

## Avaliação da degradação mecânica do concreto reforçado com fibras de aço sob fadiga: aplicação em torres eólicas

Cerqueira, Nábila; Monteiro, Vitor; Cardoso, Daniel; Silva, Flávio.

*Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, RJ, Brasil*

Cupertino, Daiane; dos Santos, Nelson.

*Furnas, Goiânia, GO, Brasil*

**ABSTRACT:** The wind energy industry has been rapidly and significantly developing in Brazil. Aiming the improvement of the Brazilian wind energy projects, Furnas work staff and the PUC-Rio university research team have just kicked-off a new R&D project, the *P&D ANEEL Fadiga*, aiming to study the mechanical deterioration of fiber reinforced concrete subjected to cyclic and fatigue loads, among other goals. Through this project it is intended to evaluate the use of fibers to control the crack opening and improve the life cycle of structures, reducing the maintenance need or even extending their periodicity. The present work brings a preliminary analysis of the first results generated from the most recent flexural fatigue tests. The first evaluated cementitious composites were high resistance and ultra high performance fiber reinforced concretes. Although all studied mix compositions have reported similar damage index evolutions, it is possible to verify higher values of stiffness for concrete with higher fiber volume fractions. In particular, ultra high performance fiber reinforced concrete did not reach complete collapse even after 1,000,000 cycles. Preliminary results are promising and indicate that the use of the studied materials would probably improve the structure's life cycle.

**RESUMO:** A indústria da energia eólica vem se desenvolvendo rápida e significativamente no Brasil. Visando aprimorar os empreendimentos eólicos no Brasil, a equipe de Furnas em parceria com a universidade PUC-Rio está desenvolvendo o P&D ANEEL Fadiga, um novo projeto de pesquisa e desenvolvimento que tem como um de seus objetivos estudar a degradação mecânica do concreto reforçado com fibras sob carregamentos cíclicos. Por meio desse projeto, pretende-se avaliar o uso das fibras no controle da abertura de fissuras e no aumento da vida útil das estruturas, tendo como consequência a redução da necessidade de manutenção ou o aumento do intervalo entre manutenções. O presente trabalho traz, portanto, uma análise preliminar dos primeiros resultados obtidos em ensaios de fadiga na flexão de possíveis materiais que podem ser utilizados na construção das próximas torres eólicas de Furnas: os concretos de alta resistência e de ultra alto desempenho (CUAD) reforçado com fibras de aço. Apesar da evolução do dano ser muito semelhante para todas as composições estudadas, é possível perceber uma maior rigidez dos materiais com maiores frações volumétricas de fibras. O concreto de ultra alto desempenho, em especial, não atingiu o total colapso mesmo após atingir 1.000.000 de ciclos. Os resultados preliminares são promissores e indicam que o emprego dos materiais estudados possivelmente promoverá um aumento na vida útil das estruturas.

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria da energia eólica vem se desenvolvendo rápida e significativamente no Brasil. De acordo com Gannoum [1], desde 2009, a capacidade total instalada média cresceu a uma taxa de 2,3 GW por ano, levando o país a atingir 21.626 GWh em 2015, i.e., 90 vezes maior em relação a 2006 (237 GWh) [2, 3]. Dessa maneira, o Brasil foi classificado, recentemente, como o oitavo maior produtor de energia eólica no mundo [4]. Entre as diferentes regiões, os principais produtores de energia eólica estão localizados no sul e nordeste brasileiros. Somente os estados do Nordeste (75 GW) respondem a mais da metade da capacidade de geração de energia pelo vento (143,5 GW) e concentra os maiores parques eólicos do país.

Com o objetivo de atingir maiores valores de produção de energia, turbinas eólicas estão se tornando maiores e atingindo alturas mais elevadas na atmosfera visando aproveitar, de forma mais vantajosa, velocidades de vento mais estáveis. Quando o potencial de energia eólica do Brasil foi investigado em 1999 [4], as principais torres eólicas atingiam 50 metros de altura na região de Palmas, por exemplo. Mais recentemente, os parques eólicos de Osório e Sangradouro foram construídos com torres de 100 metros de altura, havendo ainda a presença de torres de 120 metros no complexo eólico de Fortim [5]. Dessa maneira, espera-se a implementação de torres ainda maiores no Brasil a fim de produzir energia limpa de forma mais eficiente.

Esse rápido progresso em direção a maiores turbinas trouxe severos obstáculos em relação ao uso das tradicionais torres de aço [6]. Hau [7] destaca sérias dificuldades na manufatura das seções de torre de aço com altura maiores que 90 metros. Harte et al. [8] também ressaltam que tubos de aço acima de 85 metros apresentam sérios problemas de vibração devido ao movimento da turbina, sem poder garantir a segurança da estrutura ao longo do tempo [9]. Além disso, uma restrição adicional é o transporte das seções de aço, devido ao elevadíssimo peso das peças e o perigo de acidentes nas estradas.

Sabendo dos obstáculos impostos pela evolução da indústria eólica, o concreto de alta resistência vem se tornando bastante atrativo e sendo aplicado em novos estudos sobre o dimensionamento de parques eólicos *onshore* e *offshore* [10, 11]. Devido a sua maior rigidez, o material pode ajudar a atingir os limites de deslocamento e evitar a constante excitação pela ação do vento [12-14]. Apesar do concreto ter tornado exequível a construção de elevadas torres, sua tendência à fissuração por carregamentos cíclicos

cos levanta preocupações em relação à sua durabilidade e degradação mecânica sob fadiga [15, 16]. A presença de fissuras no concreto representa uma via para a entrada de agentes químicos, que podem atingir o reforço e acelerar a deterioração da estrutura [17, 18].

Como consequência, tanto a durabilidade quanto a performance de longo prazo das torres de concreto podem ser prejudicadas devido à fissuração promovida pelos carregamentos cíclicos, causando manutenção onerosa e inatividade indesejada. Assim, as torres eólicas são, em geral, pré-fabricadas com reforço protendido a fim de superar os problemas de fissuração durante o transporte, a instalação e durante sua vida útil. Mais recentemente, fibras vêm sendo adicionadas à mistura de concreto com o objetivo de controlar a abertura de fissuras. O reforço fibroso pode promover não somente resistência à fissuração, como também melhorar significativamente a tenacidade em relação à matriz sem reforço [11].

