo da produção e da implementação da energia eólica no país. Esse avanço tem sido favorecido pela geografia propícia e pela extensa faixa litorânea, caracterizada por ventos de alta velocidade (Cepel, 2013). Na atualização de fevereiro de 2025, a Global Energy Monitor, por meio do rastreador global de energia eólica, destacou que o Brasil possui mais de 1.000 parques eólicos em operação, os quais se restringem a usinas do tipo onshore, com concentração predominante nas regiões próximas à costa.

Figura 3 – Mapeamento dos parques eólicos em operação no Brasil.



Fonte: Modificado de Global Energy Monitor (2025).

Segundo o Boletim Anual da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) referente ao ano de 2023, foram instalados 9,3 GW de potência, tornando a energia eólica a fonte com maior expansão no período, responsável por 51,73% da nova capacidade instalada no país. Com a implantação de novas turbinas, a participação da energia eólica na matriz elétrica brasileira apresentou um avanço significativo em relação ao ano anterior, consolidando-se como a segunda principal fonte da matriz. Ao final de 2023, o país contava com 1.027 usinas e 30,45 GW de potência instalada, representando um crescimento de 18,79% em relação a dezembro de 2022, quando a capacidade era de 25,63 GW. Houve, ainda, um aumento de 1,8% em sua contribuição na matriz elétrica nacional (ABEEólica, 2024).

O investimento contínuo nessa fonte firmou o Brasil como um dos principais países produtores de energia eólica. Em 2023, o país manteve-se na sexta posição do ranking mundial em capacidade acumulada e, no ranking anual de capacidade instalada, permaneceu na terceira colocação pelo terceiro ano consecutivo (GWEC, 2024).

2.1.4 Perspectiva de energia eólica offshore no Brasil

Com o aumento anual da capacidade instalada de usinas eólicas, novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas, com foco em instalações futuras e na busca por uma geração de energia mais eficiente. Nesse contexto, a energia eólica *offshore* tem ganhado destaque, em razão de sua elevada capacidade de captação energética de forma mais constante e efetiva, aproveitando as características favoráveis dos ventos oceânicos.

O Brasil, por apresentar ventos oceânicos intensos e regulares, possui elevado potencial para a geração de energia eólica *offshore* (Cepel, 2013). Apesar do avanço tecnológico nesse setor, o país ainda carece de regulamentações e diretrizes específicas que viabilizem de forma plena a implementação dessa nova fonte energética.

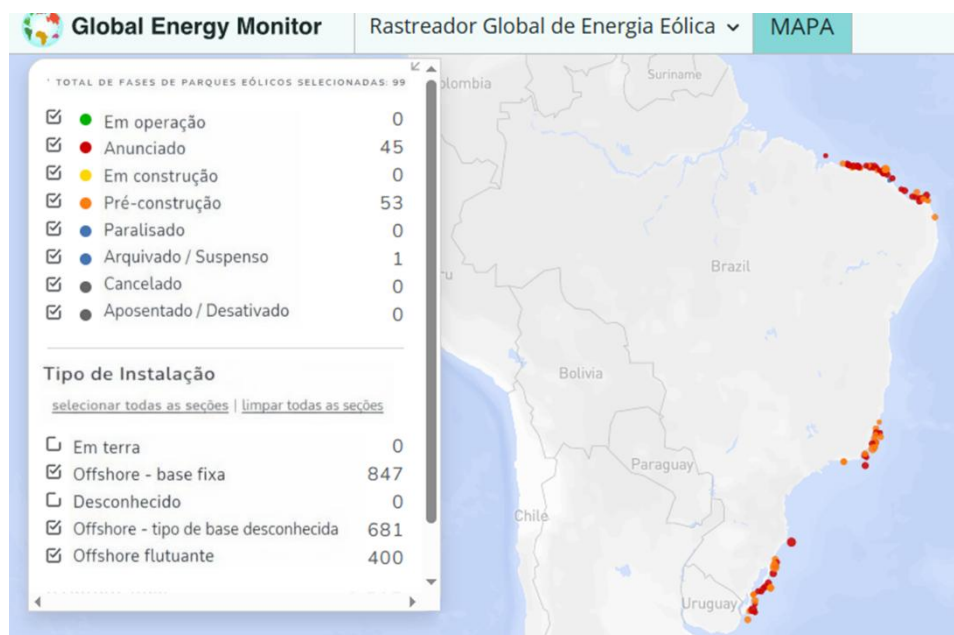
Embora essa modalidade ofereça uma captação mais estável de energia (Cepel, 2001), ela também impõe desafios significativos, especialmente no que se refere à execução dos projetos. Para Esteban et al., 2011), as turbinas eólicas *offshore* apresentam maior complexidade técnica em comparação com turbinas *onshore*, sobretudo pelas condições adversas do ambiente marinho, o que impacta diretamente nas etapas de projeto, construção e operação.

Até o momento, conforme apresentado na Figura 3, todos os parques eólicos em operação no Brasil são terrestres (*onshore*), onde o acesso para controle e manutenção é mais

facilitado. No entanto, nos últimos anos, novos projetos e acordos foram aprovados, impulsionando a expansão da energia eólica em ambiente *offshore*.

De acordo com a Global Energy Monitor (2025), até maio de 2025, há 99 projetos eólicos *offshore* previstos para o Brasil: 45 foram anunciados, mas ainda não iniciaram suas atividades; 53 encontram-se em fase de pré-construção; e um foi arquivado. Com dados mais recentes, até março de 2025, havia 104 projetos em processo de licenciamento ambiental junto ao IBAMA, distribuídos pelas regiões Nordeste, Sul e Sudeste (IBAMA, 2025).

Figura 4 – Mapeamento dos parques eólicos *offshore* no Brasil.



Fonte: Modificado de Global Energy Monitor (2025).

Em resposta a esse cenário, foi instituído o Decreto nº 10.946/2022, elaborado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), em conjunto com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e outros órgãos competentes. Nesse decreto, foi estabelecido diretrizes para o desenvolvimento de empreendimentos *offshore*, incluindo a cessão de áreas pertencentes à União e a regulamentação da instalação de turbinas eólicas, com vistas ao aproveitamento sustentável dos recursos naturais disponíveis (Ministério de Minas e Energia, 2022).

2.2 Areias Calcárias

2.2.1 Sedimentos

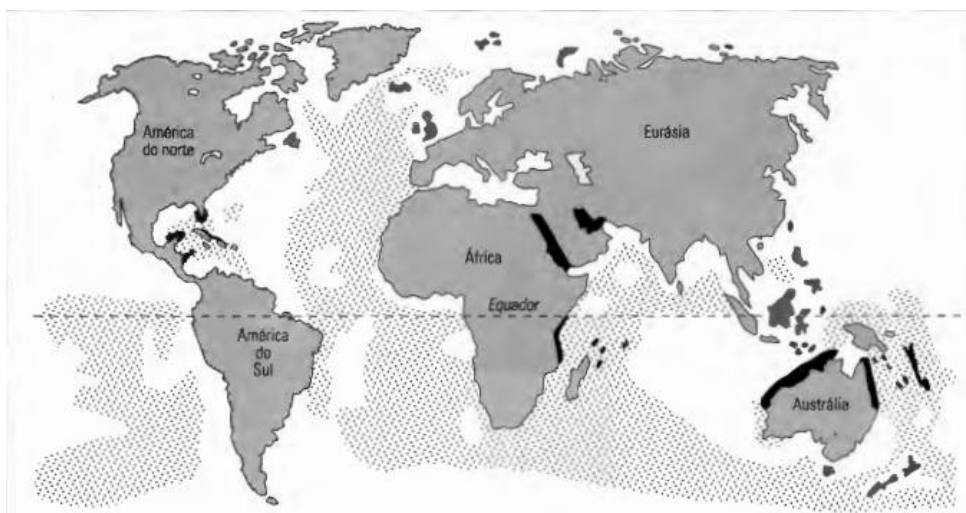
Em regiões *offshore*, os sedimentos calcários são, em sua maioria, formados a partir dos restos esqueléticos de organismos marinhos oriundos de águas rasas. Nas áreas costeiras, essa composição resulta da presença de moluscos, algas, foraminíferos, esponjas, equinodermos e crinóides. Em águas mais profundas, os principais contribuintes são foraminíferos planctônicos, pterópodes e cocólitos (Poulos, 1988).

Em diversos ambientes modernos observa-se o acúmulo de sedimentos carbonáticos, os quais, em grande parte, apresentam correspondência com formações presentes no registro geológico pretérito. Tais carbonatos podem se originar de ambientes marinhos rasos ou profundos, de bacias evaporíticas, de águas doces ou de processos eólicos (Suguio, 2003).

A maior parte dos sedimentos calcários antigos é proveniente de depósitos marinhos rasos, enquanto os sedimentos carbonáticos modernos se originam, predominantemente, de águas profundas, com ampla distribuição geográfica (Suguio, 2003). A Figura 5 apresenta o mapa de distribuição global dos sedimentos carbonáticos marinhos modernos.

Figura 5 – Mapa de distribuição de sedimentos carbonáticos modernos de origem marinha.

Em preto, áreas de carbonatos marinhos de águas rasas, o pontilhado representa vasas de carbonatos marinhos de águas profundas.



Fonte: Suguio (2003).

Com o objetivo de entender a composição e as características físicas desses sedimentos, bem como os organismos vivos associados aos detritos gerados, estudos foram

conduzidos na plataforma continental brasileira. Segundo Kempf (1970), pesquisas realizadas pelo Instituto Oceanográfico da UFPE identificaram extensas áreas com presença de algas calcárias na plataforma Norte-Nordeste. Posteriormente, com o avanço das investigações regionais, Dias (2000) constatou que a plataforma continental brasileira possui, em escala global, a maior extensão contínua de cobertura por sedimentos carbonáticos.

Estudos mais recentes voltados à plataforma continental do Ceará (PCCE) vêm aprofundando a caracterização sedimentológica da região, considerando as fácies sedimentares e os processos de transporte e deposição. Os sedimentos presentes nessa região podem ser classificados como litoclásticos, quando formados por intemperismo físico e/ou químico de rochas continentais, ou como bioclásticos, quando compostos por fragmentos de organismos marinhos (Maia de Almeida, 2021).

2.2.2 Origem das areias

As areias carbonáticas podem se originar do intemperismo de rochas sedimentares com elevado teor de carbonato de cálcio (CaCO_3), conferindo aos solos formados pela deposição desses sedimentos características geotécnicas e mineralógicas peculiares (Coop & Airey, 2002).

Segundo Suguio (2003), as rochas sedimentares de origem biogênica caracterizam-se pela presença de detritos de organismos animais e vegetais, como nos recifes de corais, ou pela acumulação de resíduos biológicos, a exemplo dos depósitos carbonosos (turfa, linhito e carvão) e carbonáticos, incluindo conchas e corais. Alguns autores descrevem a areia carbonática como o resultado da aglomeração de fragmentos com teor significativo de carbonato, oriundos, em geral, de restos esqueleticos de organismos (Hassanlourad; Rasouli; Salehzadeh, 2014; Wang et al., 2011). Esses fragmentos podem se formar *in situ*, como no caso de moluscos, recifes de coral e outros organismos bentônicos, ou serem transportados por ação de correntes, ondas e ventos. A deposição também pode ocorrer pela precipitação na coluna d'água (Murff; Asce, 1987).

Em razão de sua gênese, o comportamento geotécnico das areias calcáreas biogênicas difere substancialmente das areias quartzosas. Entre suas peculiaridades, destacam-se a elevada porosidade, decorrente do arranjo dos grãos e do alto índice de vazios; a baixa dureza das partículas, que favorece sua fragmentação sob cargas externas; e os diversos tipos de estruturas internas formadas após os processos de deposição e cimentação (Brandes, 2011).

Enquanto as areias quartzosas frequentemente utilizadas em pesquisas são predominantemente terrestres, as areias calcáreas biogênicas são encontradas em ambientes *offshore*

Dias (1996) propôs uma carta sedimentológica baseada no percentual de carbonato e na granulometria para classificar os sedimentos da plataforma continental brasileira. A Tabela 1 apresenta essa classificação, que varia desde os sedimentos litoclásticos (com teor de carbonato inferior a 30%) até os bioclásticos (com mais de 70% de carbonato).

Tabela 1 – Classificação dos sedimentos em função do teor de CaCO_3

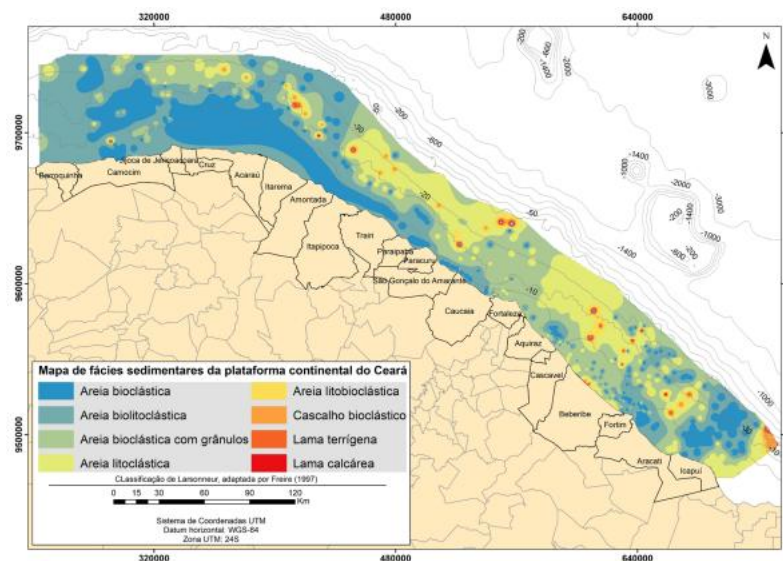
Teor	$\text{CaCO}_3 < 30\%$	$30\% < \text{CaCO}_3 < 50\%$	$50\% < \text{CaCO}_3 < 70\%$	$\text{CaCO}_3 > 70\%$
Nomenclatura	Litoclástico	Litobioclástico	Biolitoclástico	Bioclástico

Fonte: Adaptado de Dias (1996)

Investigando a plataforma continental do Ceará (PCCE), Maia de Almeida (2022) realizou um mapeamento faciológico que identificou oito fácies principais: areia bioclástica, areia litoclástica, areia biolitoclástica, cascalho bioclástico, lama terrígena, areia litobioclástica, cascalho biolitoclástico e lama calcárea.

Conforme apresentado na Figura 6, o mapa faciológico da PCCE revela uma extensa predominância de areias bioclásticas e litoclásticas. De acordo com a Tabela 1, esses tipos de sedimento apresentam elevados teores de carbonato de cálcio, o que evidencia a presença significativa de solos carbonáticos na costa do litoral cearense.

Figura 6 – Mapa Faciológico da Plataforma Continental do Ceará.



Fonte: Maia de Almeida (2021).

2.3 Fundações de Turbinas Eólicas *Offshore*

Grande parte dos parques eólicos *offshore* encontram-se localizados sobre a plataforma continental, com distância média de aproximadamente 10 km da linha costeira. Essa posição mais afastada da faixa litorânea visa aproveitar ao máximo as características do ambiente marinho e a intensidade dos ventos incidentes (Wu et al., 2019).

Com o melhor aproveitamento dos ventos, as turbinas eólicas *offshore* apresentam maior complexidade estrutural em comparação às turbinas instaladas em terra, especialmente no que se refere à fundação. Essa desempenha um papel fundamental na transmissão das cargas atuantes na torre até os solos de suporte (Guidelines for design of wind turbines, 2002).

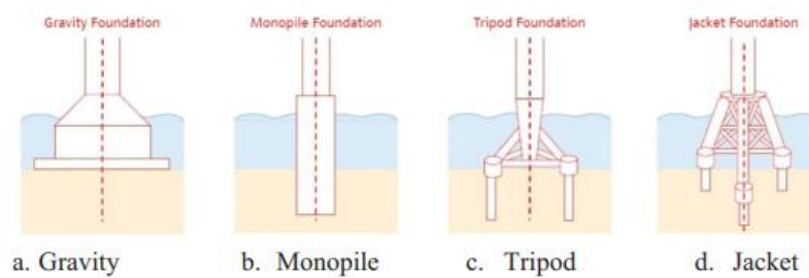
A complexidade estrutural dessas turbinas é intensificada pela natureza das cargas atuantes. A estrutura está sujeita à combinação de cargas estáticas, decorrentes do peso próprio, e de cargas dinâmicas, associadas à ação do vento, às vibrações aerodinâmicas do rotor, bem como aos esforços induzidos por ondas e correntes marítimas. Essa interação multifatorial confere ao sistema estrutural um comportamento singular, que demanda análises específicas e integradas, tanto do ponto de vista estrutural quanto geotécnico (Tiwari, 2016).

Segundo o Guidelines for Design of Wind Turbines (2002), o tipo de fundação a ser adotado depende, predominantemente, das características geotécnicas do solo na área de instalação e da profundidade da lâmina d'água. A fundação selecionada deve ser capaz de atender a diversos critérios de desempenho, incluindo:

1. capacidade de carga adequada à estrutura;
2. resistência à degradação provocada por carregamentos cíclicos;
3. controle dos recalques por adensamento;
4. limitação de recalques diferenciais;
5. mitigação dos efeitos de erosão e escavação ao redor da fundação.

Entre as principais alternativas utilizadas como fundações para turbinas eólicas *offshore*, destacam-se as fundações por gravidade, as do tipo *monopile*, tripé (*tripod*) e *jacket*, conforme ilustrado na Figura 7. A escolha entre esses tipos depende de diversos fatores, como profundidade da água, características geotécnicas do leito marinho, cargas estruturais, condições ambientais e viabilidade econômica.

Figura 7 – Tipos de fundações utilizadas em turbinas eólicas.



Fonte: (Wu et al., 2019)

2.3.1 Fundações por gravidade

Em águas rasas, com profundidades inferiores a 10 metros e sob condições adequadas de capacidade de carga do solo no leito marinho, fundações do tipo *gravity base*, compostas por bases de concreto, têm se mostrado uma alternativa eficaz para a instalação de turbinas eólicas. Devido às suas grandes dimensões e ampla área de contato com o solo, essas fundações resistem às cargas atuantes por meio do próprio peso da estrutura (Doherty; Gavin, 2012).

2.3.2 Fundações tripod

As fundações do tipo tripé são utilizadas em profundidades de aproximadamente 10 a 35 metros. Essa estrutura consiste em uma base treliçada metálica conectada a três estacas dispostas em forma de triângulo equilátero. Os vértices do triângulo são ligados à parte superior da estrutura, formando o tripé. O sistema é pré-fabricado e projetado para suportar os esforços de flexão e compressão, transmitindo-os às estacas que sustentam a estrutura (Wu et al., 2019).

2.3.3 Fundações jacket

Em águas mais profundas, geralmente entre 35 e 60 metros, as fundações do tipo *jacket* representam uma alternativa viável de suporte para turbinas eólicas *offshore*. Essas fundações consistem em estruturas treliçadas de aço, com três ou quatro apoios. Cada apoio corresponde a uma estaca cravada no solo marinho. A treliça distribui os esforços entre os apoios, que resistem às cargas axiais de tração e compressão de maneira análoga às *monopiles* (Wu et al., 2019).

2.3.4 Fundações monopiles offshore

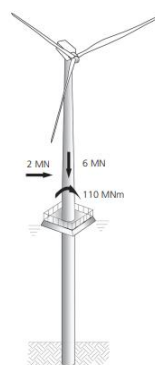
As *monopiles* consistem em estacas únicas, integradas diretamente à base da torre eólica, com o mesmo diâmetro da seção inferior da torre. Os diâmetros variam normalmente entre 3 e 12 metros, sendo dimensionados conforme os requisitos do projeto, tais como a altura da torre, o comprimento da estaca e a profundidade da lâmina d'água.

Dentre todas as alternativas de fundações *offshore*, a *monopile* é atualmente a mais utilizada no mundo. Sua popularidade deve-se à versatilidade, à simplicidade do processo de instalação em comparação com outras fundações e à viabilidade de aplicação em profundidades entre 30 e 70 metros. Essas características conferem às *monopiles* uma vantagem econômica significativa, considerando os custos de fabricação e instalação (Doherty; Gavin, 2012).

Apesar de sua atratividade, à medida que os parques eólicos se expandem para áreas mais distantes da costa, onde as profundidades aumentam, torna-se necessário adotar *monopiles* compatíveis com os Estados Limites de Serviço (ELS) e Último (ELU). Isso implica na definição do comprimento embutido e do diâmetro da estaca em função da altura da torre, a qual estará sujeita a ações dinâmicas que serão transmitidas ao *monopile* sob a forma de esforços axiais, cargas laterais e momentos fletores.

