

Plataformas fotovoltaicas flutuantes: A contribuição do LNEC

Floating photovoltaic platforms: The contribution of LNEC

José Manuel Catarino
João André
João Bilé Serra
Susana Cabral da Fonseca
Liliana Pinheiro
André Monteiro
Fernando Marques da Silva
Sílvia Amaral
Elsa Eustáquio
Isabel Martins

Resumo

A instalação de plataformas fotovoltaicas flutuantes em reservatórios de água, albufeiras e lagoas, iniciada na primeira década do século XXI, tem aumentado significativamente nos últimos anos. Em Portugal, o Decreto-Lei n.º 98/2021 de 16 de novembro determinou a abertura de procedimento concorrencial, sob a forma de leilão eletrónico, para atribuição de reserva de capacidade de injeção em pontos de ligação à Rede Elétrica de Serviço Público para eletricidade a partir da conversão de energia solar por centros eletroprodutores fotovoltaicos flutuantes a instalar em albufeiras de barragens. Neste contexto, o LNEC, por solicitação da Agência Portuguesa do Ambiente (APA), elaborou um relatório onde são especificados os requisitos técnicos para a avaliação das condições de segurança de projetos de plataformas fotovoltaicas flutuantes em albufeiras de barragens, e pela posterior apreciação dos projetos de execução destas instalações. A presente Nota Técnica descreve as principais atividades desenvolvidas e os contributos do LNEC neste domínio.

Abstract

The installation of floating photovoltaic platforms in water reservoirs, dams and lagoons, which began in the first decade of the 21st century, has increased significantly in recent years. In Portugal, Decree-Law no. 98/2021 of 16 November determined the opening of a competitive procedure, in the form of an electronic auction, for the allocation of reserve injection capacity at connection points to the Public Service Electricity Grid for electricity from the conversion of solar energy by floating photovoltaic power stations to be installed on dam reservoirs. In this context, by request of the Portuguese Environment Agency (APA), LNEC prepared a report specifying the technical requirements for assessing the safety conditions of floating photovoltaic power station projects on dam reservoirs, and for the subsequent appraisal of the execution projects for these installations. This Technical Note describes the main activities carried out and LNEC's contributions in this field.

Palavras-chave: Plataformas fotovoltaicas flutuantes / Requisitos técnicos / Apreciação de projetos de execução

Keywords: Floating photovoltaic platforms / Technical requirements / Appraisal of execution projects

Plataformas fotovoltaicas flutuantes: A contribuição do LNEC

José Manuel Catarino, João André, João Bilé Serra, Susana Cabral da Fonseca, Liliana Pinheiro, André Monteiro, Fernando Marques da Silva, Sílvia Amaral, Elsa Eustáquio, Isabel Martins

José Manuel Catarino

Doutor / Investigador-Coordenador
LNEC - Departamento de Estruturas
Lisboa, Portugal

João André

Doutor / Investigador Auxiliar
LNEC - Departamento de Estruturas
Lisboa, Portugal

João Bilé Serra

Doutor / Investigador-Coordenador
LNEC - Departamento de Geotecnia
Lisboa, Portugal

Susana Cabral da Fonseca

Doutora / Investigadora Principal
LNEC - Departamento de Materiais
Lisboa, Portugal

Liliana Pinheiro

Doutora / Investigadora Auxiliar
LNEC - Departamento de Hidráulica e Ambiente
Lisboa, Portugal

André Monteiro

Doutor / Investigador Auxiliar
LNEC - Departamento de Estruturas
Lisboa, Portugal

Fernando Marques da Silva

Doutor / Investigador Auxiliar Aposentado

Sílvia Amaral

Doutora / Investigadora Auxiliar
LNEC - Departamento de Hidráulica e Ambiente
Lisboa, Portugal

Elsa Eustáquio

Doutora / Investigadora Auxiliar
LNEC - Departamento de Materiais
Lisboa, Portugal

Isabel Martins

Doutora / Investigadora Auxiliar
LNEC - Departamento de Materiais
Lisboa, Portugal

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

CATARINO, J. [et al.] – Plataformas fotovoltaicas flutuantes: A contribuição do LNEC. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 24. ISSN 2183-8488. (março 2024) 115-122.
<https://doi.org/10.34638/rpee-sIII-n24-009>

1 Introdução

A capacidade global total instalada de plataformas solares fotovoltaicas flutuantes (FPV¹) atingiu 1,3 gigawatt-pico (GWp) em 2018 e prevê-se que este valor aumente consideravelmente até 2030 [1]. Um dos objetivos para que vários países, entre os quais Portugal, estejam a considerar a implantação de energia solar flutuante em grande escala, em particular em albufeiras de barragens, é o de evitar a utilização dos seus escassos recursos terrestres para a geração de energia solar.