Trabalhos passados já trazem uma avaliação inicial sobre a vida à fadiga do concreto reforçados com fibras de aço (CRFA) na compressão e na flexão [19-25]. Cachim et al. [21], por exemplo, verificaram que, enquanto a adição de fibras de aço de 30 mm de comprimento foi responsável por aumentar a vida à fadiga, a incorporação de fibras de 60 mm reduziu a vida útil do material compósito. Apesar das fibras serem capazes de controlar a abertura das fissuras, retardar seu crescimento e aprimorar seu comportamento mecânico, sua presença é responsável por aumentar o volume de poros e defeitos na matriz cimentícia. Nesse caso, os autores atribuem a redução de vida útil observada com o uso de fibras de maior comprimento a um maior volume de vazios do compósito fibroso.

A maior parte dos trabalhos e normas técnicas [26-28] avaliam o comportamento à fadiga do concreto na compressão e, em geral, tomam poucas considerações em relação à resposta na flexão ou na tração direta. Mesmo assim, a maior parte dos trabalhos são válidos somente no caso de seções não fissuradas, já que pouco exploram a ação da fibra no material pré-fissurado. Sabendo disso, Carlesso et al. [29, 30], por exemplo, estudou a resposta à fadiga do concreto de alta performance com fibras pré-fissurado na flexão e conseguiu não somente estudar a degradação mecânica ao longo dos ciclos, como também desenvolver modelos de evolução de dano e abertura de fissura. A avaliação do material compósito pré-fissurado consegue trazer mais informações sobre a influência das fibras do CRFA submetido à fadiga.

Visando aprimorar os empreendimentos eólicos no Brasil, encontra-se em andamento o projeto P&D ANEEL Fadiga, também intitulado “*Determinação de parâmetros para Ensaio Mecânicos do Concreto Reforçado com Fibras (CRF) sob Condições Extremas de Carregamento em Empreendimentos de Geração Hidrelétrica e Eólica*”, desenvolvido em parceria entre Furnas e a Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Esse projeto envolve tanto o estudo de materiais compósitos cimentícios quanto o monitoramento das torres instaladas no complexo de Fortim, sendo um de seus objetivos a avaliação do uso de fibras no controle da abertura de fissuras no concreto. Espera-se com isso um aumento na vida útil das estruturas, reduzindo a necessidade de manutenções ou aumentando o intervalo entre elas.

O presente trabalho visa, portanto, avaliar o comportamento e a degradação mecânica dos concretos de alta resistência e de ultra alto desempenho com fibras de aço submetidos à fadiga na flexão, buscando a aplicação desses materiais em torres eólicas. As amostras foram pré-fissuradas até uma abertura de fissura de 0,50 mm e, em seguida, foram submetidas a carregamentos cíclicos, em que a carga aplicada oscilava entre o limite superior de 70% da resistência residual do compósito e o limite inferior de 20% do limite superior até atingir 1.000.000 de ciclos ou 4 mm de abertura de fissura, critério de parada selecionado como fim da vida útil do CRFA. A influência das fibras na degradação mecânica foi avaliada através do percentual de perda de rigidez do CRFA até o fim do ensaio.

## 2 COMPLEXO EÓLICO DE FORTIM

O Complexo Eólico de Fortim (Figura 1) está localizado no estado do Ceará, no Brasil. Ele possui 41 torres eólicas de concreto, com 120 m de altura [5] e aerogeradores de capacidade igual a 3 MW, distribuídas em cinco parques eólicos: Nossa Senhora de Fátima (30 MW), Jandaia (27 MW), Jandaia I (24 MW), São Clemente (21 MW) e São Januário (21 MW), totalizando 123 MW de potência instalada, energia suficiente para abastecer uma cidade com um milhão de habitantes [31]. Os parques são interligados por uma rede de distribuição de 34,5 kV conectada à subestação elevadora de Jandaia [32], responsável por fazer a ligação com o Sistema Interligado Nacional (SIN) na subestação Russas II, através de linhas de transmissão com extensão de 69 km e tensão de 230 kV [31,32].

A construção e a operação do complexo são de responsabilidade da Brasil Ventos, subsidiária integral de Furnas criada em janeiro de 2016, com o objetivo de participar em sociedades de geração de energia renovável, como solar, eólica e biomassa. O empreendimento abrange uma área de 2.365 hectares em município homônimo, a 135 km de Fortaleza, onde a média de velocidade do vento varia entre 6,60 m/s e 8,10 m/s [31-33]. A subestação Jandaia foi energizada em março de 2020 para viabilizar o início das operações e comissionamento do complexo em abril do mesmo ano. [31,33]

Considerando a importância do incentivo às fontes limpas de energia e da busca pela utilização de materiais mais duráveis no que tange à sustentabilidade, Furnas vem desenvolvendo um projeto em parceria com a PUC-Rio visando ao aprimoramento das torres eólicas. O projeto inclui a avaliação do comportamento e da degradação mecânica de diferentes materiais com potencial de utilização na construção das torres, bem como a obtenção de melhores soluções para o monitoramento da vida útil das estruturas, a serem aplicadas no Complexo de Fortim.



Figura 1. Complexo eólico de Fortim

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1 *Materiais*

Para o preparo das amostras utilizou-se o cimento Portland CII-F 32 da fabricante Mauá, cujos parâmetros dos lotes recebidos atendem às condições especificadas na norma NBR 5733 [34]. No caso dos agregados graúdos, foi utilizado agregado de gnais-

se com diâmetro máximo de 9,5 mm e módulo de finura igual a 6,03, denominado Brita 0 neste estudo. Em relação aos agregados miúdos, utilizou-se areia natural com 2,4 mm de diâmetro máximo e módulo de finura de 2,58. A sua utilização se deu em três diferentes frações, sendo: Areia A1, representada pelo material passante na peneira 4,75 mm e retida na peneira 0,85 mm; Areia A2, associada ao material remanescente na peneira 150 µm; e Areia A3, correspondente ao material passante da peneira 1,18 mm.

Ainda, foram utilizadas adições de cinza volante, sílica ativa e pó de quartzo #325 (sílica #325) em concordância com as especificações mínimas da norma NBR 12653 [35]. Como aditivos, adotou-se o modificador de viscosidade MasterMatrix VMA 358, com densidade de 1,0 g/cm<sup>3</sup>, e o superplastificante MasterGlenium 51, com estrutura química com polímeros de éter policarboxílico de largas cadeias, densidade de 1,20 g/cm<sup>3</sup> e 32% de sólidos em sua composição, atendendo aos requisitos da norma NBR 11768 [36], ambos produzidos pela fabricante MBCC Group Brasil.