A Figura 8 ilustra as principais cargas atuantes na fundação do tipo *monopile*, incluindo a carga axial, a carga lateral e o momento fletor. Este último decorre da alavanca gerada pela distância entre o ponto de aplicação da carga lateral e o nível do leito marinho. Como resultado, a estaca está sujeita a esforços de tração e compressão, equilibrados pela reação do solo ao longo do seu comprimento embutido.

Figura 8 – Representação das cargas transmitidas à *monopile*.



Fonte: Doherty e Gavin (2012).

2.4 Análise Numérica

A confiabilidade de uma análise numérica está diretamente associada à robustez do software empregado, à coerência na definição dos parâmetros constitutivos dos materiais e à sua capacidade de representar de forma adequada o estado inicial do maciço de solo, bem como a evolução de seu comportamento ao longo do tempo. Em estudos de interação solo-estrutura, como no caso de fundações do tipo *monopile*, a modelagem numérica deve ser capaz de reproduzir tanto a resposta global do sistema quanto os mecanismos locais de deformação e redistribuição de tensões induzidos pelos carregamentos atuantes. Aspectos como a formulação dos modelos constitutivos, a representação das condições de contorno e a discretização do domínio influenciam diretamente a qualidade dos resultados obtidos, reforçando o papel da análise numérica como ferramenta fundamental para a compreensão do comportamento geotécnico e estrutural do sistema analisado.

2.4.1 Software

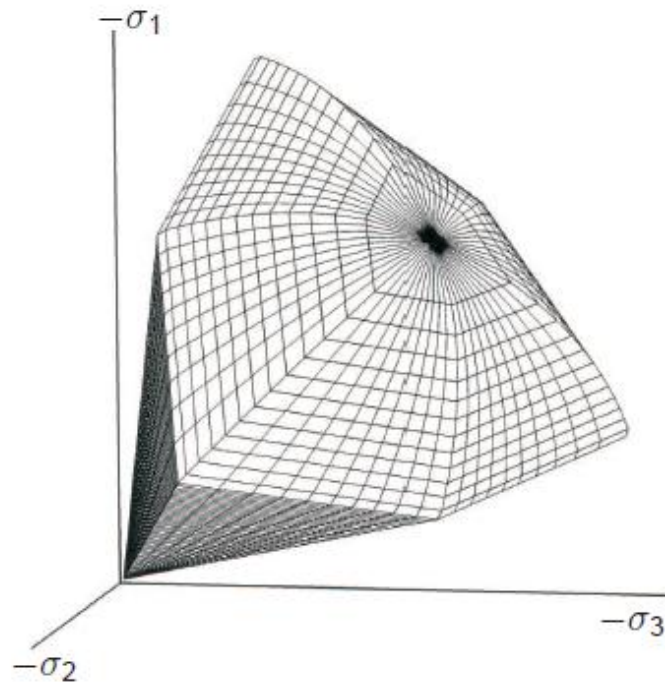
O PLAXIS 3D é um software baseado no método dos elementos finitos, desenvolvido para análises geotécnicas tridimensionais, permitindo a simulação detalhada de deformações, estabilidade e fluxo em diferentes tipos de obras no solo. O programa é amplamente empregado em estudos envolvendo escavações, túneis, fundações profundas e taludes, além de aplicações *offshore*, como a análise de *monopiles* e estruturas sujeitas a carregamentos combinados. De forma complementar, o PLAXIS 2D é utilizado em análises bidimensionais, sendo particularmente adequado para a avaliação de problemas com condições de deformação plana ou simetria axial, oferecendo maior eficiência computacional e facilidade na realização de estudos paramétricos. Ambos os softwares possibilitam a representação do comportamento não linear dos solos e da interação solo-estrutura por meio de modelos constitutivos avançados (PLAXIS, 2018).

2.4.2 Modelos constitutivos

O modelo Hardening Soil (HS) é uma ferramenta avançada amplamente utilizada para simular o comportamento não linear e dependente de tensão dos solos. Diferentemente de modelos elasto-plásticos perfeitos, como o Mohr-Coulomb clássico (MC), o modelo HS incorpora superfícies de encruamento (*hardening*), o que significa que a superfície de

escoamento não permanece fixa no espaço das tensões principais, como visto na Figura 9 (Schanz et al., 1999). Essa característica permite ao modelo representar de forma mais realista a evolução do comportamento do solo ao longo do carregamento.

Figura 9 – Superfície de escoamento no espaço das tensões principais para solo sem coesão, conforme o modelo Hardening Soil.



Fonte: Schanz et al. (1999)

Além disso, o modelo HS considera a dependência da rigidez do solo em relação ao estado de tensões, tornando-o particularmente eficaz para simular a variação da rigidez em diferentes níveis de carga. À medida que as pressões atuam sobre o maciço, os módulos de rigidez aumentam proporcionalmente, conforme descrito no *PLAXIS 3D Reference Manual* (2018).

O mecanismo de encruamento no modelo HS pode ser dividido em dois tipos: encruamento ao cisalhamento e encruamento à compressão. O primeiro está associado à resposta do solo a esforços de cisalhamento, nos quais as deformações plásticas acumuladas são irreversíveis. Já o segundo refere-se às deformações irreversíveis induzidas por esforços axiais, comumente analisadas em ensaios edométricos, que alteram permanentemente a estrutura interna do solo.

Diferentemente de materiais tradicionais da engenharia, cuja rigidez pode ser caracterizada por um único módulo de elasticidade (E), os solos exibem comportamentos complexos que variam conforme o tipo de carregamento (compressão, cisalhamento ou descarregamento). Por esse motivo, para uma melhor representação do comportamento deformacional do solo, o modelo Hardening Soil (HS) utiliza três parâmetros de entrada associados à deformabilidade: o módulo de elasticidade correspondente a 50% da tensão de ruptura no ensaio triaxial drenado (E_{50}), o módulo de elasticidade de descarregamento (E_{ur}) e o módulo de elasticidade em carregamento edométrico (E_{oed}).

2.4.3 Simulações

Uma das abordagens amplamente empregadas na engenharia *offshore* para a avaliação da resposta do solo às cargas laterais é a avaliação da carga lateral aplicada e o deslocamento lateral sofrido pela *monopile*. Tal representação avalia não só comportamento do solo, como também fornece uma noção de como é sua rigidez frente aos carregamentos. As condições de projeto, no estado ELS e ELU, são aplicadas e avaliadas em projetos de fundações de plataformas de petróleo e estruturas marítimas (API, 2007).

Bringreave et al. (2020) desenvolveram um estudo baseado em análises paramétricas de diferentes configurações estruturais de turbinas eólicas *offshore*, avaliando a influência do diâmetro do *monopile*, do comprimento de embutimento da fundação e da altura da torre. O desempenho dessas configurações foi analisado com base nos critérios de segurança associados ao Estado Limite de Serviço (ELS) e ao Estado Limite Último (ELU), permitindo comparar diferentes métodos de dimensionamento e verificar a adequação das soluções propostas para fundações do tipo *monopile*.

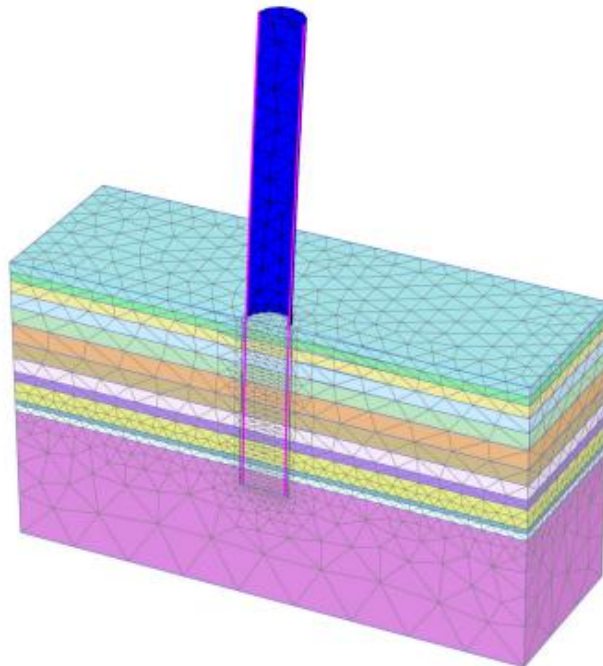
Diversos autores (Hearn & Edgers, 2010; Murphy et al., 2018; Tiwari, 2016) realizaram estudos comparativos entre os métodos baseados em elementos finitos (MEF) e as abordagens convencionais das curvas p–y. Os resultados apontam que o método convencional apresenta limitações importantes, sobretudo por se basear em dados experimentais provenientes de estacas com pequeno diâmetro, os quais não representam adequadamente o comportamento de *monopiles* de grandes dimensões. Nesse sentido, o uso de modelos numéricos por MEF tem se mostrado uma alternativa mais robusta e precisa, ao permitir a simulação detalhada da interação solo-estrutura em condições mais realistas.

Hearn & Edgers (2010) realizaram simulações em *monopiles offshore* instaladas em areia densa, comparando os resultados obtidos com a metodologia da API (2000). Os autores

observaram que o método API superestima a resistência lateral do solo, especialmente em estacas com grandes diâmetros e comprimentos. Essa limitação é explicada pelo fato de que as curvas da API foram originalmente desenvolvidas com base em ensaios de campo realizados em estacas com diâmetro de apenas 0,61 m, tornando sua aplicação questionável em projetos modernos de turbinas eólicas *offshore*, que utilizam *monopiles* significativamente maiores.

Complementarmente, Elkhawas & Salem (2021) conduziram análises paramétricas por meio de simulações numéricas, avaliando *monopiles* instaladas em areias carbonáticas da costa norte do Egito. Os autores estudaram o comportamento da fundação frente a carregamentos axiais e laterais, simulando provas de carga e analisando a resposta da deflexão horizontal sob diferentes ângulos de incidência da força sobre a torre.

Figura 10 – Modelo tridimensional de uma turbina eólica assente em solo estratificado com malha de elementos finitos gerada no PLAXIS 3D.

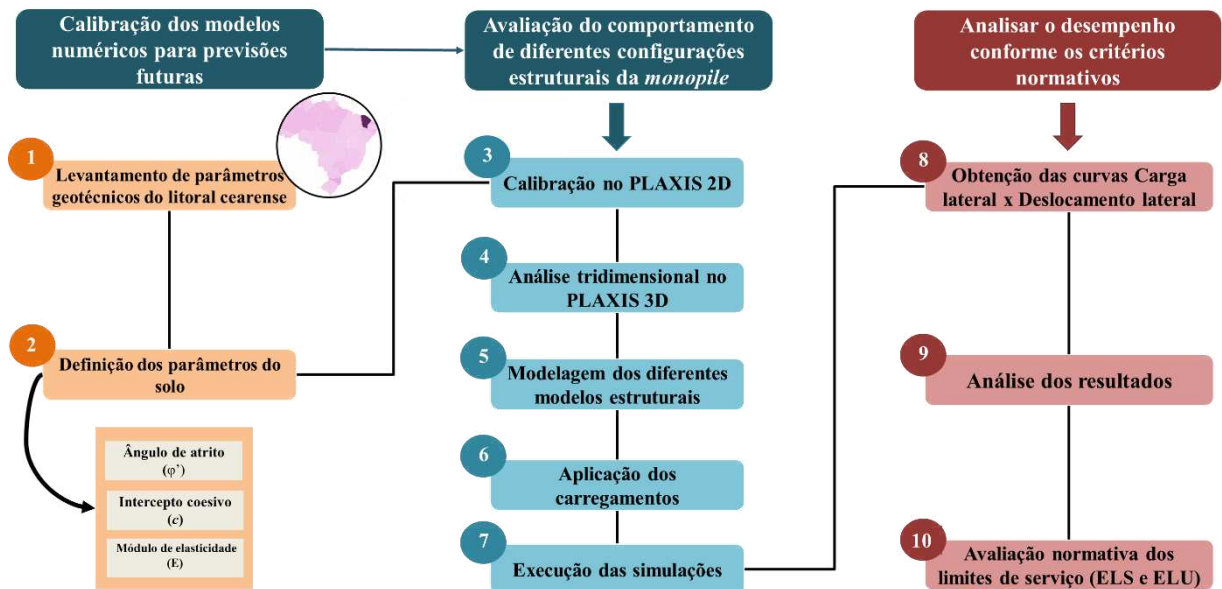


Fonte: Brinkgreve et al. (2020).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada neste trabalho foi organizada de forma linear, conforme apresentado no fluxograma da Figura 11, integrando levantamento de dados geotécnicos, modelagem numérica e avaliação normativa. De maneira geral, o procedimento visa selecionar os principais parâmetros geotécnicos das áreas de interesses, calibrar modelos numéricos que representem o comportamento tensão-deformação das areias carbonáticas, analisar o comportamento de diferentes configurações estruturais de fundações do tipo *monopile* e, por fim, avaliar o desempenho dessas fundações à luz dos critérios normativos aplicáveis aos Estados Limites de Serviço (ELS) e Último (ELU).

Figura 11 – Fluxograma da Metodologia: obtenção de parâmetros, calibração, análise numérica e verificação dos resultados



Fonte: Elaborado pelo autor.

De forma detalhada, a metodologia foi desenvolvida em três etapas. Na primeira etapa, realizou-se o levantamento dos parâmetros geotécnicos característicos de areias carbonáticas do litoral do Ceará, com base em dados disponíveis na literatura e em estudos regionais. A partir desse levantamento, foram definidos os parâmetros do solo utilizados nas simulações numéricas, tais como o ângulo de atrito efetivo (φ'), o intercepto coesivo (c) e o módulo de elasticidade (E).

Na segunda etapa, os parâmetros selecionados anteriormente foram levados ao PLAXIS 2D, onde foi realizada a calibração do modelo, ajustando o comportamento tensão-deformação obtido em laboratório com o comportamento dentro do software. Posteriormente, procedeu-se à análise tridimensional no PLAXIS 3D, utilizando os parâmetros geotécnicos calibrados como parâmetros de entrada do solo, onde as turbinas eólicas são assentadas. A partir disso, foram desenvolvidos diferentes modelos estruturais (*monopile* + torre), considerando variações geométricas previamente estabelecidas. Em seguida, foram aplicados os carregamentos representativos das ações atuantes em estruturas *offshore*, e as simulações numéricas foram executadas.

Na terceira e última etapa, foram extraídas as curvas de carga lateral versus deslocamento lateral, fundamentais para a análise do comportamento da fundação. Esses resultados foram analisados, permitindo avaliar a influência dos parâmetros adotados e das diferentes configurações estruturais. Por fim, o desempenho das *monopiles* foi avaliado conforme os critérios normativos da API, considerando os Estados Limites de Serviço (ELS) e os Estados Limites Últimos (ELU), possibilitando a verificação da segurança e da adequação das soluções analisadas.

3.1 Levantamento Geotécnico

3.1.1 Amostras

Para a realização da análise numérica, os parâmetros geotécnicos representativos das areias carbonáticas do litoral cearense foram obtidos a partir do trabalho desenvolvido por Alves (2024). Nesse estudo, foi conduzido um conjunto de ensaios laboratoriais com o objetivo de investigar o comportamento mecânico das areias carbonáticas ao longo da costa nordestina. Para esse fim, foram analisadas três amostras distintas: uma areia quartzosa e duas areias carbonáticas com diferentes teores de carbonato de cálcio, o que permitiu a comparação preliminar entre os materiais e a avaliação da influência do teor de carbonato de cálcio nas propriedades mecânicas do solo.

No âmbito deste trabalho, cujo foco está direcionado à avaliação do desempenho de turbinas eólicas assentadas em solos carbonáticos, foram adotadas as amostras de areias carbonáticas estudadas por Alves (2024). As areias carbonáticas analisadas correspondem a duas condições distintas: uma amostra *onshore*, denominada Areia Carbonática 1 (AC1), e uma amostra *offshore*, denominada Areia Carbonática 2 (AC2).

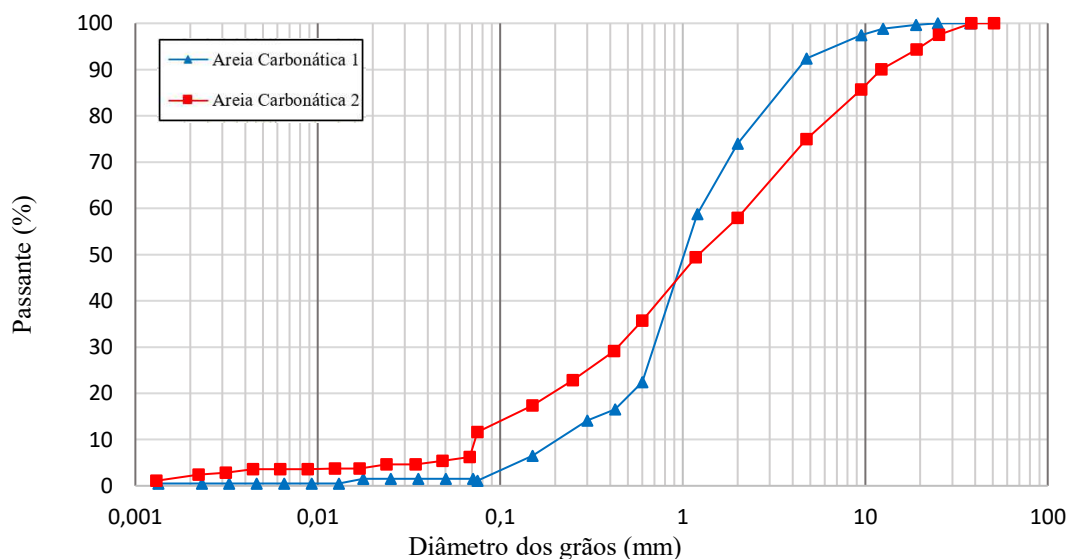
As amostras de Areia Carbonática 1 e Areia Carbonática 2 foram coletadas na Praia de Moitas, localizada no município de Amontada, litoral oeste do Ceará. A amostra AC 1 foi obtida em uma superfície *onshore*, a cerca de 1 m de profundidade, nas proximidades da foz do rio Aracatiaçu. Já a amostra AC 2 foi coletada em uma superfície *offshore*, aproximadamente 650 m distante da linha de costa e a 7 m de profundidade em relação ao nível do mar.

3.1.2 Caracterização das areias

Para compreender a distribuição do tamanho dos grãos ao longo da amostra, realizou-se o ensaio de granulometria, a partir do qual também foi possível determinar a classificação do solo. A Figura 12 apresenta as curvas granulométricas das areias AC 1 e AC 2. Observa-se que ambas exibem curvas suaves, sem descontinuidades, e com ampla variação nos tamanhos dos grãos, características típicas de areias bem graduadas (SW).

A AC 2, diferentemente da AC 1, apresenta maiores frações de pedregulho, sobretudo por se tratar de um material *offshore*, com maior presença de rodolitos. Quanto ao material fino passante na peneira nº 200, a Areia Carbonática 2 apresentou cerca de 10%, ao passo que a AC 1 mostrou um valor próximo de zero. Dessa forma, observa-se que a AC 1 possui grãos distribuídos principalmente nas faixas de areia grossa, média e fina, enquanto a AC 2 apresenta uma distribuição mais ampla, abrangendo pedregulho, areia grossa, média e fina, além de uma parcela de finos.

Figura 12 – Curva Granulométrica das Areias Carbonáticas



Fonte: Adaptado de Alves (2024)

Com base na distribuição dos tamanhos dos grãos, foram determinados o coeficiente de curvatura (C_c) e o coeficiente de uniformidade (C_u), o que permite compreender de forma mais detalhada como os grãos estão distribuídos na amostra. A Tabela 2 apresenta as principais propriedades físicas das areias, incluindo a densidade real dos grãos, os índices de vazios máximo e mínimo, além das massas específicas nos estados fofo e compacto.

