

Análise do comportamento térmico e das propriedades físico-mecânicas de concretos utilizados em fundações de torres eólicas *onshore* com aplicação de nitrogênio líquido para pré-resfriamento

Wanner Kelly Damasceno da Silva¹, Leonária Araújo Silva², Antônio Eduardo Bezerra Cabral³, Marcelo Silva Medeiros Júnior⁴, Gustavo de Medeiros Pinheiro⁵, Antônio Medeiros de Oliveira⁶

1, 2, 3, 4 Universidade Federal do Ceará (UFC)

5, 6 Dois A Engenharia e Tecnologia

kellydamasceno@alu.ufc.br, leonaria@alu.ufc.br, eduardo.cabral@ufc.br,
marcelomedeiros@ufc.br, gustavo.pinheiro@doisa.com, antonio@doisa.com

RESUMO

As turbinas eólicas *onshore* são comumente suportadas por fundações maciças, compostas por centenas de metros cúbicos de concreto e toneladas de aço. O composto cimentício libera elevado calor de hidratação durante o processo de construção, especialmente no período inicial. O gradiente de temperatura elevado gera tensões de tração significativas, ocasionando o surgimento de fissuras. Há a necessidade de medidas de controle do aumento de temperatura, na qual vários métodos preventivos podem ser adotados para controlar esse gradiente. Assim, o presente estudo tem por objetivo analisar o comportamento térmico e as propriedades físico-mecânicas de concretos aplicados a fundações de torres eólicas *onshore*, a partir da avaliação do uso de nitrogênio líquido como método de pré-resfriamento. Foram produzidas quatro variações de um mesmo traço de concreto, sendo T1 as amostras de referência, portanto não foi utilizado método de resfriamento; para a variação T2, utilizou-se gelo em escamas em substituição total à água de amassamento do traço; foi aplicado nitrogênio líquido nas amostras T3 e T4, sendo resfriado o concreto fresco ao final do processo de mistura para T3 e resfriado os agregados e a água de amassamento ao longo do procedimento de execução do concreto T4. Amostras de concreto foram inseridas em calorímetro semi-adiabático para análise térmica ao longo de sete dias, bem como foram produzidos concretos de classe 30 MPa para avaliação das propriedades físicas e mecânicas. Os resultados evidenciam a eficiência do uso de nitrogênio líquido para redução de temperatura em condições de concretagem em regiões de clima quente.

Palavras-chaves: Comportamento térmico; Fundações de torres eólicas; Concretos; Nitrogênio líquido; Métodos de resfriamento.

ABSTRACT

Onshore wind turbines are commonly supported by massive foundations made up of hundreds of cubic meters of concrete and tons of steel. The cementitious compound releases high heat of hydration during the construction process, especially in the initial period. The high temperature gradient generates stress projections, causing the appearance of cracks. There is a need for temperature rise control measures, whereby various preventive methods can be adopted to control this gradient. Thus, this study aims to analyze the thermal behavior and physical-mechanical properties of concrete applied to the foundations of onshore wind towers, based on the evaluation of the use of a water tank as a pre-cooling method. Four variations of the same concrete mix were produced, with T1 as the Reference, therefore the cooling method was not used; for the T2 variation, ice flakes were used in total replacement of the mix mix water; Liquid was applied to samples T3 and T4, the fresh concrete being cooled at the end of the mixing process for T3 and the aggregates and mixing water cooled throughout the execution procedure for concrete T4. Concrete samples were embedded in a semi-adiabatic calorimeter for thermal analysis over seven days, as well as 30 MPa class concretes were produced for the evaluation of physical and mechanical properties. The results show the efficiency of using liquid to reduce the temperature in concreting conditions in hot climate regions.

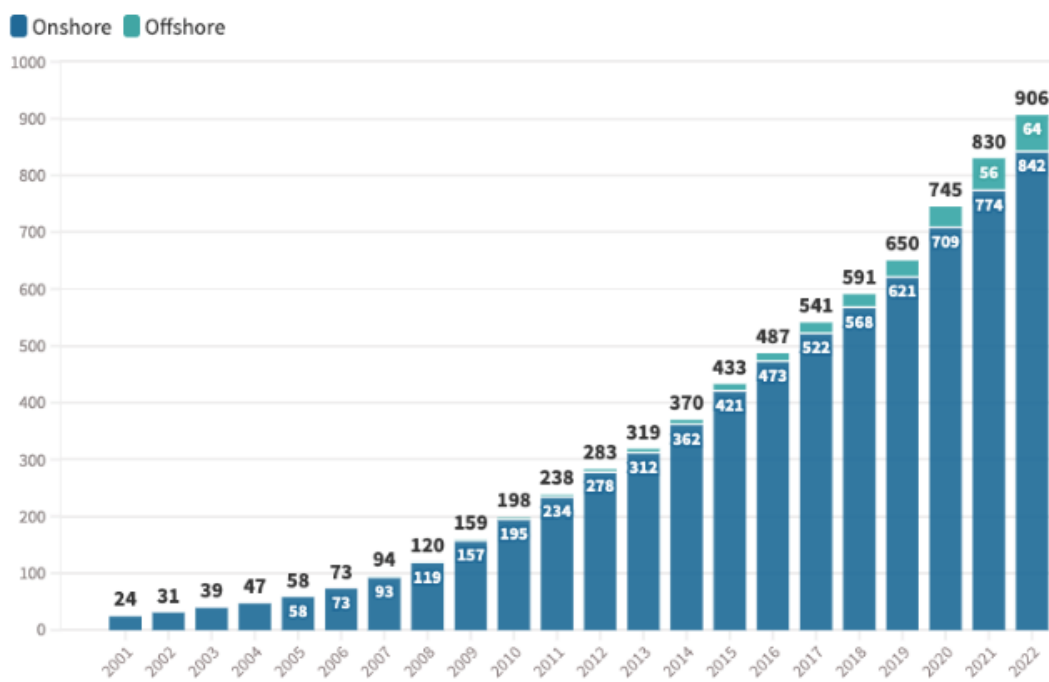
Keywords: Thermal behavior; Wind tower foundations; Concrete; Liquid nitrogen; Cooling methods.

