

Degradação da interface fibra-matriz cimentícia sob carregamento cíclico

On the degradation of the fiber/matrix interface of steel fiber reinforced concrete under fatigue loading

Vitor Monteiro (1), Nábila Cerqueira (2), Daniel Cardoso (3), Flavio Silva (3), Daiane Cupertino (4)

(1) MSc., Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio

(2) BSc. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio

(3) Professor Doutor, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio

(4) Engenheiro, Furnas

e-mail: vitormonteiro25@yahoo.com.br

Resumo

Com o crescimento do investimento em energia eólica no Brasil, a equipe de Furnas e os pesquisadores da PUC-Rio acabaram de iniciar um novo projeto de P&D (P&D ANEEL Fadiga) com o objetivo de enriquecer o entendimento sobre os mecanismos de degradação do concreto reforçado com fibras sujeito a carregamentos cíclicos e à fadiga. Esse novo projeto tem como uma das principais metas avaliar o impacto do uso de fibras na matriz de concreto visando um melhor controle da abertura de fissuras e um aumento da vida útil das estruturas eólicas brasileiras. O presente trabalho traz uma análise preliminar dos primeiros resultados obtidos em ensaios de arrancamento de fibra de aço sob fadiga, que tiveram como referência a carga máxima ($P_{máx}$) de aderência. Primeiro, é realizado um pré-deslizamento até atingir a carga máxima de aderência. Em seguida, o ensaio de fadiga é iniciado tendo como referência 95% da tensão de pico. Os ensaios foram realizados até que a ruptura da fibra ou o completo arrancamento da fibra aconteçam ou caso 1.000.000 de ciclos sejam atingidos. Dessa maneira, foi possível observar os diferentes modos de falha para cada situação estudada, além de analisar o número de ciclos até a ruptura da carga aplicada. A principal contribuição dessa etapa da pesquisa está em uma análise inicial da degradação na interface fibra/matriz quando submetido à fadiga.

Palavra-Chave: Concreto reforçado com fibras, Fadiga, Degradação da interface, Interface fibra/matriz

Abstract

With the major growth of wind energy investment in Brazil, Furnas work staff and re-searchers from PUC-Rio have just started a new R&D project (R&D ANEEL Fadiga) aiming to enrich the understanding of the deterioration mechanisms of the fiber rein-forced concrete under cyclic loading and fatigue. One of the main goals of this new project is to evaluate the fibers' use impact on the concrete matrix, seeking a better crack opening control and an increase of Brazilian wind structures lifespan. This work presents a preliminary analysis of the first results obtained from steel fiber pullout tests under fatigue, which had as reference the maximum adhesion load (P_{max}). First, the pullout specimens were pre-slipped until reaching the maximum adherence strength. Thereafter, the fatigue tests were carried out having as maximum reference pullout force of 95% of $P_{máx}$. The fatigue tests were conducted until reaching 1,000,000 cycles, the wire rupture or the complete fiber pullout. Therefore, it was possible to observe the different failure modes for each studied situation and also evaluating the necessary number of cycles until reaching one of the observed failure modes. The main paper contribution is to bring a preliminary evaluation of the interface degradation when the fiber interface is subjected to fatigue loading.

Keywords: Fiber reinforced concrete, Fatigue, Interface degradation, Fiber/matrix interface



1 Introdução

A energia eólica terminou o ano de 2020 com 686 usinas e 17,75 GW de potência eólica instalada pelo território brasileiro, como mostrado pelo boletim anual de 2020 da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA (2021)). Esses números representam um crescimento de 14,89% de potência quando comparado ao ano anterior. O grande investimento no setor eólico acompanha uma tendência mundial, que visa a redução das fontes de energia poluentes e priorizam as renováveis com baixo ou baixíssimo impacto ambiental. A velocidade em que a transição energética acontece varia dependendo da região e da situação de cada país. Porém, o fato é que essa mudança se apresenta de forma irreversível como mostrado pelo Conselho Global de energia Eólica (GWEC (2019)), que estima mais de 840 GW de energia eólica instaladas pelo globo.

Sabendo dos desafios de crescimento na produção de energia, não só as turbinas eólicas vêm se tornando cada vez maiores, como também as torres estão atingindo alturas ainda mais elevadas na atmosfera (IRENA (2021)). Esse rápido avanço em direção a maiores turbinas traz importantes obstáculos em relação ao uso das tradicionais torres de aço. Trabalhos passados na literatura (QUILLIGAN et al. (2012), HAU (2006), HARTE et al. (2007)) mostram que torres de aço com mais de 85 metros apresentam sérios riscos de vibração devido ao movimento da turbina e da ação do vento, comprometendo a segurança da estrutura ao longo do tempo.

A principal alternativa às estruturas de aço nos parques eólicos vem sendo a aplicação do concreto de alta resistência no dimensionamento dos parques eólicos *onshore* e *offshore* (JIN et al. (2019), CONCRETE CENTER (2005)), especialmente devido à maior rigidez da estrutura, que mitiga a excitação constante proveniente da ação do vento. A principal adversidade em relação ao uso de materiais à base de cimento está na fissuração devido aos constantes ciclos de carregamento e descarregamento, acarretando em uma degradação mecânica progressiva sob fadiga (GERMANO et al. (2016)). Como consequência, a performance a longo prazo e a durabilidade da estrutura podem ser prejudicadas devido ao crescimento das fissuras ao longo dos anos, resultando em manutenção onerosa.