Tabela 2 – Propriedades das Areias Carbonáticas

Amostras	Propriedades							
	Teor de CaCO_3 (%)	Gs	C_c	C_u	$\rho_{\text{mín}}$ (g/cm^3)	$\rho_{\text{máx}}$ (g/cm^3)	$e_{\text{mín}}$	$e_{\text{máx}}$
Areia carbonática 1	48,81	2,65	6,4	1,7	1,52	1,76	0,53	0,76
Areia carbonática 2	88,46	2,69	30,5	1,2	1,43	1,70	0,60	0,89

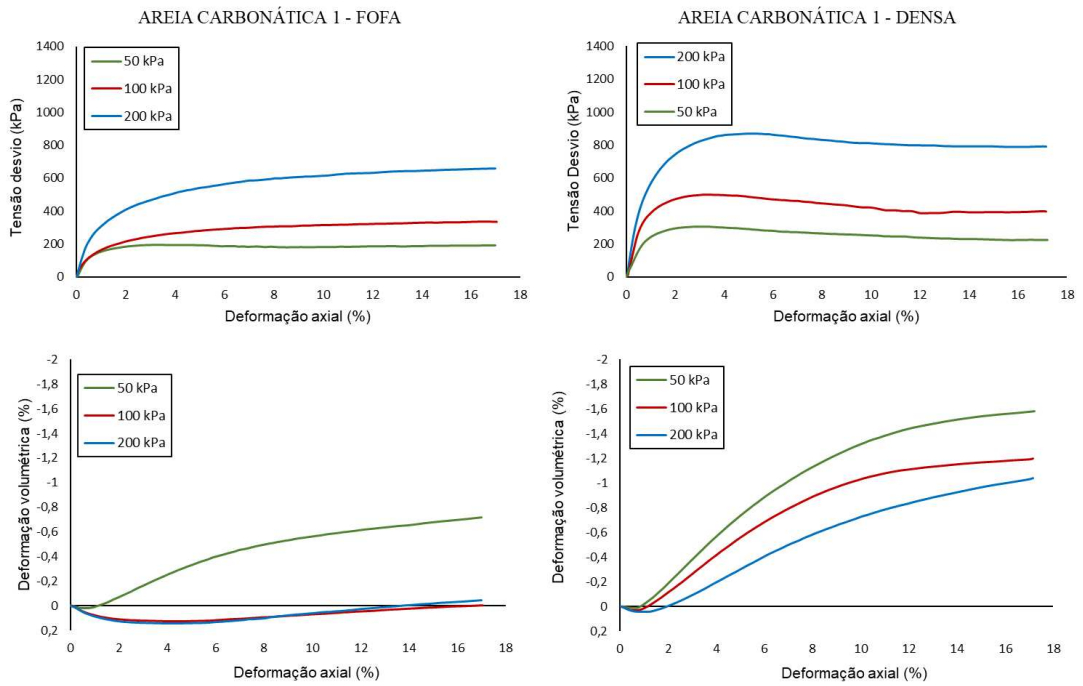
Fonte: Adaptado de Alves (2024)

3.1.3 Ensaio de compressão triaxial drenado (CD)

Para compreender o comportamento mecânico das areias e sua deformabilidade, foram realizados ensaios de compressão triaxial com o objetivo de determinar seus parâmetros de resistência e deformabilidade. As Figuras 13 e 14 apresentam as curvas tensão x deformação da AC 1 e da AC 2, obtidas sob tensões de confinamento de 50, 100 e 200 kPa, considerando ensaios realizados tanto no estado fofo quanto no estado denso (compacto).

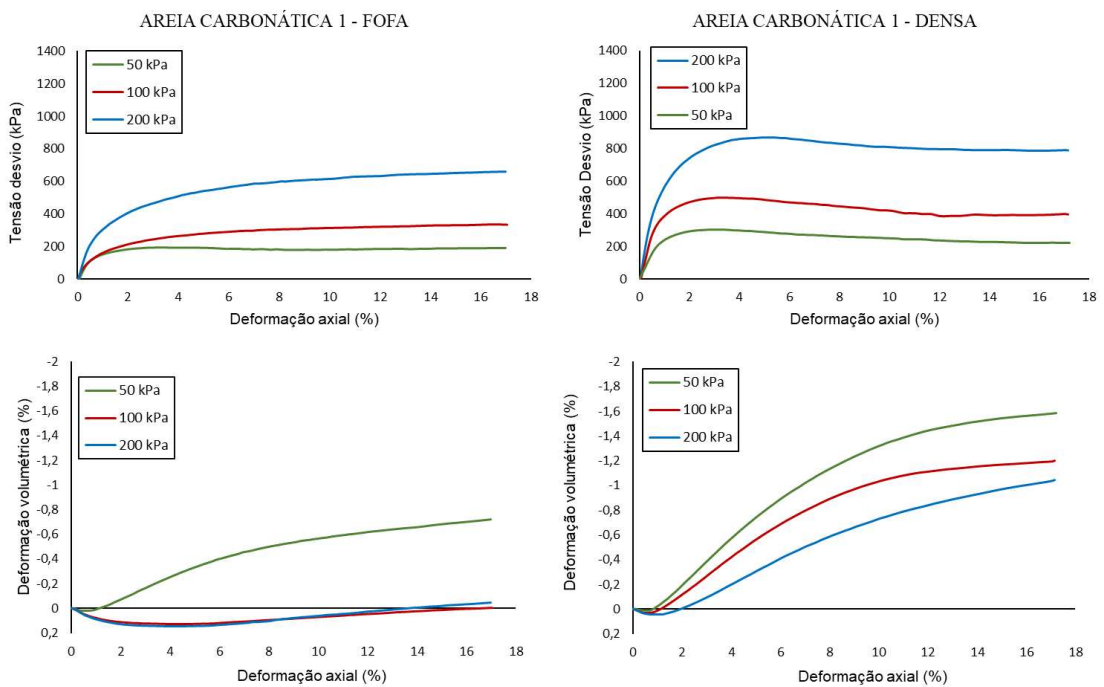
A partir dos ensaios realizados, foram determinados os parâmetros de resistência (ângulo de atrito e coesão) e de deformabilidade (módulo de elasticidade correspondente a 50% da tensão de ruptura), os quais estão apresentados na Tabela 3 e 4. Esses parâmetros serão utilizados para a calibração do modelo no software, de modo que o comportamento tensão x deformação seja fielmente representado. A aplicação desse procedimento será apresentada no próximo tópico

Figura 13 – Curvas características obtidas no ensaio de compressão triaxial para a Areia Carbonática 1, considerando: (a) estado fofo e (b) estado compacto



Fonte: Alves (2024)

Figura 14 – Curvas características obtidas no ensaio de compressão triaxial para a Areia Carbonática 2, considerando: (a) estado fofo e (b) estado compacto



Fonte: Alves (2024)

Tabela 3 – Parâmetros de resistência das Areias Carbonáticas obtidos pelo ensaio de compressão triaxial

Amostras	Parâmetros de resistência	
	Ângulo de atrito efetivo	Intercepto coesivo
	ϕ' (°)	c' (kN/m ²)
Areia Carbonática 1 - F	37,13	7,500
Areia Carbonática 1 - D	40,89	27,00
Areia Carbonática 2 - F	37,00	12,91
Areia Carbonática 2 - D	45,35	5,57

Fonte: Adaptado de Alves (2024)

Tabela 4 – Módulo de elasticidade correspondente a 50% da tensão de ruptura das Areias Carbonáticas obtidos pelo ensaio de compressão triaxial

Tensão confinante	Módulo de elasticidade correspondente a 50% da tensão de ruptura	
	Areia Carbonática 1	Areia Carbonática 2
50 kPa - Fofó	22,54	10,08
100 kPa - Fofó	15,68	11,34
200 kPa - Fofó	28,84	18,06
50 kPa - Denso	31,92	11,34
100 kPa - Denso	55,58	21,28
200 kPa - Denso	71,68	47,46

Fonte: Adaptado de Alves (2024)

3.2 Modelagem Numérica

Neste tópico, são apresentadas as metodologias adotadas para a calibração dos parâmetros experimentais obtidos por Alves (2024), utilizando modelagem bidimensional por meio do modelo axissimétrico. Adicionalmente, descreve-se o processo de desenvolvimento de uma turbina eólica *offshore* por meio de uma análise numérica tridimensional, com ênfase no processo construtivo e na malha adotada.

3.2.1 Retroanálise do ensaio de compressão triaxial

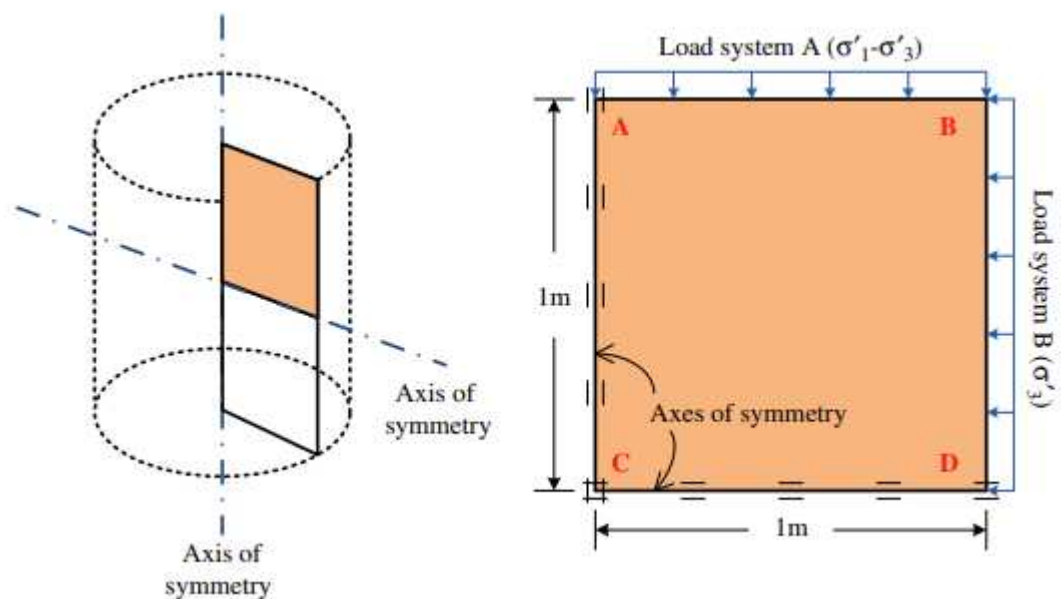
Os ensaios de compressão triaxial realizados em laboratório fornecem parâmetros de resistência e deformabilidade do solo. Contudo, o comportamento da amostra no software

pode divergir da resposta experimental, resultando em curvas tensão–deformação que não representam adequadamente a realidade.

Para que o comportamento do solo no ambiente numérico seja compatível com os resultados laboratoriais, é necessário calibrar os parâmetros do modelo constitutivo. Neste trabalho, a modelagem e calibração referentes ao ensaio triaxial foram realizadas no software PLAXIS®, versão V22.01, utilizando o módulo para análises bidimensionais (PLAXIS® 2D) e a metodologia proposta por Surarak (2012).

Embora o ensaio de compressão triaxial seja originalmente tridimensional, a fim de reduzir o tempo de processamento computacional, optou-se pela aplicação do modelo axissimétrico. Devido à simetria do sistema, considera-se a simetria em torno do eixo y, assumindo-se que as tensões e deformações sejam equivalentes na direção radial. A Figura 15 apresenta a simplificação adotada para a representação do ensaio triaxial em um modelo bidimensional.

Figura 15 – Modelo axissimétrico simplificado para o ensaio de compressão triaxial

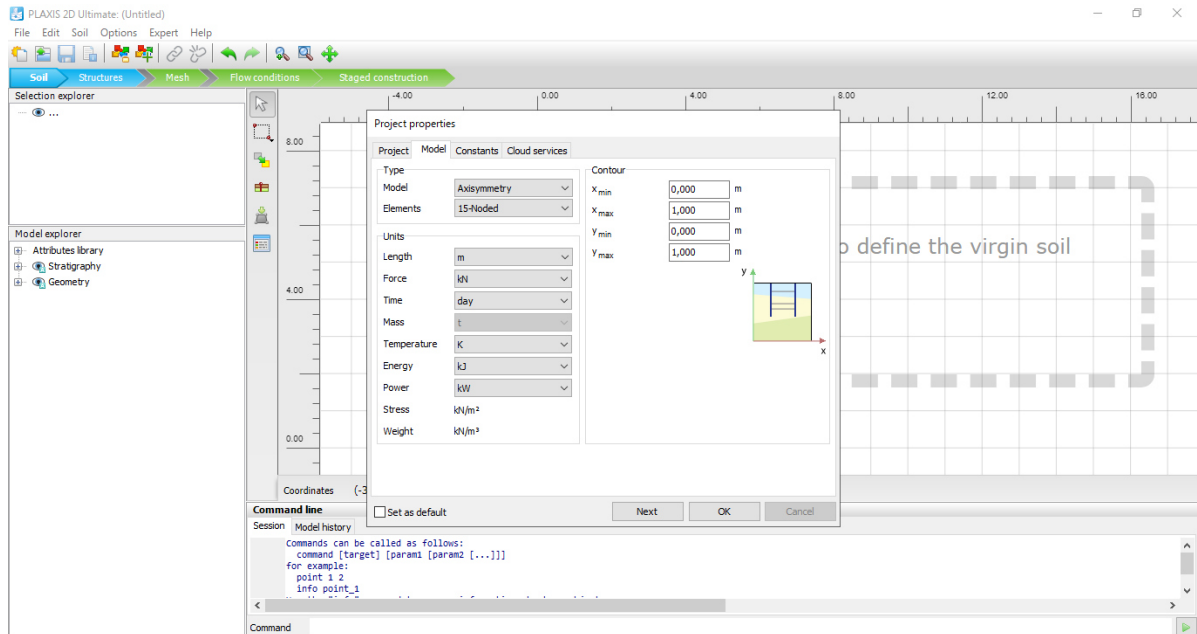


Fonte: Surarak (2012)

A modelagem numérica tem início com a escolha do modelo de análise, sendo adotado neste caso o modelo axissimétrico com elementos triangulares de 15 nós, como visto na Figura 16. Para as condições geométricas do problema, foram utilizadas dimensões unitárias nas direções x e y. Apesar da geometria apresentar valores não realistas para a execução do

ensaio, isso não compromete os resultados, uma vez que o solo é condicionado para não gerar tensões sobre si mesmo.

Figura 16 – Interface inicial do PLAXIS 2D: seleção do modelo e definição dos elementos

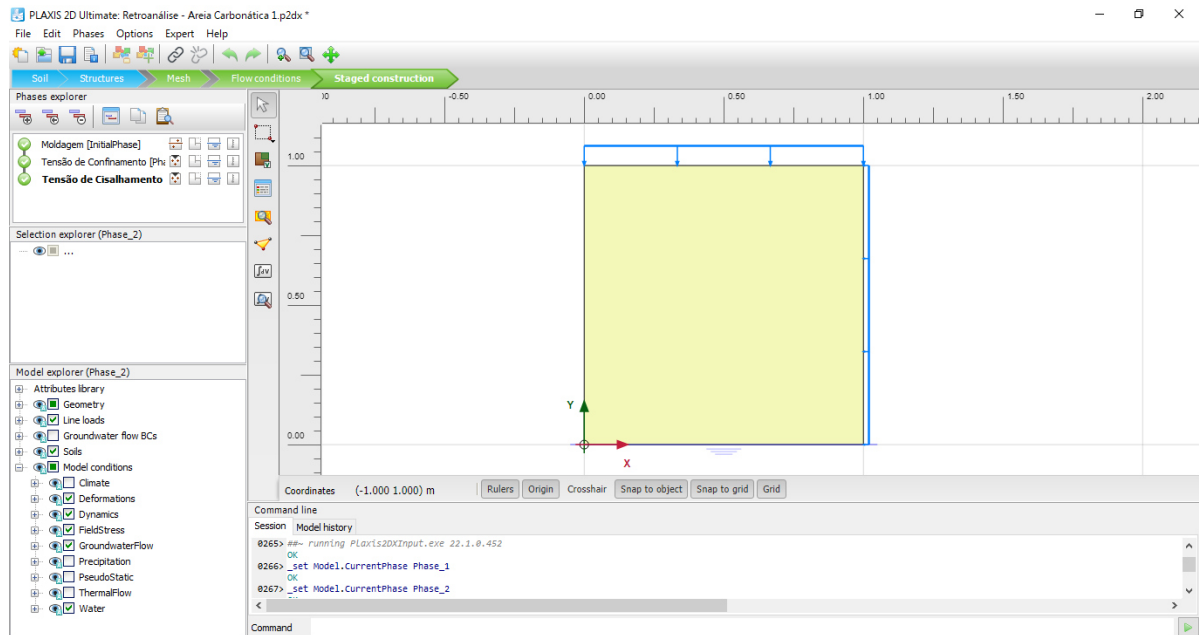


Fonte: Elaborado pelo autor.

Todas as funções relacionadas ao solo são manipuladas na aba “Soil”, que permite a criação de furos com a função *create borehole*, a definição da estratigrafia do maciço e a atribuição de parâmetros a cada material. Como se trata de uma retroanálise, apenas um material é considerado. Em paralelo, a aba “Structures” possibilita a aplicação de carregamentos sobre o solo, utilizando as funções *create line* e *create line load* para distribuir tensões sobre a parte superior, lateral e direita do elemento geométrico, representando tanto a tensão confinante quanto a tensão de cisalhamento do ensaio triaxial.

A discretização do solo é realizada na aba “Mesh”, por meio da função *Generate Mesh*, que permite selecionar o tipo de malha mais adequado ao problema. Neste estudo, optou-se pela malha “Medium”, garantindo elementos menores e maior refinamento nas regiões próximas às tensões e às condições de contorno, localizadas no canto esquerdo e na base da geometria.

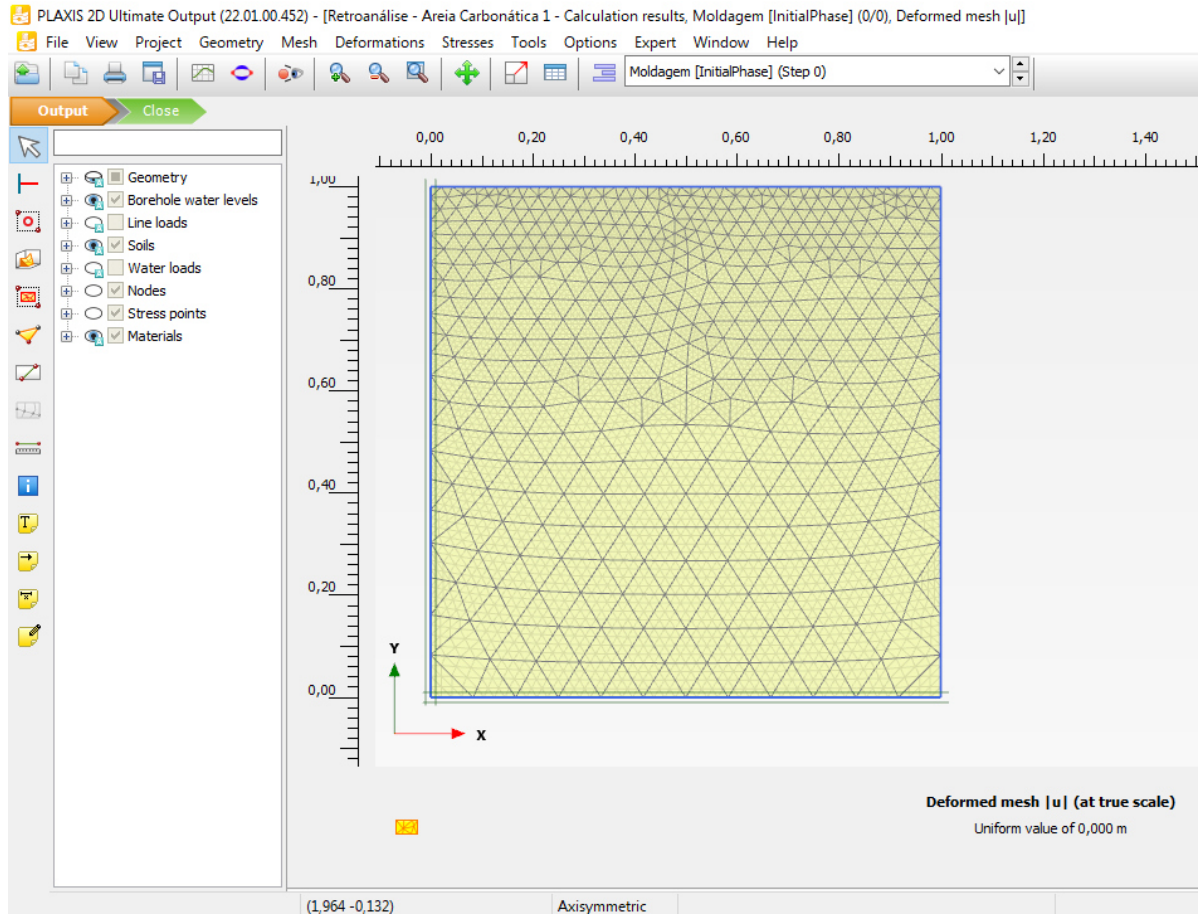
Figura 17 – Interface do PLAXIS 2D input



Fonte: Elaborado pelo autor.

