



Análise Experimental de Pilares de Concreto com Armadura de Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV)

Camila Romar Soares¹, Letícia Wolf Von Arcosy², Luiz Octavio de S. B. Oliveira³, Kissila Botelho Goliath⁴

¹ UERJ / Departamento de Construção Civil e Transportes / romarcamila@gmail.com

² UERJ / Departamento de Construção Civil e Transportes / leticia_arcosy@hotmail.com

³ UERJ / Departamento de Construção Civil e Transportes / luiz.oliveira@eng.uerj.br

⁴ UERJ / Departamento de Construção Civil e Transportes / kissila.goliath@eng.uerj.br

Resumo

Com o intuito de prolongar a vida útil e reduzir custos de manutenção de estruturas de concreto armado, os polímeros reforçados com fibra de vidro (GFRP, na sigla inglês) têm sido avaliados como alternativa à armadura tradicional de aço, devido à sua resistência à corrosão, ainda que suas propriedades mecânicas não sejam totalmente equivalentes às do aço, uma vez as barras de GFRP possuem comportamento frágil e baixo módulo de elasticidade. Para aprofundar os estudos neste tema, este trabalho faz a avaliação experimental de três pilares de concreto, com 1 metro de comprimento, armados com barras de GFRP e submetidos a ensaios de compressão axial. Todos os modelos possuíam armaduras longitudinais de GFRP, com mesma taxa geométrica, porém cada um contou com uma configuração diferente em relação aos estribos, sendo um modelo sem estribos, um com estribos de aço e um com estribos de GFRP. O comportamento carga *versus* deslocamento e carga *versus* deformação dos modelos experimentais foram analisados, incluindo a utilização de métodos de correção de imagem digital (DIC), para obtenção dos campos de deslocamento e deformação. Os resultados mostraram que as barras longitudinais de GFRP funcionaram como armadura à compressão e que as armaduras transversais proporcionaram maior confinamento, impedindo a flambagem prematura das barras longitudinais, aumentando a resistência e controlando melhor o comportamento do modelo na ruptura.

Palavras-chave

GFRP; Concreto Armado; Análise do comportamento mecânico à compressão; Análise experimental.

Introdução

O concreto armado é amplamente adotado na indústria da construção devido principalmente à combinação de qualidades do concreto (durabilidade, boa resistência à compressão, ao fogo e a água) e do aço (resistência à tração e ductilidade), bem como a sua versatilidade para ser moldado em uma variedade de formas e tamanhos. Além disso, é um material relativamente acessível, tornando-o uma escolha econômica para uma ampla gama de projetos.

Entretanto, ele também apresenta desafios significativos relacionados à sua manutenção, levando em conta sua degradação devido à corrosão das armaduras e, em consequência, à sua durabilidade. Isso tem se tornado uma preocupação global, uma vez que a degradação das estruturas de concreto armado, devido à falta de manutenção adequada, pode resultar em vida útil reduzida e custos adicionais de reparo.

Como meio alternativo, o uso de armaduras de polímero reforçado com fibra de vidro (*Glass Fiber Reinforced Polymer*, GFRP) em estruturas de concreto armado tem ganhado destaque na indústria da construção civil, por não sofrerem com o processo de corrosão e por possuírem características mecânicas compatíveis com o uso estrutural. Estas armaduras são obtidas através do processo de pultrusão, a partir de filamentos contínuos de fibra de vidro, posteriormente impregnados com matrizes poliméricas, que conferem resistência e rigidez ao material. Pesquisas aprofundadas sobre a fibra de vidro impregnada com resina formando armaduras, surgiram somente a partir dos anos 1990 no âmbito nacional (DIACENCO, 2010; STELLET, 2018; TEIXEIRA, 2018).

A armadura de polímero reforçado com fibra de vidro oferece inúmeras vantagens, que vão desde aspectos econômicos até outras propriedades físicas e mecânicas interessantes. Com relação aos aspectos econômicos é importante frisar que apesar a da fibra de vidro ter um custo mais elevado, seu custo-benefício pode ser vantajoso, levando em conta que ela não necessita de manutenção frequente, quando comparada ao aço.

Assim, a sua resistência à corrosão, mesmo que em ambientes extremamente agressivos, torna uma escolha atraente em comparação ao aço utilizado no concreto armado, que ao corroer, diminui sua seção resistente e consequentemente a resistência da estrutura em questão. Além disso, apresenta propriedades de isolamento térmico e magnético, além de menor peso específico.

Contudo, seu comportamento estrutural é diferente do apresentado pela armadura tradicional, de aço. As armaduras de GFRP possuem comportamento elástico linear até a ruptura, enquanto os vergalhões de aço têm comportamento elastoplástico, ou seja, as estruturas armadas com barras de aço apresentam aviso antes da ruptura enquanto as de GFRP não.