Dessa maneira, diferentes soluções vêm sendo empregadas para mitigar os efeitos da fissuração do material com a adição de fibras na composição da mistura. Vários trabalhos no passado recente já mostram detalhadamente o comportamento e a degradação quando o concreto reforçado com fibras é submetido à fadiga, em especial na flexão e na compressão (SINGH et al. (2003), STEPHEN et al. (2020)). É possível dividir o comportamento à fadiga e evolução do dano em três diferentes etapas (GAO et al. (1998)): (i) início do crescimento das falhas e dos vazios dentro concreto, (ii) evolução constante e praticamente linear do crescimento da abertura de fissuras até atingir um ponto crítico, e (iii) crescimento acelerado da fissura principal até atingir a ruptura total da amostra.

Com o objetivo de melhor entender a evolução do dano na região da fratura, VICENTE et al. (2019) avaliaram a microestrutura interna do concreto reforçado com fibras após os



ensaios de fadiga através do tomógrafo. Os principais mecanismos de falha observados pelos autores na região de crescimento da fissura foram o completo arrancamento da fibra e a ruptura da fibra de aço na região do gancho. O modo de falha predominante durante o ensaio de fadiga foi o arrancamento da fibra.

Estudos mais recentes têm buscado compreender melhor o processo de falha na interface fibra/matriz durante os ciclos de fadiga com o objetivo de melhor entender o desgaste ao longo dos ciclos na escala material e desenvolver novos modelos micro mecânicos. FATAAR et al. (2021), por exemplo, realizou ensaios de fadiga na escala da fibra de aço sob diferentes níveis de carga máxima (505, 70% e 85%). Os autores constataram modos de falha semelhantes a VICENTE et al. (2019), com o arrancamento da fibra em maiores níveis de pré-deslizamento e a ruptura da fibra quando em níveis mais altos de carga máxima na fadiga.

Com o objetivo de avançar no conhecimento do concreto reforçado com fibras submetido à fadiga, encontra-se em andamento o projeto P&D ANEEL Fadiga, também intitulado “*Determinação de parâmetros para Ensaios Mecânicos do Concreto Reforçado com Fibras (CRF) sob Condições Extremas de Carregamento em Empreendimentos de Geração Hidrelétrica e Eólica*”. O projeto é fruto de uma parceria entre as equipes técnicas de Furnas e a Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) e envolve tanto o estudo de materiais compósitos cimentícios, quanto o monitoramento de diferentes torres eólicas instaladas pelo Brasil. Espera-se trazer uma nova base de conhecimento em relação ao concreto reforçado com fibras visando sua aplicação na construção das torres eólicas brasileiras.

O presente trabalho traz, portanto, uma avaliação da evolução da degradação da interface fibra/matriz quando submetida a ensaios de fadiga. Primeiro, foi realizada a caracterização da interface fibra/matriz através de ensaios de arrancamento estáticos. Foram utilizadas uma matriz de concreto de alta resistência com aproximadamente 50 MPa de resistência média à compressão e fibras de aço curtas com 35 mm de comprimento. Em seguida, avaliou-se a degradação da interface sob fadiga nos ensaios de arrancamento com aplicação de um nível de carregamento máximo de 95% de pico. Por fim, verificou-se os diferentes modos de falha na interface, observados nos ensaios de fadiga.

2 Programa experimental

2.1 Materiais

Utilizou-se para a produção da matriz de concreto o cimento Portland CII-F 32 da fabricante Mauá, atendendo às especificações da NBR 16697 (ABNT, 2018) e o agregado graúdo Brita 0, composto por agregado de gnaiss com diâmetro máximo de 9,5 mm e módulo de finura igual a 6,03. Como agregado miúdo, utilizou-se areia natural com 2,4 mm de diâmetro máximo e módulo de finura igual a 2,58, em duas diferentes frações: Areia A1, composta pelo material passante na peneira 4,75 mm e retida na peneira 0,85 mm, e Areia A2, correspondente ao material remanescente na peneira 150 µm.

Como adições, foram incorporadas cinza volante, sílica ativa e pó de quartzo (sílica #325), conforme as especificações mínimas da norma NBR 12653 (ABNT, 2014). Ainda, foram incorporados os aditivos modificador de viscosidade MasterMatrix VMA 358, com densidade de 1,0 g/cm³, e superplastificante MasterGlenium 51, com estrutura química formada por polímeros de éter policarboxílico de largas cadeias, densidade de 1,20 g/cm³ e 32% de sólidos em sua composição. Ambos são produzidos pela fabricante MBCC Group Brasil e atendem aos requisitos da NBR 11768 (ABNT, 2019). A composição do concreto encontra-se disposta na tabela 1.

Tabela 1 – Composição do concreto estudado

Insumo	Quantidade
Brita 0 (kg/m ³)	492
Areia A1 (kg/m ³)	826
Areia A2 (kg/m ³)	99
Sílica #325 (kg/m ³)	70
Cimento CII-F (kg/m ³)	360
Cinza volante (kg/m ³)	168
Sílica ativa (kg/m ³)	45
Água (kg/m ³)	165
Superplastificante (%)	5,5
Modificador de viscosidade (%)	0,50

Foram utilizadas fibras de extremidades enganchadas com 35 mm de comprimento, 0,75 mm de diâmetro e razão de aspecto igual a 45. Em relação às propriedades mecânicas, as fibras possuem resistência à tração de 1.225 MPa e módulo de elasticidade igual a 200 GPa.