O procedimento de simulação é conduzido na aba “Staged Construction”, que oferece acesso a todos os elementos via model explorer. São definidos os estágios de carga do ensaio triaxial, sendo *Phase 1* responsável pelo incremento das tensões de confinamento e *Phase 2* pela aplicação da tensão de cisalhamento até a ruptura. Nessa etapa, também são estabelecidas as condições de contorno do sistema: *BoundaryXMin* e *BoundaryYMin* como *Normally fixed*, e *BoundaryXMax* e *BoundaryYMax* como *Free*, garantindo que o modelo represente corretamente o comportamento do solo sob carregamento triaxial.

Figura 18 – Interface do PLAXIS output e apresentação da malha discretizada



Fonte: Elaborado pelo autor.

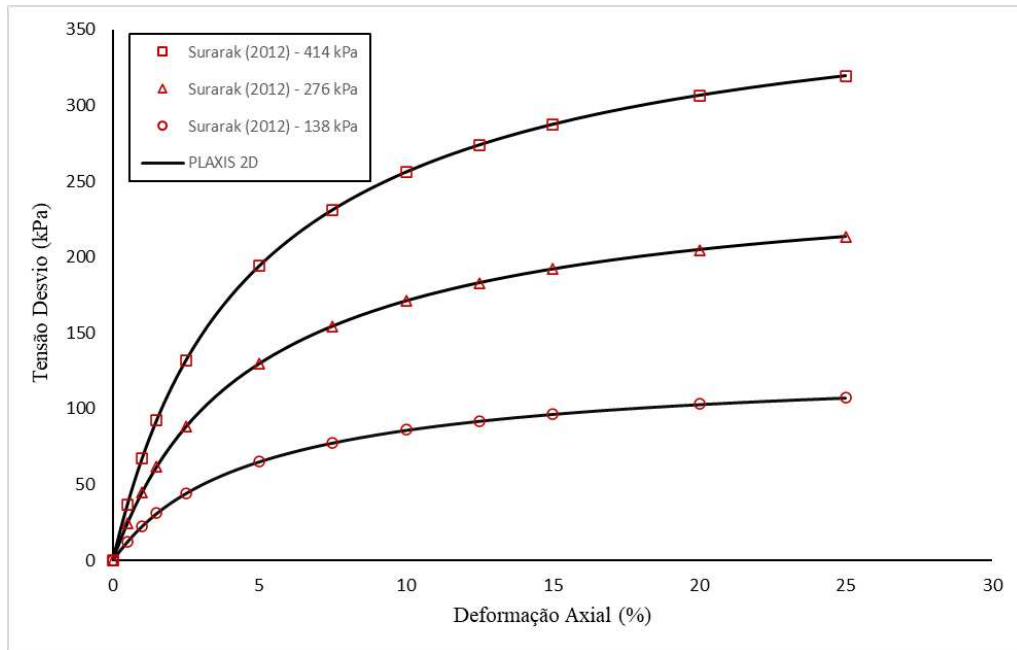
Para confirmar a confiabilidade e a precisão do método utilizado, realizou-se uma validação por meio do modelo axissimétrico apresentado, com base nos ensaios de compressão triaxial simulados por Surarak (2012). O solo utilizado nesta análise se trata das argilas moles de Bangkok, apresentado na Tabela 5. A sobreposição das curvas, apresentada na Figura 19, confirma a consistência e a precisão da metodologia adotada.

Tabela 5 – Parâmetros de entrada considerados para a argila mole de Bangkok, de acordo com Surarak (2012)

ϕ' (°)	ψ' (°)	c' (kN/m ²)	E_{so}^{ref} (kN/m ²)	E_{oed}^{ref} (kN/m ²)	E_{ur}^{ref} (kN/m ²)	R_f	m	K_{o}^{nc}	ν_{ur}
27	0	1	690	635	2070	0,9	1	0,55	0,2

Fonte: Adaptado de Surarak (2012)

Figura 19 – Validação dos resultados simulados com base em Surarak (2012)



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2 Análise tridimensional de uma monopile offshore

Para a modelagem do sistema solo-estrutura, será utilizada a versão tridimensional do PLAXIS® 3D. Nessa etapa, será conduzida uma análise paramétrica sob os aspectos estrutural e geotécnico, a fim de avaliar a influência do tipo de solo carbonático no desempenho da estrutura. A partir das retroanálises realizadas, foram determinados os parâmetros de entrada que servirão de base para a definição das camadas de solo onde a *monopile* será assentada.

A metodologia adotada fundamenta-se no estudo de Brinkgreve et al. (2020), que também serviu como referência para validação do modelo numérico. Nesse trabalho, foi desenvolvido um sistema solo-estrutura representativo de uma turbina eólica *offshore*, considerando a areia de Dunkirk como material de fundação. Os parâmetros de entrada desse solo são apresentados na Tabela 6.

A interface gráfica do PLAXIS 3D é semelhante à do PLAXIS 2D, não havendo alterações significativas nas etapas iniciais da modelagem. Para a criação da *monopile*, foi adotado um modelo *Full* com elementos de 10 nós. Considerando a complexidade do sistema solo-*monopile*, será aplicada uma simplificação por meio de um modelo simétrico, no qual apenas metade do problema será representada, permitindo um ganho significativo de tempo computacional.

Tabela 6 – Parâmetros de entrada da areia de Dunkirk para o modelo HS Small, com base em Brinkgreve et al. (2020)

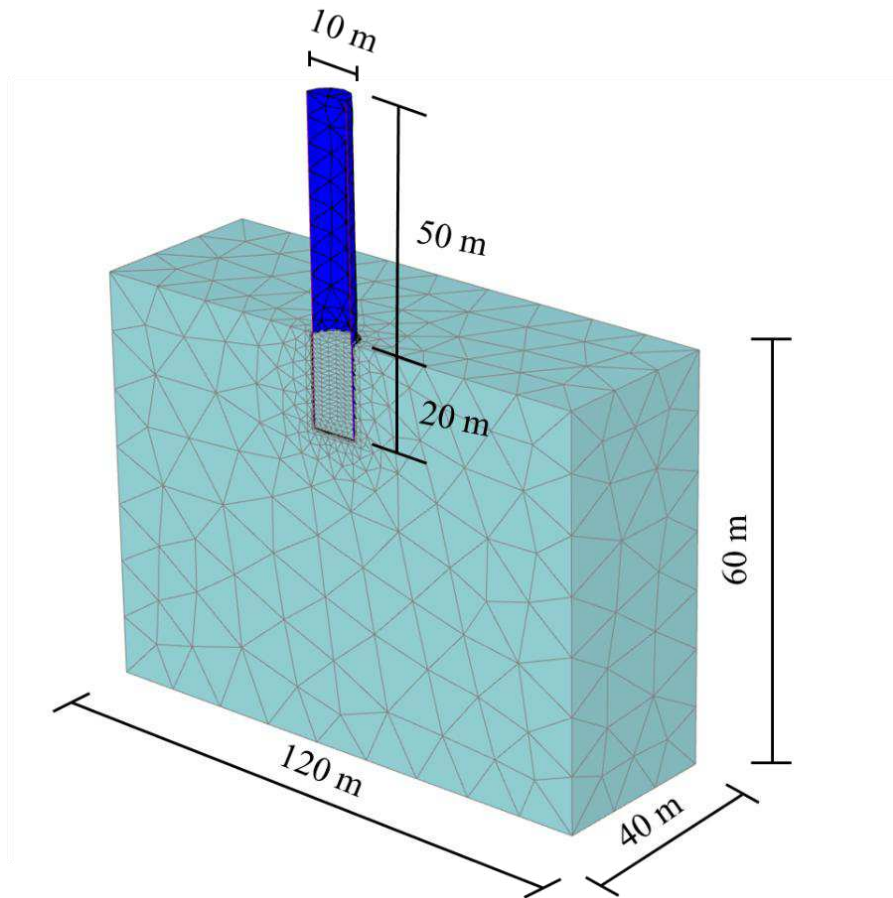
Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Peso específico efetivo	γ'	10	kN/m ³
Rigidez secante de referência em compressão triaxial	E_{50}^{ref}	45000	kN/m ²
Rigidez tangente de referência em adensamento edométrico primário	E_{oed}^{ref}	45000	kN/m ²
Rigidez de referência em recarregamento/descarga triaxial	E_{ur}^{ref}	135000	kN/m ²
Razão de Poisson em recarregamento/descarga	ν_{ur}	0,2	-
Módulo de cisalhamento em pequenas deformações de referência	G_0^{ref}	194000	kN/m ²
Deformação na qual G é reduzido para 70%	$\gamma_{0.7}$	1,25E-04	-
Coessão efetiva	c'	0,1	kN/m ²
Ângulo de atrito efetivo	ϕ'	39	°
Ângulo de dilatância	Ψ	9	°
Dependência da rigidez com a tensão	m	0,5	-
Relação de tensões K_0 em condição normalmente adensada	K_0^{nc}	0,3707	-
Razão de atrito	R_f	0,9	-

Fonte: Adaptado de Brinkgreve (2020)

As dimensões do maciço foram definidas conforme o modelo utilizado para validação, sendo de 120 m × 40 m × 90 m. Essas dimensões ampliadas foram escolhidas considerando o grande porte das *monopiles*, de modo a minimizar os efeitos de contorno e garantir maior precisão nos resultados.

A *monopile* foi construída na aba “Structures” a partir de uma policurva derivada de uma semicircunferência, seguindo a metodologia adotada no modelo. Essa policurva originou um elemento de superfície que, ao ser extrudado de acordo com as dimensões estabelecidas, ou seja, altura acima do leito marinho (H = 50 m), comprimento embutido (L = 20 m), diâmetro externo (D = 10 m) e espessura da parede (t = 0,091 m), definiu a geometria completa da torre e do trecho embutido da *monopile*, conforme ilustrado na Figura 20. O material atribuído à estrutura foi o aço, considerado linear elástico, com módulo de Young igual a 200×10^6 kN/m² e coeficiente de Poisson igual a 0,3.

Figura 20 – Dimensões do maciço de solo e da *monopile* utilizada no modelo

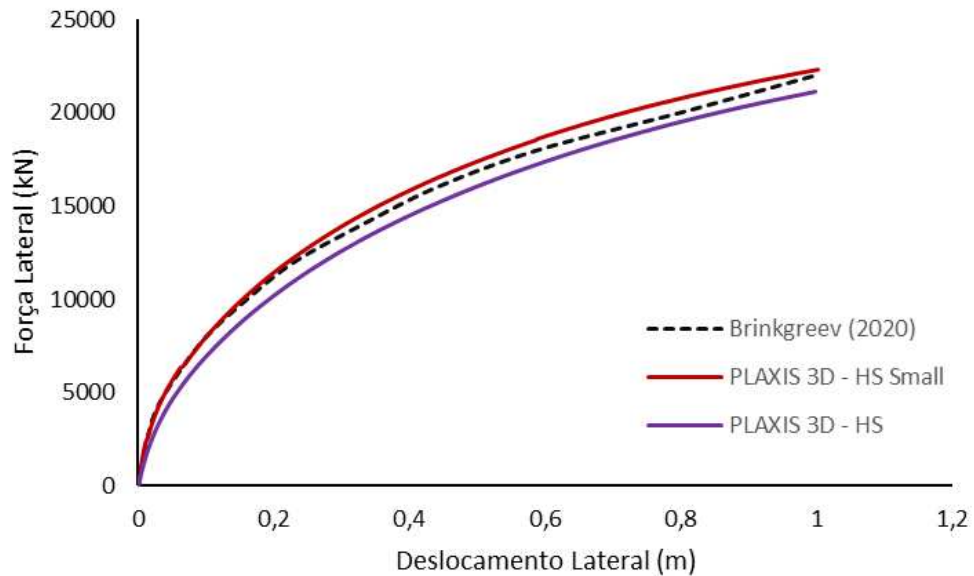


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 21 apresenta o gráfico de força lateral \times deslocamento lateral, comparando os valores obtidos por Brinkgreve et al. (2020) com os resultados deste trabalho. As condições de contorno foram definidas de modo que, no topo da *monopile*, fosse aplicado um deslocamento lateral de 9,9 m. No entanto, os valores de deslocamento horizontal considerados referem-se ao nível do leito marinho ($Z = 0$). Observa-se na Figura 21 a boa concordância entre as curvas obtidas, o que confirma a confiabilidade do modelo numérico desenvolvido.

Feita a calibração e validação do modelo, para avaliar o comportamento de turbinas eólicas *offshore* assentadas em solos carbonáticos, foram desenvolvidos modelos numéricos com diferentes configurações geométricas da *monopile* e da torre. As combinações utilizadas consideram o diâmetro da *monopile* (D_{out}), o comprimento embutido no solo (L) e a altura da torre (h). A análise comparativa dos resultados será realizada com base nas razões L/D_{out} e h/L , onde será realizado o estudo paramétrico, verificando quais parâmetros oferecem maior ou menor impacto nos resultados.

Figura 21 – Comparação dos resultados simulados para a turbina eólica *offshore* com os obtidos por Brinkgreve et al. (2020)



Fonte: Elaborado pelo autor

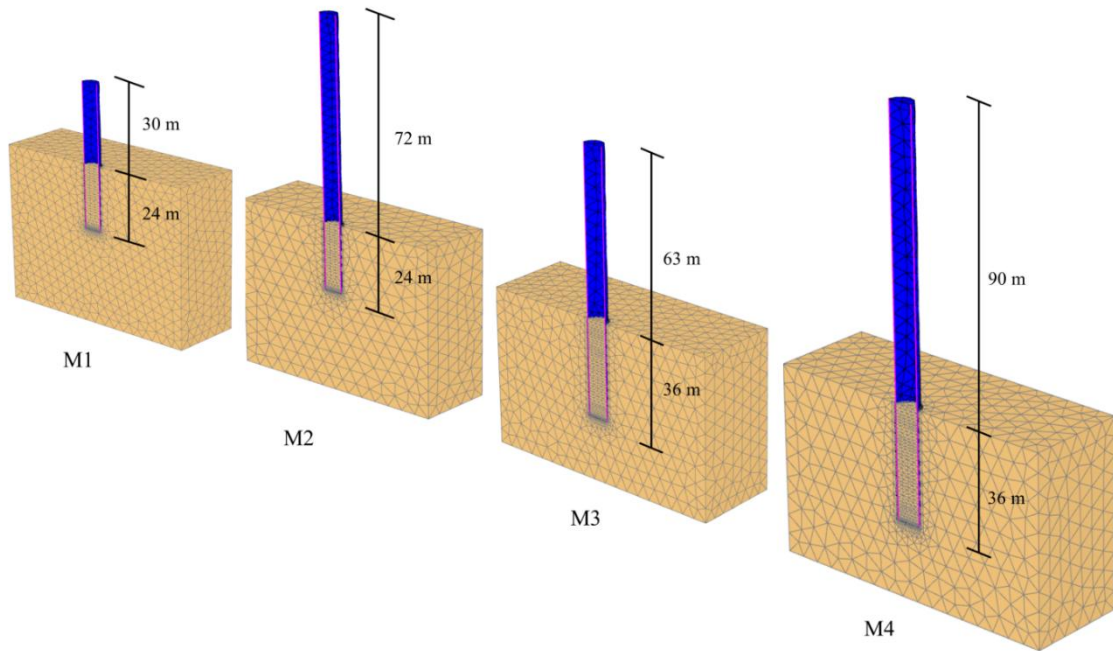
A escolha das geometrias analisadas foi baseada em Brinkgreve et al. (2020), adotando-se as razões L/D_{out} iguais a 2 e 4. Para cada razão considerada, o valor de h/L variou de acordo com as dimensões selecionadas. A Tabela 7 apresenta os modelos numéricos utilizados, organizados conforme a razão analisada. Observa-se que os pares de modelos (1 e 5), (2 e 6), (3 e 7) e (4 e 8) mantêm constantes a altura da torre e o diâmetro externo da *monopile*, diferindo apenas no comprimento embutido no solo.

Tabela 7 – Parâmetros geométricos dos modelos de *monopiles* analisados

Modelo	Parâmetros					
	h (m)	L (m)	D_{out} (m)	t (m)	h/L	L/D_{out}
M1	30	24	6	0,08	1,25	4,0
M2	72	24	6	0,08	3,00	4,0
M3	63	36	9	0,08	1,75	4,0
M4	90	36	9	0,08	2,50	4,0
M5	30	12	6	0,08	2,50	2,0
M6	72	12	6	0,08	6,00	2,0
M7	63	18	9	0,08	3,50	2,0
M8	90	18	9	0,08	5,00	2,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 – Esquema ilustrativo das turbinas eólicas *offshore* referentes aos modelos 1 ao 4



Fonte: Elaborado pelo autor.

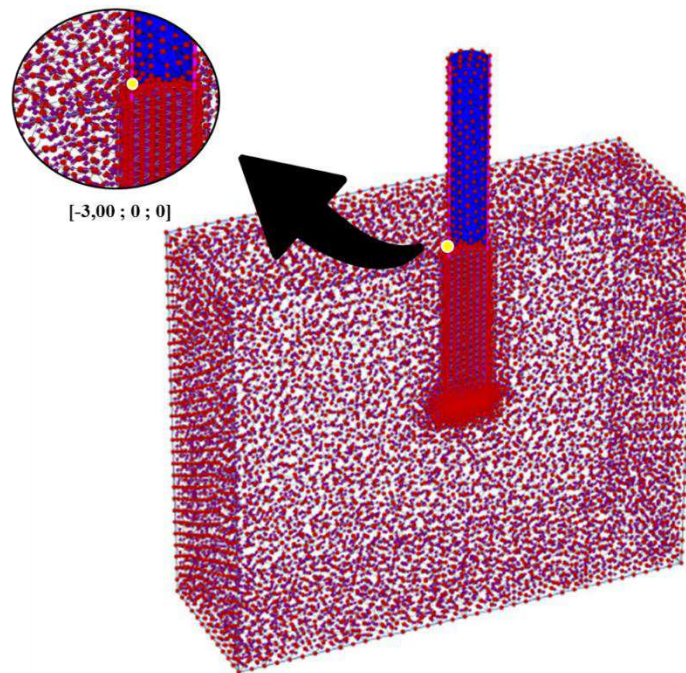
Para garantir a eficiência numérica dos modelos e a confiabilidade das respostas simuladas, foi conduzido um estudo de sensibilidade da malha. Tomando como referência M1 apresentado na Tabela 7, diferentes níveis de refinamento foram testados, mantendo-se constante a geometria do maciço de solo adotado, com as dimensões de 72 m x 24 m x 60 m. A escolha desse modelo deve-se ao fato de apresentar uma configuração geométrica mais compacta e com dimensões moderadas, com relações h/L e L/D_{out} típicas de projetos de *monopiles*, o que reduz a ocorrência de elevados gradientes de tensão e deformação ao longo da estrutura. Dessa forma, torna-se possível avaliar de maneira mais isolada a influência do refinamento da malha nos resultados numéricos, evitando que efeitos geométricos extremos ou instabilidades locais interfiram na análise e assegurando maior robustez e consistência ao processo de calibração numérica.

O software disponibiliza cinco tipos de malha: *Very Coarse*, *Coarse*, *Medium*, *Fine* e *Very Fine*, sendo cada uma com distintos números de elementos e pontos de tensão. A fim de avaliar a influência desse refinamento nos resultados, foram realizadas simulações considerando o efeito da instalação da *monopile* no solo, com a aplicação de um carregamento horizontal.