Os grandes reservatórios de água existentes nas albufeiras das barragens são locais especialmente propícios para a instalação destas plataformas, na medida em que pode ser tirado partido da hibridização, em que se aliam as duas fontes de energia, hídrica e solar, num único ponto de acesso à rede.

Embora a tecnologia FPV seja considerada comercialmente viável, subsistem desafios ao seu desenvolvimento, como sejam a complexidade técnica do projeto, a construção, a operação, a manutenção (em particular, envolvendo aspetos de ancoragem e amarração das plataformas flutuantes) e fim-de-vida. Neste contexto, é importante que nos grandes investimentos neste domínio exista uma participação de todas as partes interessadas, públicas e privadas, com o objetivo de promover soluções bem projetadas e minimizar possíveis impactos negativos para as barragens, bem como outros impactos ambientais e sociais.

Em Portugal, o Decreto-Lei n.º 98/2021 de 16 de novembro [2] determinou a abertura de procedimento concorrencial, sob a forma de leilão eletrónico, para atribuição de reserva de capacidade de injeção em pontos de ligação à Rede Elétrica de Serviço Público (RESP) para eletricidade a partir da conversão de energia solar por centros eletroprodutores fotovoltaicos flutuantes a instalar em albufeiras de barragens.

Este leilão insere-se no âmbito do Plano Nacional Energia e Clima 2030, documento que define a estratégia nacional de combate às alterações climáticas, nomeadamente através do apoio às iniciativas da transição energética e do reforço da aposta nas energias de fonte renovável, visando a consequente redução da dependência energética do exterior e o uso eficiente de recursos.

O procedimento concorrencial abrange as albufeiras das barragens referidas no anexo do Decreto-Lei acima referido, e que a seguir se listam (ver Figura 1):

- Paradela;
- Alto Rabagão;
- Vilar Tabuaço;
- Salamonde;
- Alqueva;
- Cabril;
- Castelo de Bode.

O Caderno de Encargos do procedimento indica no ponto 7 da Cláusula 3.ª da Secção II que a Agência Portuguesa do Ambiente (APA) solicita parecer ao LNEC, para que este se pronuncie sobre

se o projeto da plataforma fotovoltaica flutuante compromete o cumprimento pela barragem e pela albufeira do Regulamento de Segurança de Barragens (RSB), aprovado pelo Decreto-Lei n.º 344/2007 de 15 de outubro e revisto pelo Decreto-Lei n.º 21/2018 de 28 de março [3]. Conforme estabelecido no preâmbulo do RSB, o controlo de segurança das barragens incide sobre aspetos estruturais, hidráulico-operacionais e ambientais.