1. INTRODUÇÃO

As energias renováveis são cada vez mais importantes na matriz energética de muitos países, frente ao elevado crescimento populacional, que aumentou a demanda global de energia; e ao enfrentamento das mudanças climáticas, que vem alterando o foco do desenvolvimento (SOLAUN; CERDÁ, 2020; IRENA, 2020). Em particular, a energia eólica, como fonte renovável de energia, não produz emissões e é uma excelente alternativa em termos ambientais à produção convencional de eletricidade a partir de combustíveis como petróleo, carvão ou gás natural. Essa preferência pela tecnologia eólica, entre as demais fontes de energia renovável, deve-se à sua capacidade de gerar grandes quantidades de eletricidade a custos competitivos (SIMAS; PACCA, 2014; DE SOUZA *et al.*, 2021; REN, 2021). Em 2020, houve redução de 48% e 54% dos custos globalizados de eletricidade da geração de energia eólica *onshore* (portanto construção no solo) e *offshore* (construção localizada no mar), respectivamente (REN, 2021).

De acordo com relatório da *Global Wind Report*, a instalação total de energia eólica global *onshore* foi de 842 GW em 2022, crescimento de 8% em relação ao ano anterior (Figura 1). Este aumento foi incentivado pela ampliação nos dois maiores mercados mundiais, China e Estados Unidos. Em 2020 foi adicionado, globalmente, 86,9 GW de capacidade eólica *onshore*, expansão de 59% da capacidade comparada ao ano de 2019 e projeta-se o crescimento médio anual de 4% até 2025 (GWEC, 2021).

Figura 1 – Evolução da capacidade eólica instalada no mundo (em GW).



Fonte: GWEC, 2023.

Espera-se que as novas instalações de energia eólica global ultrapassem 100 GW em 2023 e que 680 GW de novas capacidades sejam adicionadas nos próximos cinco anos (GWEC, 2023). Isso equivale a mais de 136 GW de novas instalações por ano até 2027.

Segundo o relatório da *Global Wind Report*, cinco pilares sustentarão esse nível de sucesso nos próximos cinco anos.

- A urgência da Europa em substituir os combustíveis fósseis por renováveis para obter segurança energética após a invasão russa à Ucrânia.
- Um forte impulso para energias renováveis nos Estados Unidos nos próximos dez anos, ocasionado principalmente pela Lei de Redução da Inflação (IRA), aprovada em Agosto de 2022.
- O compromisso da China em promover a expansão das energias renováveis em sua matriz energética, que representará mais de 80% do novo consumo de eletricidade total até o final de 2025.
- Governos alinhados para as oportunidades que a energia eólica *offshore* pode proporcionar, com ambição crescente para a maturidade e desenvolvimento dos mercados.
- Forte crescimento em grandes mercados emergentes *onshore* e *offshore*, a partir do meio desta década.

Em relação ao crescimento na América latina, este permaneceu estável em 2022 com novas instalações atingindo 5,2 GW, o segundo maior na história. Tal crescimento foi principalmente impulsionado pelo Brasil, que representou cerca de 80% da capacidade adicional da região. O forte crescimento do país esteve ligado a projetos desenvolvidos em regime de leilões regulados pelo serviço público e dos acordos de compra e venda de energia limpa (*Power Purchase Agreement*, PPA). Apesar da instabilidade econômica na Argentina, novas instalações na América latina (5 GW) são prováveis em 2023-2027, impulsionado principalmente pelo crescimento contínuo no Brasil e no Chile, bem como na conclusão de projetos na Colômbia. Espera-se a adição de 26,5 GW de energia *onshore* nesta região nos próximos cinco anos, com Brasil, Chile e Colômbia contribuindo com 78% desse incremento (GWEC, 2023).

O Brasil é um país que se destaca pela rápida e expressiva implantação de parques eólicos *onshore* (DIÓGENES *et al.*, 2020). Entre 2008 e 2022, a capacidade instalada nacional cresceu 75 vezes, atingindo 25.631 MW e liderando o crescimento de energia eólica na América Latina (GWEC, 2023). A previsão é que, até 2026, considerando apenas os leilões já realizados, a energia eólica avance até cerca de 32,2 GW (ABEEÓLICA, 2021).