Para essa avaliação, utilizou-se um mesmo nó de referência para todos os níveis de refinamento, localizado na coordenada (-3,00; 0; 0), correspondente à superfície lateral da

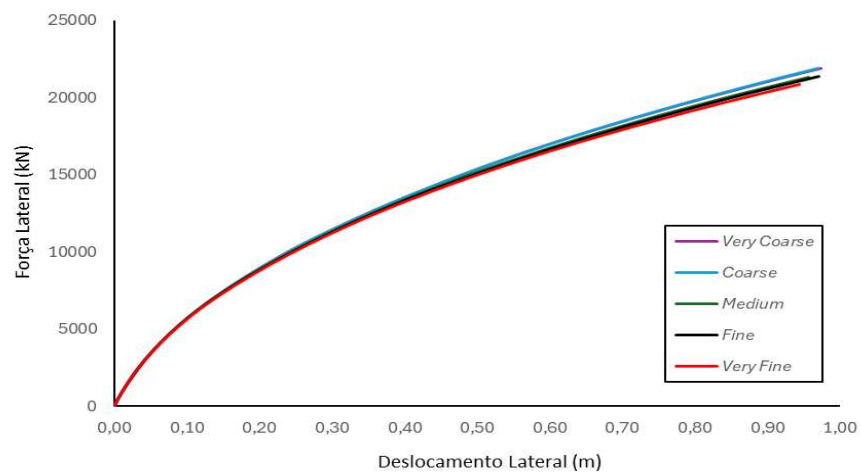
monopile, conforme apresentado na Figura 23. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 24, na qual se observa que as curvas tendem à convergência, sem apresentar dispersões significativas, mesmo quando comparadas as malhas mais grosseiras com as mais refinadas. Diante desse comportamento, optou-se pela adoção da malha do tipo “*Fine*”, a fim de obter uma discretização mais adequada dos elementos, associada a um tempo computacional intermediário

Figura 23 – Nó correspondente ao ponto de análise da sensibilidade da malha



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 – Efeito do refinamento da malha na resposta numérica do modelo



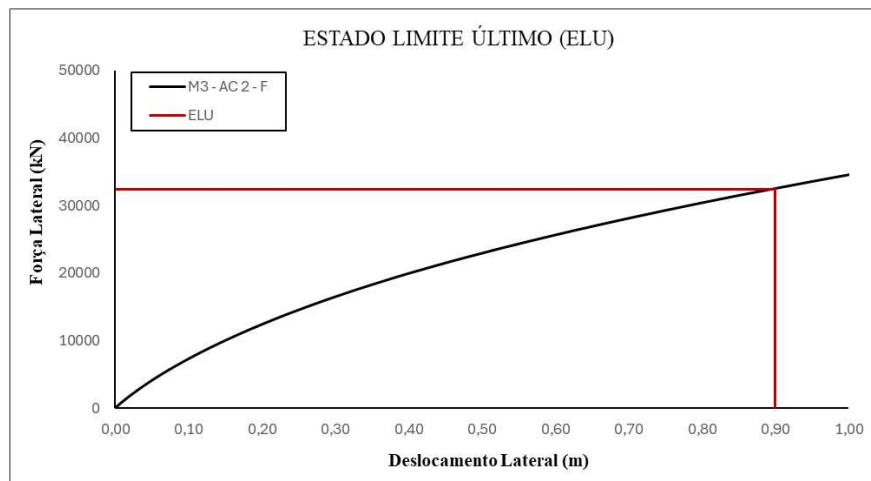
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Avaliação conforme as Diretrizes Normativas

A partir das curvas força lateral versus deslocamento lateral, serão avaliados os estados limites último (ELU) e de serviço (ELS) da estrutura, conforme os critérios estabelecidos pela DNV (2021) e utilizado por Brinkgreve et al. (2020), a fim de verificar se as configurações estruturais adotadas são compatíveis com a implantação de turbinas eólicas em solos arenosos carbonáticos.

Para a avaliação do Estado Limite Último (ELU), adotou-se como critério o deslocamento lateral máximo admissível da estrutura. De acordo com a DNV, esse deslocamento máximo corresponde a 0,1 vezes o diâmetro (D) da *monopile*. A determinação da carga associada ao ELU é ilustrada na Figura 25, para a amostra AC2, classificada como solo *offshore* com elevado teor de carbonato de cálcio, com aproximadamente 89% de teor de CaCO_3 .

Figura 25 – Determinação da carga correspondente ao Estado Limite Último (ELU).

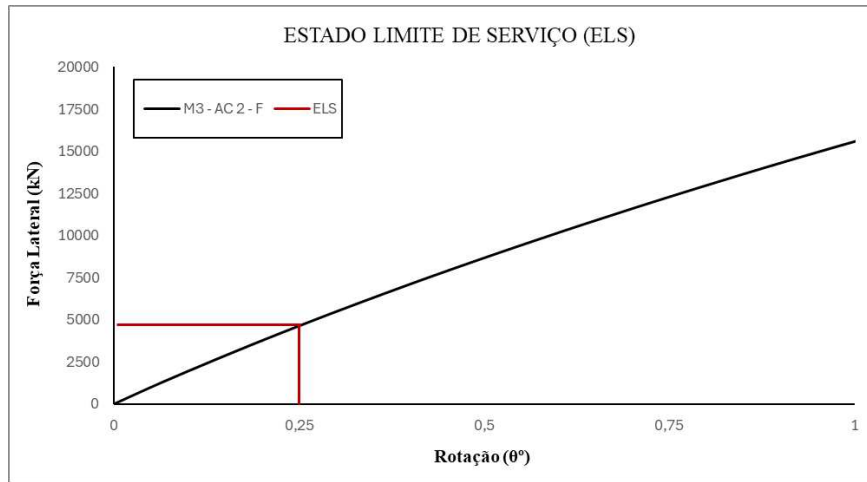


Fonte: Elaborado pelo autor.

A determinação da carga correspondente ao Estado Limite de Serviço (ELS), diferentemente do ELU, está associada à rotação desenvolvida pela *monopile*. De acordo com a DNV (2021), a carga referente ao ELS é definida no ponto em que a *monopile* atinge uma rotação de $0,25^\circ$. A Figura 26 ilustra o procedimento adotado para a obtenção dessas cargas.

A rotação no leito marinho foi determinada a partir do deslocamento da própria torre, considerando-se os deslocamentos obtidos no topo da *monopile* e no leito marinho. A partir desses valores, calculou-se o deslocamento relativo e , em conjunto com a altura h , estimou-se a rotação por meio da tangente do ângulo correspondente ao triângulo retângulo formado.

Figura 26 – Determinação da carga correspondente ao Estado Limite de Serviço (ELS).



Fonte: Elaborado pelo autor

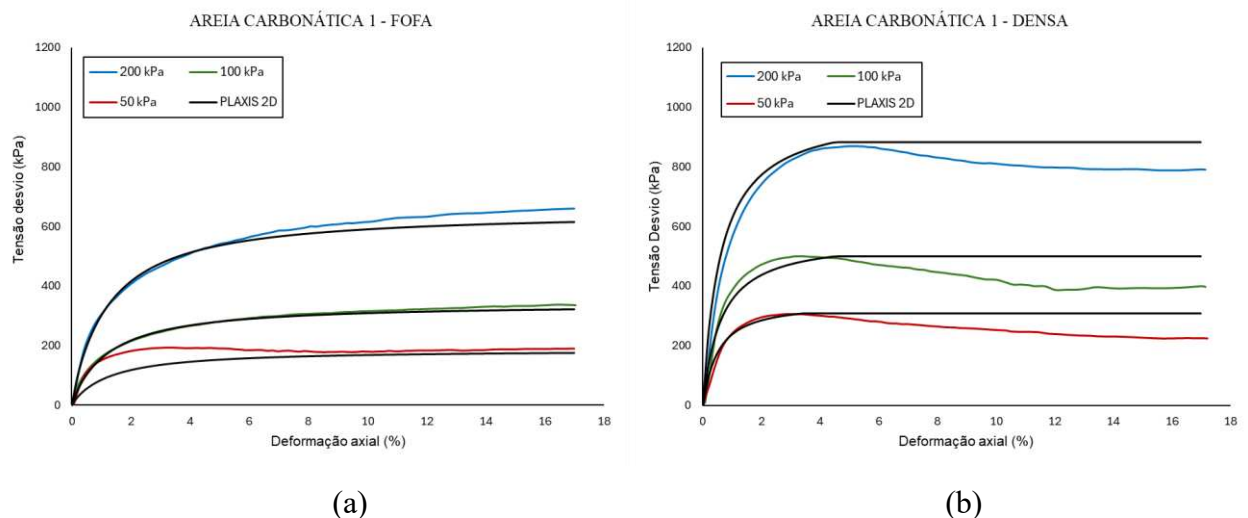
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico, serão apresentados e discutidos os resultados da análise numérica, incluindo a definição dos parâmetros de entrada utilizados no software para os solos estudados, assim como a realização de uma análise paramétrica aplicada a diferentes modelos de estrutura *offshore*, compostos pelo conjunto *monopile* e torre.

4.1 Retroanálise do Ensaio de Compressão Triaxial

Com base nos ensaios de compressão triaxial realizados, procedeu-se à retroanálise dos resultados experimentais. Os parâmetros de solo obtidos em laboratório foram utilizados como parâmetros de entrada no software, gerando curvas aproximadas das observadas nos ensaios reais. Para alcançar uma correspondência mais fiel ao comportamento tensão-deformação, esses parâmetros foram ajustados, de modo a garantir uma melhor correspondência entre as curvas numéricas e experimentais, conforme apresentado nas Figuras 27 e 28.

Figura 27 – Curvas tensão x deformação retroanalizadas para a Areia Carbonática 1, considerando: (a) estado fofo e (b) estado compactado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 27, é apresentado o comportamento da AC 1 a partir do ajuste realizado no software. Observa-se que, para a areia no estado fofo, as curvas correspondentes às tensões

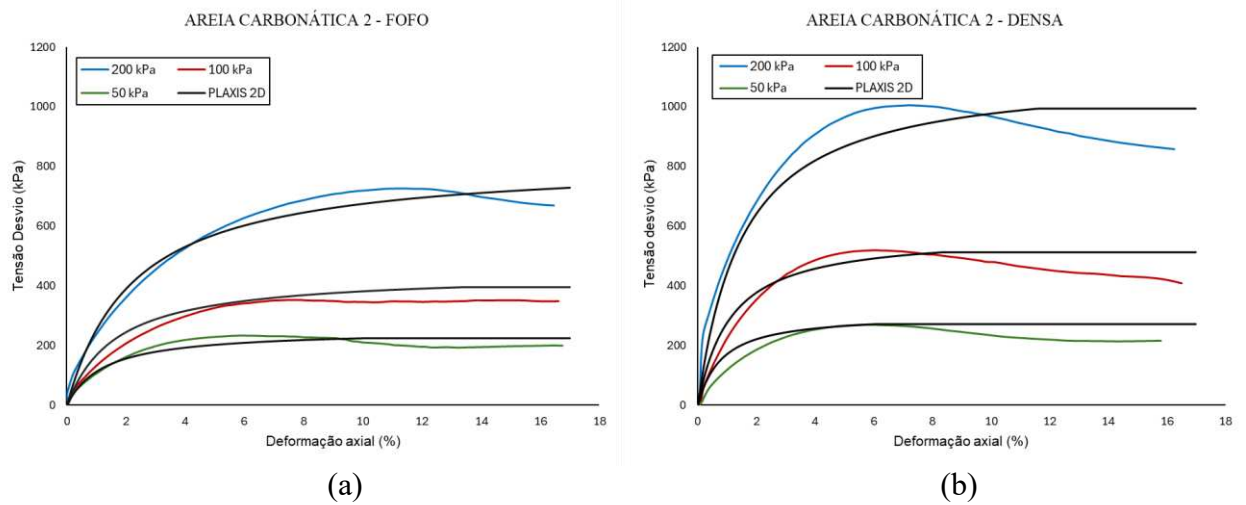
de confinamento de 200 kPa e 100 kPa apresentam melhor correspondência, sendo praticamente sobrepostas pela curva gerada pelo modelo numérico. Entretanto, para a tensão de 50 kPa, essa correspondência não ocorre integralmente, pois as curvas passam a se aproximar apenas após cerca de 9% de deformação, enquanto nas deformações iniciais o solo apresenta uma rigidez maior que a prevista pelo ajuste. Esse comportamento pode estar associado à presença de uma possível cimentação entre os grãos, que tende a aumentar a rigidez inicial devido à maior ligação entre as partículas.

No estado compacto, o comportamento do solo também é representado pelo software. Diferentemente da areia fofa, cujo nível de resistência tende a se manter aproximadamente constante após a ruptura, a areia compacta apresenta uma tensão de pico, correspondente ao instante em que ocorre a ruptura do solo. Após esse ponto, observa-se uma perda progressiva de resistência, caracterizando o trecho de tensões residuais, que são inferiores à tensão de pico. Em razão desse comportamento pós-ruptura, verifica-se uma divergência entre as curvas retroanalizadas e as experimentais após o pico de resistência no estado compacto, justificado pelo modelo HS adotado, pois não reproduz o comportamento de amolecimento do solo.

Na Figura 28, é apresentado o ajuste realizado no software para a AC 2, também representado pela curva preta. Para a areia em estado fofo, foi possível obter uma boa concordância entre as curvas retroanalizadas e as experimentais nas diferentes tensões de confinamento. Embora a sobreposição tenha sido satisfatória, para realizar uma análise mais sofisticada, adotou-se, como critério de ajuste, a priorização de uma maior proximidade no trecho inicial das deformações, a fim de garantir valores mais representativos do módulo de elasticidade.

De maneira análoga, as curvas experimentais no estado compacto apresentaram picos de resistência mais pronunciados, comportamento típico de areia no estado compacto, especialmente para a tensão de 200 kPa. Para evitar que as curvas retroanalizadas se tornassem excessivamente dispersas entre si, aplicou-se a mesma metodologia mencionada anteriormente. Nas tensões de confinamento de 100 kPa e 200 kPa, observa-se maior aproximação entre as curvas experimental e retroanalizada, o que não ocorre de forma satisfatória na tensão de 50 kPa. Esse comportamento decorre das diferenças entre os valores do módulo de elasticidade a 50% da tensão de ruptura para cada nível de confinamento. Dessa forma, para representar adequadamente as três tensões de confinamento, adota-se um valor médio aproximado.

Figura 28 – Curvas tensão x deformação retroanalizadas para a Areia Carbonática 2, considerando: (a) estado fofo e (b) estado compactado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a retroanálise das curvas, os parâmetros ajustados da AC 1 e AC 2, nos estados fofo e compacto, foram reunidos e apresentados na Tabela 8. A partir desses parâmetros, torna-se possível representar de forma mais realista o comportamento das turbinas eólicas assentes em solos carbonáticos, permitindo avaliar não apenas o desempenho da *monopile*, mas também a influência direta do solo na resposta estrutural.

De modo geral, os parâmetros retroanalizados mostraram boa concordância com aqueles obtidos nos ensaios laboratoriais, tanto em termos de resistência quanto de deformabilidade. Conforme indicado na Tabela 3, os parâmetros de resistência apresentam valores muito próximos aos experimentais, ao passo que, conforme apresentado na Tabela 4, observa-se que os módulos de elasticidade correspondentes a 50% da tensão de ruptura situam-se na mesma ordem de grandeza dos resultados de laboratório.

Tabela 8 – Parâmetros de resistência e de deformabilidade obtidos através da retroanálise do ensaio de compressão triaxial

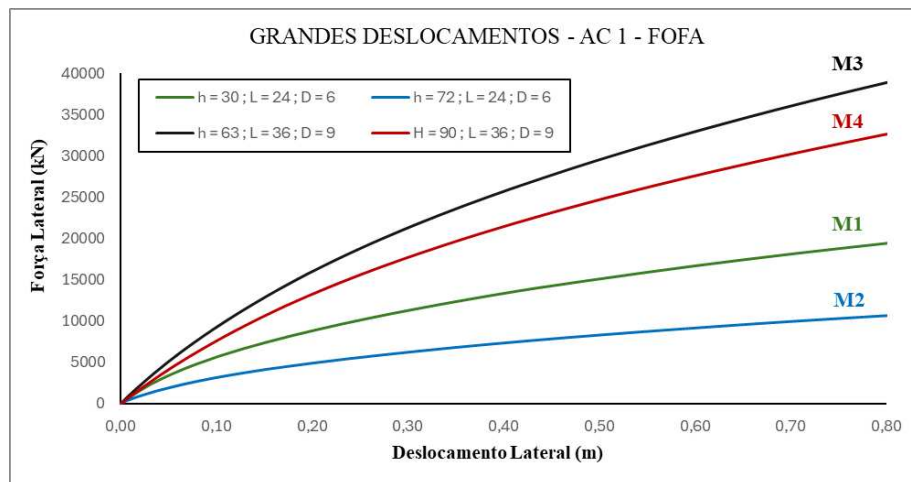
Amostras	Parâmetros										
	γ (kN/m ³)	ϕ' (°)	ψ' (°)	c' (kN/m ²)	E_{so}^{ref} (kN/m ²)	E_{oed}^{ref} (kN/m ²)	E_{ur}^{ref} (kN/m ²)	R_f	m	K_o^{nc}	v_{ur}
AC 1 - F	15,2	37,5	0,0	7,5	15000	15000	45000	1,0	1,0	0,42	0,2
AC 1 - C	17,6	41,0	5,0	27,0	55000	55000	165000	0,9	1,0	0,39	0,2
AC 2 - F	14,3	39,0	4,0	13,0	11000	11000	33000	0,9	0,5	0,35	0,2
AC 2 - C	17,0	45,0	4,0	6,0	30000	30000	90000	0,9	0,5	0,35	0,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Modelagem Tridimensional de *Monopiles Offshore*

A partir dos modelos desenvolvidos e dos parâmetros geotécnicos obtidos por meio da retroanálise, foram realizadas as simulações do sistema, com o objetivo de avaliar o comportamento das *monopiles* assentes nos solos carbonáticos AC 1 e AC 2, ambos no estado fofo e compacto. Para conduzir essas modelagens, adotaram-se dois critérios de análise da *monopile*: o de grandes deslocamentos e o de pequenos deslocamentos na superfície do leito marinho, conforme ilustrado nas Figuras 29 e 30, representados pelas curvas de força lateral versus deslocamento horizontal.

Figura 29 – Comportamento da *monopile* sob grandes deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 4$ para Areia Carbonática 1 no estado fofo



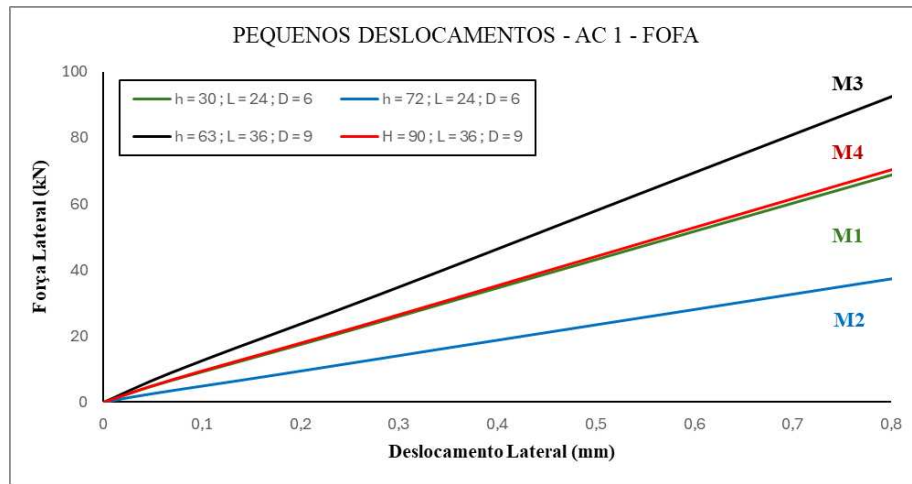
Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base na Figura 29 e nos modelos apresentados na Tabela 7, observa-se que a relação h/L não apresenta correlação direta entre seu aumento e uma maior rigidez. Isso é evidenciado pelo fato de a do modelo M2 ($h/L = 3,00$) apresentar menor rigidez quando comparada à curva do modelo M1 ($h/L = 1,25$), comportamento igualmente verificado entre as curvas dos modelos M3 e M4. Essa tendência pode ser explicada pela diferença dos diâmetros adotados, fazendo com que *monopiles* com maior diâmetro apresentem maior rigidez global. Isso é confirmado pelas curvas M3 e M4, associadas a um diâmetro de 9 metros, enquanto as curvas verde e azul correspondem a *monopiles* com diâmetro de 6 metros.

Para o comportamento da *monopile* submetida a pequenos deslocamentos laterais, apresentado na Figura 30, observa-se que as curvas seguem a mesma tendência registrada para

os grandes deslocamentos: a curva de maior rigidez, representada pela curva do modelo M3, mantém-se acima das curvas de menor rigidez, representadas pelas curvas dos modelos M1 e M2. No entanto, nota-se que as curvas M4 e M1 estão praticamente sobrepostas, indicando um comportamento equivalente entre os dois modelos.

