

Inovação tecnológica para concretagem de bases eólicas frente aos desafios térmicos

MARIO GUILGE – GER. DE PROD. E SERV. TÉC. – APODI CIMENTO; GUSTAVO PINHEIRO – DIR. DE TECN. E INCORP.; ANTONIO M. DE OLIVEIRA – DIR. COM. – DOISA ENGENHARIA E TECNOLOGIA; DANIEL ALEIXO – DIR. EXEC. – DM ALEIXO

RESUMO

Nos últimos anos, o crescimento do uso de concretos de alto desempenho (CAD) e a conscientização sobre o desenvolvimento de fissuras e a formação de etringita tardia, que são induzidas pelo aumento da temperatura interna e dos gradientes térmicos, levaram a demandas crescentes e especificações mais rigorosas no que diz respeito ao controle térmico das estruturas de concreto massa. Historicamente, o uso de gelo tem sido capaz de atender a maioria das especificações de temperatura dos concretos, tornando-o mais viável quando seu custo é comparado aos custos do uso de nitrogênio líquido e de tubos de resfriamento, sendo

estes utilizados, principalmente, para necessidades específicas do projeto e especificações extremas de temperatura. Entretanto, com os recentes avanços na tecnologia de equipamentos e de construção, esse cenário está mudando e a utilização do nitrogênio líquido vem se apresentando como uma ferramenta viável para o controle geral da temperatura do concreto. A *Non-Crack Solution* é uma solução de tecnologias combinadas entre um cimento especial de baixo calor de hidratação e alta resistência mecânica e um sistema de resfriamento com nitrogênio líquido capaz de solucionar problemas existentes nas frentes de concretagem atualmente.

PALAVRAS-CHAVE: CONCRETO MASSA, CONTROLE DE TEMPERATURA, ETRINGITA TARDIA.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o ACI 207.1R (2005), o comportamento térmico das estruturas de concreto massa é o fator que as diferenciam de outros tipos de estruturas convencionais, necessitando, assim, de medidas para controlar o aumento e a dissipação do calor gerado pela reação de hidratação do cimento, que é exotérmica.

Esse controle representa um desafio tanto no planejamento quanto na construção das estruturas maciças de concreto devido à variabilidade de diversos fatores, como a geometria e as dimensões das estruturas, o traço e as propriedades térmicas e mecânicas do concreto, os mecanismos de concretagem e de cura, as condições de contorno e as condições ambientais (EMBORGAND BERNANDER, 1994).

No Brasil, dentre as estruturas de concreto massa, as fundações de aerogeradores vêm se destacando atualmente devido à expansão do uso da fonte eólica, a qual representa 10,8% das fontes brasileiras de geração de energia e apresenta taxas de crescimento significativas, com capacidade instalada de energia eólica prevista

para atingir 30,2 GW até 2024 (ABEE-ÓLICA, 2021). Além disso, esse relatório mostra a relevância da região Nordeste no setor eólico, onde 80% dos parques existentes estão localizados.

Essas volumosas fundações apresentam grandes espessuras (geralmente maiores que 1 m), e essa característica contribui para o acúmulo e dificulta a dissipação do calor gerado no núcleo central da estrutura (ACI 207.2R, 2007; BOBKO *et al.*, 2014). Em relação às superfícies, há maior proximidade com o ambiente externo e, conseqüentemente, maior facilidade de dissipação de calor, o que acelera o resfriamento superficial. Isso gera uma distribuição não uniforme das temperaturas internas e pode provocar o surgimento de manifestações patológicas, como a formação de etringita tardia e o desenvolvimento de fissuras de origem térmica (LAROSCHE, 2009; WU *et al.* 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

As fissuras vão ocorrer quando as tensões internas de tração, causadas pela presença de elevados gradientes térmicos e de restrições que impeçam a movimentação da estrutura, excederem a resistência à tração dos concretos (WU *et al.* 2011). A formação de etringita

tardia (DEF) está relacionada à elevação da temperatura interna e é um produto expansivo que também pode ocasionar o surgimento de fissuras e, assim, contribuir para a redução da vida útil da estrutura (LAROSCHE, 2009).