Foram utilizados dois tipos de fibra de aço: a fibra FA1, de extremidades com ganchos com 30 mm de comprimento, diâmetro de 0,62 mm e razão de aspecto igual a 45; e a fibra FA2, com comprimento de 13 mm, diâmetro de 0,20 mm e razão de aspecto igual a 65. As propriedades das fibras, de acordo com os fabricantes, podem ser analisadas na Tabela 1. O concreto de alta resistência (C0) foi reforçado com três frações diferentes de fibra de aço: 20 (C20), 40 (C40) e 60 (C60) kg/m<sup>3</sup> da fibra FA1. Já o concreto de ultra alto desempenho (CUAD) foi aplicado com 160 kg/m<sup>3</sup> da fibra FA2. As composições dos concretos analisados estão na Tabela 2. As resistências à compressão de cada composição analisada estão na Tabela 3.

Tabela 1. Propriedades das fibras

Propriedades	FA1	FA2
Formato	Com ganchos	Lisa
Comprimento (mm)	45	13
Diâmetro (mm)	0,62	0,20
Razão de aspecto	30	65
Resistência à tração (MPa)	1270	2750
Módulo de elasticidade (GPa)	210	200

Tabela 2. Composição das misturas.

Insumos	Misturas				
	C0	C20	C40	C60	CUAD
Agregado graúdo (kg/m <sup>3</sup> )	492	485	479	472	0
Areia A1 (kg/m <sup>3</sup> )	826	826	826	826	0
Areia A2 (kg/m <sup>3</sup> )	99	99	99	99	0
Areia A3 (kg/m <sup>3</sup> )	0	0	0	0	883
Sílica #325 (kg/m <sup>3</sup> )	70	70	70	70	80
Cimento CPII-F32 (kg/m <sup>3</sup> )	360	360	360	360	1011
Cinza volante (kg/m <sup>3</sup> )	168	168	168	168	0
Sílica ativa (kg/m <sup>3</sup> )	45	45	45	45	58
Água (kg/m <sup>3</sup> )	165	165	165	165	175,5
Superplastificante (%)	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	2,2%
Modificador de viscosidade (%)	0,50%	0,50%	0,50%	0,50%	0
Fibra FA1 (kg/m <sup>3</sup> )	0	20	40	60	0
Fibra FA2 (kg/m <sup>3</sup> )	0	0	0	0	160

A reologia dos concretos estudados foi avaliada através de ensaios de espalhamento feitos de acordo com as normas NBR 15823-1 [37] e 15823-2 [38] para concreto com fibras. O espalhamento foi medido através do diâmetro médio do concreto após a liberação do material do cone de Abrams. Analisou-se também a estabilidade do concreto, que está associada à distribuição dos agregados e à ocorrência de exsudação ao longo do perímetro do material após o término do escoamento. Todas as matrizes analisadas mostraram-se altamente estáveis, sem evidência de segregação ou exsudação, mesmo com a adição de fibras. A Tabela 3 mostra os resultados de espalhamento para todas as misturas analisadas.

Tabela 3. Resultado dos ensaios de espalhamento e resistência à compressão.

Composição	C0	C20	C40	C60	CUAD
Fibra	-	FA1	FA1	FA1	FA2
Quantidade (kg/m <sup>3</sup> )	0	20	40	60	160
Espalhamento (mm)	710	600	690	625	845
$f_c$ (MPa)	48	47	52	50	101

### 3.2 Processo de mistura

Para a produção das amostras, utilizou-se, para volumes superiores a 30 litros, uma betoneira com capacidade de 400 litros. Para volumes de até 30 litros, a mistura foi realizada em um misturador planetário. O concreto de alta resistência seguiu o seguinte procedimento de mistura:

- Adição dos agregados ao tambor de mistura (previamente saturado) com 70% da água, seguida de mistura por 1 minuto;
- Adição das adições minerais, seguida de mistura por 1 minuto;

- Adição do cimento, seguida de mistura por 1 minuto;
- Incorporação do superplastificante, lentamente, junto com os 30% restantes da água, seguida de mistura por 5 minutos;
- Havendo fibras, elas são adicionadas e a mistura continua por mais 5 minutos.

No caso do concreto de ultra alto desempenho, adotou-se o seguinte procedimento:

- Adição dos materiais secos (agregados e aglomerantes) no tambor de mistura (previamente saturado), seguida de mistura por 1 minuto;
- Adição de 50% da água e do superplastificante, seguida de mistura por 8 minutos;
- Adição dos 50% restantes de água e superplastificante, seguida de mistura por 12 minutos;
- Incorporação das fibras, lentamente, seguida de mistura por mais 3 minutos.

### *3.3 Ensaios de flexão quase-estáticos*

Para os ensaios de flexão quase-estáticos do concreto de alta resistência com fibras de aço, foram moldados três prismas de 150 mm x 150 mm x 550 mm para cada fração de fibra estudada. Um entalhe de 25 mm foi introduzido no centro da face inferior de cada amostra, na direção do ponto de aplicação de carga, com o auxílio de uma serra diamantada de 3 mm. Adotou-se ainda um recuo de 25 mm a partir das extremidades para a delimitação dos apoios, resultando em um vão de teste de 500 mm. No caso do concreto de ultra alto desempenho, foram utilizados três prismas de 100 mm x 100 mm x 400 mm. O entalhe adotado foi de 15 mm e um vão de 350 mm foi considerado nos testes. Os ensaios de flexão de três pontos foram realizados aos 28 dias segundo a norma EN 14651 [39], os detalhes da montagem podem ser analisados na Figura 2.

O equipamento utilizado nos testes foi um atuador hidráulico MTS, com controle de loop fechado e célula de carga com capacidade de 100 kN. Os ensaios foram controlados pela abertura de fissura CMOD (*Crack Mouth Opening Displacement*) com o auxílio de um clip-gauge, a uma taxa constante de 0,05 mm/min até atingir 0,10 mm, seguida de uma taxa de 0,20 mm/min até atingir 4 mm de CMOD.