Figura 30 – Comportamento da *monopile* sob pequenos deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 4$ para Areia Carbonática 1 no estado fofo



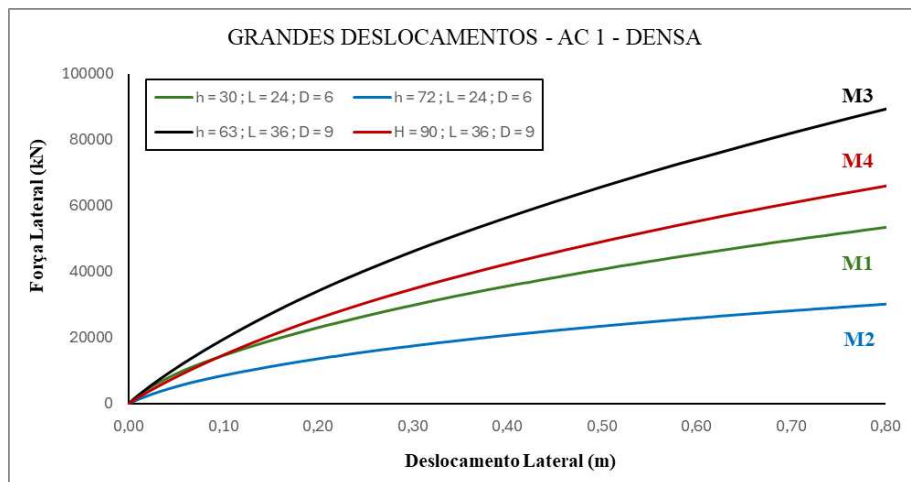
Fonte: Elaborado pelo autor.

O Modelo (M1), correspondente à curva verde, apresenta o menor comprimento de torre (30 metros) e diâmetro de 6 metros, enquanto o Modelo 4 (M4), representado pela curva vermelha, possui o comprimento de torre intermediário (63 metros) e diâmetro de 9 metros. No caso de M4, embora o maior diâmetro proporcione uma rigidez estrutural superior, a carga aplicada no topo da torre gera um momento fletor significativamente maior na *monopile*, efeito que não ocorre no M1 devido ao comprimento da torre ser três vezes menor. Dessa forma, apesar da maior rigidez global do sistema, o comportamento para pequenos deslocamentos pode se tornar semelhante ao de um sistema menos rígido, em função da influência da altura da torre.

Após a avaliação do comportamento da *monopile*, será analisada também sua resposta quando assentada em solos carbonáticos no estado compacto, de modo a identificar diferenças e similaridades e compreender quais parâmetros são determinantes para um desempenho mais favorável. Nas Figuras 31 e 32 são apresentados os comportamentos das *monopiles* instaladas na Areia Carbonática 1 em estado compacto, considerando tanto os grandes quanto os pequenos deslocamentos no leito marinho.

Com base na Figura 31, observa-se que o comportamento geral das curvas se mantém, mesmo quando a *monopile* está inserida em areia carbonática no estado compacto. A relação h/L novamente não demonstra uma tendência clara de aumento de rigidez com o aumento desse parâmetro, o que pode ser visto ao comparar a curva do modelo M2 ($h/L = 3,00$) com a curva do modelo M1 ($h/L = 1,25$), bem como o mesmo padrão entre as curvas dos modelos M3 e M4. Entretanto, por se tratar de um solo mais denso, verifica-se que são necessárias forças laterais significativamente maiores para produzir deslocamentos equivalentes aos observados no estado menos compacto, evidenciando a maior resistência do material à mobilização.

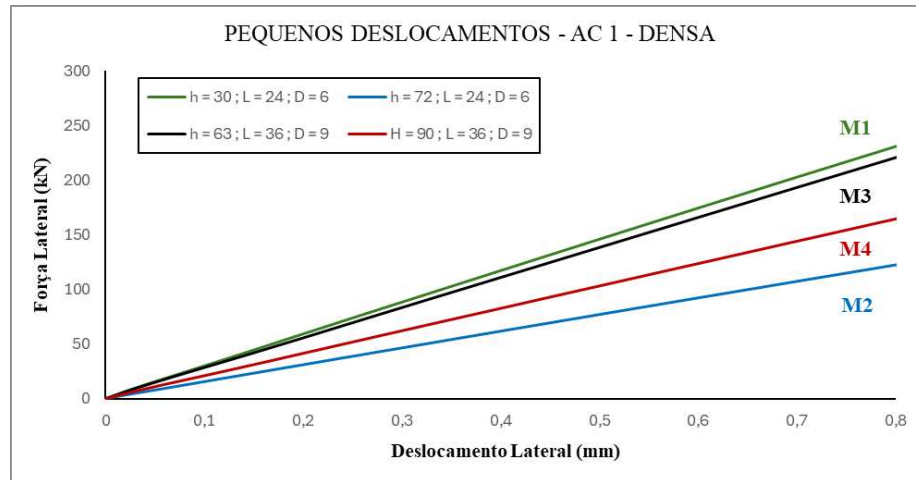
Figura 31 – Comportamento da *monopile* sob grandes deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 4$ para Areia Carbonática 1 no estado compacto



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a Figura 32, observa-se um comportamento distinto daquele verificado para a areia no estado fofo. As curvas preta, vermelha e azul mantêm a mesma ordem relativa; entretanto, a curva verde, correspondente à M1, supera a curva preta, associada à M4. Esse resultado ocorre porque, embora o padrão geral de comportamento seja semelhante ao observado na areia fofo, a condição densa exige cargas laterais significativamente maiores para mobilizar o deslocamento da *monopile* e do solo circundante. Dessa forma, como o Modelo 4 possui uma torre mais baixa, o momento fletor transmitido à base da *monopile* é reduzido, demandando uma carga ainda maior para gerar o mesmo deslocamento lateral. Isso faz com que, mesmo pertencendo a um sistema com maior diâmetro, sua rigidez mobilizada seja superada por M1.

Figura 32 – Comportamento da *monopile* sob pequenos deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 4$ para Areia Carbonática 1 no estado compacto



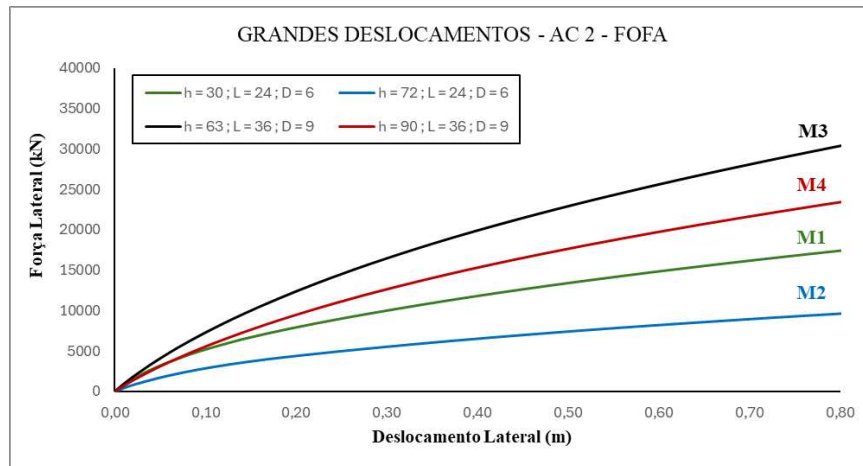
Fonte: Elaborado pelo autor.

Dando continuidade à avaliação do desempenho das *monopiles*, procede-se à aplicação da mesma metodologia de análise anteriormente empregada para a Areia Carbonática 1, que apresenta teor intermediário de CaCO_3 , em torno de 49%, agora direcionada à Areia Carbonática 2, de origem *offshore*. Essa segunda areia mostra-se mais representativa das condições típicas do leito marinho, tanto por sua origem quanto pelo elevado teor de CaCO_3 , da ordem de 89%, possibilitando uma comparação mais consistente do comportamento das fundações em ambiente carbonático. Na sequência, são apresentadas as curvas correspondentes às respostas obtidas para essa condição, conforme ilustrado nas Figuras 33 e 34.

A partir da análise da Figura 33, observa-se que, para os grandes deslocamentos, o comportamento da *monopile* na Areia Carbonática 2 se mantém praticamente idêntico ao obtido para a Areia Carbonática 1. As curvas apresentam elevada similaridade, o que era esperado, considerando que os parâmetros geotécnicos obtidos pela retroanálise para ambas as areias não diferem de maneira significativa. Assim, a resposta lateral segue o mesmo padrão geral de rigidez e mobilização de deslocamentos.

A partir da análise da Figura 33, observa-se que, para os grandes deslocamentos, o comportamento da *monopile* na Areia Carbonática 2 se mantém praticamente idêntico ao obtido para a Areia Carbonática 1. As curvas apresentam elevada similaridade, o que era esperado, considerando que os parâmetros geotécnicos obtidos pela retroanálise para ambas as areias não diferem de maneira significativa. Assim, a resposta lateral segue o mesmo padrão geral de rigidez e mobilização de deslocamentos.

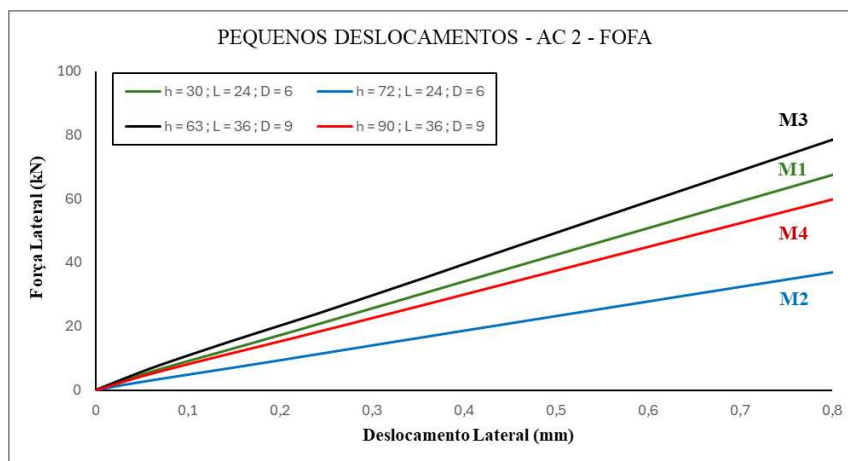
Figura 33 – Comportamento da *monopile* sob grandes deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 4$ para Areia Carbonática 2 no estado fofo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando a Figura 34, verifica-se que, para os pequenos deslocamentos, o comportamento da *monopile* se diferencia daquele observado para os seus próprios grandes deslocamentos. Nesse caso, referente ao modelo M1, se mantém acima da curva referente ao modelo M4, sem qualquer sobreposição entre elas, como visto na AC 1. Esse resultado está associado aos parâmetros de deformabilidade do solo da AC 2, que apresentam menores valores em comparação aos da Areia Carbonática 1, o que promove uma distinção mais evidente entre as rigidezes mobilizadas pelos modelos mesmo em pequenas mobilizações.

Figura 34 – Comportamento da *monopile* sob pequenos deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 4$ para Areia Carbonática 2 no estado fofo

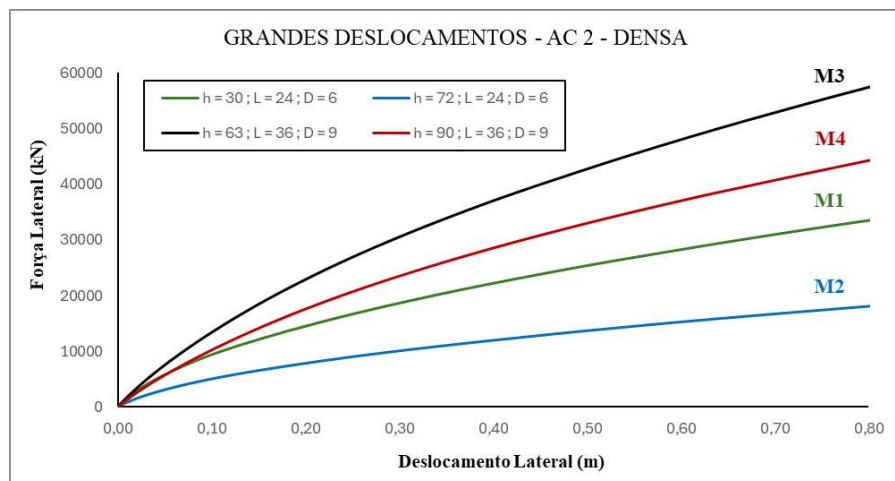


Fonte: Elaborado pelo autor.

Dando sequência, passa-se agora à análise da AC 2 no estado compacto, seguindo o mesmo procedimento adotado anteriormente. Em seguida, são apresentadas as curvas obtidas para essa condição, conforme ilustrado nas Figuras 35 e 36.

Na Figura 35, apresenta-se os grandes deslocamentos para a AC 2 no estado compacto, observa-se que o comportamento geral da *monopile* se mantém consistente com o padrão identificado anteriormente para esse tipo de solo no estado fofo. As curvas seguem a ordem esperada conforme a rigidez dos modelos, com a curva preta exibindo a maior rigidez e, em seguida, os modelos M4, M1 e M2. Isso acontece devido às estruturas com diâmetros maiores mobilizarem uma maior força lateral, de forma que a sequência dos modelos sigam prioritariamente essa ordem.

Figura 35 – Comportamento da *monopile* sob grandes deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 4$ para Areia Carbonática 2 no estado compacto



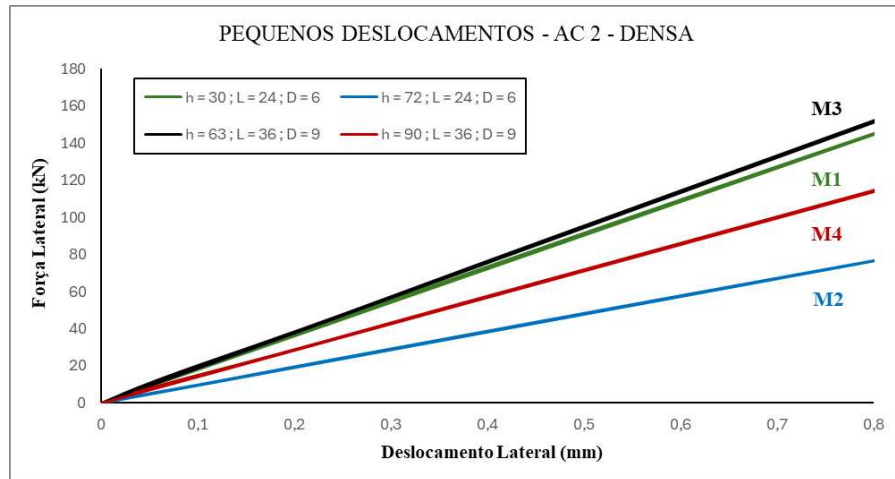
Fonte: Elaborado pelo autor.

Como observado anteriormente para a AC 1 no estado compacto, a Figura 36 aponta que o comportamento da *monopile* se repete, com a curva do modelo M1 tendendo a se aproximar da curva do modelo M3, indicando que os Modelos 1 e 3 apresentam respostas equivalentes para pequenos deslocamentos. No entanto, diferentemente do que ocorreu na Areia Carbonática 1, a curva M1 não supera a curva M3, uma vez que a AC 2, mesmo em estado compacto, apresenta menor rigidez, o que reduz a resistência mobilizada nessa faixa de deslocamentos.

Serão apresentadas, a seguir, os resultados referentes à razão $L/D_{out} = 2$ para as duas areias, onde será avaliado o comportamento da *monopile* a partir da variação do seu

comprimento embutido. Nessa análise, o diâmetro e a altura da torre permanecem inalterados, conforme visto nos pares (M1 - M5), (M2 - M6), (M3 - M7) e (M4 - M8), permitindo isolar o efeito da mudança no comprimento L sobre a resposta lateral da fundação.

Figura 36 – Comportamento da *monopile* sob pequenos deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 4$ para Areia Carbonática 2 no estado compacto

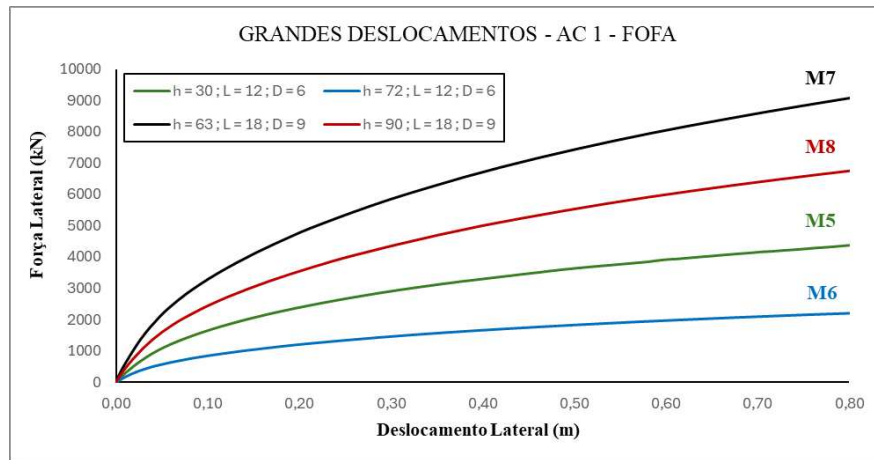


Fonte: Elaborado pelo autor.

Comparado ao comportamento observado nos modelos anteriores, nota-se que as curvas seguem a mesma tendência geral, na qual os modelos 7 e 8, por apresentarem diâmetros maiores, mobilizam maiores valores de resistência ao deslocamento lateral. Esse comportamento está de acordo com o esperado, uma vez que o aumento do diâmetro da *monopile* amplia a área de interação solo estrutura e, conseqüentemente, a rigidez lateral do sistema. Tais resultados podem ser visualizados na Figura 37

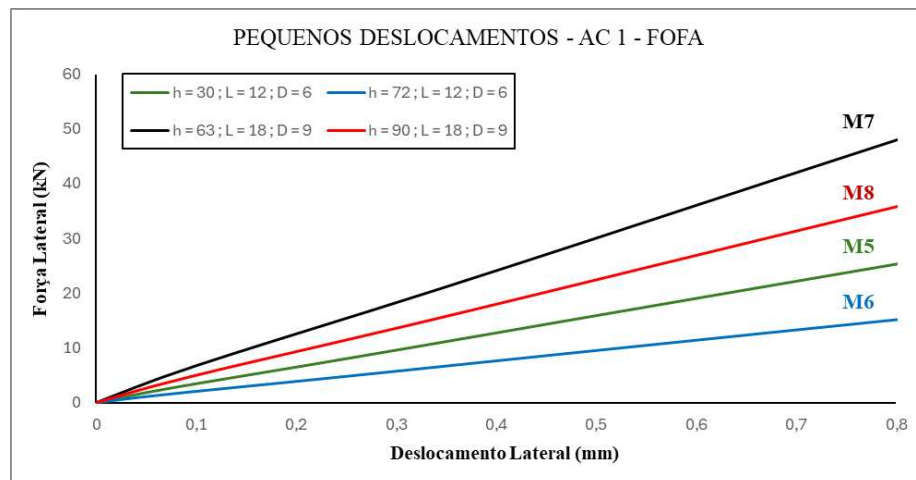
Ao contrário do observado nos modelos com $L/D_{out} = 4$, a Figura 38 apresenta curvas cuja rigidez se mantém semelhante à verificada no caso de grandes deformações, o que não ocorria anteriormente. Esse resultado evidencia a influência direta do comprimento embutido da *monopile*, que passa a modificar de forma mais expressiva a resposta inicial do sistema. Dessa forma, a altura da torre torna-se um fator relevante na definição da estrutura, uma vez que seu efeito, combinado ao comprimento embutido, altera o comportamento lateral da fundação.

Figura 37 – Comportamento da *monopile* sob grandes deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 2$ para Areia Carbonática 1 no estado fofo



Fonte: Elaborado pelo autor.

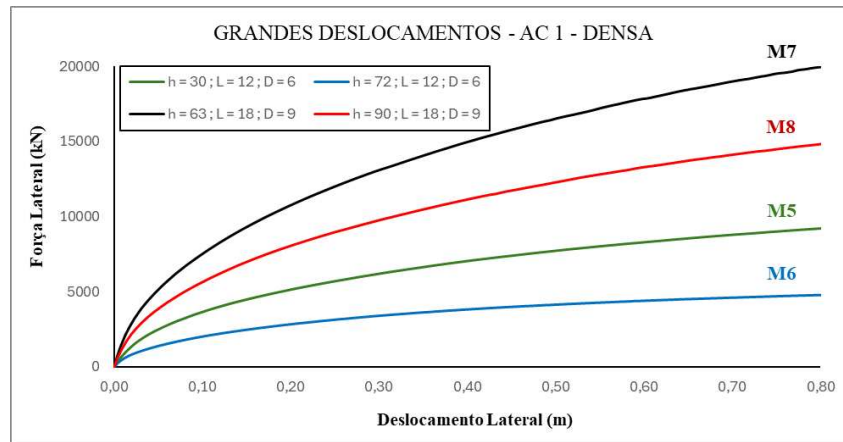
Figura 38 – Comportamento da *monopile* sob pequenos deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 2$ para Areia Carbonática 1 no estado fofo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 39, observa-se a repetição do padrão de comportamento já identificado, em que o solo no estado compacto oferece maior resistência à ação lateral. Como consequência, torna-se necessária uma carga lateral mais elevada para produzir deslocamentos equivalentes aos observados no estado fofo.