Na busca pela solução para evitar a ocorrência desses tipos de problema, comumente as concretagens são executadas substituindo a água do traço por gelo ($\cong 0^\circ\text{C}$), a fim de reduzir a temperatura de lançamento do concreto. Essa dinâmica, largamente difundida nas obras executadas no Brasil, afeta a produtividade, pode reduzir a qualidade do concreto, aumentar a geração de resíduos e, mesmo que se tomem todos os cuidados nas etapas de produção, lançamento, espalhamento e cura do concreto, ainda pode sujeitar a peça concretada à necessidade de reparos posteriores.

Diante desse cenário desafiador e sempre na busca de processos mais seguros e que respeitem o meio ambiente, a *Non-Crack Solution* é uma solução mais eficiente e moderna em controle de temperatura na produção, lançamento e aplicação de concreto massa.

Essa iniciativa traz para o mercado uma oportunidade inovadora de



► **Figura 1**
Fissura em bloco – retração térmica

atender aos critérios mais rigorosos de controle de temperatura, que vem se tornando um problema crescente, em função do incremento dos volumes dos blocos de fundação que dão sustentação aos aerogeradores em razão da altura das torres e da potência das turbinas que são cada vez maiores.

1.1 Análise da segurança contra a fissuração

A maior dificuldade de dissipação de calor do núcleo da estrutura de concreto massa (seu centro de gravidade) e a maior facilidade de dissipação nas superfícies provocam uma não uniformidade na distribuição das temperaturas ao longo do tempo. Quanto maiores forem esses gradientes térmicos (ΔT), maior será a probabilidade de ocorrer retração térmica e, conseqüentemente, maiores serão as tensões de tração (σ_t), que levam ao fissuramento da estrutura quando excedem a resistência à tração do concreto (f_t) (ACI 207.2R, 2007; COELHO *et al.*; BOBKO *et al.*, 2014).

Para reduzir o valor de ΔT , que é igual à temperatura máxima atingida pelo concreto menos a temperatura ambiente ao longo do tempo, é possível limitar a temperatura máxima do concreto por meio de mecanismos de pré ou pós refrigeração e/ou utilizar mecanismos de cura e isolamento que dificultem a perda de calor da superfície da estrutura para o ambiente (ACI 301,2010; BOBKO *et al.*, 2014).

A temperatura máxima do concreto consiste no somatório da sua temperatura de lançamento com a elevação adiabática. Logo, deve-se atuar no sentido de reduzir esse pico máximo. A refrigera-

ção do concreto é um ponto importante nesse processo e obrigatória em regiões quentes, principalmente quando se deseja concretar uma estrutura de concreto massa, como uma base de aerogerador, em uma única etapa.

1.2 Manifestações patológicas

As principais manifestações patológicas que podem ocorrer em concretos massa, dentre os quais incluem-se as bases de torres eólicas, são: fissuras devido à retração térmica (Figura 1); fissuras devido à formação de Etringita Tardia (DEF) (Figura 2); fissuras devido à retração hidráulica; fissuras devido à retração plástica e reação Álcali – Agregado.

O sulfato de cálcio dihidratado (gesso), adicionado durante a moagem do clínquer (para controle do tempo de pega e melhora do desenvolvimento da resistência), reage com o aluminato tricálcico do cimento para formar a etringita (trissulfatoaluminato tricálcico) nas primeiras horas após a mistura com água em concretos curados a temperatura ambiente. Essa etringita é chamada de etringita primária, e nesse estágio (inicial), ela é formada de forma homogênea e imediata, estando dispersa uniformemente em toda pasta de cimento. Entretanto, a etringita primária não é estável a elevadas temperaturas, e caso isso ocorra, ela não irá se formar no estado fresco, podendo se formar tardiamente, em contato com umidade, quando o concreto estiver no estado endurecido. Isso gera um aumento das tensões internas na estrutura, uma vez que a formação de etringita é um processo expansivo (LAROSCHE, 2009). Apesar de não haver normas brasileiras que especifiquem um limite máximo de temperatura para evitar a formação de etringita tardia, encontram-se alguns valores na literatura, como 65 °C (MEHTA; MONTEIRO, 2014) e 70 °C (ACI 301, 2010).