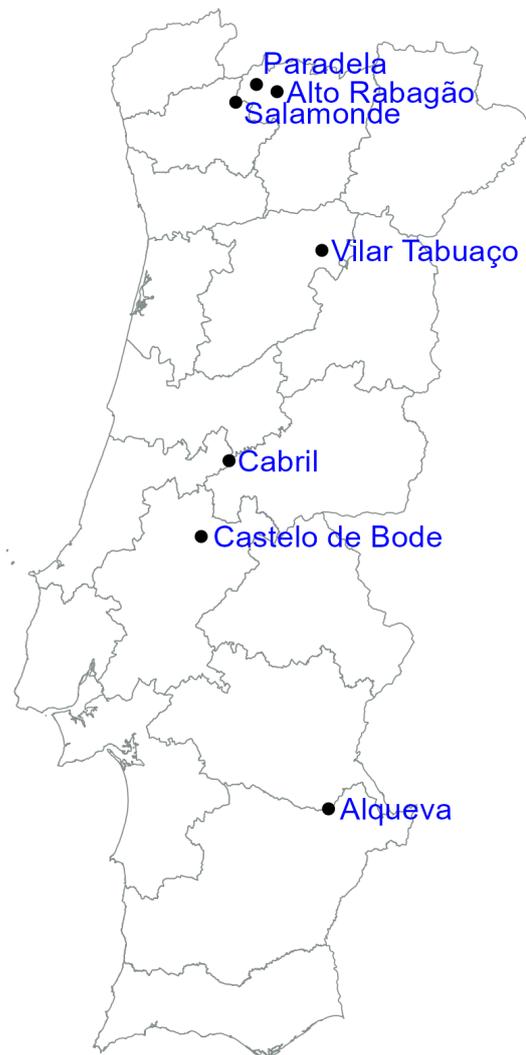


Figura 1 Barragens abrangidas no procedimento concursal

Adicionalmente, salienta-se que nos esclarecimentos do júri do procedimento se refere que no RSB não são definidos critérios específicos relativamente à instalação de plataformas fotovoltaicas flutuantes em albufeiras de barragens. No mesmo documento refere-se ainda que “(...) o projeto será submetido a parecer do Laboratório Nacional de Engenharia Civil I.P. o qual deverá incluir a avaliação das condições de segurança e amarração das estruturas a instalar no plano de água, estando também prevista a monitorização e fiscalização destas estruturas durante a fase de exploração” da plataforma fotovoltaica.

1 Sigla da designação em língua inglesa: Floating Photovoltaic.

Para efeitos de definição do âmbito da colaboração desenvolvida, considera-se genericamente que as soluções estruturais de plataformas fotovoltaicas flutuantes (doravante estrutura ou plataforma) podem ser tipicamente constituídas pelos seguintes três (sub)sistemas (ver Figura 2):

- 1) sistema flutuante, tipicamente constituído por módulos interligados, sobre os quais são instalados os painéis fotovoltaicos;
- 2) sistema de amarração dos elementos flutuantes;
- 3) sistema de ancoragem dos elementos de amarração ao terreno de fundação.

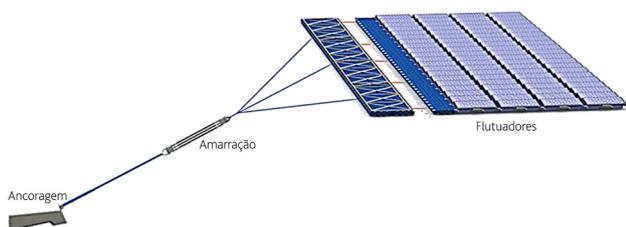


Figura 2 Subsistemas de uma plataforma FPV

As plataformas são ainda constituídas por painéis fotovoltaicos, cabos, e equipamentos diversos.

Note-se por fim que o projeto de uma plataforma fotovoltaica flutuante na albufeira de uma barragem apresenta aspetos específicos, quando comparada com projetos em lagos naturais. Os sistemas de ancoragem e amarração são necessariamente mais complexos devido às variações do nível da água e às diferentes batimetrias do fundo de uma albufeira. Para além disso, é essencial que o projeto da plataforma fotovoltaica flutuante acautele a segurança da barragem ou barragens existentes na albufeira.

Na presente Nota Técnica apresentam-se as principais atividades desenvolvidas pelo LNEC para dar resposta ao acima referido, apoiando os promotores dos projetos e a APA, nomeadamente no desenvolvimento dos requisitos técnicos para o projeto destas instalações.

2 Requisitos técnicos para projetos de FPV

2.1 Âmbito

Neste contexto, o LNEC elaborou um relatório [4] com os requisitos técnicos para a avaliação das condições de segurança de projetos de plataformas fotovoltaicas flutuantes em albufeiras de barragens, incluindo-se as exigências relativas aos projetos das plataformas fotovoltaicas a instalar nas barragens acima listadas.

Considerando que as albufeiras das barragens acima referidas são distintas e que cada projeto e local apresentam condições e desafios próprios, o relatório pretendeu ser genérico. Por esse motivo não se incluiu referências a soluções específicas.

No referido relatório são estabelecidos os princípios e os requisitos de segurança, de utilização, de robustez e de durabilidade das plataformas a considerar durante as fases de projeto, execução, exploração e desmantelamento.

Salienta-se que não são abrangidos o projeto eletrotécnico e outros aspetos fora do domínio da engenharia civil, mas que constam do Caderno de Encargos. Excluem-se, ainda, do âmbito do relatório possíveis utilizações de plataformas fotovoltaicas em água salgada ou perto da zona costeira.

O relatório foi elaborado com base no estado do conhecimento atual, podendo ser revisto e atualizado em função de novos avanços científicos e tecnológicos e de aprendizagens decorrentes da exploração de projetos de plataformas já implementados. Os requisitos foram estabelecidos com base nos Eurocódigos Estruturais, complementados com o documento DNVGL-RP-0584 [5].