Assim, esta pesquisa visou a ampliar o conhecimento das propriedades de armaduras de polímeros reforçados com fibra de vidro (GFRP) para uso estrutural, de caráter exploratório, considerando a análise de elementos comprimidos axialmente, assim, avaliar sua potencialidade no quesito da capacidade de resistência à compressão.

Modelos Experimentais

Foram ensaiados três pilaretes, cada um com uma seção transversal de 150x300mm com altura de 1 metro e armadura longitudinal de GFRP. Para todos os pilares foram utilizados, em cada extremidade, três estribos metálicos para prevenir falhas prematuras na região de introdução de carga. Como um dos objetivos do trabalho era avaliar a funcionalidade do confinamento conseguido através de estribos no concreto, visando à melhoria da resistência e do comportamento na ruptura dos elementos, o primeiro pilar, P1, apresentou estribos metálicos ao longo de seu comprimento, funcionando como controle. O segundo pilar, P2, não possuía estribos, além dos metálicos nas extremidades, como já referido. Finalmente, o pilar P3, contava com estribos de GFRP distribuídos ao longo de seu comprimento, e em suas extremidades estribos metálicos. A Tabela 1 apresenta os dados referentes à armadura em cada pilar.

Tabela 1 – Taxa de armadura de cada pilar.

Pilar	Quantidade Armadura Longitudinal	Quantidade Armadura Transversal	Área Armadura Longitudinal (ρ) (cm ²)	Taxa Geométrica da Armadura Longitudinal (ρ_{fl}) (%)	Taxa Volumétrica de Armadura Transversal (ρ_{fw}) (%)
1	4Ø12 (GFRP)	8Ø6,3 (Aço CA-50)	4,52	1,01	0,45
2	4Ø12 (GFRP)	Sem estribo	4,52	1,01	0,00
3	4Ø12 (GFRP)	8Ø8 (GFRP)	4,52	1,01	0,73

As figuras 1, 2 e 3, a seguir, ilustram o detalhamento dos modelos experimentais.

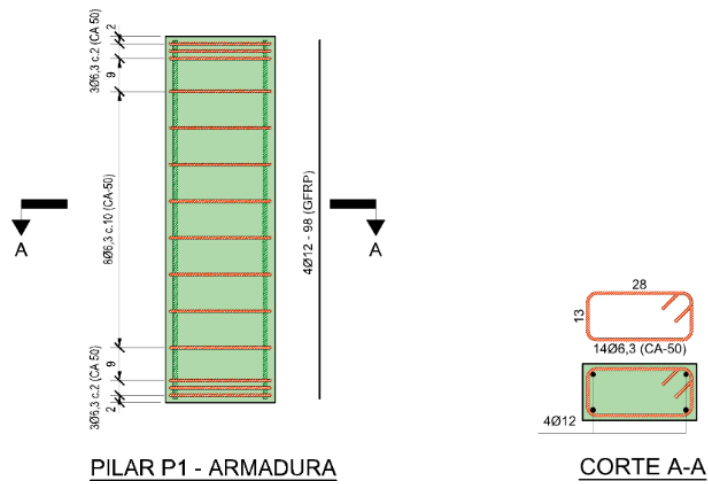


Figura 1 – Detalhamento do Pilar 1.

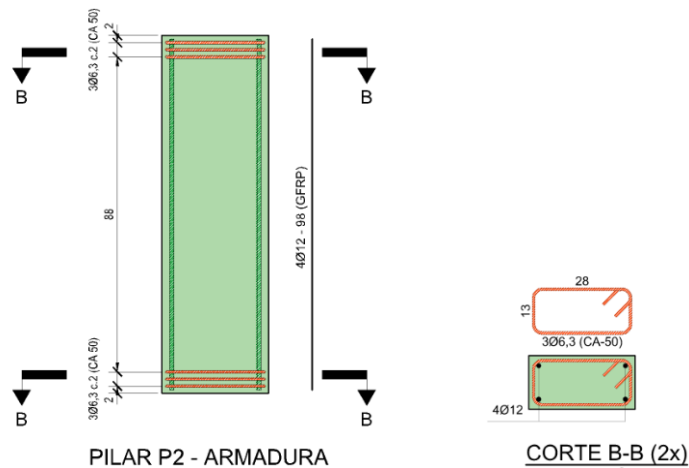


Figura 2 – Detalhamento do Pilar 2.

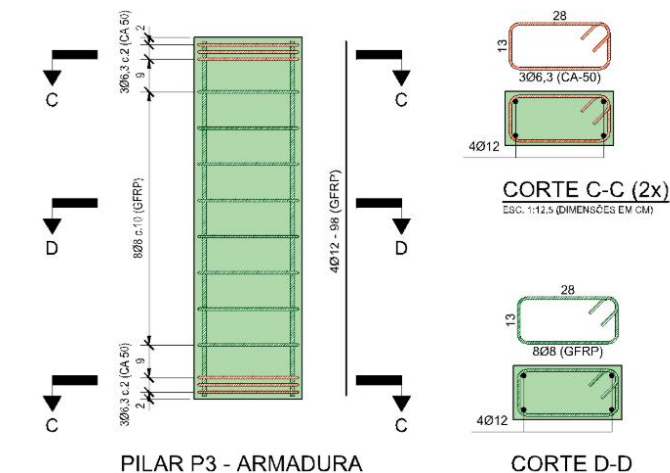


Figura 3 – Detalhamento do Pilar 3.

