

---

## POTENCIALIDADE DE APLICAÇÃO DE UHPC EM ESTRUTURAS MISTAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA

### *POTENTIAL APPLICATION OF UHPC IN COMPOSITE STRUCTURES FOR WIND POWER GENERATION*

Paulo Roberto Lopes Lima <sup>1</sup>,

Mojtaba Maali Amiri <sup>2</sup>

Milad Shadman <sup>2</sup>

Feng Junkai <sup>3</sup>

Segen Farid Estefen <sup>2</sup>

Romildo Dias Toledo Filho <sup>2</sup>

**Resumo:** O grande crescimento da demanda por energia renovável nos últimos anos tem representado um desafio à engenharia estrutural pela necessidade de estruturas maiores e mais esbeltas para aumento da capacidade de geração. Demandas de mercado tem resultado na substituição de torres e plataformas em aço por estruturas de concreto armado, que podem incorporar novos materiais avançados. Neste trabalho é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o uso de concreto de ultra alta performance em estrutura mistas para sistemas onshore e offshore de geração de energia eólica. Inicialmente são apresentadas as prescrições normativas específicas para uso do concreto armado em plataforma offshore. As propriedades do concreto de ultra alta performance (UHPC) bem como as aplicações em estruturas para geração de energia são discutidas. Os resultados indicam que é possível reduzir a armadura passiva de estruturas de concreto armado com o uso de materiais cimentícios avançados e que há a possibilidade de aplicações desses materiais em elementos mistos aço-concreto.

**Palavras-chaves:** Materiais avançados; energia eólica; estruturas mistas; concreto reforçado com fibras

**Abstract:** *The significant growth in demand for renewable energy in recent years has posed a challenge to structural engineering due to the need for larger and more slender structures to increase generation capacity. Market demands have led to the replacement of steel towers and platforms with reinforced concrete structures, which can incorporate new advanced materials. This paper presents a literature review on the use of ultra-high-performance concrete in mixed structures for onshore and offshore wind energy generation systems. Initially, specific regulatory prescriptions for the use of reinforced concrete in offshore platforms are presented. The properties of ultra-high-performance concrete (UHPC) as well as its applications in energy generation structures are discussed. The results indicate that it is possible to reduce the passive reinforcement of reinforced concrete structures through the use of advanced cementitious materials, and that there is the possibility of applying these materials in steel-concrete composite elements.*

**Keywords:** *Advanced materials; wind energy; composite structures; fiber-reinforced concrete.*

---

<sup>1</sup>Universidade Estadual de Feira de Santana – Brasil, e-mail: [prllima@uefs.br](mailto:prllima@uefs.br)

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro – Brasil, e-mail: [mojtaba@lts.coppe.ufrj.br](mailto:mojtaba@lts.coppe.ufrj.br), [milad.shadman@lts.coppe.ufrj.br](mailto:milad.shadman@lts.coppe.ufrj.br), [segen@lts.coppe.ufrj.br](mailto:segen@lts.coppe.ufrj.br), [toledo@coc.ufrj.br](mailto:toledo@coc.ufrj.br)

<sup>3</sup>China National Offshore Oil Company – China, e-mail: [fengjk@cnoocbrasil.com](mailto:fengjk@cnoocbrasil.com)

---

## 1 Introdução

O concreto armado tem sido empregado com sucesso há muitos anos na construção de diversas estruturas, incluindo barragens, pontes, torres e arranha-céus. No setor de energia eólica onshore, o concreto foi inicialmente utilizado nas fundações de sustentação de torres metálicas e posteriormente aplicado na produção de torres de concreto armado e protendido (HAAR; MARX, 2015; LAGO et al., 2022).

O sucesso do concreto armado em termos de relação custo-eficácia, resistência e durabilidade em estruturas marítimas fixas, como portos, pontes e docas, incentivou a sua aplicação em estruturas fixas offshore, incluindo plataformas petrolíferas e plataformas de energia eólica e no desenvolvimento de plataformas flutuantes (FERNANDEZ; PARDO, 2013; EDWARDS et al., 2023; MATHERN et al., 2021).