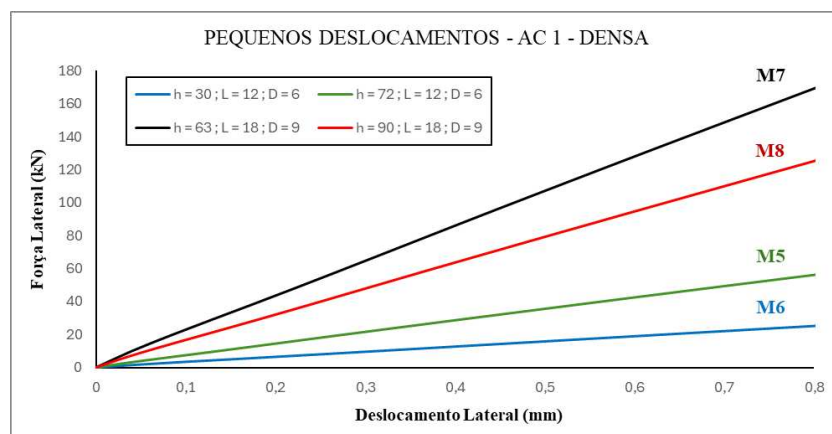
Figura 39 – Comportamento da *monopile* sob grandes deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 2$ para Areia Carbonática 1 no estado compacto



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os pequenos deslocamentos, ilustrados na Figura 40, observa-se novamente o comportamento previamente identificado para os grandes deslocamentos. No entanto, apesar de os modelos manterem a mesma tendência geral, verifica-se uma maior divergência entre as curvas obtidas, na qual aquelas associadas aos maiores diâmetros se apresentam mais próximas entre si, assim como ocorre com as curvas correspondentes aos menores diâmetros, enquanto ambos os conjuntos permanecem claramente afastados um do outro. Esse comportamento difere daquele observado para o solo em estado fofo. Em termos gerais, na areia em estado compacto, as diferenças de resposta entre os modelos tornam-se mais evidentes, resultando em uma separação mais pronunciada entre os grupos de diâmetros.

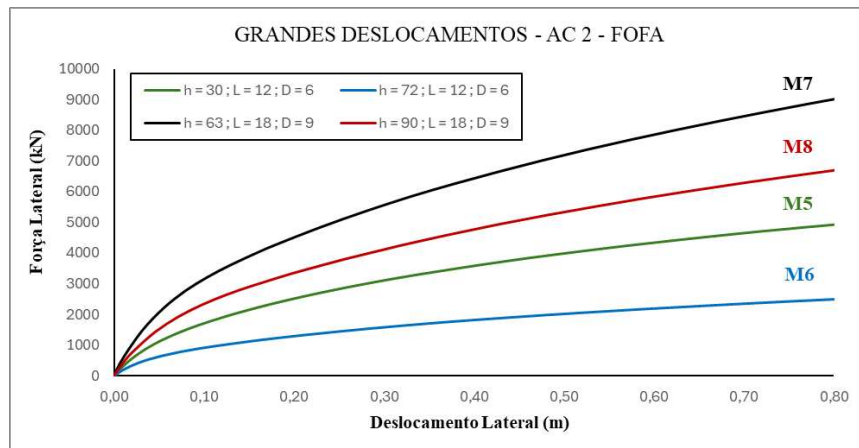
Figura 40 – Comportamento da *monopile* sob pequenos deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 2$ para Areia Carbonática 1 no estado compacto



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 41, verifica-se que, para a AC 2 no estado fofo, as curvas apresentam o mesmo padrão identificado em estudos anteriores, evidenciando que a força lateral mobilizada é progressivamente maior nos modelos com maiores diâmetros.

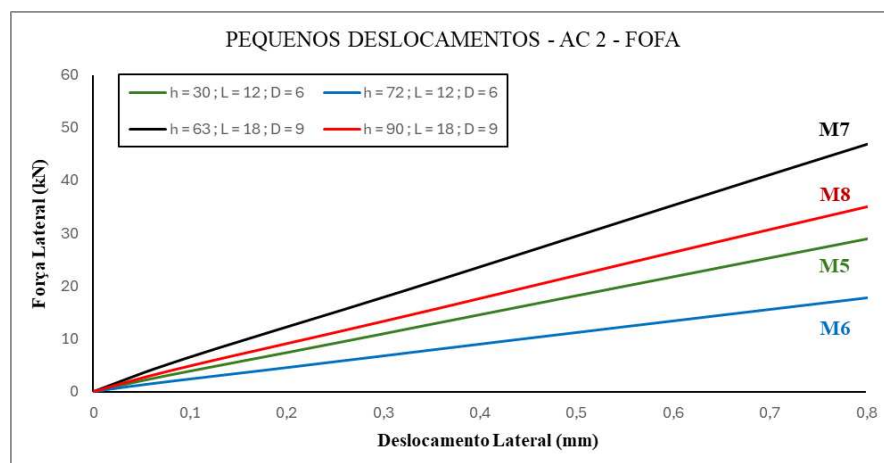
Figura 41 – Comportamento da *monopile* sob grandes deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 2$ para Areia Carbonática 2 no estado fofo



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 42 apresente que, nos pequenos deslocamentos, o comportamento das curvas permanece semelhante ao observado para os grandes deslocamentos. A resposta mantém um caráter linear, e a separação entre as curvas se apresenta de forma bem definida, sem aproximações ou sobreposições entre elas.

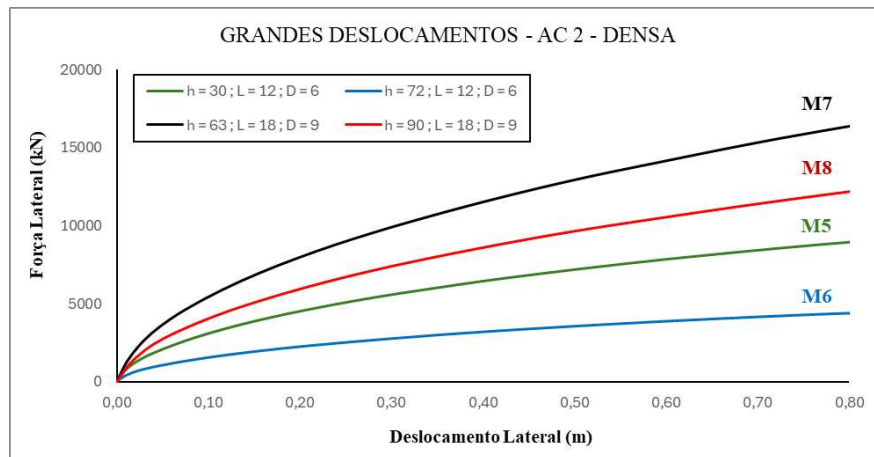
Figura 42 – Comportamento da *monopile* sob pequenos deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 2$ para Areia Carbonática 2 no estado fofo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 43, observa-se novamente o mesmo padrão de comportamento, em que o solo no estado compacto proporciona uma resistência lateral significativamente maior.

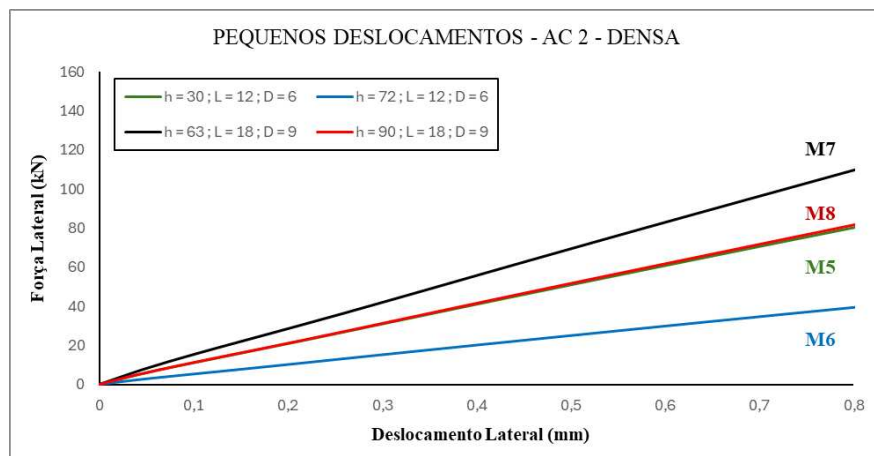
Figura 43 – Comportamento da *monopile* sob grandes deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 2$ para Areia Carbonática 2 no estado compacto



Fonte: Elaborado pelo autor.

No estado compacto, para pequenos deslocamentos, conforme indicado na Figura 44, os modelos apresentam a mesma tendência observada para grandes deslocamentos; contudo, o modelo M5 passa a se aproximar do comportamento do M8. O aumento da compacidade do solo favorece esse comportamento, permitindo que modelos com menores diâmetros apresentem respostas mais próximas às daqueles com maiores diâmetros, com destaque para o modelo M5.

Figura 44 – Comportamento da *monopile* sob pequenos deslocamentos no leito marinho, comparando os modelos para $L/D_{out} = 2$ para Areia Carbonática 2 no estado compacto



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Avaliação conforme as diretrizes normativas

Para a interpretação dos resultados das curvas força lateral x deslocamento, procedeu-se à verificação dos estados limites de serviço (ELS) e do estado limite último (ELU), em conformidade com os critérios estabelecidos pela DNV (2021). Os valores obtidos a partir dessas avaliações encontram-se apresentados, respectivamente, na Tabela 9 e na Tabela 10.

Para a avaliação do Estado Limite Último (ELU) dos diferentes modelos, conforme apresentado na Tabela 9, observa-se que os maiores valores de carga lateral correspondem aos modelos M3 e M4, ambos com razão comprimento/diâmetro (L/D) igual a 4, enquanto os modelos M7 e M8 apresentam os maiores valores para a razão L/D = 2. Como esses modelos possuem diâmetro de 9 m, torna-se necessária uma carga mais elevada para mobilizar um volume maior de solo durante o deslocamento lateral da *monopile*.

Analisando a relação entre as cargas laterais no ELU para AC 1, nos estados compacto e fofo, considerando os oito modelos avaliados, verifica-se uma razão aproximada entre os valores, variando no intervalo de 2,02 a 2,91. De forma análoga, para AC 2, essa razão entre as cargas no estado compacto e no estado fofo situa-se entre 1,78 e 1,93. Esses resultados indicam, especialmente para a AC 2, a existência de uma tendência de comportamento, na qual as cargas associadas ao ELU variam dentro de uma faixa proporcional relativamente bem definida, com um menor desvio padrão se comparada com a variação de AC 1.

Tabela 9 – Resultados das cargas horizontais associadas aos Estados Limite de Serviço (ELU) para AC1 e AC 2.

Modelo	ELU			
	AC 1 - F	AC 1 - C	AC 2 - F	AC 2 - C
	Fx (MN)	Fx (MN)	Fx (MN)	Fx (MN)
M1	16,23	45,27	14,54	28,09
M2	8,88	25,87	7,96	15,12
M3	41,41	95,40	32,02	60,70
M4	34,80	70,43	25,01	46,97
M5	3,92	8,28	4,29	7,81
M6	1,96	4,37	2,17	3,86
M7	9,47	20,84	9,48	17,21
M8	7,00	15,44	7,00	12,82

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 10 apresenta os valores das cargas associadas aos Estados Limite de Serviço (ELS). A análise dos modelos indica que o modelo M1 apresentou as maiores cargas no ELS, mesmo quando comparado ao modelo M4, que possui maior diâmetro. Esse comportamento está associado à maior altura de aplicação da força horizontal, o que resulta em um momento fletor mais elevado na base da *monopile* e, conseqüentemente, em maiores rotações e deslocamentos laterais da estrutura.

A redução da razão L/D nos modelos M5 a M8, em comparação com seus respectivos pares (M1 ao M4), ocasionou uma diminuição significativa da capacidade de carga lateral para a areia carbonática 1 em estado fofo, variando entre 53,67% e 74,46%, correspondentes, respectivamente, aos modelos M4 e M1. Esses resultados indicam que *monopiles* com menores diâmetros apresentam sua resistência lateral mais sensivelmente afetada pela redução do comprimento embutido quando comparadas àquelas com diâmetros maiores.

Para a areia carbonática 1 no estado compacto, observa-se a mesma tendência identificada anteriormente, na qual os modelos M3 e M1 apresentam maior resistência às cargas laterais. Entretanto, com a redução da razão L/D, a perda de resistência lateral mostrou-se menor, sendo seus valores mínimos e máximos de 28,08% e 67,60%. Essa menor redução da capacidade resistente está associada à maior compacidade do solo, que proporciona maior rigidez e melhor mobilização das tensões resistentes frente aos carregamentos horizontais.

A areia carbonática 2 em estado fofo apresenta comportamento semelhante ao observado para a areia carbonática 1 também em estado fofo, em função da proximidade entre seus parâmetros de resistência e deformabilidade. A variação máxima entre as cargas obtidas entre elas foi de 12,5% para o modelo M3, enquanto os demais modelos apresentaram variações no intervalo de 0% a 9%. De forma análoga, a redução do comprimento embutido da *monopile* resultou em diminuição da capacidade de carga lateral mais acentuada nos modelos com menores diâmetros, com diferenças da ordem de 50% entre os pares M3-M7 e M4-M8, e, para os pares M1-M5 e M2-M6 apresentaram perdas aproximadas de 70%.

Para a areia carbonática 2 em estado compacto, a comparação entre os pares M1-M5, M2-M6, M3-M7 e M4-M8, considerando a redução da razão L/D, indica que as *monopiles* com maiores diâmetros apresentam menor variação das cargas laterais, com reduções de 64,88%, 55,87%, 45,43% e 39,57%, respectivamente. Observa-se que essas variações são mais elevadas quando comparadas às obtidas para a areia carbonática 1 em estado compacto (AC1 - C), o que pode ser explicado pelo fato de a areia carbonática 2, mesmo no estado compacto,

apresentar menores valores de módulo de elasticidade, caracterizando um solo menos rígido e, portanto, mais suscetível aos efeitos da redução do comprimento embutido da *monopile*.

Tabela 10 – Resultados das cargas horizontais associadas aos Estados Limite de Serviço (ELS) para AC 1 e AC 2.

Modelo	ELS			
	AC 1 - F	AC 1 - C	AC 2 - F	AC 2 - C
	Fx (MN)	Fx (MN)	Fx (MN)	Fx (MN)
M1	3,58	6,33	3,31	5,03
M2	1,42	2,00	1,33	1,78
M3	5,30	6,98	4,64	6,23
M4	3,30	4,16	3,02	3,86
M5	0,92	2,05	0,91	1,77
M6	0,46	0,99	0,47	0,78
M7	2,18	4,50	1,99	3,40
M8	1,53	3,00	1,40	2,33

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 10 apresenta as cargas características atuantes na estrutura de uma turbina eólica *offshore*. De acordo com Doherty & Gavin (2012), as ações que governam o dimensionamento estrutural são predominantemente as cargas laterais e os momentos fletores. No presente trabalho, por se tratar de uma análise estática baseada na aplicação de uma carga horizontal monotônica, foram obtidos valores característicos de cargas horizontais para o Estado Limite de Serviço (ELS) que, em consonância com a ordem de grandeza apresentada na literatura, fornecem uma base consistente para a compreensão da influência das diferentes configurações estruturais adotadas, bem como do papel das propriedades do solo no processo de tomada de decisão de projeto.

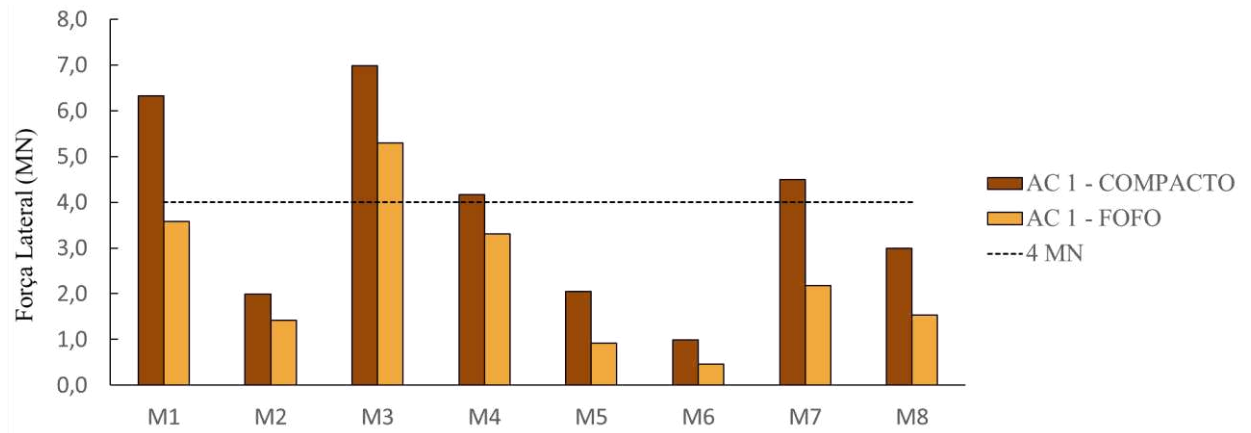
Como listado na Tabela 11, Byrne & Houlsby (2003), Byrne & Houlsby (2015) e Jawalageri et al. (2024) apresentam cargas horizontais da ordem de 4 MN para turbinas eólicas *offshore* com potências entre 3,5 MW e 5,0 MW. Considerando a instalação de aerogeradores com essa faixa de potência em solos carbonáticos do litoral cearense, especificamente para AC 1, os resultados obtidos indicam que as configurações estruturais que atendem a esse nível de carregamento são o modelo M3 para o estado fofo e os modelos M1, M3, M4 e M7 para o estado compacto, conforme ilustrado na Figura 45.

Tabela 11 – Cargas características atuantes em turbinas eólicas *offshore*

Referência	Potência da turbina (MW)	Carga vertical V (MN)	Carga horizontal H (MN)	Momento fletor M (MN·m)	Observações
Byrne & Housby (2003)	3,5	6	4	120	Estudo desenvolvido no Reino Unido analisa uma turbina eólica offshore instalada em águas rasas, com profundidade entre 5 e 20 m, evidenciando a influência direta dos carregamentos ambientais no dimensionamento estrutural.
Lesny & Wiemann (2005)	5	35	16	560	Neste estudo, é avaliada uma turbina eólica offshore localizada no sul do Mar do Norte, sujeita a profundidades de água entre 25 e 35 m e a alturas extremas de onda de até 22 m, caracterizando um ambiente marítimo severo.
Doherty & Gavin (2012)	-	6	2	110	O trabalho aponta que o projeto da turbina eólica offshore é governado predominantemente pelas cargas horizontais e pelos momentos fletores, ressaltando a necessidade de reduzir as incertezas associadas à estimativa desses carregamentos para garantir respostas estruturais mais confiáveis.
Byrne & Housby (2015)	3,5 – 5	6 – 10	4 – 8	-	Projeto de usina eólica offshore no Reino Unido adota alturas de torre entre 90 e 110 m e lâmina d'água entre 20 e 50 m, parâmetros determinantes para a magnitude dos momentos atuantes na fundação.
Brinkgreve (2020)	11	-	15	525	Análise conduzida no Mar do Norte considera a aplicação de cargas horizontais a uma altura de 35 m acima do fundo do mar, condição utilizada para a avaliação do comportamento estrutural da torre e da fundação.
Jawalageri et al. (2024)	NREL 5	-	4,33 – 6,45	165,6 - 374,0	Estudo numérico determina as cargas horizontais por meio de um método simplificado associado a simulações no OpenFAST, considerando condições críticas de ondas para a definição dos estados de carregamento mais desfavoráveis.
	IEA 15	-	11,9 – 19,1	757,2 - 1823,8	

Fonte: Elaborado pelo autor.