Em 2021, o Brasil esteve em sexto lugar no Ranking Mundial de capacidade total instalada *onshore* com 21,5 GW (Figura 2), crescimento de 21% em relação ao ano anterior (GWEC, 2022). No ranking que contabiliza especificamente a nova capacidade instalada no ano, o Brasil aparece na terceira posição pelo segundo ano consecutivo. A expansão eficiente da indústria de energia eólica no Brasil é justificada pelo expressivo investimento de empresas que compõem essa cadeia produtiva, na qual foram investidos R\$ 20,6 bilhões, em 2020, representando 45% dos investimentos realizados em energias renováveis no país; ainda, justifica-se pela ótima qualidade dos ventos, evidenciado pelo fator de capacidade acima da média mundial. Tem-se que o fator de capacidade é a proporção entre a geração efetiva da usina em um intervalo de tempo e a capacidade total neste intervalo, portanto, este dado mede a produtividade dos ventos; e, em 2020, o Brasil atingiu o fator de 40,6%, valor acima da média mundial de 35% (ABEEÓLICA, 2021).

Figura 2 – Ranking da capacidade total instalada de energia *onshore*.



Fonte: GWEC, 2022.

A expansão da capacidade instalada de geração de energia eólica *onshore*, associada às contínuas inovações e melhorias de tecnologia, resulta no aumento do diâmetro do rotor e da altura das torres eólicas (IRENA, 2019). A pressão sobre os preços tem funcionado como um impulsionador da inovação tecnológica, empresas chinesas continuam a lançar novas turbinas com maior potência e rotores maiores para permanecerem competitivas. Em 2023, a empresa Sany lançou o protótipo 230/8-11MW em Pequim, a maior turbina eólica *onshore* do mundo (GWEC, 2023). Torres de maior altura requerem fundações mais robustas para suportar maiores carregamentos, necessitando de grandes volumes de concreto, uma vez que a qualidade dos recursos eólicos melhora significativamente com o aumento da altura das turbinas e este aumento garante uma distância segura entre pás mais longas e o solo (LANTZ *et al.*, 2019).

Em idade precoce, a temperatura em estruturas maciças de concreto pode atingir mais de 70 °C, tendo em vista as reações químicas de hidratação do cimento serem exotérmicas (BRIFFAUT *et al.*, 2012). No entanto, uma maior diferença de temperatura entre o interior e o exterior do concreto provoca fissuras térmicas, que afetam a segurança estrutural das edificações (RIDING *et al.*, 2014). Como o concreto possui baixa condutividade térmica, o calor interno oriundo do processo de hidratação não é facilmente distribuído, enquanto o calor externo se dissipa mais rapidamente, tendo em vista a transferência de calor na superfície do concreto com o meio (LI; NIE; WANG, 2014). Quando a deformação de contração térmica excede a capacidade de deformação de tração do concreto, ocorre sua fissuração precoce (AN *et al.*, 2017).

Para controlar o gradiente de temperatura e evitar o risco de fissuração das estruturas, métodos preventivos devem ser considerados, como o uso de materiais cimentícios suplementares, o uso de cimento Portland de baixo calor de hidratação, o pré-resfriamento do agregado antes da mistura do concreto, o pós-resfriamento do concreto com o uso de serpentinas internas ao compósito cimentício, a adoção de isolamento térmico superficial (YANG; WANG; ZHOU, 2007; TASRI; SUSILAWATI, 2019; HAMID; CHORZEPA, 2020; SMOLANA *et al.*, 2021). Dentre as medidas de pré-resfriamento, considera-se a aplicação de nitrogênio líquido, para resfriamento dos agregados, como inovação na indústria eólica, ainda que este material tenha sido utilizado pela primeira vez para pré-resfriar o concreto há quase 30 anos (GAJDA; SUMODJO, 2012), verifica-se que não há o domínio da tecnologia por parte dos empreiteiros, no Brasil. Assim, o presente artigo objetiva analisar o comportamento térmico e as propriedades físico-mecânicas de concretos aplicados a fundações de torres eólicas *onshore*, a partir da avaliação do uso de nitrogênio líquido como método de pré-resfriamento.

Apesar das vantagens da aplicação de nitrogênio líquido como método de pré-resfriamento do concreto massa, poucos estudos abordam este uso. Harith, Hassan e Hasan (2022) recomendam que sejam

desenvolvidas mais investigações relacionadas aos efeitos do resfriamento com nitrogênio líquido sobre as propriedades endurecidas, microestruturas e desempenho do concreto.

2. MATERIAIS E MÉTODO

2.1. Seleção de materiais

Foi utilizado o cimento Portland de alto forno com classe de resistência de 40 MPa (CP III 40 RS), produzido com adição de 35% a 75% de escória granulada de alto forno e usualmente aplicado em obras de fundações de estruturas de concreto massa devido ao baixo calor de hidratação desse cimento. O agregado miúdo usado foi de origem natural, proveniente de leito de rio. Utilizou-se, como agregado graúdo, uma rocha basáltica britada com dimensão máxima característica de 19 mm. Foi utilizado aditivo plastificante de pega normal, o qual promove a redução da retração e aparecimento de fissuras.