Avaliou-se a reologia da matriz de concreto a partir do ensaio de espalhamento segundo as normas NBR 15823-1 (ABNT, 2017) e 15823-2 (ABNT, 2017). Mediu-se o espalhamento a partir do diâmetro médio do concreto após a liberação do material do cone de Abrams, igual a 710 mm. A matriz mostrou-se altamente estável, apresentando distribuição homogênea dos agregados e ausência de exsudação ao longo do perímetro do material após finalizado o escoamento. A resistência à compressão média obtida a partir de ensaios de caracterização foi de 50 MPa após 28 dias.

Para os ensaios de arrancamento quase-estáticos e arrancamento na fadiga utilizou-se a matriz sem a incorporação do agregado graúdo.

2.2 Preparação de amostras

O procedimento de mistura para a produção das amostras foi realizado em um misturador planetário com capacidade de 5 litros. Inicialmente adicionou-se ao misturador previamente saturado as areias A1 e A2, misturadas com 70% da água por um minuto. Em seguida foram adicionados o pó de quartzo (sílica #325), a sílica ativa e a cinza volante, misturando-se por mais um minuto. Incorporou-se então o cimento e após um minuto de mistura adicionou-se o restante da água, o superplastificante e o modificador de viscosidade, misturando-se por 10 minutos.

Para avaliar a interface entre fibra e matriz, as amostras foram produzidas em formas com formato de *dog-bone*, como indicado na figura 1. As fibras de aço com gancho foram posicionadas no meio da amostra com um comprimento de ancoragem de 15 mm. As amostras eram armazenadas em local com umidade e temperatura (25° C) controladas por 28 dias até a realização dos ensaios.

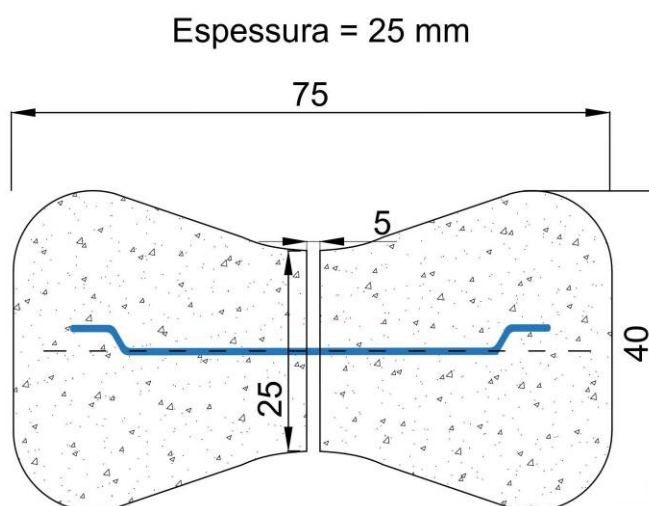


Figura 1 – Dimensões do corpo de prova em formato de *dog-bone*. Dimensões em mm.

2.3 Ensaio de arrancamento quase-estáticos

Os ensaios de arrancamento quase-estáticos foram realizados em um equipamento universal de ensaios mecânicos MTS, modelo 810, com capacidade de carga de 500 kN. Utilizou-se o controle de deslocamentos a uma taxa de 0,50 mm/min até o deslocamento máximo de 15 mm. Uma célula de carga de 5 kN foi adicionada ao setup com o objetivo de melhorar a precisão na aquisição de dados da força aplicada. A leitura dos deslocamentos foi realizada tanto pelo sistema do atuador, como também com o posicionamento de LVDT de 10 mm ao setup da figura 2. Duas garras de alumínio foram acopladas nas partes superior e inferior da máquina para a realização do arrancamento.



(a) (b)
Figura 2 – Foto do ensaio de arrancamento da fibra

2.4 Ensaios de arrancamento na fadiga

Os ensaios de fadiga no arrancamento são divididos em duas partes: uma primeira etapa com um ensaio estático e, em seguida, a aplicação de ciclos de carregamento e descarregamento. O pré-deslizamento das amostras foi realizada a uma taxa de 0,30 mm/min até atingir a região pouco após a carga de pico. O critério de parada foi o momento em que a força medida pela célula de carga atingiu em torno de 90% da força máxima, registrada anteriormente. A força de parada do ensaio (P_0) se situou na região de deslizamento de 1,42 mm até 2,32 mm, como mostrado na tabela 2. O arranjo experimental utilizado no ensaio de fadiga foi o mesmo usado no ensaio quase-estático.

Após o descarregamento, inicia-se o ensaio de fadiga sob uma frequência de 6 Hz com uma oscilação em forma senoidal. A carga máxima aplicada (P_{upp}) foi definida como 95% da força F_0 , enquanto a carga mínima (P_{low}) foi definida através da razão de amplitude de 0,05 ($R = P_{low}/P_{upp} = 0,05$). O critério de parada dos ensaios foi ou alcançar 1.000.000 ciclos (CARLESSO et al. (2021)) ou até que a fibra apresente um dos seus modos de falha (arrancamento ou ruptura). A figura 3 resume o programa experimental aplicado.