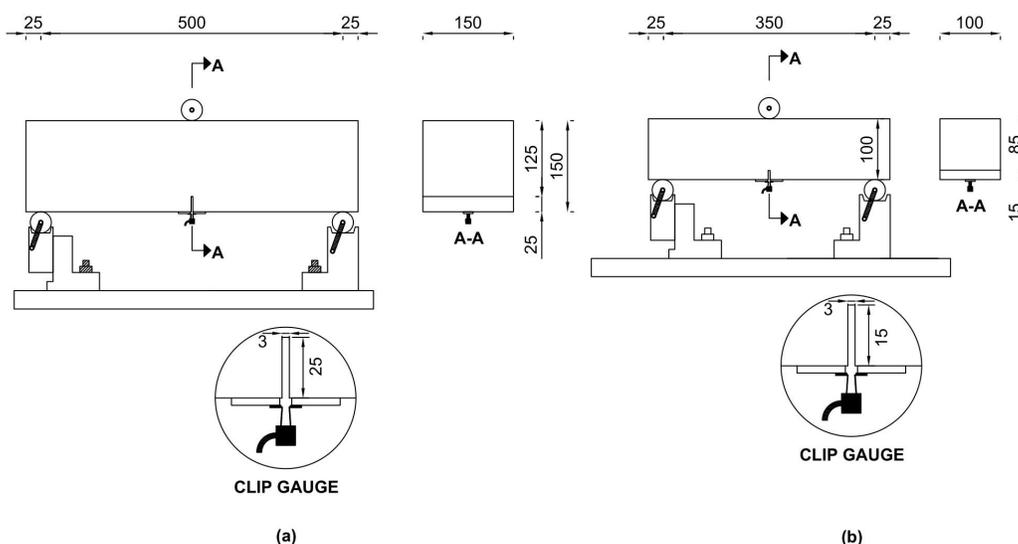


Figura 2. Ensaio de flexão (quase-estáticos e na fadiga) para (a) o concreto auto adensável reforçado com fibras de aço e (b) concreto de alto desempenho.

### 3.4 Ensaio de fadiga na flexão

Os ensaios de flexão sob carregamento cíclico foram realizados seguindo a mesma montagem dos ensaios quase-estáticos. Inicialmente, as amostras foram submetidas a uma pré-fissuração, correspondente a 0,5 mm de CMOD, que caracteriza o estado limite de serviço [26]. Para tal, utilizou-se uma taxa de abertura de fissura de 0,05 mm/min, sendo ainda obtido o valor da carga correspondente à abertura de 0,5 mm ( $f_{R,1}$ ), utilizada como referência na definição dos valores máximo e mínimo aplicados à respectiva amostra no carregamento cíclico. Para o concreto de alta resistência e o concreto de ultra alto desempenho, utilizaram-se os limites máximo ( $f_{máx}$ ) de 70% de  $f_{R,1}$  e mínimo ( $f_{mín}$ ) de 20% de  $f_{máx}$ .

Determinadas as cargas máxima e mínima às quais a amostra seria submetida, continuou-se o ensaio de fadiga a uma frequência de 6 Hz, sendo finalizado quando a abertura de fissura atingisse 4,0 mm ou ao final de  $10^6$  de ciclos. A aquisição de dados se deu a uma frequência de 1024 Hz, sendo obtidos os dez primeiros ciclos, ciclos múltiplos de 200 e os últimos trinta ciclos. O procedimento de ensaio pode ser observado na Figura 3.

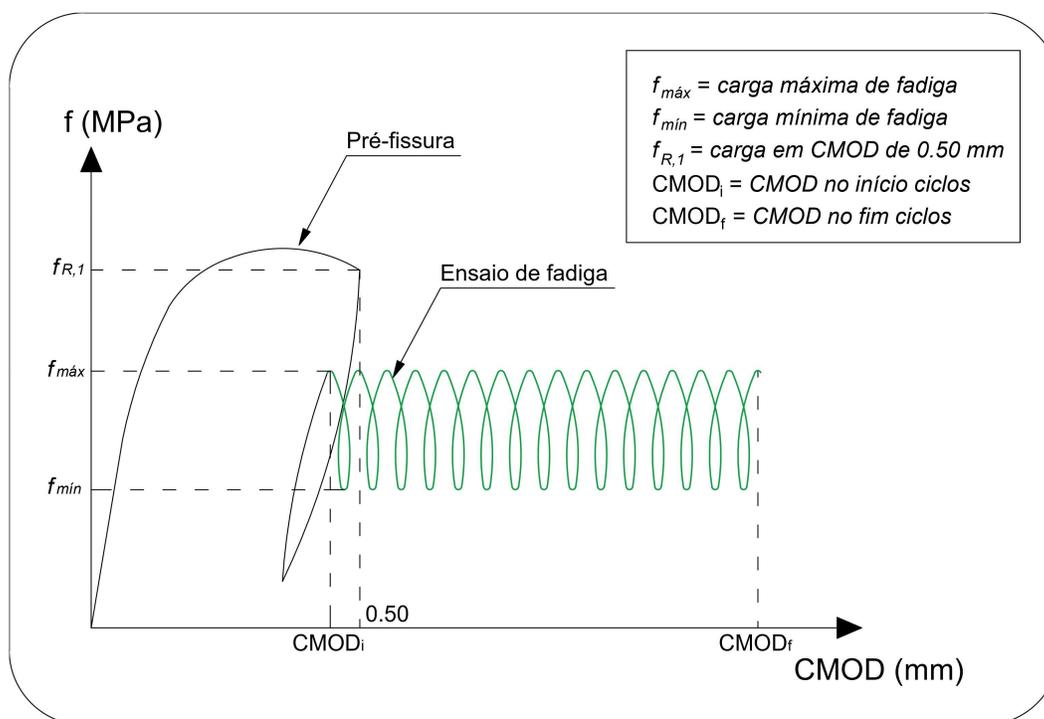


Figura 3. Procedimento do ensaio de fadiga à flexão aplicado

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização mecânica

Segundo a EN 14651 [39], a tensão no limite de proporcionalidade (LOP) do material é calculada a partir da  $f_{LOP}$ , que corresponde à carga máxima no intervalo de 0,05 mm. De acordo com a norma europeia,  $f_{R,i}$  equivale à resistência residual obtida a partir do ensaio de flexão de três pontos em amostras entalhadas, com  $i = 1, 2, 3$  e  $4$  correspondendo, respectivamente, aos valores de CMOD de 0,5, 1,5, 2,5 e 3,5 mm.

O comportamento à flexão do concreto de alta resistência com 20, 40 e 60 kg/m<sup>3</sup> da fibra de aço FA1 pode ser observado na Figura 4 (a). No caso do concreto de ultra alto desempenho com 160 kg/m<sup>3</sup> de fibra de aço FA2, os resultados são apresentados na Figura 4 (b). A Tabela 4 indica os valores médios e respectivos desvios padrão para os concretos estudados para as resistências residuais.

A dosagem especial para a elaboração do concreto de ultra alto desempenho resulta em tensões residuais bem superiores quando comparado com o concreto de alta resistência com fibras de aço. O CUAD consegue atingir tensões de  $f_{R,1}$  acima de 17 MPa, enquanto o concreto C60 atingiu quase metade desse valor. O mesmo ocorre para as

tensões médias em 3,5 mm de CMOD com 3,82 MPa para o concreto C60 e 9,67 MPa para o CUAD.