Na definição dos princípios e requisitos, foram considerados os seguintes pressupostos gerais:

- a escolha do sistema estrutural e o projeto da plataforma são realizados por técnicos com qualificação e experiência adequadas;
- a execução da estrutura é realizada por pessoal com competência e experiência adequadas;
- uma supervisão e um controlo da qualidade adequados são assegurados durante toda a execução da estrutura, nomeadamente, nos gabinetes de projeto, nas fábricas, nas empresas, nos estaleiros e no local;
- os materiais e os elementos são utilizados de acordo com as especificações da NP EN 1990 a NP EN 1999 ou de normas de execução ou especificações técnicas aplicáveis;
- as estruturas são objeto de inspeção e de manutenção adequada;
- as estruturas têm uma utilização em conformidade com as hipóteses consideradas no projeto.

2.2 Requisitos gerais

2.2.1 Requisitos para elementos de projeto

Todos os projetos desenvolvidos devem respeitar os requisitos que se apresentam no relatório elaborado pelo LNEC [4], para além das exigências constantes da regulamentação aplicável. Em particular, no que respeita à documentação de cada projeto, esta deve ser completa e clara, incluindo:

- estudos de base;
- documentação das hipóteses consideradas;
- informação sobre caracterização da solução estrutural da plataforma, incluindo peças escritas e desenhadas e especificações técnicas gerais e especiais adotadas no projeto;
- análise de riscos.

2.2.2 Tempo de vida útil de projeto

O tempo de vida útil de projeto deverá ser o especificado pela APA, recomendando-se que, no mínimo, seja de 25 anos.

Poderá ser adotado um menor tempo de vida útil no caso de elementos estruturais substituíveis, desde que a situação de projeto correspondente à sua substituição seja explicitamente tida em consideração no projeto.

2.2.3 Fiabilidade estrutural

A solução estrutural da plataforma deve ser projetada e executada de modo que a plataforma, durante o tempo de vida útil de projeto, com níveis de fiabilidade apropriados e de uma forma económica:

- possa resistir a todas as ações e influências suscetíveis de ocorrerem durante a sua execução, utilização e desconstrução, e
- cumpra os requisitos de utilização e durabilidade especificados para a estrutura ou para qualquer elemento estrutural.

A escolha dos níveis de fiabilidade para uma determinada solução estrutural da plataforma deverá ter em conta os fatores relevantes, incluindo:

- a causa de e/ou os modos possíveis de ser atingido um estado limite;
- as possíveis consequências de ser atingido um estado limite, no que respeita à segurança de pessoas, segurança estrutural e desempenho operacional da barragem ou potenciais prejuízos económicos;
- o grau de aversão pública às possíveis consequências de ser atingido um estado limite;
- a capacidade de deteção atempada da ocorrência de um estado limite;
- os custos e os procedimentos necessários para controlar o nível de risco associado à ocorrência de um estado limite.

As consequências da rotura da estrutura ou de qualquer elemento estrutural devem ser classificadas em uma das três classes de consequências (CC) a seguir indicadas:

- CC3: Consequência elevada em termos de perda de vidas humanas; ou consequências económicas, sociais ou ambientais muito importantes;
- CC2: Consequência média em termos de perda de vidas humanas; consequências económicas, sociais ou ambientais medianamente importantes;
- CC1: Consequência baixa em termos de perda de vidas humanas; e consequências económicas, sociais ou ambientais pouco importantes ou desprezáveis.

Releva-se para a seleção da CC, as consequências (diretas e indiretas) de uma eventual não-conformidade funcional da barragem causada pela estrutura ou por um elemento da plataforma fotovoltaica.

A classe de consequência a considerar no dimensionamento deve ser submetida à APA, recomendando-se que não seja inferior à CC2.

2.2.4 Robustez

A solução estrutural da plataforma deve ser projetada com um nível adequado de robustez para que, durante o tempo de vida útil de projeto, seja aceitável o nível de risco associado à perda de integridade estrutural da plataforma devida à ocorrência de eventos adversos, previstos e imprevistos.

Recomenda-se que, no mínimo, sejam verificados os Estados Limites Últimos para uma situação de projeto acidental correspondente à perda nominal de, pelo menos, um elemento com efeitos das ações mais próximos da sua capacidade resistente.