1.3 A importância da refrigeração

A fim de evitar as manifestações patológicas, é necessário aplicar técnicas de refrigeração do concreto. Como solução, há três tipos básicos de refrigeração do concreto: uso de água gelada, gelo



► **Figura 2**
Fissuras devido à DEF

em escama e nitrogênio líquido.

O emprego de água gelada é muito utilizado em concretos, para pavimento rígido. Em geral, a água gelada tem capacidade para reduzir a temperatura do concreto entre 3 °C e 5 °C, no máximo.

O uso de gelo em escamas (mais recomendado) ou em cubos (menos recomendado) é um procedimento muito utilizado, mas, em geral, só se consegue reduzir a temperatura do concreto entre 11 °C e 12 °C.

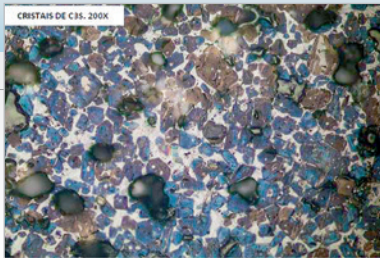
O emprego do nitrogênio líquido é o meio mais eficaz e prático de se refrigerar um concreto. Porém, não é o meio mais barato, e desta forma torna-se, em muitas frentes, impraticável. Esse tipo de refrigeração apresenta os seguintes benefícios: redução do consumo de água; redução na velocidade de perda do "slump"; aumento do tempo de início de pega; temperatura do concreto tão baixa, quanto se desejar; redução da mão de obra, além de evitar todas as formas de fissuras.

2. A "NON-CRACK SOLUTION"

A "Non-Crack Solution" é a materialização de uma solução baseada em duas grandes tecnologias, um cimento especial de baixo calor de hidratação e um sistema de resfriamento inovador capaz de solucionar diversos entraves técnicos e operacionais existentes hoje nas frentes de concretagem de elementos volumosos.

2.1 Cimento CP III 40 RS BC Apodi

A Cimento Apodi investiu no desenvolvimento de um produto específico que ajudasse o segmento de energia eólica a solucionar duas das suas principais preocupações, a temperatura de lançamento dos concretos e o desenvolvimento de calor durante o período de cura da base.



► **Figura 3**
C₃S Clínquer Apodi

Com isso, surge o CP III 40 RS BC, produto que leva em seu *mix design* um balanço de fases de clínquer, mineralogia ajustada e matéria prima selecionada, que permite reduzir a temperatura na concretagem, liberando menos calor ao longo do seu processo de hidratação, atingindo aos patamares de resistência à compressão especificados em projeto, nesse caso 30 MPa e 55 MPa.

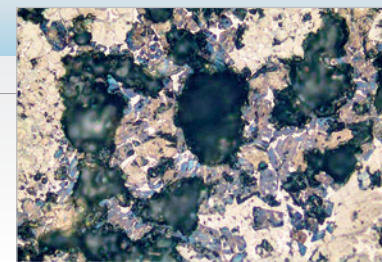
A principal fase do clínquer, responsável pela geração de resistência é o C₃S, desta forma, quanto maior a concentração dessa fase, mais resistência teremos a curto prazo. Porém, não basta isso, pois se os cristais de C₃S forem de tamanho grande, essa reatividade pode ser lenta, devido à menor superfície específica, fazendo com que o cimento leve mais tempo para atingir a resistência de projeto. Ainda dentro desta linha, temos um fator de suma importância que é o polimorfismo deste C₃S (o tipo M1 mais reativo e resistente).