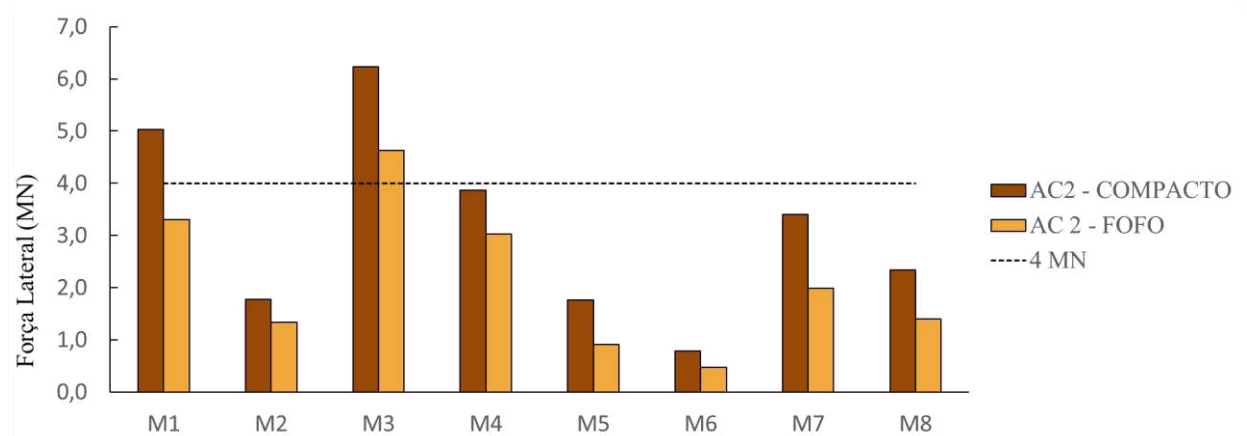
Figura 45 – Cargas horizontais no Estado Limite de Serviço (ELS) para AC 1 nos estados fofo e compacto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando a mesma carga horizontal característica de 4 MN para a areia carbonática 2 (AC2), observa-se que apenas o modelo M3 no estado fofo e os modelos M1 e M3 no estado compacto atendem à carga de referência, conforme ilustrado na Figura 46.

Figura 46 – Cargas horizontais no Estado Limite de Serviço (ELS) para AC 2 nos estados fofo e compacto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora as cargas horizontais obtidas para os diferentes modelos não sejam iguais ou superiores às cargas características associadas a aerogeradores de 5 MW, esse desempenho pode ser ajustado por meio da modificação dos parâmetros geométricos da *monopile*, como o aumento do diâmetro e/ou do comprimento embutido, proporcionando maior resistência ao

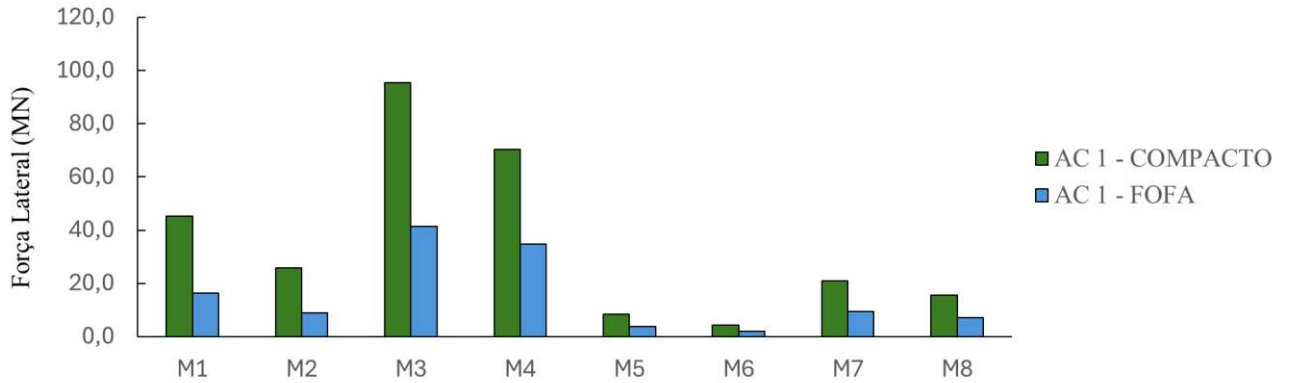
sistema e possibilitando o atendimento aos Estados Limite de Serviço e Último, conforme aponta Brinkgreve (2020). Ainda assim, para turbinas eólicas de menor potência, cujas cargas horizontais são reduzidas, os modelos simulados neste trabalho podem se mostrar compatíveis com os critérios de segurança adotados, atendendo aos estados limite e podendo, portanto, ser considerados viáveis para aplicação.

A amostra AC 2, apesar de apresentar maior teor de carbonato de cálcio e, conseqüentemente, parâmetros de resistência superiores aos da AC 1, evidenciou um comportamento mais compressível, o que resultou em maior sensibilidade à mobilização dos carregamentos laterais. Essa maior compressibilidade implicou deslocamentos laterais mais significativos para um mesmo nível de carregamento, limitando a capacidade de diversos modelos em atender aos critérios de desempenho estabelecidos.

Como consequência, apenas algumas configurações foram capazes de resistir à carga característica de uma turbina de 5 MW, sendo esse comportamento observado exclusivamente no estado compacto do solo. No estado fofo, a elevada deformabilidade do solo restringiu ainda mais o desempenho estrutural, de modo que somente o modelo M3 apresentou viabilidade de implantação em ambas as amostras, evidenciando a forte influência do estado de compactidade no comportamento global do sistema.

A Figura 47 apresenta, por meio de um gráfico de barras, uma visualização mais clara do comportamento dos diferentes modelos quanto à carga associada ao estado limite último para a amostra AC 1, nos estados fofo e compacto. Observa-se que os modelos com maiores diâmetros (M3 e M4) mobilizaram forças mais elevadas para a razão $L/D = 4$, enquanto seus pares correspondentes (M7 e M8) apresentaram as maiores forças mobilizadas para a razão $L/D = 2$.

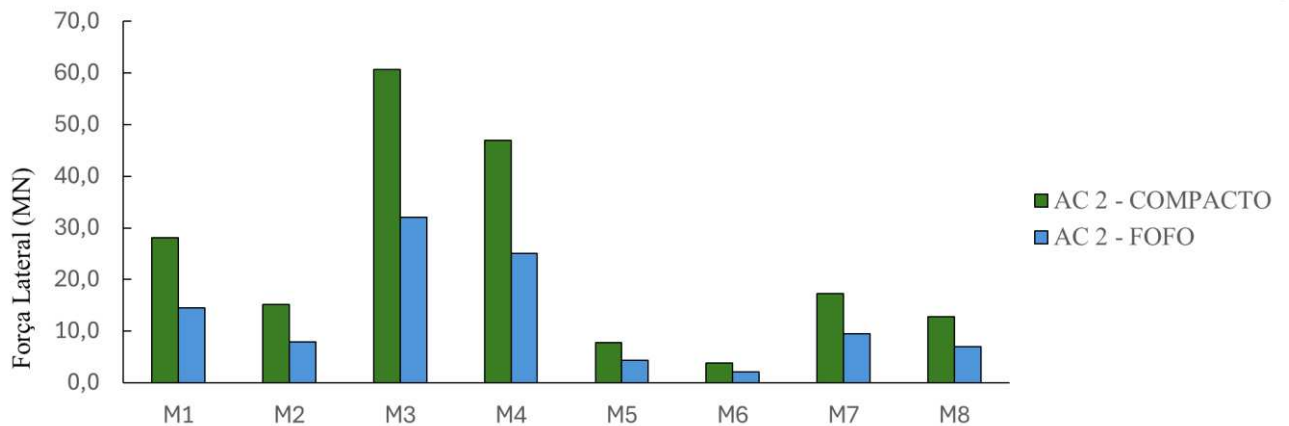
Figura 47 – Cargas horizontais no Estado Limite Último (ELU) para AC 1 nos estados fofo e compacto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a amostra AC 2, a Figura 48 apresenta, por meio de um gráfico de barras, a comparação do desempenho dos modelos quanto à carga no estado limite último, considerando os estados fofo e compacto. Mantém-se a tendência observada anteriormente, com destaque para a influência das razões L/D e do diâmetro dos modelos nos valores de força mobilizada.

Figura 48 – Cargas horizontais no Estado Limite Último (ELU) para AC 1 nos estados fofo e compacto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este trabalho investiga o comportamento de fundações do tipo *monopile* aplicadas a ambientes offshore, com ênfase em solos arenosos carbonáticos que apresentam diferentes teores de carbonato de cálcio. São analisadas duas amostras distintas: a Areia Carbonática 1 (AC 1), com teor de CaCO_3 de aproximadamente 49%, e a Areia Carbonática 2 (AC 2), com teor mais elevado, em torno de 89%. A pesquisa busca compreender como as particularidades desses materiais, como a maior compressibilidade e a sensibilidade ao estado de tensões, influenciam a resposta das fundações, especialmente sob a ação de carregamentos laterais típicos de turbinas eólicas offshore. Para isso, foram realizadas retroanálises a partir de dados experimentais, permitindo a calibração de parâmetros geotécnicos mais representativos, que subsidiam a modelagem numérica das *monopiles*. Os resultados são então confrontados com critérios normativos vigentes, contribuindo para uma avaliação mais realista e segura do desempenho geotécnico dessas fundações em ambientes carbonáticos típicos do leito marinho.

A retroanálise realizada para as areias carbonáticas AC1 e AC2 mostrou-se adequada, permitindo representar de forma representativa o comportamento tensão-deformação das amostras. A melhor concordância foi observada no estado fofo, com parâmetros próximos aos obtidos em laboratório, destacando-se a boa correspondência entre o módulo de elasticidade a 50% da tensão de ruptura retroanalisado e aquele determinado nos ensaios de compressão triaxial. O comportamento no estado compacto também foi adequadamente representado; contudo, verificaram-se divergências após o pico de resistência, atribuídas às limitações do modelo Hardening Soil, que não reproduz o amolecimento do solo nem a tensão residual pós-ruptura. De modo geral, os parâmetros de resistência e deformabilidade obtidos por retroanálise apresentaram pequenas diferenças em relação aos valores laboratoriais, confirmando a calibração apropriada do modelo e a eficiência do software empregado.

A simulação dos aerogeradores avaliou oito cenários distintos, todos assentados em areias carbonáticas com médio e alto teor de carbonato de cálcio. A partir da modelagem numérica e da análise dos resultados, obtêm-se as seguintes conclusões:

- Para uma mesma razão L/D , os modelos que apresentaram maior resistência às cargas laterais foram aqueles com maiores diâmetros, destacando-se os modelos M3 e M4 para $L/D = 4$, e M7 e M8 para $L/D = 2$;
- A razão L/D exerce influência desfavorável sobre a rigidez do sistema *monopile*-torre quando reduzida, uma vez que menores valores implicam menor comprimento embutido, reduzindo a resistência lateral mobilizada ao longo do fuste e, conseqüentemente, o

desempenho estrutural;

- A razão h/L mostrou-se pouco representativa para a avaliação da resistência lateral, não apresentando correlação consistente com os resultados obtidos. Observou-se, por exemplo, que o modelo M3 ($h/L = 1,75$) apresentou maior resistência às cargas laterais, enquanto o modelo M4 ($h/L = 2,50$) apresentou desempenho inferior, e o modelo M1 ($h/L = 1,25$) exibiu comportamento intermediário, mesmo com valores de h/L menores;
- Na análise do Estado Limite Último (ELU), verificou-se que a razão entre as cargas obtidas para os estados compacto e fofo da areia carbonática 1 variou entre 2,02 e 2,91. Para a areia carbonática 2, essa razão apresentou menor dispersão, situando-se entre 1,78 e 1,93, indicando a possibilidade de estimar a proporção entre as cargas no ELU a partir do tipo de solo e do seu estado de compactidade;
- Considerando o ELU para ambas as areias, os maiores valores de carga lateral foram observados nos modelos M3 e M1 para $L/D = 4$, e nos modelos M7 e M8 para $L/D = 2$, devido ao maior diâmetro se comparado aos outros modelos;
- A redução da razão L/D resultou em maiores reduções percentuais das cargas no Estado Limite de Serviço (ELS) para as amostras no estado fofo, enquanto as amostras no estado compacto mostraram-se menos sensíveis a essa variação geométrica.

A partir do desenvolvimento deste trabalho, são propostas as seguintes sugestões para pesquisas futuras:

- Realizar ensaios de compressão triaxial em solos carbonáticos com diferentes teores de carbonato de cálcio, visando estabelecer correlações entre os parâmetros de resistência e deformabilidade e o teor de carbonato;
- Desenvolver simulações numéricas contemplando novas combinações de diâmetro da *monopile* (D), altura da torre (h) e comprimento embutido (L);
- Empregar ensaios pressiométricos (PMT) e o ensaio de piezocone (CPTu) como base para procedimentos de retroanálise, visando à obtenção de parâmetros de resistência e deformabilidade mais representativos para análises numéricas diversificadas;
- Conduzir análises paramétricas de um único aerogerador com carga horizontal de projeto previamente definida, avaliando a influência do diâmetro (D_{out}) e do comprimento embutido da *monopile* (L) com base nos Estados Limite de Serviço (ELS) e Último (ELU);
- Avaliar o comportamento dinâmico do sistema, incluindo a determinação da frequência

natural da torre e a análise dos esforços decorrentes de carregamentos cíclicos e dinâmicos.

REFERÊNCIAS

- ABEEÓLICA. **Boletim anual 2024**. São Paulo: Associação Brasileira de Energia Eólica, 2024. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energiaeolica/dados-abeeolica/>. Acesso em: 11 maio 2025.
- ALVES, Victor Luiz da Silva. **Estudo experimental do comportamento mecânico de areias carbonáticas da costa nordeste do Brasil**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Geotecnia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.
- AMARANTE, O. A. C.; BROWER, M.; ZACK, J.; SÁ, A. L. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2001.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Recommended practice for planning, design and constructing fixed offshore platforms – working stress design (RP 2A-WSD)**. 21. ed. Dallas: API, 2000.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Recommended practice for planning, design and constructing fixed offshore platforms – working stress design**. Washington, D.C.: API, 2007.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Matriz elétrica brasileira registra maior expansão da história em 2024**. Brasília, 10 jan. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2025/matriz-eletrica-teve-aumento-de-10-9-gw-em-2024-maior-expansao-da-serie-historica>. Acesso em: 11 maio 2025.
- BRANDES, H. G. Simple shear behavior of calcareous and quartz sands. *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 29, n. 1, p. 113–126, 2011.
- BRASIL. **Decreto nº 10.946, de 25 de janeiro de 2022**. Regulamenta dispositivos da Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/Decreto/D10946.htm. Acesso em: 11 maio 2025.
- BRINKGREVE, R. et al. Validation and application of a new software tool implementing the PISA design methodology. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 8, n. 6, 2020.
- BYRNE, B. W.; HOULSBY, G. T. Foundations for offshore wind turbines. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, London, v. 361, n. 1813, p. 2909–2930, 2003. DOI: 10.1098/rsta.2003.1286.
- BYRNE, B. W.; HOULSBY, G. T. Helical piles: an innovative foundation design option for offshore wind turbines. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical,*

- Physical and Engineering Sciences*, London, v. 373, p. 20140081, 2015. DOI: 10.1098/rsta.2014.0081.
- CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA (CEPEL). **Atlas do potencial eólico brasileiro: simulações 2013**. Rio de Janeiro: CEPEL, 2017.
- COOP, M. R.; AIREY, D. W. Carbonate sands. In: TAN, T. S.; PHOON, K. K.; HIGHT, D. W.; LEROUEIL, S. (ed.). *Characterization and engineering properties of natural soils*. Rotterdam: Balkema, 2002. p. 1049–1086.
- DIAS, G. T. M. Classificação de sedimentos marinhos: proposta de representação em cartas sedimentológicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39., 1996, Salvador. *Anais eletrônicos* [...]. Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia (SBG), 1996. p. 423–426.
- DIAS, G. T. M. Granulados bioclásticos – algas calcárias. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 18, n. 3, p. 307–325, 2000.
- DOHERTY, P.; GAVIN, K. Laterally loaded monopole design for *offshore* wind farms. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Energy*, v. 165, n. 1, p. 7–17, 2012.
- DNV-RP-C212. (2019). DNV-RP-C212 **Offshore soil mechanics and geotechnical engineering**. <https://www.dnv.com/energy/standards-guidelines/dnv-rp-c212-offshore-soil-mechanics-andgeotechnical-engineering/>
- DNV-ST-0126. (2021). DNV-ST-0126 **Support structures for wind turbines**. <https://www.dnv.com/energy/standards-guidelines/dnv-st-0126-support-structures-for-windturbines/>
- ELKHAWAS, N. M. **Analysis and assessment of offshore piles**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Estrutural) – Faculty of Engineering, Zagazig University, Zagazig, 2021.
- ENEL. **Relatório de sustentabilidade 2024**. Roma, 2024. Disponível em: <https://ri.enel.com/publicacoes/relatorio-de-sustentabilidade>. Acesso em: 10 maio 2025.
- ESTEBAN, M. D. et al. Why *offshore* wind energy? *Renewable Energy*, 2011.
- GLOBAL ENERGY MONITOR. **Rastreador global de energia eólica**. San Francisco, 2025. Disponível em: <https://globalenergymonitor.org/pt/projects/global-wind-power-tracker/tracker-map/>. Acesso em: 5 maio 2025.
- GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). **Global wind report 2022**. Brussels: GWEC, 2022.
- GUIDELINES FOR DESIGN OF WIND TURBINES. **Guidelines for design of wind turbines**. Roskilde: Risø National Laboratory, Wind Energy Department; Høvik: Det Norske Veritas (DNV), 2002.

- HASSANLOURAD, M.; RASOULI, M. R.; SALEHZADEH, H. A comparison between the undrained shear behavior of carbonate and quartz sands. *International Journal of Civil Engineering*, v. 12, n. 4, p. 417–426, 2014.
- HEARN, E. N.; EDGERS, L. Finite element analysis of an *offshore* wind turbine *monopile*. In: *Proceedings of the ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE 2010)*. Shanghai: ASME, 2010.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **IEA Wind TCP: Denmark – report 2023**. Paris: IEA, 2023.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Mapas de projetos em licenciamento: complexos eólicos offshore**. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/laf/consultas/mapas-deprojetos-em-licenciamento-complexos-eolicos-offshore>. Acesso em: 12 maio 2025.
- JAWALAGERI, S.; BHATTACHARYA, S.; JALILVAND, S.; MALEKJAFARIAN, A. A comparative study on load assessment methods for *offshore* wind turbines using a simplified method and OpenFAST simulations. *Energies*, Basel, v. 17, p. 2189, 2024. DOI: 10.3390/en17092189.
- KEMPF, M. Notes on the benthic bionomy of the N-NE Brazilian shelf. *Marine Biology*, v. 5, p. 213–224, 1970.
- LESNY, Kerstin; WIEMANN, Jens. Finite-element modelling of large diameter *monopiles* for *offshore* wind energy converters. In: **GEOCONGRESS 2006. Reston: ASCE, 2006**. p. 1–10.
- MAIA DE ALMEIDA, N.; FREIRE, G. S. S.; MORAIS, J. O.; XIMENES NETO, A. R.; ABREU NETO, J. C.; PESSOA, P. R. S.; FERRO, I. M. M.; PINHEIRO, L. S. Plataforma Continental do Ceará. In: VITAL, H.; DIAS, M. S.; BASTOS, A. C. (org.). *Plataforma Continental Brasileira*. Série II. Rio de Janeiro: P2GM, 2021. v. 1, p. 71–121.
- McCLELLAND, B. **Calcareous sediments: an engineering enigma**. In: JEWELL, R. J.; KHORSHID, M. S. (org.). *Engineering for calcareous sediments*. Perth, 1988. v. 2, p. 777–784.
- MURFF, J. D. Pile capacity in calcareous sands: state of the art. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 113, n. 5, p. 490–507, 1987.
- MURPHY, G. et al. 3D FEM approach for laterally loaded *monopile* design. *Computers and Geotechnics*, v. 100, p. 76–83, 2018.
- PLAXIS. PLAXIS 2D reference manual. Delft: Bentley Systems, 2018.
- PLAXIS. PLAXIS 3D reference manual. Delft: Bentley Systems, 2018.

- SCHANZ, T.; VERMEER, P. A.; BONNIER, P. G. The hardening soil model: formulation and verification. In: BRINKGREVE, R. B. J. (org.). *Beyond 2000 in computational geotechnics*. Rotterdam: Balkema, 1999. p. 281–296.
- SURARAK, C. et al. Stiffness and strength parameters for hardening soil model of soft and stiff Bangkok clays. *Soils and Foundations*, v. 52, n. 4, p. 682–697, 2012.
- TABASSUM, A. et al. Wind energy: increasing deployment, rising environmental concerns. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014.
- TERCIOTE, R. Eficiência energética de um sistema eólico isolado. Campinas: UNICAMP, 2002.
- TIWARI, A. K. Analysis of *monopile* foundation for *offshore* wind turbine. 2016.
- WANG, X. Z. et al. Engineering characteristics of the calcareous sand in Nansha Islands, South China Sea. *Engineering Geology*, v. 120, n. 1–4, p. 40–47, 2011.
- WELCH, J. B.; VENKATESWARAN, A. The dual sustainability of wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, p. 1121–1126, 2009.
- WU, X. et al. Foundations of *offshore* wind turbines: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 104, p. 379–393, 2019.