3 Resultados e discussão

3.1 Caracterização do arrancamento da fibra de aço

Ensaio estáticos foram realizados com o objetivo de caracterizar o arrancamento progressivo das fibras de aço ao longo do tempo e a máxima força média necessária para arrancar a fibra da matriz. Um total de 13 amostras foram testadas dessa forma, sendo 6 resultados apresentados na figura 4(a). Em geral, há um comportamento similar para todas as amostras observadas. Primeiro, há um pico inicial que ocorre anteriormente à carga máxima, atribuído ao descolamento da fibra de sua matriz, como explicado por ABDALLAH et al. (2017). Após a aderência inicial ter sido quebrada, a carga decresce e o gancho na extremidade da fibra é ativado, resultando no aumento da força. A força continua aumentando até atingir o pico global, quando então a carga começa a diminuir,

podendo atingir um segundo pico significativo. Por fim, a força reduz progressivamente até o fim do ensaio. A força máxima de aderência média foi de 318 N (9,02 MPa), apresentando uma variação significativa e característica desse tipo de análise com um desvio padrão de 57 N (1,62 MPa).

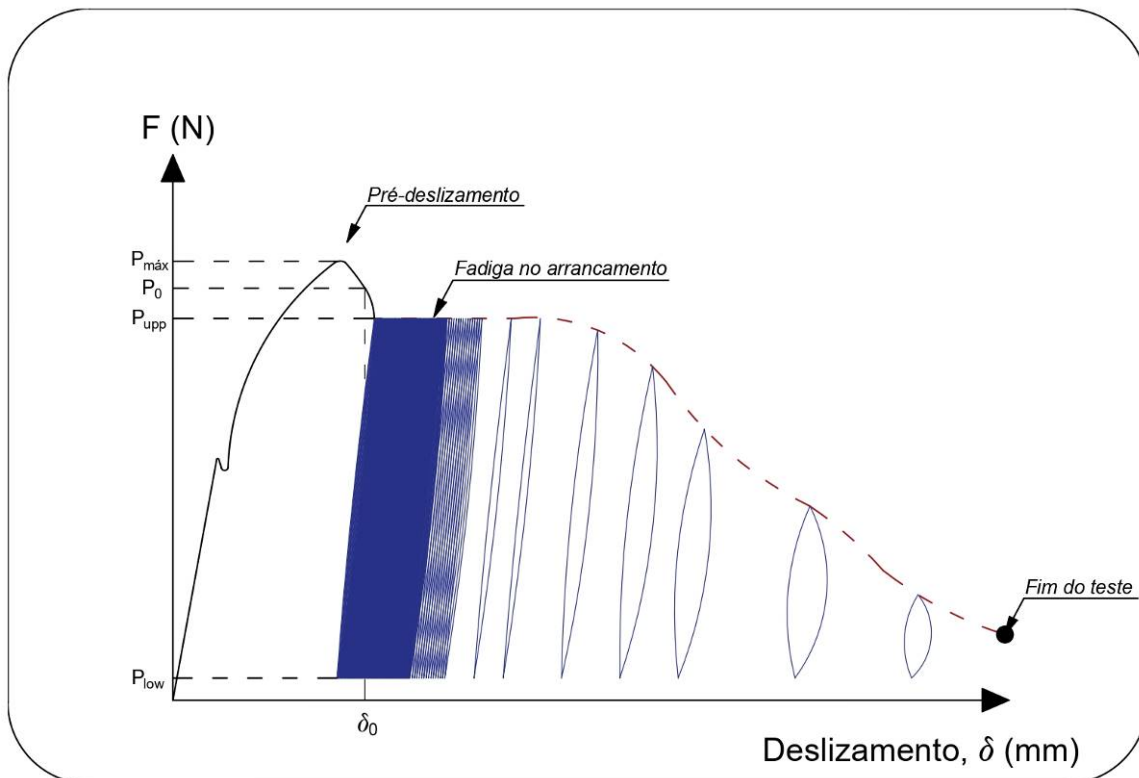


Figura 3. Procedimento experimental para ensaio de fadiga no arrancamento

Esse comportamento já foi amplamente avaliado e estudado na literatura por diversos autores como GHODDOUSI et al. (2009), BEGLARIGALE et al. (2015) e NIEUWOUTD et al. (2017). Uma curva teórica de força versus deslocamento de uma fibra de aço é mostrada na figura 5, dividindo o comportamento na interface em cinco fases principais:

1. Lento descolamento da fibra da matriz;
2. Completo descolamento da fibra;
3. Ativação da ancoragem mecânica da fibra de aço, resultando na máxima carga de arrancamento;
4. Deformação do gancho até atingir um segundo pico;
5. Arrancamento sob forças friccionais após o completo alisamento da fibra.

A identificação das fases e do comportamento da interface fibra/matriz nos ensaios de arrancamento é fundamental para a análise do *pullout* na fadiga. O pré-deslizamento da fibra em relação à matriz de concreto foi realizado até se atingir a carga de pico e, em seguida, o ensaio foi descarregado para o início do ensaio de fadiga. Os pré-deslizamentos aplicados para os ensaios de fadiga são mostrados na figura 4(b). É

possível notar, além da dispersão das curvas, que todas se situam próximas até a/na fase 3, que abrange a região próxima à tensão máxima de aderência. Assim, será possível estudar o comportamento à fadiga na escala da fibra na região crítica em termos de aderência.