Em termos de projeto estrutural, as estruturas flutuantes offshore seguem os mesmos princípios das estruturas fixas em terra e podem ser projetadas com base nos principais códigos de projeto internacionais, como NBR 6118, ACI 318 e CEB-FIP MC2010. No entanto, as forças dinâmicas a que estão sujeitos e a exposição ao ambiente marinho requerem considerações específicas, que foram estabelecidas por códigos relevantes estabelecidos pelo Det Norske Veritas (DNV), American Bureau of Shipping (ABS) ou ISO 19903. Isto porque relatórios de acidentes estruturais com estruturas de energia eólica indicam a necessidade de uma avaliação cuidadosa de todas as forças atuantes.

Além disso, preocupações com custos, durabilidade e necessidade de descomissionamento exigem otimização de materiais e incorporação de novas tecnologias na produção de plataformas flutuantes de concreto. Com o avanço da tecnologia do concreto nos últimos anos, novos materiais têm sido introduzidos como alternativas para uso em torres e plataformas, como o concreto de ultra alta performance (UHPC). Contudo, a sua utilização deve ser baseada nos requisitos estabelecidos pelos códigos de projeto, como será discutido.

O objetivo deste trabalho é apresentar as principais propriedades dos materiais cimentícios avançados e seu uso em estruturas de concreto armado e estruturas mistas aço-concreto para sistemas de geração de energia eólica. Para isso, uma revisão de literatura foi realizada sobre as propriedades dos materiais avançados, as normas utilizadas para estruturas offshore de concreto armado e sobre as aplicações já desenvolvidas em estruturas de concreto e estruturas mistas aço-concreto.

## 2 Requisitos normativos para concreto utilizado em plataformas flutuantes

Para o dimensionamento de estruturas offshore, são necessárias especificações especiais para considerar as ações dinâmicas atuantes e garantir a durabilidade em ambiente marinho. De acordo com a ABS (2020), a subestrutura flutuante de concreto de uma Turbina Eólica Offshore Flutuante deve possuir resistência suficiente para garantir segurança adequada contra a falha da estrutura ou de seus componentes. Vários modos de falha potencial a serem considerados incluem: i) Perda de equilíbrio geral; ii) Falha da seção crítica; iii) Instabilidade resultante de deformação excessiva; e iv) Deformação plástica ou de fluência excessiva. A operacionalidade da subestrutura flutuante também deve ser avaliada, considerando os seguintes fatores que podem influenciar sua operacionalidade: i) Fissuração e lascamento; ii) Deformação; iii) Corrosão das armaduras ou deterioração do concreto; iv) Vibração; e v) Vazamento.

Para estruturas expostas à água do mar, o concreto deve apresentar resistência à compressão superior a 40 MPa, sendo que a resistência à fadiga é uma condição necessária para a utilização da subestrutura flutuante de concreto de uma turbina eólica offshore.

Devido à agressividade do ambiente marinho, mudanças na composição do concreto precisam ser implementadas para estruturas offshore. De acordo com o DNV-OS-C502 (DNVS, 2004), na zona de respingo, o teor de cimento não deve ser inferior a 400 kg/m<sup>3</sup>. O Bureau Veritas (2017), por outro lado, estabelece valores máximos eficazes de relação água/cimento a serem utilizados para concreto estrutural em balsas offshore são de 0,45 para fora da zona de respingo e 0,40 para outras zonas.

De acordo com a ABS (2013), o cimento utilizado deve ser equivalente aos tipos I ou II de cimento Portland conforme especificado pela ASTM C150 ou cimento Portland-pozolânico conforme especificado pela ASTM C595. Para aplicações específicas, o cimento Portland tipo III da ASTM C150 pode ser especialmente aprovado.

## 2 Uso do concreto com fibras

O uso de Concreto Reforçado com Fibras (CRF) na produção de estruturas de concreto offshore é permitido pela DNVGL-ST-C502 (DNV, 2004), sendo que a contribuição do CRF na resistência a tração só é permitida para elementos secundários e desde que sejam usadas fibras de aço com uma fração volumétrica superior a 1%. Elementos secundários são aqueles onde a falha não teria consequências significativas.