2.2.5 Materiais e componentes

A plataforma poderá ser projetada e executada considerando diferentes tipos de materiais e componentes (e.g. elementos estruturais e ligações), desde que próprios para o fim a que se destinam e com propriedades adequadas às situações de projeto preconizadas e durante o ciclo de vida útil da plataforma.

Todos os produtos utilizados na solução estrutural da plataforma devem ser devidamente caracterizados, quer em termos físico-químicos, de desempenho mecânico e de durabilidade, devendo conhecer-se, por exemplo:

- a resistência e a capacidade de deformação à tração e a resistência à fadiga em tração (de baixo e alto ciclo);
- a resistência e a capacidade de deformação ao choque e ao impacto (e.g. granizo, acostagem);
- a durabilidade face à corrosão dos materiais metálicos com ou sem proteção anticorrosiva;
- a durabilidade face à exposição solar (e.g. raios UV), em especial dos materiais de natureza polimérica;
- a reação e a resistência ao fogo, nomeadamente a capacidade de os materiais resistirem à propagação do fogo e de suportarem as altas temperaturas geradas durante um incêndio;
- a toxicidade dos materiais, nomeadamente o risco de libertação de substâncias tóxicas que possam contaminar a albufeira e colocar em risco a qualidade da água;
- a reciclabilidade e a pegada de carbono dos materiais.

As propriedades acima indicadas deverão ser caracterizadas, quando aplicável, para o curto e para o longo prazo e para a gama de temperaturas atmosféricas que caracterizam a região onde a plataforma será instalada, bem como para regimes quase-estáticos e/ou dinâmicos (incluindo ciclos carga-descarga), conforme aplicável.

Recomenda-se que sejam utilizados materiais (e elementos estruturais) objeto de normas de ensaio e de produto, nacionais ou europeias, ou documentos equivalentes (e.g. Documentos de Avaliação Europeus), envolvendo sistemas e mecanismos de certificação. Em todo o caso, devem ser sempre verificadas as exigências referidas na legislação aplicável.

2.2.6 Gestão da qualidade

Devem ser implementadas medidas apropriadas de gestão da qualidade para se alcançar em obra uma estrutura que corresponda aos requisitos e às hipóteses do projeto. Estas medidas incluem:

- procedimentos organizativos para o projeto, a execução, a utilização e a manutenção;
- controlos nas fases de projeto, incluindo a sua revisão formal, de pormenorização, de execução, de utilização e de manutenção.

A especificação da Classe de Execução deverá ser efetuada com base na legislação em vigor, e ser clara relativamente à identificação dos componentes ou tecnologias/materiais que requerem Classe de Execução com requisito diferente da Classe de Execução da generalidade da obra.

2.2.7 Condições ambientais

O aumento da capacidade de produção de energia elétrica com base na instalação de plataformas solares flutuantes com um tempo de vida útil de pelo menos 25 anos, tem como consequência a curto-médio prazo o aumento da fileira de resíduos fotovoltaicos. Para prevenir a produção de resíduos é necessário definir estratégias desde a fase de conceção até ao final de vida das plataformas flutuantes que permitam circular os materiais de modo a reterem o seu valor económico mais elevado, ou seja, potenciando a valorização. Assim, deverá ser elaborado e apresentado um plano de desativação e de desconstrução da plataforma flutuante no projeto submetido a aprovação pela APA.

2.3 Estudos de base

Os estudos de base têm como objetivo caracterizar as condições ambientais e específicas do local onde se pretende instalar a plataforma. Essas condições incluem todos os fenómenos naturais e aspetos locais que podem influenciar o desempenho da estrutura e, por conseguinte, o seu projeto.

Nas condições específicas do local consideram-se a topografia e a batimetria, as condições do terreno, a sismicidade, as condições ambientais, a biologia e a qualidade da água.

O conjunto das condições ambientais inclui as condições meteorológicas (radiação solar, pluviosidade, vento, neve e gelo) e as condições hidrodinâmicas da albufera (agitação, correntes e variação do nível de água).