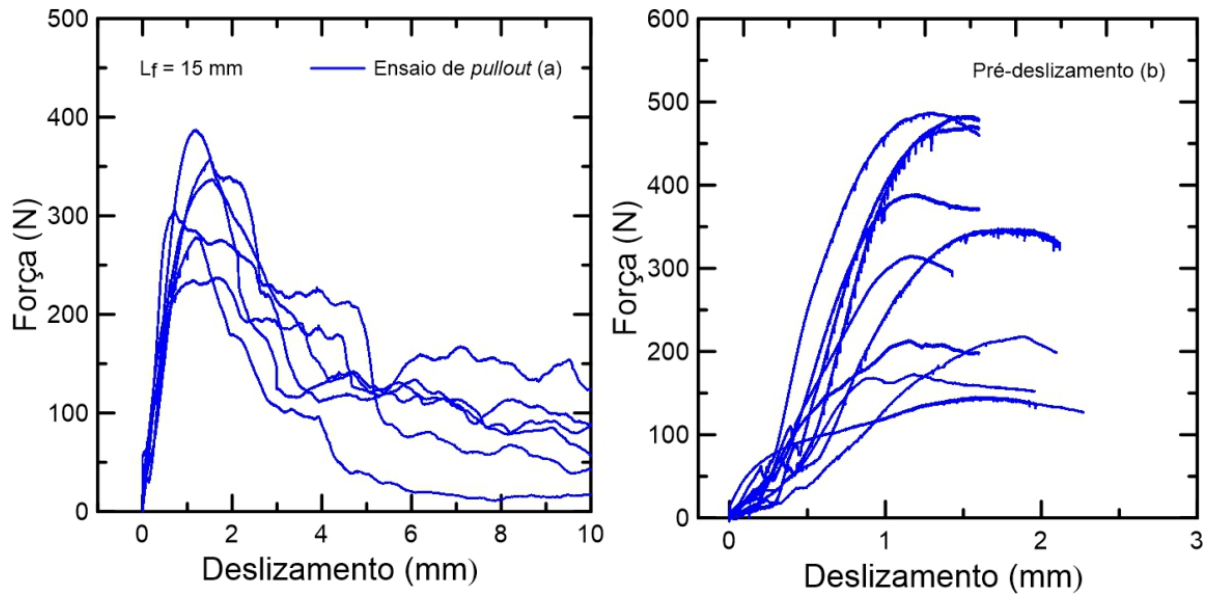


Figura 4 – Resultado dos ensaios de arrancamento estáticos em fibra de aço: (a) caracterização do arrancamento das fibras de aço e (b) pré-deslizamento anterior ao início dos ensaios de fadiga

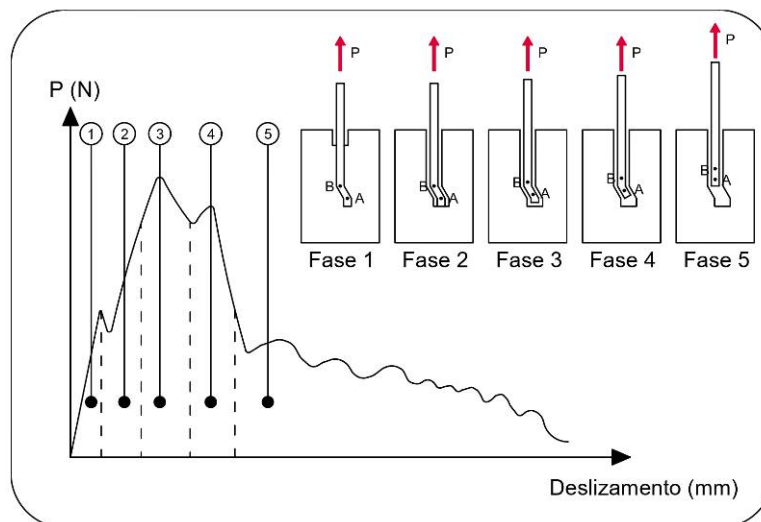


Figura 5 – Comportamento do arrancamento das fibras de aço com gancho do concreto

3.2 Degradação da interface na fadiga

A figura 6 mostra a evolução da degradação da interface fibra/matriz com os ciclos de histerese ao longo do deslizamento para a amostra CP11. A tensão τ_0 é a tensão de arrancamento referência para a realização do ensaio de fadiga. A tabela 2 traz um resumo dos parâmetros analisados nos ensaios de fadiga como as tensões de referência, número de ciclos até a falha (N), o modo de falha e o pré-deslizamento (δ_0) associado à tensão de arrancamento de referência (τ_0). Ao fim do ensaio de fadiga, três modos de falha finais foram observados: arrancamento completo da fibra, ruptura da fibra na região do gancho e “run out”, que significa que a amostra atingiu o fim do ensaio sem apresentar uma falha aparente.

O resultado mostrado na figura 6 está associado a uma amostra que sofreu arrancamento ao longo do ensaio de fadiga. É possível notar um aumento dos deslizamentos com o aumento do número de ciclos. Esse aumento ocorre até atingir o comprimento de ancoragem da fibra na matriz. Essa evolução é acompanhada por um aumento das áreas dos ciclos de histerese, indicando a perda da capacidade de resistir aos ciclos de carregamento e descarregamento ao longo da fadiga. Diferente do que ocorre com o modo de falha por arrancamento, quando ocorre a ruptura do gancho não há uma evolução do deslizamento ao longo do tempo. A figura 7 traz a evolução do deslizamento ao longo dos ciclos relativos (n/N) para todos os modos de falha observados.