Embora as normas sejam geralmente conservadoras quanto ao uso de CRF em elementos estruturais primários de estruturas de concreto offshore, Ewart et al. (2018) sugerem que o uso de concretos avançados reforçados com fibras, como o Concreto de Ultra-Alto Desempenho Reforçado com Fibras (UHPRFC) e o Compósito de Cimento tipo SHCC, poderia reduzir potencialmente a necessidade de reforço interno, diminuir a espessura da parede e a massa estrutural geral.

Além disso, o CRF reduz a permeabilidade do material no estado fissurado, o que poderia minimizar a necessidade de pós-tensionamento, reduzindo assim o custo de plataformas flutuantes de concreto armado.

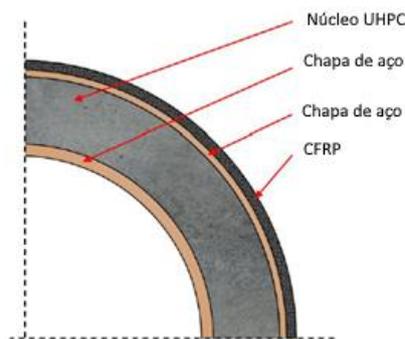
## 3 Aplicação do concreto de ultra alta performance (UHPC)

O UHPC pertence a uma classe de CRF caracterizada por uma fração volumétrica de fibras relativamente alta, geralmente superior a 2% e que apresentam alta resistência, ductilidade e durabilidade. A resistência à compressão do UHPC é tipicamente superior a 100 MPa, atendendo aos requisitos dos padrões de estruturas de concreto offshore. Seu comportamento à tração é caracterizado por endurecimento de deformação com aumento da resistência mesmo após o surgimento de fissuras na matriz e com resistência à tração superior a 6 MPa.

O UHPC é caracterizado por um teor de cimento muito alto, uma relação água-cimento extremamente baixa, a inclusão de microsílica, pó de quartzo fino, superplastificante, fibras de aço e areia de quartzo com diâmetro menor que 0,60 mm (AZMEE; SHAFIQ, 2018). O uso de fibras de aço limita a aplicação do UHPC em estruturas expostas a um ambiente marinho devido ao risco de corrosão, o que levou ao desenvolvimento de UHPC com outros tipos de fibras, como fibra polimérica, fibra de carbono e fibra de vidro (GONG et al, 2022).

Em termos de durabilidade, o UHPC oferece vantagens sobre o concreto convencional devido à sua menor absorção de água e reduzida capilaridade para água e íons de cloreto. Como resultado, o UHPC exibe uma taxa mais baixa de corrosão da armadura e menos deterioração devido a ciclos de gelo e degelo. As misturas de UHPC também demonstram excelente resistência ao congelamento e descongelamento, reação álcali-sílica e à entrada de substâncias agressivas como íons de cloreto e sulfatos.

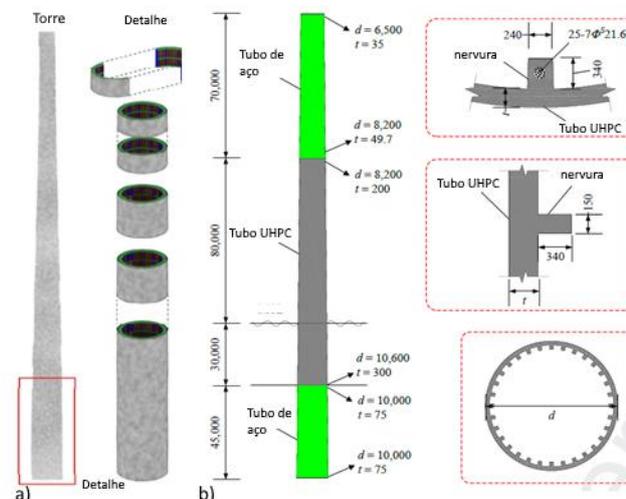
O aprimoramento das propriedades físicas e mecânicas, bem como a resistência química do UHPC, o qualifica para uso em estruturas de concreto armado para torres e plataformas de turbinas eólicas. Markowski e Lohaus (2019) aplicaram elementos sanduíche de UHPC (Figura 1) na subestrutura de uma construção offshore, que exibiram alta ductilidade e uma redução de 50% do custo, em comparação com a solução de aço.