As barras de polímero reforçado com fibra de vidro utilizadas foram fornecidas pela empresa Stratus, produzidas pelo processo de pultrusão, com aplicação de resina epóxi éster vinílica associada com fibra de vidro, na proporção 70% fibra e 30% resina (TEXEIRA, 2018). As barras foram caracterizadas, para obtenção de seu módulo de elasticidade, avaliado experimentalmente em 51,76 GPa.

As barras dos modelos experimentais foram instrumentadas com extensômetros elétricos de resistência no meio do vão das armaduras longitudinais, sendo posicionadas na parte externa da armadura de cada pilar e em barras alternadas. De forma análoga, também foram fixados dois extensômetros nas armaduras transversais. Os ensaios de compressão centrada foram realizados na prensa hidráulica de acionamento elétrica para carga e registro de forças - UBP 300, da marca Losenahesenwerk - LOS de 300 kN. Os pilares foram posicionados de forma centralizada sobre a base da máquina, de modo a sofrer solicitação concêntrica. A seguir, a Figura 4 ilustra o modelo de carregamento para o ensaio de compressão.

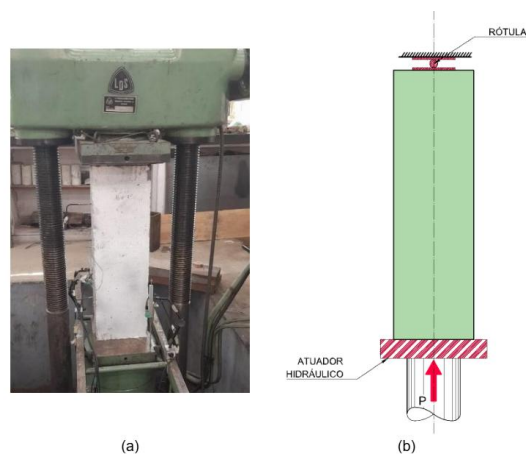


Figura 4 – Ensaio de compressão centrada (a) modelo de carregamento (b) detalhamento do ensaio.

Ensaio

Os modelos foram submetidos à carga centrada mecanicamente controlada, aumentando gradualmente a força aplicada a uma taxa de aproximadamente 1kN/min. No momento do ensaio do Pilar P1, foi identificado desaprumo, devido à deformação da forma no momento da concretagem, e ainda, algumas irregularidades em sua superfície. Para atenuar essas irregularidades, durante o ensaio foi colocada uma placa de elastômero do tipo “Neoprene” com o objetivo de melhorar a distribuição do carregamento na face, buscando deixá-la uniforme. A carga máxima atingida pelo pilar P1 foi de 959,5 kN. Durante o ensaio observou-se a formação de fissuras no concreto, posteriormente deslocamento do concreto, acompanhado pelo surgimento de fissuras na extremidade superior do pilar, associado ao carregamento de 645,9 kN e 851,95 kN, respectivamente. Na sequência, ocorreu o esmagamento do concreto nas extremidades do modelo, seguida da ruptura em uma barra longitudinal de GFRP. Observou-se que, não obstante tenha havido redução da carga no atuador, o modelo manteve-se resistindo até que o ensaio foi interrompido, à carga de 696,1 kN aproximadamente.

Para a realização do ensaio do Pilar P2, sem estribos, não houve necessidade de nenhum tipo de capeamento das extremidades, tendo em vista que suas faces estavam satisfatoriamente regularizadas. Diferentemente do ensaio do Pilar P1, este se deu sem indícios de fissuras, com ruptura brusca quando se atingiu a carga de 1355 kN, com posterior queda do valor para patamares da ordem de 200 kN.

O ensaio do Pilar P3, armado com barras transversais de polímero reforçado com fibra de vidro, foi realizado sob as mesmas condições de carregamento, também sem necessidade de capeamento. Foi observado que a partir da carga 1463,44 kN, o modelo começou a apresentar fissuras, tendo sua ruptura na carga máxima de 1504,4k N, quando se verificou a ruptura do concreto e da armadura longitudinal.

Após a operação dos ensaios e através da leitura dos extensômetros e dos transdutores de deslocamento posicionados na base inferior dos pilares, reuniram-se todos os resultados, comparando-os com dados obtidos pela análise DIC. A Tabela 2 apresenta os dados teóricos e experimentais de cada modelo ensaiado. A Tabela 3 apresenta os deslocamentos para a carga máxima e ao final de cada ensaio.