Para pré-resfriamento dos concretos produzidos, foi utilizado nitrogênio líquido e gelo em escamas, sendo este produto fabricado sem especificações técnicas. O nitrogênio líquido refrigerado (N_2) foi produzido e fornecido pelo Laboratório de Criogenia da Universidade Federal do Ceará (UFC), conforme Figura 3. Suas propriedades físico-químicas são apresentadas na Tabela 1.

Figura 3 – a) Fornecimento de nitrogênio líquido; b) Frasco dewar para armazenamento e transporte de N_2 .



Fonte: Autores, 2023.

Tabela 1 – Propriedades físico-químicas do Nitrogênio líquido (N₂) utilizado.

Propriedade	Nitrogênio líquido
Aspecto	Líquido criogênico, incolor, inodoro
Peso específico do líquido no ponto de ebulição e 1 atm (kg/m ³)	808,5 kg/m ³
Ponto de fusão a 10 psig (°C)	-210,0
Ponto de ebulição a 10 psig (°C)	-195,8
Peso molecular	28,01
Temperatura crítica (°C)	-149,9

Fonte: Autores, 2023.

2.2. Método de pesquisa

Para o presente artigo foram produzidas quatro variações de um mesmo traço de concreto, sendo as proporções dosadas por construtora local, onde se variou o método de pré-resfriamento dos materiais. Para o teste intitulado como T1, não foi utilizado método de resfriamento, sendo as amostras desse grupo nomeadas como referências ou amostras-padrão; para a variação T2, utilizou-se gelo em escamas em substituição total à água de amassamento do traço. Foi aplicado nitrogênio líquido, como solução para resfriamento dos materiais, nas amostras T3 e T4, sendo resfriado o concreto fresco ao final do processo de mistura para T3 e resfriado os agregados e a água de amassamento ao longo do procedimento de execução do concreto T4. A Tabela 2 apresenta o resumo dos métodos utilizados.

Tabela 2 – Métodos de pré-resfriamento utilizados nos concretos produzidos.

Nomenclatura das variações do traço	Método de resfriamento	Material resfriado	Quantidade de material para resfriamento / m³ de concreto
T1	Sem resfriamento (Referência)	-	0 kg
T2	Gelo em escamas	Concreto	193 kg
T3	Nitrogênio líquido	Concreto	386 l
T4	Nitrogênio líquido	Agregados e água	406 l

Fonte: Autores, 2023.

A fim de avaliar as propriedades físico-mecânicas dos concretos produzidos, foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões 10 cm x 20 cm e mantidos em cura úmida por 28 dias. Foram executados os ensaios listados na Tabela 3, conforme as respectivas normas.

Tabela 3 – Ensaio físico-mecânicos dos concretos.

Ensaio	Norma	Amostragem (por variação de traço e idade)
Absorção, índice de vazios e massa específica aos 28 dias	ABNT NBR 9778:2009	3
Resistência à compressão axial nas idades de 7 dias e 28 dias de cura	ABNT NBR 5739:2018	3

Fonte: Autores, 2023.

Para avaliação térmica das amostras produzidas, foi utilizado calorímetro semi-adiabático presente no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFC (Figura 4), o qual indica a temperatura interna da amostra, por meio de termopares do tipo K inseridos no núcleo do concreto fresco, ao longo do tempo de análise. Os sensores utilizados têm baixo custo e ampla disponibilidade de compra; apresentam sensibilidade de aproximadamente $41\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ e são adequados para medição contínua desde -200°C até 1260°C . O calorímetro empregado foi calibrado previamente, onde se utilizou água quente como meio de calibração, conforme método indicado pela norma BS EN 12930:2018 parte 14.

Figura 4 – Calorímetro semi-adiabático (Autores, 2023).



Fonte: Autores, 2023.

As temperaturas foram medidas com os aquisitores de dados (equipamentos que coletam e armazenam informações em sua memória para tratá-los através de um computador) a cada hora ao longo de sete dias, portanto foram realizadas 168 leituras a cada amostra de concreto avaliada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Ensaio físico-mecânicos