O número de ciclos até a falha ou fim do ensaio varia significativamente dependendo do modo de falha. Para uma carga máxima (S) de 95% em relação à tensão de referência (τ_0), o número de ciclos até atingir o arrancamento da fibra oscilou entre 17 e 144, ou seja, a falha da amostra é alcançada poucos minutos após o início do ensaio de fadiga. Por outro lado, quando a fibra atinge a ruptura de seu gancho, o número de ciclos até falha foi consideravelmente maior com $N = 36.852$.

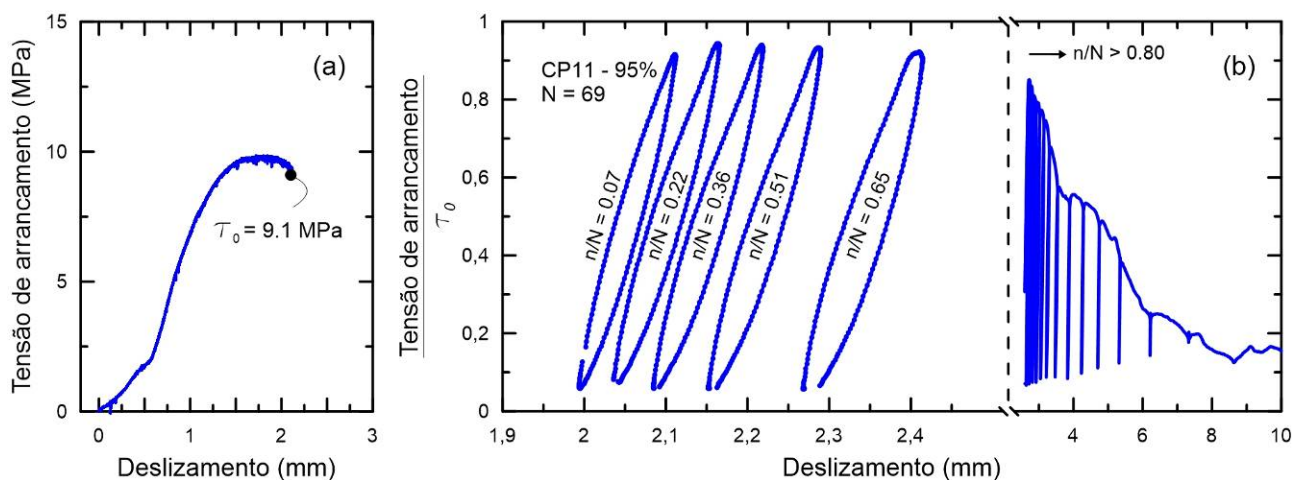


Figura 6 – Degradação da interface ao longo do deslizamento para a amostra CP11: (a) pré-deslizamento e (b) ciclos de histerese ao longo do deslizamento

Tabela 2 – Resultados obtidos nos ensaios de fadiga no arrancamento

Amostra	P_0	τ_0	δ_0	Ciclos (N)	Modo de falha
-	N	MPa	mm	-	-
CP1	440	12,45	1,72	144	Arrancamento
CP2	191	5,40	1,63	1.000.000	“Run-out”
CP3	290	8,21	1,42	36.852	Ruptura
CP4	446	12,62	1,82	101	Arrancamento
CP5	367	10,38	1,63	500.000	“Run-out”
CP6	458	12,96	1,73	176	Arrancamento
CP7	127	3,59	2,27	1.000.000	“Run-out”
CP8	198	5,60	2,10	1.000.000	“Run-out”
CP9	152	4,3	1,96	1.000.000	“Run-out”
CP10	196	5,55	2,32	17	Arrancamento
CP11	322	9,11	2,12	69	Arrancamento

Essa diferença no modo da falha pode ser atribuída à forma como se distribuem as tensões na interface fibra/matriz. No caso do modo de falha por arrancamento da fibra, a componente normal devido ao gancho não é suficiente para resistir aos ciclos de carregamento e descarregamento. Com o aumento do deslizamento ao longo dos ciclos e o movimento da fibra dentro da matriz, a fibra torna-se reta e as tensões de cisalhamento interfacial passam a ser as principais componentes responsáveis por resistir às cargas de fadiga. Nesse caso, como a resistência ao deslizamento devido às tensões de cisalhamento interfacial são significativamente inferiores à componente normal, a taxa de deslizamento aumenta, acarretando o fim do ensaio. A figura 8(a) mostra em detalhes esse mecanismo.

Já quando o modo de falha é a ruptura da fibra, as tensões normais no gancho são as responsáveis por resistir às cargas cíclicas, aumentando significativamente a ordem de grandeza do número de ciclos até a falha. A falha por ruptura está associada a uma região de fragilidade localizada nas curvas das extremidades do gancho, que podem falhar depois de um número significativo de ciclos de carregamento. O comportamento é muito semelhante ao caso em que a fibra não apresenta nenhuma falha aparente (“Run-out”). Neste caso, as cargas aplicadas não foram suficientes para acarretar uma falha por ruptura ao longo de 1.000.000 ou 500.000 ciclos.