Os estudos de base deverão incluir (lista não exaustiva):

- **Análise de riscos**
Nesta análise, para o sistema completo constituído pela plataforma serão identificados os modos de rotura com risco relevante (e.g. movimentação excessiva da plataforma), os seus eventos iniciadores (e.g. ondulação ou ventos intensos), a sequência de eventos, as consequências e as medidas de mitigação preventivas ou corretivas a adotar.
- **Batimetria da albufera**
Uma correta determinação da batimetria da albufera nas proximidades da plataforma é fundamental para se conhecer a gama de profundidades de água existentes e se avaliar a possibilidade de ocorrência de rebentação das ondas em locais de baixa profundidade.
- **Hidrodinâmica da albufera**
O estudo da hidrodinâmica da albufera em situação de cheia deve permitir analisar, em particular, se a capacidade de vazão dos órgãos de segurança da barragem é afetada devido à obstrução dos vãos pela estrutura da plataforma ou por qualquer dos seus elementos (e.g. módulos e painéis fotovoltaicos) à deriva por rotura nos subsistemas da plataforma e/ou nas suas interligações.
- **Caracterização do vento**
As direções predominantes e o(s) valor(es) básico(s) da velocidade de referência do vento podem ser determinados a partir de registos obtidos de estações meteorológicas situadas a

menos de 20 km da albufera em orografias simples desde que, devidamente auditadas por forma a garantir a qualidade e a consistência dos registos.

O cálculo das ações do vento e da interação vento-estrutura podem ser estimados a partir de ensaios em túnel de vento e/ou simulações numéricas (e.g. Computational Fluid Dynamics (CFD)).

- **Caracterização da ondulação**
No caso de albufeiras de dimensões reduzidas ou médias ($\sim < 100\text{km}^2$ de superfície inundável), a altura significativa das ondas geradas pela ação do vento pode ser estimada utilizando formulações empíricas com base no valor do percurso sobre a superfície livre da água (vulgo “fetch”). Em alternativa, se houver medições da altura de onda, que cubram um período representativo de pelo menos 10 anos, podem as estimativas da ondulação ser inferidas pela análise desta série e extração dos valores associados aos períodos de retorno adequados. Adicionalmente, a ondulação gerada pela passagem/acostagem de embarcações, bem como pela ação de aeronaves deverá ser igualmente caracterizada.
- **Estudo geológico-geotécnico**
Deve ser elaborado um relatório geológico e geotécnico interpretativo das condições dos terrenos de fundação do sistema de ancoragens. Esta informação deverá permitir a seleção dos tipos de ancoragem e a verificação de segurança geotécnica e estrutural das que vierem a ser adotadas. O relatório deverá respeitar as disposições da NP EN 1997-1 [6] e da EN 1997-2 [7]. Deverá conter informação de base sobre a planimetria e altimetria do local, a caracterização geológica do local, as unidades geotécnicas identificadas e sua distribuição espacial e dois anexos com informação geológica e geotécnica e o com o relatório factual dos trabalhos de prospeção e dos ensaios de campo e de laboratório realizados.
- **Ensaio de caracterização de desempenho**
Caracterização experimental do desempenho de materiais, elementos e ligações não enquadrados por normas e outros documentos regulamentares.

2.4 Princípios para o dimensionamento em relação aos estados limites

2.4.1 Estados limites últimos

Quando for pertinente, devem ser verificados os seguintes estados limites últimos:

- rotura da estrutura ou do terreno de fundação, total ou parcial, por falta de capacidade resistente dos materiais, deformação excessiva, perda de estabilidade da estrutura ou de parte da estrutura, incluindo apoios e fundações;
- perda de equilíbrio do conjunto ou de parte da estrutura, considerada como corpo rígido;
- rotura provocada por fadiga, vibração ou por outros efeitos dependentes do tempo.

2.4.2 Estados limites de utilização

Devem ser classificados como estados limites de utilização os que se referem:

- ao desempenho da estrutura ou dos seus elementos estruturais em condições normais de utilização (deslocamentos, vibrações, fendilhação, etc.);
- à operacionalidade da plataforma (e.g. movimentos).

2.4.3 Definição de situações de projeto

Devem selecionar-se as situações de projeto relevantes, tendo em conta as circunstâncias nas quais a estrutura da plataforma deve desempenhar a sua função, nomeadamente:

- situações de projeto persistentes, correspondentes a condições normais de utilização;
- situações de projeto transitórias, correspondentes a condições temporárias de duração muito inferior ao tempo de vida útil de projeto, como, por exemplo, durante a execução, manutenção, inspeção ou a substituição de elementos, acostagem de embarcações utilizadas nestas operações, utilização da albufera para abastecimento de aeronaves de combate a incêndios;
- situações de projeto acidentais, correspondentes a condições excecionais aplicáveis à estrutura ou à sua exposição, como, por exemplo, incêndios, explosões, colisão de embarcações/aeronaves ou outros objetos e ainda consequências de rotura localizada.