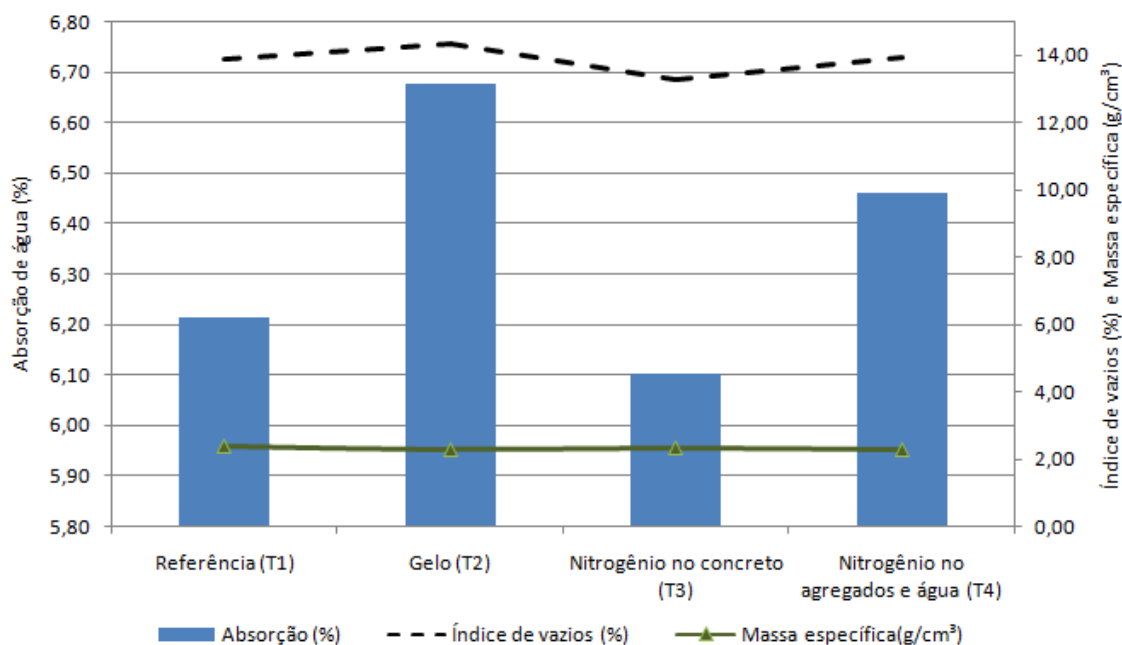
Para avaliação das propriedades físicas dos concretos produzidos, a Tabela 4 indica os valores médios de absorção de água, índice de vazios e massa específica das variações de traço após 28 dias de cura úmida, com seus respectivos desvios padrões e coeficientes de variação. A Figura 5 apresenta a análise gráfica dos resultados obtidos, onde se observam menores valores de absorção de água e índice de vazios para a variação de traço T3, onde se resfriou o concreto fresco com nitrogênio líquido. O menor valor de massa específica, portanto o grupo menos denso foi T2, traço que utiliza gelo como método de pré-resfriamento. A variação T2 foi aquela que apresentou maiores valores de absorção de água e índice de vazios, o que, de maneira geral, justifica a menor densidade deste concreto. Em laboratório, observou-se a exsudação da água de amassamento para T2 quando da moldagem dos corpos de prova. A hipótese levantada é que haja evaporação parcial da água do traço para este método de resfriamento.

Tabela 4 – Resultados médios para os ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica.

Nomenclatura das variações do traço	Absorção (%) (desvio padrão); coeficiente de variação	Índice de vazios (%) (desvio padrão); coeficiente de variação	Massa específica (g/cm³) (desvio padrão); coeficiente de variação
T1	6,21 (± 0,15); 2,42%	13,89 (± 0,28); 2,03%	2,37 (± 0,01); 0,30%
T2	6,68 (± 0,81); 12,12%	14,34 (± 1,50); 10,47%	2,29 (± 0,02); 0,98%
T3	6,10 (± 0,15); 2,49%	13,30 (± 0,28); 2,11%	2,31 (± 0,01); 0,51%
T4	6,46 (± 0,25); 3,92%	13,94 (± 0,44); 3,15%	2,30 (± 0,01); 0,57%

Fonte: Autores, 2023.

Figura 5 – Resultados obtidos para as propriedades físicas dos concretos (Autores, 2023).



Fonte: Autores, 2023.

A Tabela 5 apresenta os valores médios de resistência mecânica à compressão axial dos concretos produzidos nas idades de ruptura de 7 dias e 28 dias, com seus respectivos desvios padrões e coeficientes

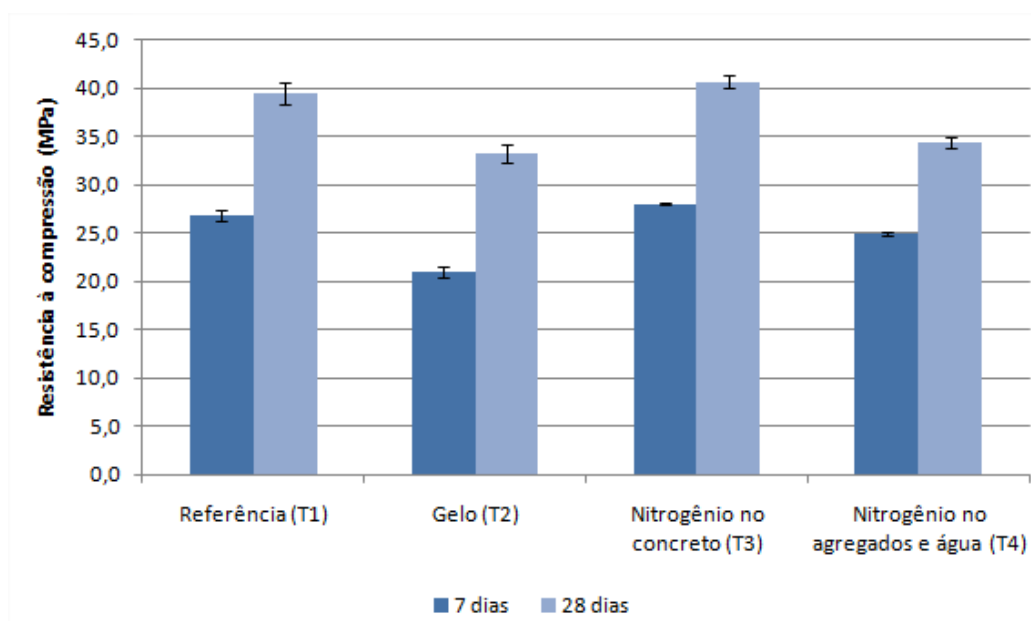
de variação. A Figura 6 ilustra esses valores, com seus erros padrões indicados por barras, e apresenta o crescimento da resistência à compressão axial à medida que se aumenta a idade do concreto para as diferentes variações.