O conjunto de equipamentos (pré-calcinador, forno e resfriador) e a qualidade e controle das matérias primas utilizadas na produção do clínquer Apodi permitem atingir uma excelente relação de reatividade e temperatura. A Figura 3 mostra uma fotomicrografia do clínquer Apodi, em que é possível perceber um volume de C₃S muito maior do que o da Figura 4, que, por sua vez, representa um clínquer do mercado. Além da quantidade, os tamanhos reduzidos dos cristais e a sua regularidade podem ser claramente notados quando em comparação ao outro clínquer. O controle químico do calcário utilizado e das adições da farinha permite maiores concentrações de polimorfos M1.

Com as características do clínquer obtidas através dos recursos acima citados, foi possível alcançar um teor de substituição maior por escória básica

de alto forno (matéria prima para produção de CP III). Esse elevado valor de substituição faz o cimento produzido liberar menos calor, já que o clínquer é o principal responsável pela reação exotérmica de hidratação. A Figura 5 demonstra um comparativo de duas curvas de liberação de calor, sendo a verde do cimento CP III - 40 RS BC e a amarela de um CP IV - 32 RS, comumente utilizado nos projetos de base eólica. Neste comparativo, percebe-se que a diferença entre os picos de temperatura entre o CP IV e o CP III - 40 RS BC é de quase 15 °C. Em números, de acordo com a normatização, a energia liberada pelo CP III - 40 RS BC em 40 horas de reação é de 202 J/g de cimento, ao passo que o mesmo CP IV citado produz 242 J/g.

Para ratificar aquilo que foi projetado na indústria, foram feitas simulações de fluxo de temperatura em fundações para torres eólicas através de software específico para tal fim (ensaios realizados na Universidade Federal do Ceará – Laboratório de Materiais de Construção). A influência do uso desses dois cimentos na elevação térmica de uma base eólica foi verificada computacionalmente, analisando a mesma estrutura, sem alteração no consumo de cimento (418 kg/m³) e na temperatura de lançamento (15 °C), e com alteração apenas no tipo de

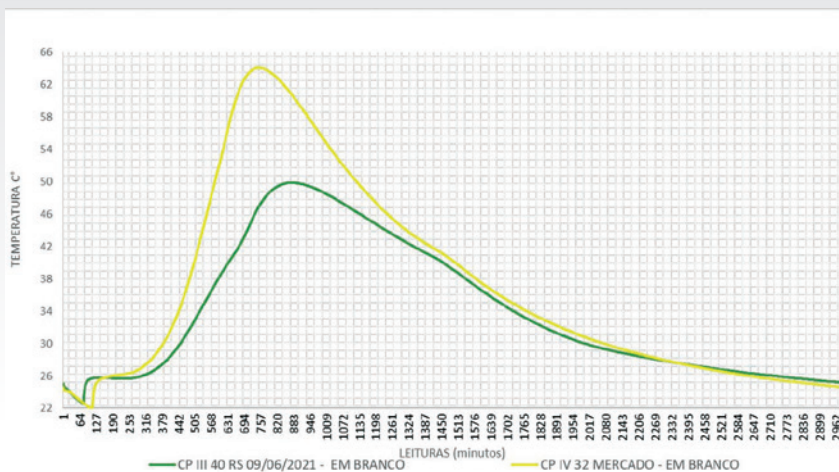


► **Figura 4**
C₃S Clínquer do mercado

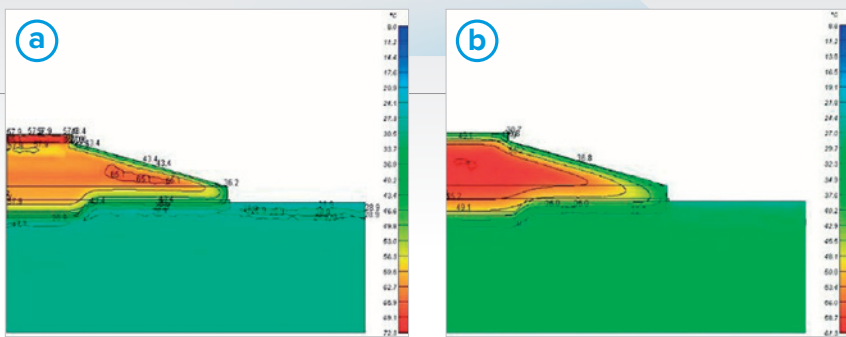
cimento. Os resultados confirmaram o esperado, o desenvolvimento de calor foi inferior para a base simulada com o cimento CP III - 40 RS BC.