2.4.4 Modelação e análise estrutural

Para cada situação de projeto, o dimensionamento em relação aos estados limites deve basear-se na utilização de modelos estruturais e de modelos de ações que sejam adequados em relação aos estados limites a considerar.

Os seguintes modelos de verificação poderão ser utilizados:

- modelos experimentais;
- modelos numéricos.

A análise estrutural deverá permitir obter uma simulação fidedigna do desempenho do sistema global, inclusive a longo prazo. Para tal, os modelos devem ser validados, para averiguar se reproduzem com exatidão e precisão adequadas os fenómenos físicos relevantes.

O modelo estrutural deve simular o desempenho do sistema global da plataforma, considerando todos os subsistemas.

No caso de serem utilizados modelos numéricos podem ser utilizados um dos seguintes métodos:

- método de dimensionamento indireto, no qual a verificação é feita com base nos efeitos das ações (por exemplo, forças internas e tensões) obtidos a partir do modelo e na resistência obtida pela fórmula relevante especificada no Eurocódigo apropriado (e.g. NP EN 1993-1-1 [8]);
- método de dimensionamento direto, no qual a verificação é feita com base nos efeitos das ações (por exemplo, forças interiores e tensões) e na resistência obtida diretamente a partir do modelo.

Os modelos das ações e resistências a considerar devem ser compatíveis com o método de dimensionamento e tipo de análise estrutural utilizado.

Para cada projeto, deverá ser utilizado apenas um único método de dimensionamento e tipo de análise estrutural.

2.4.5 Formatos de verificação da segurança

Deverá ser preferencialmente utilizado o formato dos coeficientes parciais. Em alternativa, poderá ser utilizado o formato do coeficiente de resistência global e, em casos especiais, o formato do coeficiente global.

Em cada projeto, deverá ser utilizado apenas um único formato de verificação. Não obstante, para certos elementos, a verificação da segurança poder ser complementada com base num formato baseado em ensaios experimentais.

As verificações devem ser efetuadas para todos os estados limites aplicáveis, cobrindo todas as situações de projeto e combinações relevantes de ações.

Todas as fontes relevantes de incertezas, incluindo as do modelo, devem ser tidas em conta nas verificações.

Refira-se que os valores dos coeficientes parciais especificados nos Eurocódigos Estruturais não foram especificamente calibrados para a tipologia de estruturas objeto do presente relatório. Não obstante, e na falta de melhor informação, poderá admitir-se que os mesmos são válidos para o projeto de plataformas fotovoltaicas flutuantes.

2.4.6 Ações e combinações de ações

Devem ser consideradas todas as ações (permanentes, variáveis e acidentais) que contribuem para o comportamento da plataforma e dos seus componentes. Os Eurocódigos Estruturais devem ser seguidos sempre que aplicáveis.

No caso específico do efeito da agitação, devem ser consideradas as ações das ondas geradas pelo vento, geradas pela circulação de embarcações na albufera e ainda, eventualmente, geradas por outro tipo de veículos que possam utilizar a albufera (e.g. motas de água, aeronaves de recolha de água para combate a incêndios).

Os valores de cálculo do efeito desta ação, os coeficientes parciais e as combinações de ações devem ser obtidos de acordo com o especificado nas seguintes normas nacionais europeias em vigor:

- BS 6349-1-1:2013 – British Standards. Maritime structures – Part 1: Code of practice for general criteria [9];
- BS 6349-2:2019 – British Standards. Maritime works – Part 2: Code of practice for the design of quay walls, jetties and dolphins [10];
- ROM 2.0-11. Recomendaciones para el proyecto y ejecución de Obras de Atraque y Amarre [11].

As combinações de ações a considerar para cada situação de projeto devem incluir diferentes cenários verosímeis de combinação das ações atuantes (e.g. vento, agitação e correntes). Cada uma destas combinações deve ter associada uma probabilidade de excedência anual em conformidade com a Classe de Consequência (especificada

para o projeto. Os efeitos do nível da água devem ser incluídos, quando relevantes.

2.4.7 Resistência, deformabilidade e vibrações

O valor de cálculo das propriedades resistentes dos materiais deve ser determinado de acordo com o indicado nos Eurocódigos Estruturais.