**Figura 1.** Seção transversal de uma estrutura sanduíche com UHPC  
Fonte: Markowski; Lohaus (2019)

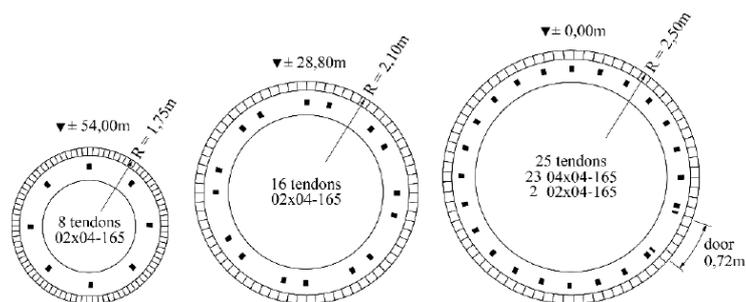
Jammes et al. (2013) propõem o uso de UHPC na produção de torres de turbinas eólicas de concreto pré-fabricadas, considerando a resistência à fadiga e durabilidade aprimoradas em comparação com o concreto convencional. Utilizando projeto estrutural e modelagem numérica, um novo método de construção é proposto, envolvendo a produção da torre em segmentos, conforme mostrado na Figura 2a. Uma torre híbrida com tubos de aço e UHPC foi sugerida por Zhou et al. (2023), conforme ilustrado na Figura 2b. Esta torre híbrida demonstrou resistência suficiente tanto em carga última quanto em fadiga para suportar cargas ambientais severas de ventos extremos, ondas e terremotos.

O projeto conceitual de uma estrutura de torre de UHPC apresentado por Sobek et al. (2013) propõe a divisão da torre em 14 segmentos pré-fabricados que são empilhados uns sobre os outros, e posteriormente centralizada por protensão. Os resultados da avaliação dinâmica sugerem substituir a torre de aço por torres de UHPC.



**Figura 2.** Torre in UHPC: a) construção em segmentos de concreto (Jammes et al., 2013); b) Estrutura mista UHPC-aço  
Fonte: Zhou et al. (2023)

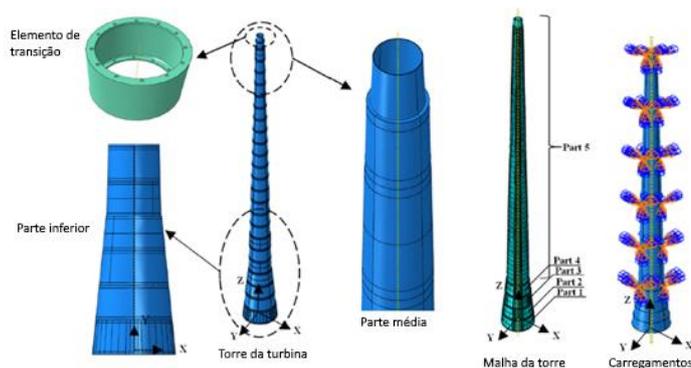
Toader et al. (2019) também propuseram uma estrutura de torre para turbinas eólicas feita de segmentos de UHPC reforçados com concreto protendido, como mostrado na Figura 3. Sua abordagem de projeto, baseada em análise de frequência própria, indica a viabilidade de construir uma torre de 72 metros usando apenas 130 m<sup>3</sup> de concreto, o que reduz significativamente o consumo de material em comparação com uma torre de concreto protendida moldada in loco.



**Figura 3.** Segmentos de UHPC em concreto protendido

Fonte: Toader et al. (2019)

O conceito de torre híbrida é apresentado por Wu et al. (2022) que utilizou um material compósito cimentício de ultra alto desempenho com resistência à compressão de 200 MPa para garantir alta durabilidade e ductilidade da torre de turbina eólica. A estrutura da torre de 120 metros era composta por vários segmentos de UHPC, como mostrado na Figura 4. A torre foi projetada com várias dimensões e, com base em uma avaliação geral, a torre com espessura de parede de 200-300 mm, juntamente com armadura protendida, demonstrou desempenho estrutural superior.