O pico de temperatura da base simulada com o CP III - 40 RS BC foi 11 °C inferior ao pico de temperatura da base simulada com o CP IV - 32 RS. Pode-se notar claramente a diferença na Figura 6a, onde o centro da base apresenta coloração de amarela a alaranjada, comparando-se com a Figura 6b, que apresenta cor bastante avermelhada, indicando temperaturas mais altas.

Diante desses estudos, pode-se dizer que, com o cimento CP III - 40 RS BC, é possível produzir um traço muito mais ajustado às necessidades técnicas e às especificações solicitadas. Além disso, por ser um produto de classe de resistência 40 MPa e produzir menor calor na hidratação, o consumo de cimento será mais baixo, o que, consequentemente, reduz



► **Figura 5**
Gráfico do fluxo de calor do CP III - 40 RS BC comparado a um CP IV - 32 RS de mercado, comumente utilizado nas obras de base eólica



► Figura 6

Simulação do fluxo de calor em uma base com concreto lançado a 15 °C e consumo de cimento igual a 418 kg m³: Imagem a (esquerda) – Cimento CP III – 40 RS BC Apodi; Imagem b (direita) CP IV – 32 RS de mercado, comumente utilizado nas obras de bases eólica (ensaios realizados na UFC)

o consumo de aditivo, fazendo o concreto desenvolvido com esse cimento ser mais econômico e eficaz que os demais. Ainda é possível dizer que, pelo menor calor liberado na hidratação, o custo do resfriamento será também menor que os demais concretos produzidos com outros cimentos.

2.2 O uso de nitrogênio para resfriamento de concreto

O sistema de dosificação de nitrogênio líquido na esteira de agregado, o qual fora utilizado para a solução, surgiu após um processo de pesquisa e desenvolvimento de mais de cinco anos na indústria de concreto dos Estados Unidos. Atualmente, mais de 100 plantas de concreto na América do Norte, entre EUA, Canadá e México utilizam este sistema para atender às especificações de temperatura de lançamento do concreto. O sistema realiza o resfriamento dos agregados quando eles são carregados para dentro do caminhão por meio das esteiras transportadoras, permitindo que 70% a 80% do volume de materiais constituintes do concreto seja resfriado de maneira contínua ao processo de carregamento, viabilizando resfriamentos extremos, maior consistência e produtividade nas operações de concretagem.

2.2.1 FUNCIONAMENTO DO SISTEMA

O sistema consiste na aplicação de nitrogênio líquido através de automação, e sua dosagem acontece durante o carregamento dos materiais, sem alteração no processo da planta de concreto. Aplica-se o nitrogênio líquido diretamente

ao agregado e, com isso, a massa de materiais com baixa temperatura permeia a mistura como um todo. O agregado corresponde a mais de 70% da massa da mistura do concreto, portanto, reduzir a temperatura do agregado, resfria, de maneira mais eficaz, toda a mistura, sem alterar o conteúdo de água.

Basicamente consiste em um conjunto composto pelo tanque reservatório de nitrogênio líquido, as tubulações que transportam o material até um equipamento de dosagem localizado sobre a esteira de agregados, além de um painel de controle que se comunica com o painel da central dosadora e seu respectivo *software*. A Figura 7 exemplifica o esquema de funcionamento do sistema.