É possível verificar também o efeito da adição de diferentes frações de fibra no comportamento pós-fissuração do material. O incremento gradual na quantidade de fibras de aço no concreto de alta resistência promove um aumento nas tensões residuais. Enquanto o concreto C40 resultou em média de 7,07 MPa para  $f_{R,1}$ , C20 atingiu 3,31 MPa.

Tabela 4. Resultado da caracterização mecânica dos concretos estudados. Desvio padrão entre parênteses.

Composição	$f_{lop}$ MPa	$f_{R,1}$ MPa	$f_{R,2}$ MPa	$f_{R,3}$ MPa	$f_{R,4}$ MPa
C20	5,59 (0,21)	3,31 (1,11)	2,76 (0,83)	1,66 (0,70)	1,26 (0,44)
C40	6,38 (0,56)	7,07 (1,00)	6,01 (0,82)	3,78 (0,33)	2,75 (0,22)
C60	6,37 (0,75)	7,88 (2,09)	6,95 (1,89)	4,87 (1,80)	3,82 (1,26)
CUAD	9,95 (1,08)	17,32 (2,61)	15,03 (3,09)	11,99 (2,66)	9,67 (2,11)

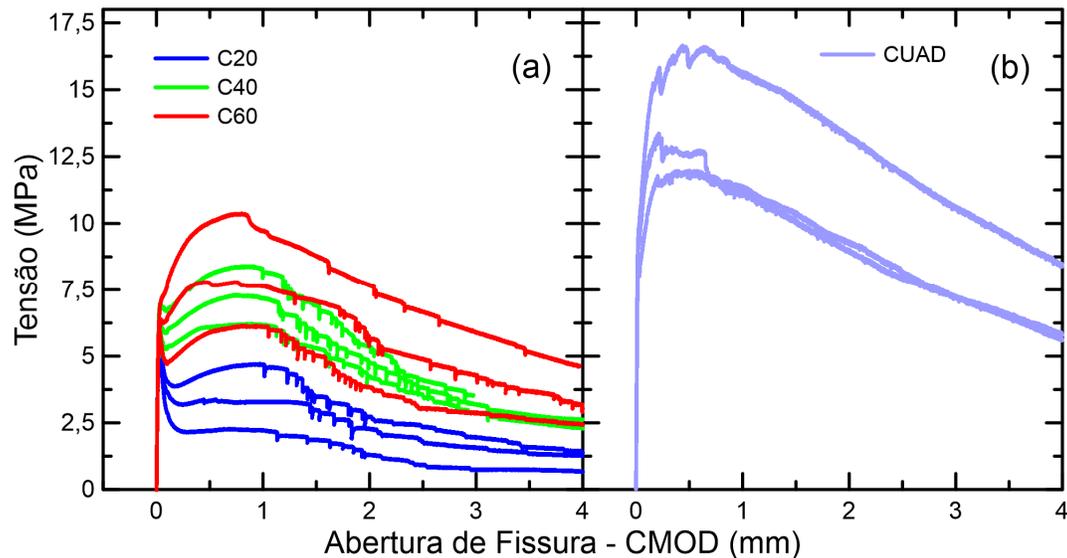


Figura 4. Resposta mecânica dos ensaios de flexão (EN 14651) para (a) concreto de alta resistência reforçado com fibras de aço e (b) concreto de ultra alto desempenho.

#### 4.2 Variação da abertura de fissuras ao longo dos ciclos

A Figura 5 traz a variação da abertura de fissuras (CMOD) ao longo dos ciclos do ensaio de fadiga. Enquanto a Figura 5 (a) mostra a evolução da abertura de fissuras em função do número de ciclos, a Figura 5 (b) traz os resultados em função do número de

ciclos ( $n$ ) relativo ao seu número máximo ( $N$ ). A Tabela 4, por sua vez, mostra o número total de ciclos percorridos por cada amostra. Somente o CUAD atingiu o limite de fadiga de 1.000.000 de ciclos, enquanto o concreto de alta resistência reforçado com fibras teve seus ensaios interrompidos quando o limite de abertura de fissuras de 4 mm foi alcançado.

As curvas de CMOD ao longo do número de ciclos para o concreto de alta resistência reforçado com fibras de aço apresentam duas fases distintas. Inicialmente, a abertura de fissura aumenta a uma taxa praticamente constante. Em seguida, ao atingir por volta de  $n/N$  igual a 90%, ocorre um crescimento súbito de CMOD, indicando que a amostra está próxima de atingir seu colapso total. O concreto de ultra alto desempenho, por outro lado, não alcança o estágio de crescimento súbito da abertura de fissura, mantendo uma taxa de evolução de CMOD muito similar à do concreto de alta resistência até atingir o limite de 1.000.000 de ciclos. Em relação ao concreto de alta resistência, não é possível perceber uma influência da quantidade de fibras na taxa de evolução de CMOD ao longo do ensaio de fadiga.

O processo de pré-fissuração executado antes da realização dos ensaios de fadiga compromete a capacidade da matriz cimentícia de resistir às forças de tração na flexão dos prismas na seção fissurada. Dessa maneira, a variação da carga entre  $f_{máx}$  e  $f_{mín}$  promove o surgimento gradual de microfissuras na interface entre fibra e matriz, que com a degradação do compósito levam ao crescimento da macro fissura no meio da seção da amostra. Essa degradação gradual acarreta no incremento do dano do material devido ao *pull-out* da fibra ao longo da fadiga [40].

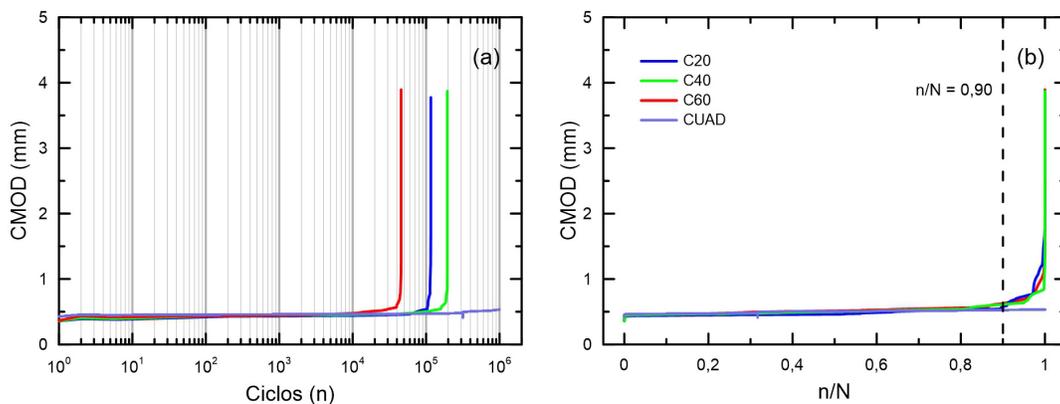


Figura 5. Evolução da abertura de fissuras ao longo do ensaio de fadiga em função de (a) ciclos ( $n$ ) e (b) número de ciclos ( $n$ ) relativo ao seu número máximo ( $N$ ).