Tabela 2 - Dados teóricos e experimentais dos pilares

Pilar	Carga Teórica (kN)	Carga Experimental (kN)	Relação entre a carga experimental e teórica
P1	1225,91	959,5	0,783
P2	1297,06	1355,0	1,045
P3	1297,06	1504,5	1,160

Tabela 3 – Deslocamentos obtidos para a carga máxima e ao final do ensaio em cada modelo

Pilar	Deslocamento à carga máxima (mm)	Deslocamento ao final do ensaio (mm)
P1	6,60	28,69
P2	6,42	7,75
P3	6,78	10,15

Para cada pilarete ensaiado, foram utilizados dois meios de obtenção de dados, sendo eles:

- Labview: associado ao equipamento de compressão, permitindo a integração de dados da máquina por meio do processamento de sinais utilizados para a leitura dos extensômetros elétricos de resistência e transdutores de deslocamento.
- Digicam e GOM: Digicam é o programa no qual captura imagens através de uma câmera e as transfere diretamente para um computador, permitindo também o controle de parâmetros de disparo. Para a execução dos ensaios de compressão dos pilares, foi programado o disparo a cada 10 segundos. O GOM é uma ferramenta que permite a análise de dados por meio da leitura de um padrão de nuvens de pontos, independente do Labview. Este recurso possibilita a criação de instrumentos de leitura “virtuais”, podendo aferir deformações, deslocamentos, aberturas de fissuras, etc.

Para todos os pilares, foi utilizado o software GOM para analisar as fotos capturadas pelo Digicam. Foram estabelecidas na primeira imagem de cada pilar três distâncias verticais distintas nas nuvens de pontos, duas nas extremidades do pilar (Dist. 1 e Dist.3) e uma no centro (Dist.2). Assim, pode-se extrair os deslocamentos sofridos pelos pontos ao longo das imagens. Como as fotos foram tiradas com um intervalo de 10s, foram relacionados esses dados com o tempo do ensaio registrado pelo Labview, permitindo uma análise detalhada da carga versus deslocamento para cada pilar. Durante o ensaio do pilar 1, houve falha na câmera fotográfica, impossibilitando sua análise pelo software GOM.

Discussões e conclusão

Observou-se que os três pilares apresentaram deslocamentos bem próximos, onde o maior deslocamento aconteceu no pilar P3, com 6,79mm, seguido do pilar P1, com 6,61mm e com menor deslocamento de 6,43mm ficou o Pilar 2. Durante o ensaio do pilar P1, a aplicação da carga foi interrompida, devido à oscilação constante da carga e a formação contínua de fissuras e deslocamento do concreto. Os pilares P2 e P3 demonstraram um deslocamento menor para uma carga maior em comparação com o pilar de concreto com estribos de aço, revelando um comportamento frágil, caracterizado por uma ruptura abrupta e uma ruptura com presença de fissuras, respectivamente. O pilar P3, quando comparado ao pilar P2, resistiu a uma carga superior, porém com um deslocamento maior. Esse comportamento pode ser atribuído à presença da armadura transversal que conferiu confinamento do concreto e redução do comprimento efetivo das barras longitudinais, aumentando assim a resistência do pilar e prevenindo a flambagem prematura das barras de GFRP. O Gráfico 1 mostra a comparação de carga versus deslocamento entre os pilares.

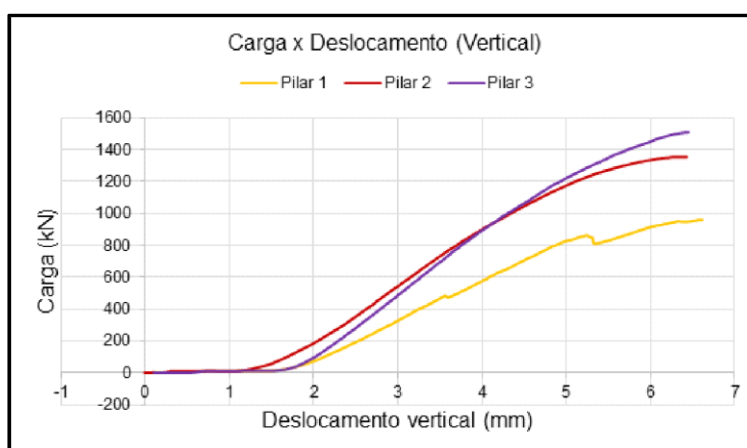


Gráfico 1 – Comparação de carga versus deslocamento entre os pilares - Labview.

O Gráfico 2 ilustra o comportamento previsto pelo GOM. Para o pilar P2 foi semelhante ao representado pelo Labview. Contudo, no pilar P3, apesar da carga ser superior quando comparado ao P2, o seu deslocamento foi inferior. Esse comportamento não foi o esperado, tendo em vista que o P2 teve uma ruptura abrupta. Durante o ensaio do P1, houve problemas técnicos com a câmera fotográfica, impedindo a análise pelo software GOM.