2.2.2 PRINCIPAIS BENEFÍCIOS

Quando comparado ao uso de gelo ou nitrogênio líquido inserido diretamente no balão através de uma lança, observa-se uma redução de custos devido à redução de mão de obra e equipamentos no processo de resfriamento. O gelo é normalmente fornecido em sacos, sendo necessário mão de obra extra para ser carregado no caminhão betoneira, enquanto o nitrogênio líquido é aplicado diretamente na esteira de agregados, durante o processo de carregamento, não alterando o tempo de carregamento do caminhão. Há também uma redução do tempo total de ciclo do caminhão. Diferentemente do processo com gelo ou nitrogênio com lança, que utiliza um tempo adi-

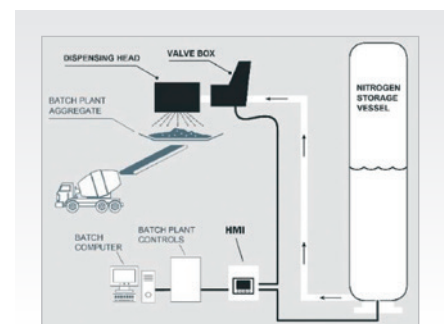
cional para ser inserido no caminhão antes ou depois do carregamento do restante dos materiais.

Por se tratar de um sistema automatizado, verifica-se maior consistência e qualidade no processo. De forma comparativa, é possível afirmar que o sistema funciona como o de aditivos, integrado à automação da central. Não depende de quantificação manual, como ocorre com os sacos de gelo, proporcionando, assim, um melhor controle do processo.

A Figura 8 mostra os dados registrados durante uma concretagem do projeto de substituição da ponte I-74 no Rio Mississippi em Davenport, estado de Iowa, durante o verão de 2018. Esta concretagem teve um total de 657 metros cúbicos de concreto em um período de 10 horas e, com o uso do sistema, foi possível manter a temperatura do concreto constante, mesmo com a significativa subida da temperatura ambiente.

A consistência observada em inúmeras operações de concretagem é capaz de reduzir o número de caminhões rejeitados. É bastante comum o retorno de cargas por não atenderem às especificações de temperatura em obra. Com o sistema de nitrogênio líquido aplicado diretamente nos agregados, é possível obter maior compatibilidade entre cargas e melhor desempenho em relação à temperatura especificada.

Também são observados benefícios no âmbito ambiental e de segurança do trabalho. Embora ainda seja comum a utilização de gelo no setor, este apresenta risco para a mão de obra e tempo



► Figura 7

Funcionamento do sistema

Fonte: Nitrocrete, 2020

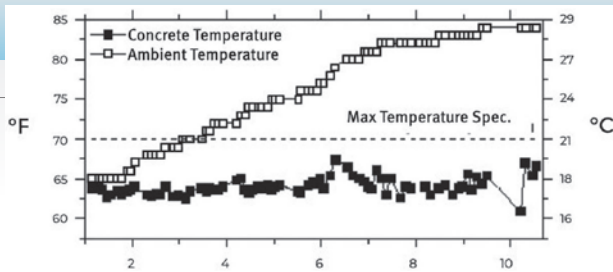


Figura 8
Temperatura do concreto X temperatura ambiente
Fonte: Nitrocrete, 2018

de inatividade para a eficiência operacional. Ao automatizar o processo de resfriamento do concreto, reduzem-se os riscos de acidentes e outros problemas associados ao esforço excessivo e à fadiga devido ao levantamento inadequado e repetitivo de sacos.

A agência de consultoria em sustentabilidade e conformidade ambiental nos Estados Unidos, John Beath Environmental (2019), realizou um comparativo que mostrou uma redução de 83% nas emissões de carbono, uma redução de 66% no consumo de energia e uma redução de 87% no material particulado, comparando o sistema ao gelo. O estudo mediu as categorias de impacto ambiental, como emissões de CO₂, consumo de energia e material particulado (Figura 9).

Além disso, o uso do nitrogênio

promove maior produtividade e com a eliminação do ponto de carga de gelo e do ajuste de slump, uma vez que a presença de gelo eleva o desvio padrão do concreto e, conseqüentemente, a água de corte para controlar o concreto.