Tabela 5 – Resistência à compressão axial média em diferentes idades de ruptura

Nomenclatura das variações do traço	Resistência à compressão axial média (MPa) (desvio padrão); coeficiente de variação	
	7 dias	28 dias
T1	26,9 (\pm 0,84); 3,1%	39,5 (\pm 1,85); 4,7%
T2	20,9 (\pm 0,95); 4,5%	33,3 (\pm 1,25); 3,7%
T3	28,0 (\pm 0,07); 0,3%	40,7 (\pm 1,17); 2,9%
T4	25,0 (\pm 0,16); 0,6%	34,4 (\pm 0,98); 2,8%

Fonte: Autores, 2023.

Figura 6 – Resultado médio de resistência à compressão axial (Autores, 2023).



Fonte: Autores, 2023.

Para as idades de 7 dias e 28 dias de cura, observam-se maiores valores de resistência à compressão axial na variação T3, em que houve aplicação de nitrogênio líquido no concreto fresco ao final do processo de mistura; e têm-se menores valores para amostras com gelo (T2). Para o método de pré-resfriamento dos agregados e da água de amassamento com nitrogênio líquido (T4), foram obtidos valores de resistência à compressão axial menores que os resultados observados para as amostras de referência. A hipótese levantada é que o resfriamento com N₂ provoque microfissuras no agregado graúdo, quando da aplicação direta neste material, reduzindo a resistência do concreto. Esse comportamento se manteve nas diferentes idades de análise.

Realizou-se análise de variância, ANOVA, para os valores obtidos, onde se verificou diferença estatisticamente significativa para as idades de 7 e 28 dias, conforme Tabela 6. Em seguida, foi realizada a comparação múltipla entre as médias por meio do teste de Tukey onde se observou diferença significativa entre T1 e T2; T2 e T3; T2 e T4; T3 e T4, aos 7 dias, e diferença entre os grupos T1 e T2; T2 e T3; T3 e T4; T1 e T4, aos 28 dias, devido à redução na resistência mecânica das variações T2 e T4 verificada pelos maiores índices de vazios, conforme Tabela 4 supracitada. A Tabela 6 apresenta a significância dos resultados obtidos para as idades em análise.

Tabela 6 – Teste de variância (ANOVA) para resistência à compressão axial em diferentes idades

Parâmetro	Idade de cura (dias)	F	Valor-p	Significância
Método de resfriamento	7	61,67	0,000021	Significativo
Método de resfriamento	28	18,405	0,001063	Significativo

Fonte: Autores, 2023.

3.2. Estudo térmico

A Tabela 7 apresenta as temperaturas máximas e mínimas obtidas nos concretos avaliados ao longo de sete dias em calorímetro semi-adiabático. Observa-se maior pico de temperatura (34 °C, 48 h após concretagem) para a variação de traço referência (T1), sendo este concreto produzido sem sistema de resfriamento, o que valida a necessidade de redução da temperatura do concreto massa. As amostras T2 e T4 apresentam menores picos de temperatura (31 °C, 36 h após concretagem), sendo utilizado, respectivamente, gelo em escamas e nitrogênio líquido, como sistemas de pré-resfriamento.