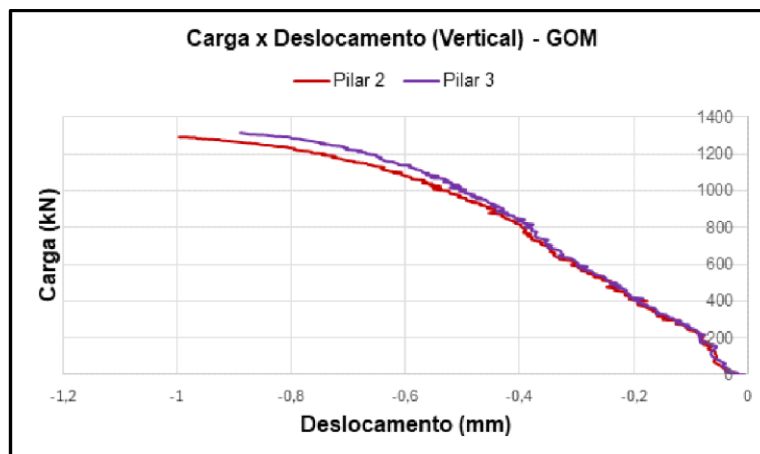


Gráfico 2 – Comparação de carga versus deslocamento entre os pilares - GOM.

É válido ressaltar, que o deslocamento medido no gráfico 1 (Labview) está associado ao nível da base compressora da máquina, enquanto o gráfico 2 (GOM) o deslocamento é medido no centro do pilar, o que justifica o seu menor deslocamento. E ainda, o Labview realiza a leitura do deslocamento sofrido de compressão como positivo, enquanto o GOM ao analisar a nuvem de pontos expressa seu deslocamento de forma negativa, por meio da aproximação da escala gráfica.

Análise das Deformações Longitudinais

De acordo com o relatório ACI 440-1R (2015), a maior solicitação de compressão que um pilar de GFRP pode suportar, é expresso por:

$$R_{SD} = 0,85 \cdot f_c \cdot A_c \quad (1)$$

Assim, foi calculada a carga teórica esperada para cada pilar, sendo 1225,91 kN para o pilar P1 e 1297,06 kN para os pilares P2 e P3. No pilar P1 observou-se que, devido à irregularidade da superfície, as barras longitudinais não contribuíram efetivamente para a resistência do elemento estrutural, resultando em uma capacidade de carga 21,73% abaixo da resistência do concreto. Nos pilares P2 e P3, a armadura longitudinal influenciou a capacidade de carga dos elementos estruturais, apresentando um aumento na resistência correspondente a 4,47% e 15,99% da resistência do concreto, respectivamente. O gráfico 3 ilustra o comportamento carga versus deformação longitudinal obtido por meio do Labview.

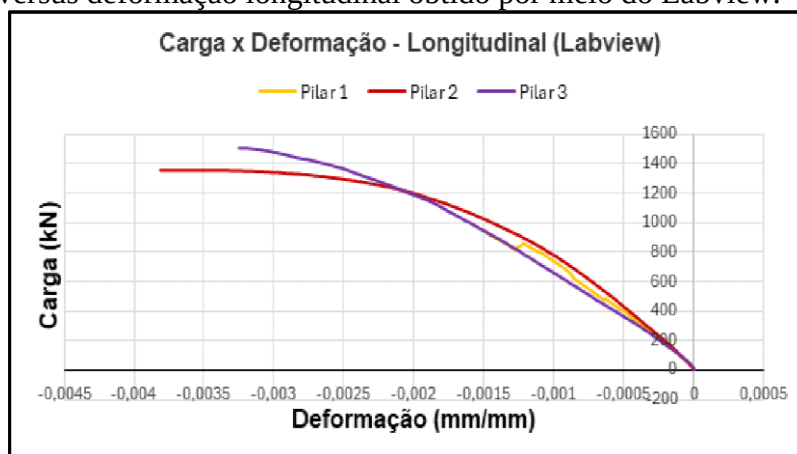


Gráfico 3 – Comparação de carga versus deformação longitudinal entre os pilares - Labview.

Pelo Gráfico 4, observou-se que o comportamento dos pilares P2 e P3 são semelhantes, de forma análoga à análise do gráfico carga versus deslocamento. O pilar P3 apresentou deformação com uma aplicação de carga maior, enquanto o pilar P2 deformou-se com uma aplicação de carga menor.

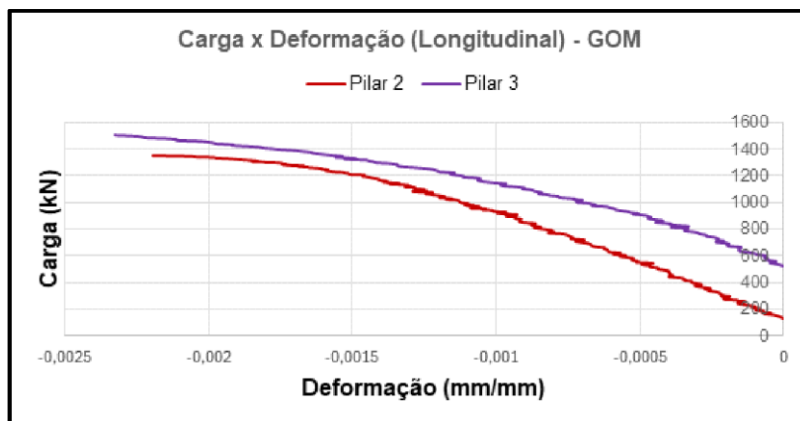


Gráfico 4 – Comparação de carga versus deformação longitudinal entre os pilares - GOM.