Tabela 4. Resultados obtidos a partir dos ensaios de fadiga para os concretos estudados

Mistura	Ensaio de fadiga							
	$N_{m\acute{a}x}$ -	$f_{m\acute{a}x}$ (MPa)	CMOD <sub>f</sub> (mm)	$k_0$ (kN/mm)	$k_{0,50}$ (kN/mm)	$k_{0,90}$ (kN/mm)	$D_{0,50}$ (%)	$D_{0,90}$ (%)
C20	116.114	2,3	4,0	50	48	36	6%	30%
C40	194.483	3,9	4,0	74	63	54	16%	29%
C60	45.739	6,2	4,0	121	95	83	21%	30%
CUAD	1.000.000	8,7	0,5	176	139	132	20%	25%

### 4.3 Degradação mecânica no ensaio de fadiga

Depois do dano localizado devido à pré-fissura, o dano acumulado controla o comportamento tensão-deformação na zona fissurada [40]. A propagação do dano no concreto acarreta no declínio do módulo secante do concreto, podendo atingir até 30% do seu valor inicial como relatado em pesquisas anteriores [29, 30]. Os valores de evolução do dano podem ser usados como critério para prever a proximidade da estrutura a sua falha à fadiga.

A Figura 6 ilustra a queda de rigidez do concreto C40 ao longo do ensaio de fadiga. A perda de rigidez revela um aumento na abertura de fissuras e denota uma degradação mecânica do CRF [41]. A rigidez é usada para avaliar o índice de dano (D) na equação 1, que tem como referência a rigidez  $k_0$  e a rigidez em função do índice  $n/N$ ,  $k_{n/N}$ . A rigidez  $k_0$  está associada ao ciclo (n) igual a 400, que foi escolhida como referência para reduzir as imprecisões associadas aos primeiros ciclos do ensaio de fadiga.

$$D = 1 - \frac{k_{n/N}}{k_0} \quad (1)$$

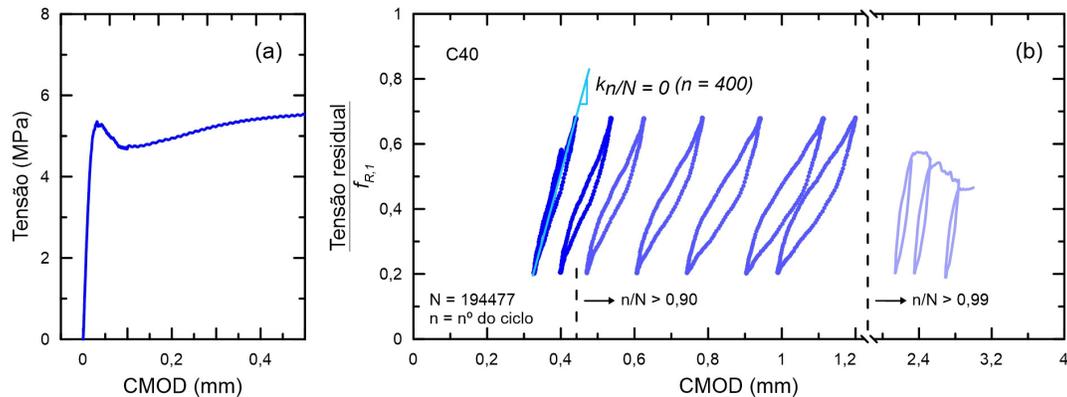


Figura 6. Realização do ensaio de fadiga no concreto C40: (a) pré-fissuração até atingir CMOD igual a 0,50 mm e (b) ensaio de fadiga com variação entre 70% de  $f_{R,t}$  e 30% de  $f_{m\acute{a}x}$ .

A Figura 7 (a), por sua vez, traz a queda de rigidez ao longo da evolução dos ciclos de carga e descarga, tornando possível comparar a rigidez dos diferentes compósi-

tos reforçados com fibras. A contribuição das fibras na rigidez do material compósito já foi amplamente discutida, especialmente em relação ao uso de fibras contínuas ou tecidos inseridos em diversas matrizes [42, 43]. Porém, pouco foi discutido em relação à perda de rigidez do concreto reforçado com fibras sob fadiga. As curvas apresentadas na Figura 7 (a) mostram de forma clara a influência das fibras na rigidez do concreto pré-fissurado, já que há uma relação entre tensão residual ( $f_{R,I}$ ) e a rigidez do CRFA.

Especificamente para o concreto de alta resistência, a rigidez é tão maior quanto maior a fração volumétrica das fibras de aço. No caso do CUAD, a rigidez é ainda superior em relação a C20, C40 e C60. A maior rigidez está associada a um maior número de fibras na seção fissurada, que pode ser avaliada através da tensão residual na abertura de fissuras de 0,50 mm ( $f_{R,I}$ ). Enquanto CUAD resultou em 17,32 MPa para  $f_{R,I}$ , o concreto C20 apresentou 3,31 MPa (Tabela 4). No caso da rigidez  $k_0$ , o CUAD apresentou 178 kN/mm e o C20 resultou em 50 kN/mm (Tabela 5). Como a matriz de concreto já está fissurada, sua rigidez pouco contribui ao longo dos ciclos de fadiga, acarretando em uma significativa variação de rigidez do compósito dependendo de  $f_{R,I}$ .

A Figura 7 (b) apresenta a queda de rigidez em função da abertura de fissura. Não é possível verificar uma relação direta entre essas duas variáveis. Enquanto a rigidez decresce ao longo dos ciclos, pouco se observa em relação ao aumento da abertura de fissuras. Porém, ao atingir a marca de  $n/N$  igual a 0,90, há um incremento muito acentuado de CMOD, associado ao fim da vida útil à fadiga do concreto de alta resistência. O mesmo comportamento não é observado no caso do CUAD, já que esse material compósito cimentício não atingiu a ruptura, mesmo após 1.000.000 de ciclos.

A Figura 8 traz a evolução do índice de dano, calculado a partir da equação 1, ao longo dos ciclos  $n/N$  dos ensaios de fadiga. Apesar dos valores de rigidez variarem significativamente dependendo da quantidade de fibras na seção fissurada, a evolução do índice de dano apresentou muitas semelhanças para as composições estudadas. A evolução do índice de dano é gradual até atingir por volta de 30% em  $n/N$  igual a 0,90, como mostrado na Tabela 4. No caso dos concretos C20, C40 e C60, o índice de dano começa a aumentar vertiginosamente até a atingir a ruptura dos compósitos.