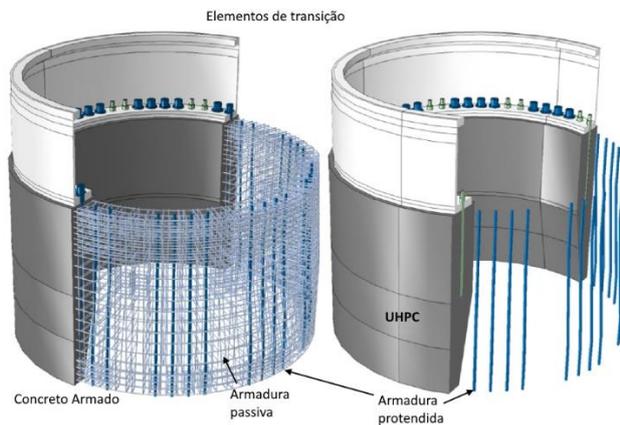


**Figura 4.** Modelo de análise de torre em UHPC

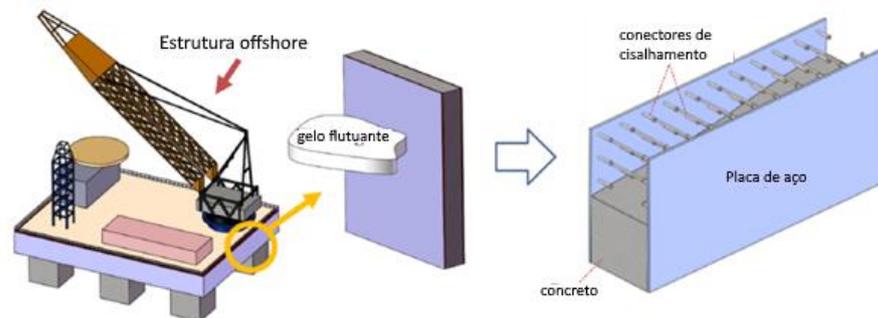
Fonte: Wu et al. (2022)

Lin et al. (2023a) realizaram uma avaliação do uso de UHPC na estrutura de uma torre de turbina eólica protendida em aço e concreto de 4,8 MW com altura de 160 m, comparando-a com uma solução convencional de concreto armado. Em contraste com o segmento de transição tradicional (Figura 5), que emprega uma quantidade significativa de reforço de aço, incluindo reforço circular horizontal, reforço vertical, reforço de canal e reforço construtivo, eles propuseram um novo segmento de transição usando UHPC que não requer reforço de aço comum.

O uso de painéis sanduíche UHPC-aço para aplicações offshore (Figura 6) foi investigado por Lin et al. (2023b) em modelos de projeto. Um novo modelo teórico foi proposto, considerando o escorregamento interfacial e os efeitos das fibras de aço na determinação da capacidade máxima do painel. A vantagem do uso de aço como proteção da camada superficial do concreto já tinha sido apresentada anteriormente por Yan et al. (2016), Figura 7, e foi confirmada por Lin et al. (2023b) que utilizou uma estrutura offshore aço-UHPC-aço com o objetivo de aumentar a proteção da estrutura contra impacto de gelo.



**Figura 5.** Segmentos de transição da torre de turbina eólica em concreto armado convencional e em UHPC  
Fonte: Lin et al. (2023a)



**Figura 6.** Estrutura offshore mista aço-UHPC-aço  
Fonte: Lin et al. (2023b)



**Figura 7.** Estrutura offshore mista aço-UHPC-aço utilizada no Ártico  
Fonte: Yan et al. (2016)



---

DACHOLLOM, G. L.; HEJAZI, F.; YUSUF, B. Development of ultra high-performance fiber reinforced concrete barge for 5 MW wind turbine. *Structures*. p. 1349-1368, 2023.

DNV (Det Norske Veritas). Offshore Concrete Structures. **Offshore Standard DNV-OS-C502**, 2004.

DNV (Det Norske Veritas). **DNVGL-ST-0119: Floating wind turbine structures**. Report, DNV GL, URL <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/ST/2018-07/DNVGL-ST-0119.pdf>, 2018.