Na figura 5 são mostradas as imagens extraídas do GOM onde a escala de cor indica a ação sofrida na região, sendo vermelho para tração e azul para compressão do pilar. Por ser uma análise de deformação longitudinal, observa-se concentração de deformações de compressão no sentido transversal ao eixo do pilar P3, que pode ser atribuído à presença de estribos que garantem o confinamento do núcleo do concreto. Enquanto no pilar P2, por ter uma ruptura abrupta, não pode ser visualizado este tipo de comportamento. As imagens mostradas são referentes aos pilares P2 e P3, com ausência de informação do pilar P1 devido à falha da câmera fotográfica.

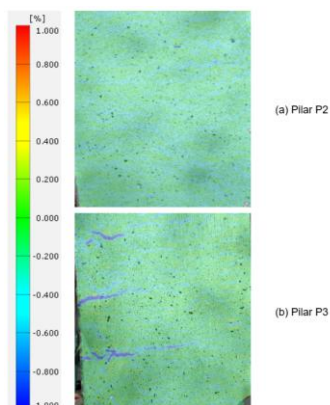


Figura 5 – Campo de deformações próximo à ruptura dos pilares P2 e P3 (deformações longitudinais) - extraído do GOM.

Análise das Deformações Transversais

Os estribos têm por função realizar o confinamento do concreto e reduzir o comprimento de flambagem das barras longitudinais. Nesse sentido, à medida que o carregamento é aplicado, as armaduras transversais tracionam-se absorvendo as tensões sofridas pela expansão do núcleo do concreto.

Devido ao pilar P2 não possuir estribos, a análise foi realizada apenas nos pilares P1 e P3. Assim, o gráfico 5, explicita o comportamento dos dois pilares.

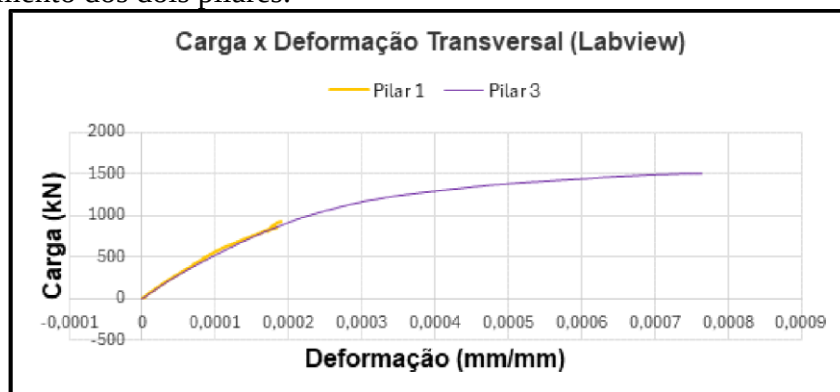


Gráfico 5 – Comparação de carga versus deformação transversal entre os pilares - Labview.

Nesse contexto, o pilar P1 por conter estribos metálicos, teve sua deformação menor quando comparada aos de GFRP do pilar P3, em função de sua menor resistência à tração, sendo 500 MPa e 900 MPa respectivamente.

É válido lembrar que o ensaio do pilar P1 foi interrompido, o que impossibilitou a análise da deformação última da armadura transversal metálica. Mediante problemas técnicos ocorridos com a câmera durante a execução do ensaio, não foi possível obter os dados pertinentes à deformação das armaduras transversais do pilar P1 por meio da análise de dados extraídos pelo GOM. Como o pilar P2 não possui estribos, a análise restringe-se apenas ao pilar P3. Conforme pode ser visto no gráfico 6, o comportamento não atendeu ao esperado, apresentando oscilações de tração e compressão de forma ligeira.