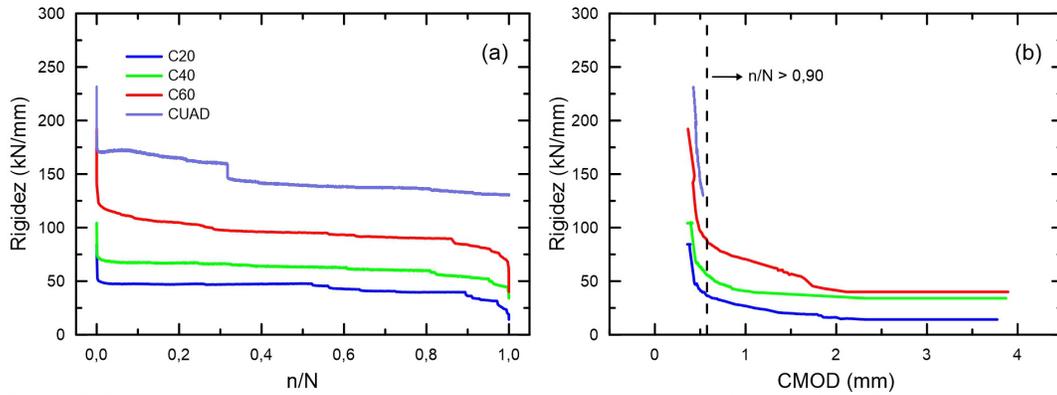


Figura 7. Variação da rigidez ao longo do ensaio de fadiga em função de (a) ciclos  $n/N$  e (b) abertura de fissuras.

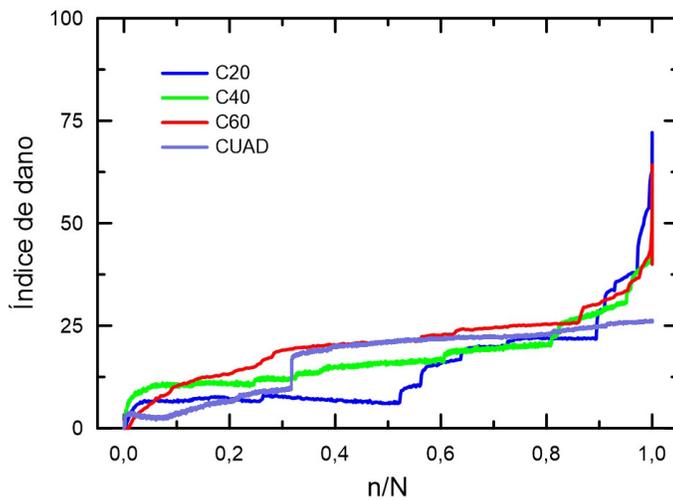


Figura 8. Evolução do índice de dano ao longo dos ciclos  $n/N$

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho traz os primeiros resultados obtidos no âmbito do Projeto P&D ANEEL Fadiga relacionados ao comportamento e à degradação mecânica do concreto de alta resistência e do concreto de ultra alto desempenho reforçados com fibras de aço quando submetidos à fadiga. Os corpos de prova prismáticos foram pré-fissurados até atingir o valor de CMOD igual a 0,50 mm e, em seguida, submetidos a uma variação de carga entre 70% da tensão residual e 20% da tensão máxima ( $f_{máx}$ ). As principais conclusões obtidas nos resultados parciais do programa de pesquisa são:

- As curvas de abertura de fissura ao longo do número de ciclos para o concreto de alta resistência reforçado com fibras de aço apresentam duas fases distintas. Inicialmente, a abertura de fissuras aumenta a uma taxa pratica-

mente constante e, ao atingir de  $n/N$  igual a 90%, ocorre um crescimento súbito de CMOD, indicando que a amostra vai atingir seu colapso total. O concreto de ultra alto desempenho, por outro lado, não alcança o estágio de crescimento súbito da abertura de fissuras, mantendo uma taxa de evolução de CMOD muito similar ao concreto de alta resistência até atingir o limite de 1.000.000 de ciclos.

- A rigidez do concreto pré-fissurado com fibras está relacionada com a quantidade de fibras presentes na seção fissurada. Foi possível notar uma relação de proporcionalidade entre as tensões residuais em CMOD igual a 0,50 mm e a rigidez do concreto com fibras de aço. Como a matriz de concreto já está fissurada, sua rigidez pouco contribui ao longo dos ciclos de fadiga, acarretando em uma significativa variação de rigidez do compósito dependendo de  $f_{R,1}$ .
- Visando a aplicação do concreto reforçado com fibras em torres eólicas, as fibras de aço podem contribuir com o aumento da rigidez da estrutura, constantemente submetida a carregamentos cíclicos ao longo de sua vida útil devido à atuação do vento e do movimento do rotor. O monitoramento da degradação mecânica é fundamental para entender em que ponto da vida útil está o material. Resultados preliminares mostram que ao atingir por volta de 30% de dano dos concretos de alta resistência, o material começa a alcançar um estágio próximo de sua ruptura.