Tabela 7 – Temperaturas máximas e mínimas obtidas em estudo térmico

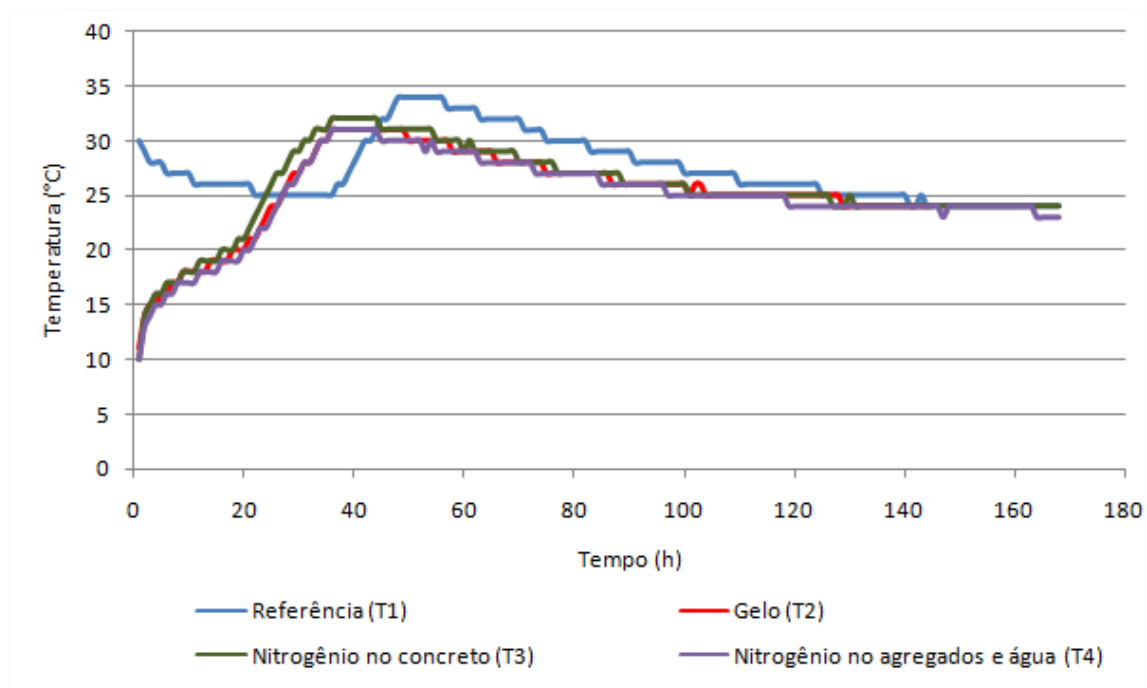
Nomenclatura das variações do traço	Temperatura de lançamento (°C)	Temperatura máxima (°C)	Varição de Temperatura, T_{máx} - T_{lançamento} (°C)	Horário de T_{máx} (h)
T1	32	34	2	48
T2	10	31	21	36
T3	10	32	22	36
T4	10	31	21	36

Fonte: Autores, 2023.

A curva de perfil térmico, obtida para as temperaturas localizadas no centro da amostra de concreto, pode ser observada na Figura 7, onde se visualiza o comportamento térmico das variações de traço ao longo do tempo. Constatam-se maiores valores de temperatura para a variação T1, traço de referência, em comparação com as amostras resfriadas. Observa-se que o uso de nitrogênio líquido no concreto (T3) apresentou maiores valores de temperatura quando comparado à T2 e T4, obtendo-se, ainda, menores resultados de temperatura para este último. Este resultado justifica-se pelo maior consumo de nitrogênio líquido em T4 (406 litros por metro cúbico de concreto) em comparação à T3 (386 litros de N₂ por metro cúbico de concreto). Segundo Kattoof, Hassan, Hasan (2022), a temperatura de resfriamento do concreto

depende do consumo de nitrogênio líquido utilizado. Portanto, quanto maior o consumo de N_2 , menores as temperaturas a serem observadas.

Figura 7 – Perfil térmico de concretos ao longo do tempo (Autores, 2023).



Fonte: Autores, 2023.

4. CONCLUSÕES

No presente artigo foram analisados o comportamento térmico e as propriedades físico-mecânicas de concretos aplicados a fundações de torres eólicas *onshore* para diferentes métodos de pré-resfriamento. Foi avaliada a eficiência do uso de nitrogênio líquido e de gelo em escamas, a fim de mitigar a ocorrência de manifestações patológicas provenientes do elevado gradiente de temperatura.

Nos ensaios físico-mecânicos, observaram-se menores valores de absorção de água e índice de vazios para a variação de traço T3 e menor valor de massa específica para T2, sendo este grupo aquele com maiores valores de absorção de água e índice de vazios, possivelmente devido à exsudação da água de amassamento para T2 quando da moldagem dos corpos de prova. Foram obtidos maiores valores de resistência à compressão axial na variação T3 aos 7 dias e 28 dias de cura e menores valores para amostras com gelo (T2). Para o método de pré-resfriamento dos agregados e da água de amassamento com nitrogênio líquido (T4), foram obtidos valores de resistência à compressão axial menores que os resultados observados para as amostras de referência. Os resultados físicos corroboram para a compreensão dos resultados mecânicos, tendo em vista que o menor índice de vazios, portanto, a menor porosidade das amostras T3 resultou em maior resistência à compressão do referido traço ao longo do tempo. A partir dos resultados obtidos nos ensaios físico-mecânicos sugere-se a aplicação de nitrogênio líquido no concreto fresco como método mais adequado para pré-resfriamento do concreto.

Os métodos avaliados apresentaram eficiência relevante quando analisada a curva de perfil térmico dos concretos desenvolvidos, ao longo do tempo, verificando-se menores temperaturas de lançamento para as variações com gelo em escamas (T2) e nitrogênio líquido (T3 e T4), em comparação com a amostra de referência (T1), portanto sem resfriamento. Observa-se que o uso de nitrogênio líquido no concreto (T3) apresentou maiores valores de temperatura quando comparado à T2 e T4, obtendo-se, ainda, menores

resultados de temperatura para este último. Verificou-se que o maior consumo de nitrogênio líquido por metro cúbico de concreto acarreta em maior redução da temperatura deste composto, sendo o uso de nitrogênio líquido uma alternativa promissora como método de pré-resfriamento do concreto massa quando em regiões de clima quente, conforme evidenciam Harith, Hassan e Hasan (2022).

REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. Energia Eólica: os bons ventos do Brasil. **Infovento 23**. Brasil, 23 nov. 2021. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>. Acesso em: 28 jun. 2023. Publicado em 2021.

AN, J.; KIM, S. S.; NAM, B. H.; DURHAM, S. A. Effect of aggregate mineralogy and concrete microstructure on thermal expansion and strength properties of concrete. **Applied Sciences**, v. 7, n. 12, p. 1307, 2017.

BRIFFAUT, M.; BENBOUDJEMA, F.; TORRENTI, J. M.; NAHAS, G. Effects of early-age thermal behaviour on damage risks in massive concrete structures. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 16, n. 5, p. 589-605, 2012.

DE SOUZA, N. B. P.; DOS SANTOS, J. V. C.; NASCIMENTO, E. G. S.; SANTOS, A. A. B.; MOREIRA, D. M. Long-range correlations of the wind speed in a northeast region of Brazil. **Energy**, p. 122742, 2021.
DIÓGENES, J. R. F.; RODRIGUES, J. C.; DIÓGENES, M. C. F.; CLARO, J. Overcoming barriers to onshore wind farm implementation in Brazil. **Energy Policy**, v. 138, p. 111165, 2020.

GAJDA, J.; SUMODJO, F. Precooling Mass Concrete with Liquid Nitrogen. **Concrete international**, v. 34, n. 7, 2012.

GWEC. Global Wind Energy. GWEC | **GLOBAL WIND REPORT 2021**. 2021. Disponível em <<https://gwec.net/global-wind-report-2021/>>. Acesso em: 05 jun. 2023. Publicado em 2021.

GWEC. Global Wind Energy. GWEC | **GLOBAL WIND REPORT 2023**. 2023. Disponível em <<https://gwec.net/globalwindreport2023>>. Acesso em: 25 jun. 2023. Publicado em 2023.

HAMID, H.; CHORZEPA, M. G. Quantifying maximum temperature in 17 mass concrete cube specimens made with mixtures including metakaolin and/or slag. **Construction and Building Materials**, v. 252, p. 118950, 2020.

HARITH, I. K.; HASSAN, M. S.; HASAN, S. S. Liquid nitrogen effect on the fresh concrete properties in hot weathering concrete. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 7, n. 1, p. 1-13, 2022.

IRENA - International Renewable Energy Agency. Future of wind: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects. **A Global Energy Transformation paper**. Abu Dhabi, 2019. (978-92-9260-155-3).

IRENA - International Renewable Energy Agency. 10 Years: Progress to Action. **International renewable energy agency**, Abu Dhabi, 2020. Disponível em <<https://irena.org/publications/2020/Jan/10-Years-Progress-to-Action>>. Acesso em: 05 jun. 2023. Publicado em 2020.

KATTOOF, I.; HASSAN, M. S.; HASAN, S. S. Effects of Liquid Nitrogen Cooling on the Microstructure Properties of Nano-Modified Concrete Under Hot Conditions. **Arabian Journal for Science and Engineering**, p. 1-15, 2022.

LANTZ, E.; ROBERTS, O.; NUNEMAKER, J.; DEMEO, E.; DYKES, K.; SCOTT, G. **Increasing Wind Turbine Tower Heights: Opportunities and Challenges**. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5000-73629. 2019.

LI, Y.; NIE, L.; WANG, B. A numerical simulation of the temperature cracking propagation process when pouring mass concrete. **Automation in construction**, v. 37, p. 203-210, 2014.

REN21. 2021. **Renewables 2021 Global Status Report** (Paris: REN21 Secretariat). ISBN 978-3-948393-03-8

RIDING, K. A.; POOLE, J. L.; SCHINDLER, A. K.; JUENGER, M. C.; FOLLIARD, K. J. Statistical determination of cracking probability for mass concrete. **Journal of materials in civil engineering**, v. 26, n. 9, p. 04014058, 2014.

SIMAS, M.; PACCA, S. Assessing employment in renewable energy technologies: A case study for wind power in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 83-90, 2014.

SMOLANA, A.; KLEMCZAK, B.; AZENHA, M.; SCHLICKE, D. Early age cracking risk in a massive concrete foundation slab: Comparison of analytical and numerical prediction models with on-site measurements. **Construction and Building Materials**, v. 301, p. 124135, 2021.

SOLAUN, K.; CERDÁ, E. Impacts of climate change on wind energy power – Four wind farms in Spain. **Renewable energy**, v. 145, p. 1306-1316, 2020.

TASRI, A.; SUSILAWATI, A. Effect of material of post-cooling pipes on temperature and thermal stress in mass concrete. In: **Structures**. Elsevier, 2019. p. 204-212.

YANG, H.; WANG, Y.; ZHOU, S. Anti-crack performance of low-heat Portland cement concrete. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.**, v. 22, n. 3, p. 555-559, 2007.