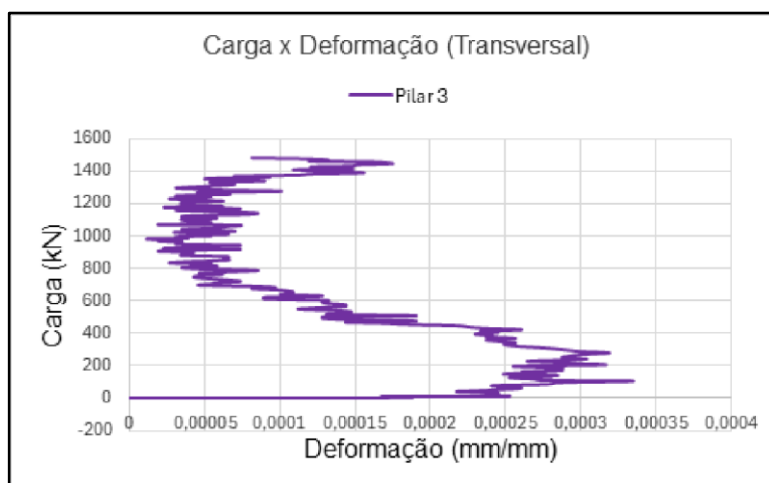


Gráfico 6 – Comparação de carga versus deformação transversal entre os pilares - GOM.

Abaixo, na Figura 6, por ser uma análise de deformação transversal, observa-se a concentração de tensão de tração no sentido longitudinal, que pode ser atribuído ao aumento do volume do concreto no instante da carga máxima. As imagens são referentes aos pilares P2 e P3, com ausência de informações do pilar P1, devido a problemas técnicos com a câmera fotográfica.

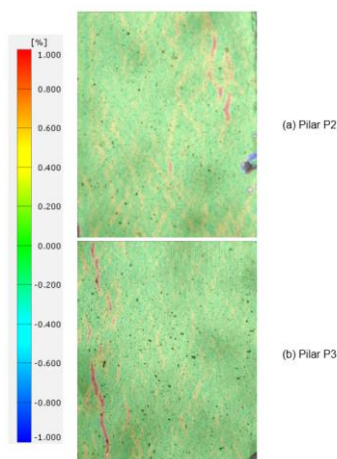
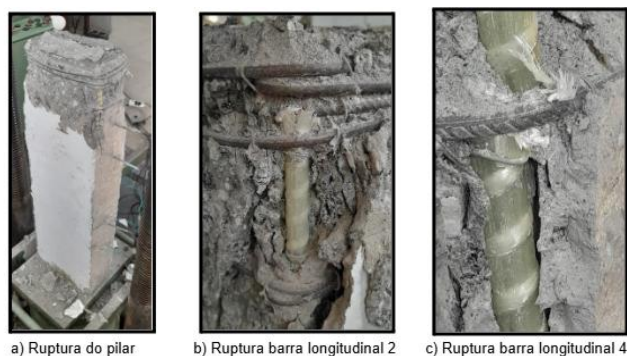


Figura 6 – Campo de deformações próximo à ruptura dos pilares P2 e P3 (deformações transversais) - GOM.

Modo de Ruptura

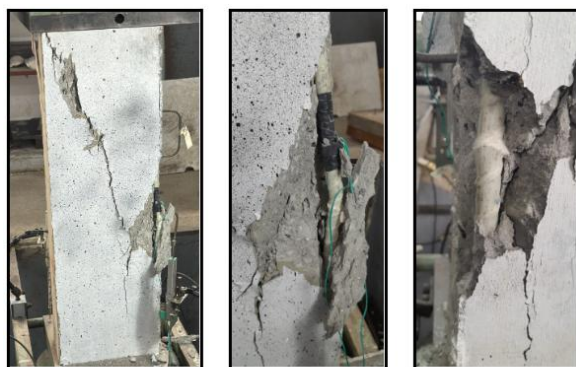
Pilar 1: Durante o ensaio, o pilar 1 sofreu fissuras, flambagem e deslocamento do concreto em sua parte superior, à medida que o incremento de carga foi aplicado, iniciando uma flambagem local do pilar, caracterizando um comportamento mais próximo de dúctil, devido ao módulo de elasticidade das barras de aço que compuseram os estribos. Sua ruptura deu-se por meio do esmagamento do concreto e ruptura de duas barras longitudinais, conforme pode ser visto na figura 7. Embora a resistência estimada seja de 1225,91 kN, equivalente à 85% da resistência do concreto, o pilar resistiu à 959,5 kN, o que corresponde à 78,27% da capacidade do concreto. Uma hipótese que justifique esse resultado não esperado é em razão da irregularidade da superfície do pilar, no qual, acabou perfurando a placa de Neoprene utilizada como método de capeamento.



a) Ruptura do pilar b) Ruptura barra longitudinal 2 c) Ruptura barra longitudinal 4

Figura 7 – Ruptura do Pilar 1 (a) e da barra longitudinal de GFRP (b) Barra 2 (c) Barra 4.

Pilar 2: Por não apresentar armaduras transversais que caracterizam o confinamento do concreto, sua ruptura ocorreu de modo frágil. Durante o ensaio não apresentou nenhuma fissura, O momento da ruptura se deu de forma abrupta, com rompimento da barra longitudinal e esmagamento do concreto, juntamente com projeção de partículas. A carga resistida pelo pilar foi de 1355 kN, próxima à resistência do concreto de 1297,06 kN, apresentando uma contribuição da armadura longitudinal de apenas 4,47%. Na Figura 8 pode-se observar o momento da ruptura.



a) Ruptura do pilar b) Flambagem barra longitudinal c) Expansão barra longitudinal

Figura 8 – Ruptura do Pilar 2 (a) e da barra longitudinal de GFRP (b) Expansão volumétrica da armadura longitudinal (c).