EDWARDS, E. C.; HOLCOMBE, A.; BROWN, S.; RANSLEY, E.; HANN, M.; GREAVES, D. Evolution of floating offshore wind platforms: A review of at-sea devices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 183, p. 113416, 2023.

EWART, L. B.; BARLTROP, N.; THIES, P. R.; STRATFORD, T. Advanced concrete materials for offshore floating structures. 7th International Conference on Ocean Energy, Cherbourg, France, 2018.

FERNANDEZ, R.P.; PARDO, M. L.. Offshore concrete structures. **Ocean Engineering**, v. 58, p. 304-316, 2013.

GONG, J.; MA, Y.; FU, J.; HU, J.; OUYANG, X.; ZHANG, Z.; WANG, H. Utilization of fibers in ultra-high-performance concrete: A review. **Composites Part B: Engineering**, v. 241, p. 109995, 2022.

HAAR, C.V.D.; MARX, S. Design aspects of concrete towers for wind turbines. **Journal of the South African Institution of Civil Engineering**, v. 57, n. 4, p. 30-37, 2015.

JAMMES, F. X.; CESPEDES, X.; RESPLENDINO, J. Design of offshore wind turbines with UHPC. In: Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete. Marseille, France. 2013. p. 443-452.

LAGO, B. D.; FLESSATI, L.; MARVEGGIO, P.; MARTINELLI, P.; FRARACCIO, G.; DI PRISCO, C.; DI PRISCO, M. Experimental tests on shallow foundations of onshore wind turbine towers. **Structural Concrete**, v. 23, n. 5, p. 2986-3006, 2022.

LIN, L. et al. Damage evolution and failure analysis of the advanced transition segment behavior of wind turbine tower. **Engineering Failure Analysis**, v. 152, p. 107527, 2023a.

LIN, Y.; YAN, J.; WANG, Z.; ZOU, C. Theoretical models and reliability assessment of steel-UHPC-steel composite beams in offshore structures. **Ocean Engineering**, v. 271, p. 113739, 2023b.

MARKOWSKI, J.; LOHAUS, L. Winding Reinforced UHPC Sandwich Structures for Lightweight Jackets for Offshore Megastructures. **Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing**, p. 012027, 2019.

MATHERN, A.; VON DER HAAR, C.; MARX, S. Concrete support structures for offshore wind turbines: Current status, challenges, and future trends. **Energies**, v. 14, n. 7, p. 1995, 2021.

SOBEK, W.; PLANK, M.; FRETTLÖHR, B.; RÖHM, J.; CORVEZ, D. Conceptual design of an UHPFRC tower structure in segmental construction for offshore wind turbines. In: Proceedings of International Symposium on Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. 2013. p. 423-432.

TOADER, T.N.; SCHMEER, D.; SOBEK, W. Concept for an onshore tower structure made of UHPFRC segments for wind turbines. **Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture**, v. 62, n. 1, 2019.

---

WALIA, D.; SCHIINEMANN, P.; KUHL, M.; ADAM, F.; HARTMANN, H.; GROßMANN, J.; RITSCHEL, U. Prestressed ultra high-performance concrete members for a TLP substructure for floating wind turbines. In: ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference. ISOPE, 2017. p. ISOPE-I-17-304.

WU, X.; ZHANG, X.; BHATTARAI, H. B.; HWANG, H. J.; YANG, J.; KANG, S. Structural Behavior Analysis of UHPC Hybrid Tower for 3-MW Super Tall Wind Turbine Under Rated Wind Load. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 16, n. 1, p. 1-13, 2022.

YAN, J. B.; WANG, J. Y.; LIEW, J. R.; QIAN, X.; & ZONG, L. Ultimate strength behaviour of steel–concrete–steel sandwich plate under concentrated loads. **Ocean Engineering**, v. 118, p. 41-57, 2016.

ZHOU, Z.; CHEN, C.; SHEN, X.; ZHOU, X.; HUA, X. Conceptual Design of a Prestressed Precast Uhpc-Steel Hybrid Tower to Support a 15 Mw Offshore Wind Turbine. **Available at SSRN 4553891.**, 2023.