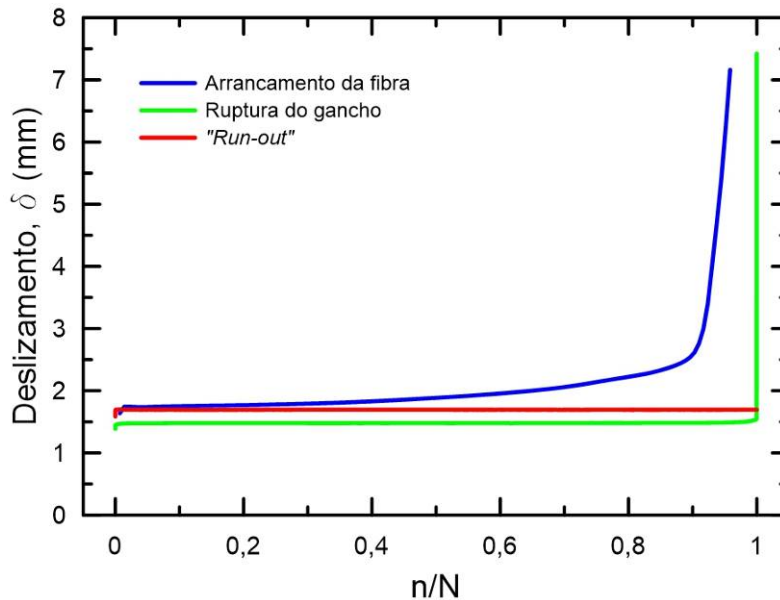


Figura 7 – Evolução do deslizamento em função de n/N

4 Conclusão

O presente trabalho apresenta os resultados iniciais em relação à degradação da interface fibra/matriz através de ensaios de arrancamento submetidos a cargas de fadiga. Ele faz parte do projeto “*Determinação de parâmetros para Ensaios Mecânicos do Concreto Reforçado com Fibras (CRF) sob Condições Extremas de Carregamento em Empreendimentos de Geração Hidrelétrica e Eólica*”, que tem como origem uma parceria entre PUC-Rio e Furnas. Um total de onze ensaios de fadiga no arrancamento foram realizados em um nível de carregamento $S = 95\%$. A principal contribuição desse trabalho está em trazer resultados preliminares sobre o comportamento e a degradação da interface quando submetido à fadiga ao longo do tempo, visando acrescentar conhecimento correlação à deterioração mecânica do concreto reforçado com fibras. As principais conclusões podem ser obtidas desse trabalho:

- Diferentes modos de falha são observados quando o arrancamento da fibra é submetido a ciclos de carregamento e descarregamento. Durante o ensaio de fadiga, a fibra pode sofrer o completo deslizamento da matriz de concreto em poucos ciclos, bem como apresentar a ruptura do material na região do gancho. Em alguns casos, não foi possível observar um modo de falha aparente com a amostra atingindo 1.000.000 de ciclos, sendo finalizado o ensaio de fadiga;
- O modo de falha modifica significativamente a curva de deslizamento versus número de ciclos relativos (n/N). No caso em que a fibra é arrancada, o deslizamento da fibra aumenta progressivamente com n/N até atingir o fim do teste. No segundo modo de falha, o gancho é responsável por resistir à fadiga até o momento em que ocorre a ruptura frágil da região do gancho. Dessa maneira, a fibra praticamente não evolui em seu deslizamento antes da ruptura.