Relativamente à deformabilidade e vibrações, caso as normas acima referidas não especifiquem valores adequados para um caso particular (e.g. especificidades do material e elemento utilizado, funcionamento de determinado equipamento) poderão ser utilizados os critérios indicados na documentação técnica do fabricante/produzidor, bem como o definido pelo dono de obra como requisitos de funcionamento e operação da plataforma.

2.4.8 Requisitos para a fase de exploração

Deve ser elaborado um Plano de Observação, o qual deve incluir:

- a identificação dos modos de rotura e das grandezas decorrentes a controlar durante a fase de exploração da plataforma;
- os requisitos dos equipamentos e sistemas a instalar para registar e analisar os registos as grandezas a controlar, respetivamente;
- os parâmetros de avaliação das grandezas a controlar para diferentes níveis de desempenho (e.g. alerta e alarme);
- o posicionamento dos equipamentos e sistemas a instalar;
- o responsável pela segurança da plataforma nos aspetos considerados neste plano.

Deve ser também elaborado um Plano de Inspeção e de Manutenção, o qual deve ser baseado na informação indicada nos documentos técnicos dos materiais e elementos utilizados. Em particular:

- deve ser assegurado o cumprimento dos requisitos indicados nos documentos acima referidos quanto às atividades preventivas de rotina de inspeção e de manutenção (e.g. reparações e substituições), quer em relação à sua periodicidade, extensão, detalhe e metodologia.
- as ações de inspeção e manutenção devem ser escrupulosamente registadas, para memória futura.

3 Apreciação de projetos FPV

Na sequência do indicado no Caderno de Encargos do procedimento concorrencial Leilão Solar Flutuante 2021, o LNEC colabora com diversas entidades promotoras na apreciação dos anteprojetos de plataformas fotovoltaicas flutuantes, com o objetivo de verificar o cumprimento do RSB e dos requisitos técnicos acima resumidos, bem como a necessária viabilidade construtiva, operacional e económica destas instalações.

4 Conclusão

A presente Nota Técnica sumariza as principais atividades desenvolvidas pelo LNEC no âmbito do Decreto-Lei n.º 98/2021

de 16 de novembro que determinou a abertura de procedimento concorrencial, sob a forma de leilão eletrónico, para atribuição de reserva de capacidade de injeção em pontos de ligação à Rede Elétrica de Serviço Público para eletricidade a partir da conversão de energia solar por centros eletroprodutores fotovoltaicos flutuantes a instalar em albufeiras de barragens.

Em particular, apresentou-se, de forma condensada, os requisitos técnicos definidos pelo LNEC para a avaliação das condições de segurança de projetos de plataformas fotovoltaicas flutuantes em albufeiras de barragens, e pela posterior apreciação dos projetos de execução destas instalações.

Referências

- [1] World Bank Group, ESMAP and SERIS – *Where Sun Meets Water: Floating Solar Handbook for Practitioners*. World Bank, 2019, 155 p.
- [2] Diário da República – *Decreto-Lei n.º 98/2021 de 16 de novembro*.
- [3] Diário da República – *Decreto-Lei n.º 21/2018 de 28 de março*.
- [4] LNEC – *Projetos de centrais fotovoltaicas flutuantes em albufeiras de barragens requisitos técnicos para a avaliação das condições de segurança*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 335/23 DE-Chefia, 2023, 55 p.
- [5] DNV GL – *Design, development and operation of floating solar photovoltaic systems*. DNV GL, DNVGL-RP-0584, 2021, 152 p.
- [6] IPQ – *Eurocódigo 7 - Proyecto geotécnico - Parte 1: Regras gerais (NP EN 1997-1)*. Instituto Português da Qualidade, 2013.
- [7] CEN – *Eurocode 7 - Geotechnical design - Part 2: Ground investigation and testing (EN 1997-2)*. European Committee for Standardization, 2010.
- [8] IPQ – *Eurocódigo 3 - Projeto de estruturas de aço - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios (NP EN 1993-1-1)*. Instituto Português da Qualidade, 2017.
- [9] BSI – *Maritime works - General. Code of practice for planning and design for operations (BS 6349-1-1)*. London: British Standards Institution, 2013.
- [10] BSI – *Maritime works - Code of practice for the design of quay walls, jetties and dolphins (BS 6349-2)*. London: British Standards Institution, 2019.
- [11] Puertos del Estado – *Obras de Atraque y Amarre: Criterios generales y Factores del Proyecto (ROM 2.0-11)*. Puertos del Estado, 2011.