Os resultados mostram-se promissores no que tange ao controle da abertura de fissuras e ao aumento da rigidez com o uso dos materiais, podendo indicar que a adição de fibras no concreto viabiliza um aumento na vida útil e uma redução nas necessidades de manutenção das estruturas.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 GANNOUM, E. **O desenvolvimento da indústria de energia eólica no Brasil**: aspectos de inserção, consolidação e sustentabilidade. *Cadernos Adenauer*, vol. 3, p. 57-71, 2014.
- 2 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. ABEÓLICA. **Boletim anual de geração eólica**. São Paulo, 2016.
- 3 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. ABEÓLICA. **Boletim anual de geração eólica**. São Paulo, 2013.
- 4 AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEEL, **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília, 2005.
- 5 MULTINACIONAL reabre fábrica de torres de concreto no RN para atender parque eólico. **AgoraRN**, Natal, 18 de dez. de 2018. Disponível em: <<https://agorarn.com.br/economia/multinacional-reabre-fabrica-de-torres-de-concreto-no-rn-para-atender-parque-eolico-no-ceara/>>. Acesso em: 27 de jul. de 2021
- 6 QUILLIGAN, A. O'CONNOR, A. PAKRASHI, V. Fragility of steel and concrete wind turbine towers. **Engineering Structures**, vol. 36, p. 270-282, 2012.
- 7 HAU, E. **Wind turbines: fundamentals, technologies, applications, economics**. 2ª ed. Springer, 2006.
- 8 HARTE, R. VAN ZIJL, G. Structural stability of concrete wind turbines and solar chimney towers exposed to dynamic wind action. **Journal of Wind Engineering**, vol. 95, p. 1079-1096, 2007.
- 9 OSORIO, L. BASU, B. Unavailability of wind turbines due to wind-induced accelerations. **Engineering Structures**, vol. 30, p. 885-893, 2008.
- 10 JIN, Q. LI, V. Development of lightweight engineered cementitious composite for durability enhancement of tall concrete wind towers. **Cement and Concrete Composites**, vol. 96, p. 87-94, 2019
- 11 THE CONCRETE CENTER, **Concrete towers for onshore and offshore wind farms: conceptual design studies**, 2005.
- 12 JIN, Q. LI, V. Structural and durability assessment of ECC/concrete dual-layer system for tall wind turbine towers. **Engineering Structures**, vol. 196, 2019.
- 13 KIM, M. KIM, T. LEE, D. KIM, M. Experimental Investigation of the Steel-Concrete Joint in a Hybrid Tower for a Wind Turbine under Fatigue Loading. **KSCE Journal of Civil Engineering**, vol. 23, p. 2971-2982, 2019.
- 14 BAI, X. HE, M. MA, R. HUANG, D. CHEN, J. Modelling fatigue degradation of the compressive zone of concrete in onshore wind turbine foundations. **Construction and Building Materials**, vol. 133, p. 425-437, 2017.
- 15 MEHTA, P. BURROWS, R. Building durable structures in the 21st century. **Concrete International**, vol. 23, p. 57-63, 2001.
- 16 ABBAS, S. NEHDI, M. SALEEM, M. Ultra-high performance concrete: mechanical performance, durability, sustainability and implementation challenges. **International Journal of Concrete Structures Materials**, vol. 10, p. 125-138, 2016.

- 17 SHI, X. XIE, N. FORTUNE, K. GONG, J. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. **Construction and Building Materials**, vol. 30, p. 125-138, 2012.
- 18 BERROCAL, C. FERNANDEZ, I. LUNDRGREN, K. LÖFGREN, I. Corrosion-induced cracking and bond behaviour of corroded reinforcement bars in SFRC. **Composites Part B**, vol. 113, p. 123-137, 2017.
- 19 LEE, M. BARR, B. An overview of the fatigue behavior of plain and fiber reinforced concrete. **Cement & concrete Composites**, vol. 26, p. 299-305, 2004.
- 20 GRZYBOWSKI, M. MEYER, C. Damage accumulation in concrete with and without fiber reinforcement. **ACI Materials Journal**, vol. 90, p. 594-604, 1993.
- 21 CACHIM, P. FIGUEIRAS, J. PEREIRA, P. Fatigue behavior of fiber-reinforced concrete in compression. **Cement & Concrete Composites**, vol. 24, p. 211-217, 2002.
- 22 POVEDA, E. RUIZ, G. CIFUENTES, H. YU, R. ZHANG, X. Influence of the fiber content on the compressive low-cycle fatigue behavior of the self-compacting SFRC. **International Journal Fatigue**, vol. 101, p. 9-17, 2017.
- 23 BANJARA, N. RAMANJANEYULU, K. Experimental investigations and numerical simulations on the flexure fatigue behavior of plain and fiber-reinforced concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, vol. 30, 2018.
- 24 SINGH, S. SHARMA, U. Flexure fatigue strength of fibrous concrete beams. **Advances in Structural Engineering**, vol. 10, p. 197-207, 2007.
- 25 GOEL, S. SINGH, P. Fatigue performance of plain and steel fibre reinforced self-compacting concrete using S-N relationship. **Engineering Structures**, vol. 74, p. 65-73, 2014.
- 26 INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE. **CEB-FIB**, 2010.
- 27 HSU, T. Fatigue of plain concrete. **Journal of American Concrete Institute**, vol. 76, p. 292-305, 1981.
- 28 Standard DNVGL-ST-0126. **Support structures for wind turbines**, DNV GL AS, 2016.
- 29 CARLESSO, D. DE LA FUENTE, A. CAVALARO, S. Fatigue of cracked high performance fiber reinforced concrete subjected to bending. **Construction and Building Materials**, vol. 220, p. 444-455, 2019.
- 30 CARLESSO, D. CAVALARO, S. DE LA FUENTE, A. Flexural fatigue of pre-cracked plastic fibre reinforced concrete: Experimental study and numerical modeling. **Cement and Concrete Composites**, vol. 115, 2021.
- 31 RIBEIRO, Marcelo. Complexo Eólico de Fortim - 123 MW. **Furnas**. Disponível em: <<http://www.furnas.com.br/subsecao/362/complexo-eolico-de-fortim--123mw?culture=pt>>. Acesso em: 27 de jul. de 2021
- 32 COMPLEXO Eólico de Fortim. **Brasil Ventos**, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.brasilventos.com.br/BV/fortim.asp>>. Acesso em: 27 de jul. de 2021
- 33 CUNHA, Leonardo. Complexo Eólico de Fortim entra em operação. **Furnas**, 20 de abr. de 2020. Disponível em: <<https://www.furnas.com.br/noticia/103/noticias/1454/complexo-eolico-de-fortim-entra-em-operacao>>. Acesso em: 27 de jul. de 2021
- 34 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. ABNT, 1991.
- 35 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos. ABNT, 1992.

- 36 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. ABNT, 2011.
- 37 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1**: Concreto autoadensável – Parte 1: classificação, controle e recebimento no estado fresco. ABNT, 2017.
- 38 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2**: Concreto autoadensável – Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams. ABNT, 2017.
- 39 EUROPEAN STANDARD. **EN 14651**: Test method for metallic concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual), 2005
- 40 FATAAR, H. COMBRINCK, R. BOSHOFF, W. An experimental study on the fatigue failure of steel fibre reinforced concrete at a single fibre level. **Construction and building Materials**, 2021.
- 41 BOULEKBACHE, B. HAMRAT, M. CHEMROUK, M. AMZIANE, S. Flexural behavior of steel fiber-reinforced concrete under cyclic loading. **Construction and Building Materials**, vol. 126, p. 253-262, 2016.
- 42 MOBASHER, B. **Mechanics of Fiber and Textile Reinforced Cement Composites**: 1<sup>st</sup> ed. CRC Press, 2019.
- 43 BENTUR A, MINDNESS, S. **Fiber reinforced cementitious composites**. 2<sup>nd</sup> ed. Taylor & Francis, 2007.