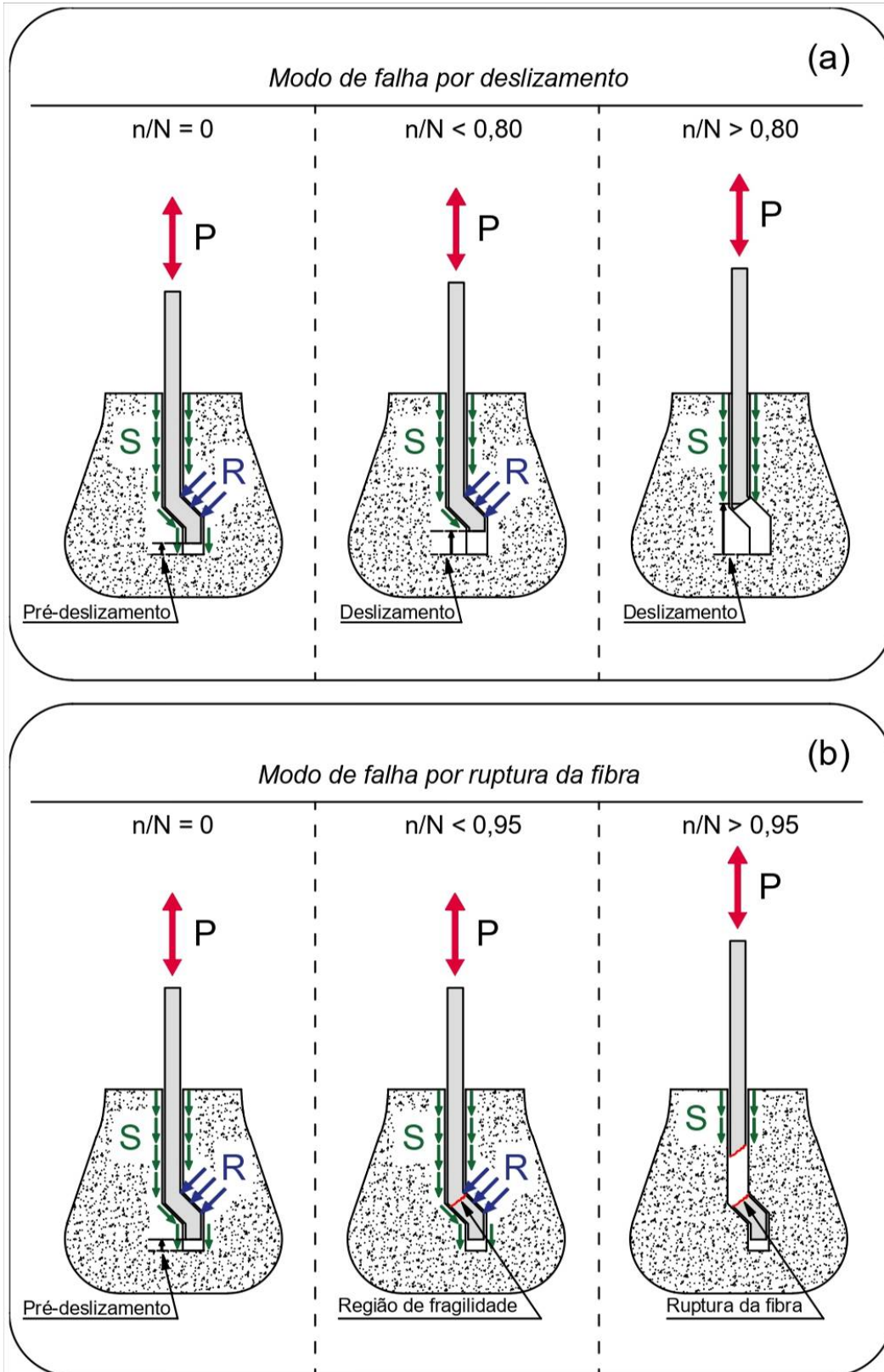


Figura 8 – Modos de falha observados nos ensaios de fadiga no arrancamento: (a) falha por deslizamento e (b) falha por ruptura da fibra de aço.



5 Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e com suporte da equipe de Furnas através do projeto de pesquisa Aneel PD-0394-1905/2019 (Furnas – PUC-Rio): *Determinação de parâmetros para ensaios mecânicos do concreto reforçado com fibras sob condições extremas de carregamento em empreendimentos de geração hidrelétrica e eólica*. Mais informações sobre o projeto estão no site www.fadiga.civ.puc-rio.br.



6 Referências

ABDALLAH, S.; FAN, M. ZHOU, X. Pull-out behavior of hooked end steel fibres embedded in ultra-high performance mortar with various W/B ratios. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 11, p. 301-313, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **ABEEólica**. Relatório Anual 2020, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1**: Concreto autoadensável – Parte 1: classificação, controle e recebimento no estado fresco. ABNT, 2017.

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.

BEGLARIGALE, A.; YAZICI, H. Pull-out behavior of steel fiber embedded in flowable RPC and ordinary mortar. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 255-265, 2015.

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**, v. 115, 2021.

CONCRETE CENTER. **Concrete towers for onshore wind farms: conceptual design studies**, 2005.

FATAAR, H.; COMBRINCK, R.; BOSHOF, W. An experimental study on the fatigue failure of steel fibre reinforced concrete at single fibre level. **Construction and Building Materials**, v. 299, 2021.

GAO, L.; HSU, T.; fatigue of concrete under uniaxial compression cyclic loading. **ACI Materials**, v. 95, p. 575-581.

GERMANO, F.; TIBERTI, G.; PLIZZARI, G.; Post-peak fatigue performance of steel fiber reinforced concrete under flexure. **Materials and Structures**, v. 49, p. 4229-4245, 2016.



GHODDOUSI, P.; AHMADI, R.; SHARIFI, M. Fiber pullout model for aligned hooked-end steel fiber. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 37, p. 1179-1188, 2010.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **GWEC**. Global Wind Report 2018, 2019

HARTE, R.; VAN ZIJL, G. Structural stability of concrete wind turbines and solar chimney towers exposed to dynamic wind action. **Journal of Wind Engineering**, v. 95, p. 1079-1096, 2007.

HAU, E. **Wind turbines: fundamentals, technologies, applications, economics**. 2. ed. Springer, 2006.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. International Renewable Energy Agency. **IRENA**. Tracking the impacts of innovation: offshore wind as a case study, 2021.

JIN, Q.; LI, V.; Development of lightweight engineered cementitious composite for durability enhancement of tall concrete wind towers. **Cement and Concrete Composites**, v. 96, p. 87-94, 2019.

NIEUWOUDT, P.; BOSHOFF, W. Time-dependent pull-out behavior of hooked-end steel fibres in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 79, p. 133-147, 2017.

QUILLIGNA, A.; O'CONNOR, A.; PARKASHI, V. Fragility of steel and concrete wind turbine towers. **Engineering Structures**, v. 36, p. 270-282, 2012.

STEPHEN, S.; GETTU, R.; Fatigue fracture of fibre reinforced concrete in flexure. **Materials and Structures**, v. 53, p. 1-11, 2020.

VICENTE, M.; MÍNGUEZ, J.; GONZÁLEZ, D. Computed tomography scanning of the internal microstructure, crack mechanisms, and structural behavior of fiber reinforced concrete under static and cyclic bending tests. **International Journal of Fatigue**, v. 121, p. 9-19, 2019.