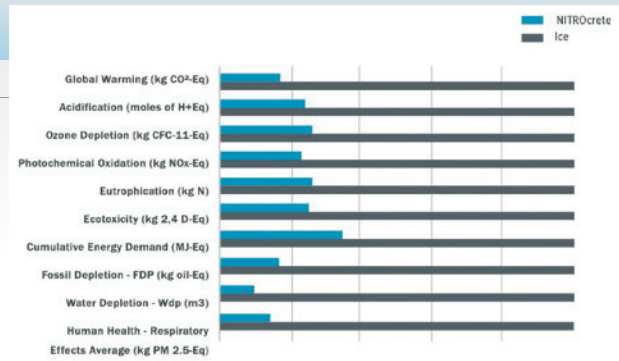
3. CONCLUSÃO

As demandas por melhores controles de temperaturas de concreto massa para projetos de aerogeradores serão cada vez maiores, devido às exigências de tamanho das bases e resistência do concreto, que respectivamente serão maiores que as atuais. A conscientização sobre o desenvolvimento de fissuras e a formação de etringita tardia, que são induzidas pelo aumento da temperatura interna e dos gradientes

térmicos, está promovendo demandas crescentes e especificações rigorosas que as tecnologias atuais de refrigeração do concreto e os tipos de cimento do mercado brasileiro não serão capazes de atender.

A solução apresentada neste artigo como “*Non-Crack Solution*” demonstra a aplicação do que há de mais inovador para a produção de fundações, com uma proposta que cumpre os requisitos técnicos e com adicionais de extremo valor para o nosso mercado, capaz de solucionar problemas existentes nas frentes de concretagem e ainda ser uma solução ambientalmente sustentável, de maior produtividade e de elevado grau técnico de eficiência. ☑

Figura 9
Impactos do uso gelo e nitrogênio
Fonte: John Beath Environmental, 2019



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABEEÓLICA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. Infovento 20. Brasil, 15 jun. 2021.
- [2] ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 207.1R. Guide to Mass Concrete. p. 1-30. Farmington Hills, MI, 2006.
- [3] ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 305.1. Specification for Hot Weather Concreting. p. 1-12. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2006.
- [4] ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 207.2R. Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete. p. 1-32. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2007.
- [5] BOBKO, C. P.; SERACINO, P.; ZIA, P.; EDWARDS, A. Crack Free Mass Concrete Footings on Bridges in Coastal Environments. Technical Report. Department of Civil, Construction, and Environmental Engineering North Carolina State University, 2014.
- [6] CIRIA C660. Early-age thermal crack control in concrete. London, 2007. 113 p. (978-8-86107-660-2).
- [7] COELHO, N. A.; PEDROSO, L. J.; RÉGO, J. H. S.; NEPOMUCENO, A. A. Use of ANSYS for Thermal Analysis in Mass Concrete. Journal of Civil Engineering and Architecture, [s.l.], v. 8, n. 7, p. 860-868, 28 jul. 2014. David Publishing Company. <http://dx.doi.org/10.17265/1934-7359/2014.07.007>.
- [8] EMBORG, M.; BERNANDER, S. Assessment of Risk of Thermal Cracking in Hardening Concrete. Journal of Structural Engineering, [s.l.], v. 120, n. 10, p. 2893-2912, out. 1994. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1994\)120:10\(2893\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1994)120:10(2893)).
- [9] LAROSCHE, C.J. Types and causes of cracking in concrete structures. Failure, Distress and Repair of Concrete Structures, [s.l.], p. 57-83, 2009. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1533/9781845697037.1.57>.
- [10] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- [11] WU, S.; HUANG, D.; LIN, F.; ZHAO, H.; WANG, P. Estimation of cracking risk of concrete at early age based on thermal stress analysis. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 105, n. 1, p. 171-186, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10973-011-1512-y>.
- [12] JOHN BEATH ENVIRONMENTAL. (2019) “Streamlined comparative life cycle assessment for NITROcrete™ process.”
- [13] ACI COMMITTEE 207, Mass Concrete, ACI 207.1R, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1996.