Pilar 3: Apresentou fissuração na parte superior do pilar, próximo ao seu carregamento máximo, rompendo de maneira frágil, porém sem ser de forma abrupta com projeção de partículas. Adicionalmente, ocorreu ruptura no estribo e flambagem local da armadura longitudinal, além do esmagamento do concreto. A carga máxima resistida pelo pilar foi de 1504,50 kN e a prevista de 1297,06 kN, ou seja, pode-se inferir que a contribuição da armadura longitudinal foi de 15,99%. A Figura 9 ilustra o modo de ruptura do pilar.



a) Ruptura em duas faces do pilar b) Ruptura da armadura transversal

Figura 9 – Ruptura do Pilar 3 (a) e da armadura transversal (b).

Apesar do pilar P1 não ter apresentado os resultados esperados, foram observados sinais visuais de deformação antes da ruptura, como abertura de fissuras, flambagem local e deslocamento do concreto, de acordo com a aplicação de carga. Em contraste, o pilar P2 rompeu de forma frágil, sem indicativos de deformações e projetando partículas após o rompimento, um comportamento indesejável para elementos estruturais, caracterizado pela ausência de estribos. Embora o pilar P3 também tenha se comportado de forma frágil, suas

armaduras transversais garantiram o confinamento do núcleo do concreto, resultando em indícios de deformação próximo à ruptura, com fissuras e sem projeção de partículas.

É importante destacar que a taxa de armadura geométrica foi a mesma em todos os pilares, variando apenas a taxa de armadura volumétrica. Essa variação evidenciou sua importância, o pilar P1 apresentou o melhor comportamento visual, seguido pelo pilar P3 com taxa superior ao pilar P1. Enquanto o pilar P2, resultou no pior comportamento visual, com sua taxa de armadura volumétrica nula.

Ademais, pode-se inferir que:

- não é recomendada a substituição das armaduras de aço por armaduras de GFRP, devido às propriedades mecânicas serem divergentes, sendo indicado a análise do projeto para a escolha da armadura ideal.
- a não contribuição da armadura de GFRP é muito conservadora, levando em conta que as abarras longitudinais dos pilares P2 e P3 contribuíram de forma efetiva para as suas resistências, sendo nos valores de 4,47% e 15,99%, respectivamente.
- a capacidade de carga de compressão pura de pilares pode ser determinada da mesma forma dos pilares convencionais de aço, levando em consideração o fator de redução de 0,85 da tensão máxima de compressão do concreto, conforme previsto na NBR 6118, tendo em vista que o máximo de encurtamento que o concreto pode sofrer é de 3,5%, de acordo com o diagrama de tensão-deformação à compressão para concretos de classe até C50.
- pilares de concreto armado com GFRP apresentam comportamento mais sensível das armaduras longitudinais ao efeito de flambagem, devido ao seu menor módulo de elasticidade.
- comparando os pilares P2 e P3, pode-se observar que os estribos de GFRP presentes no pilar P3, corroborou para o aumento da sua capacidade de carga em 11,03%.
- não é recomendado adotar o mesmo critério convencional de dimensionamento de armaduras transversais, tendo em vista o rompimento frágil do estribo observado no ensaio do pilar P3.

E ainda, sugere-se alguns pontos de estudos futuros:

- em pilares de concreto armados com GFRP, sugere-se analisar e formular equações que melhor se adaptem à contribuição da armadura de GFRP;
- verificar o melhor espaçamento entre estribos de GFRP para conferir uma ductilidade mais satisfatória do elemento estrutural;
- realização de mais estudos para compreender melhor o comportamento dos pilares em condições de carregamentos adversos.

Referências

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. Farmington Hills, 2009.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440.1R-15: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bras. 1 ed. Farmington Hills, 2015. 88 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR12655. Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro.2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR14931. Execução de estruturas de concreto armado, protendido e com fibras – Requisitos. Rio de Janeiro.2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR16697. Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro.2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR16697. Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro.2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR16917. Agregado graúdo – Determinação da densidade e absorção de água. Rio de Janeiro.2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR16972. Agregado – Determinação da massa unitária e índice de vazios. Rio de Janeiro.2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR7211. Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro.2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR6118. Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro. 2023.
- DIACENCO, 2010 – DIACENCO, A. A. Modelagem por elementos finitos de materiais compósitos estruturais. Dissertação (Mestrado em engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal de Itajubá, 2010.

- ELCHALAMAKANI M., MA G. Tests of glass fibre reinforced polymer rectangular concrete columns subjected to concentric and eccentric axial loading. *Engineering Structures* 151 (2017) 93–104.
- ELMESSALAMI N., REFAI A.E., ABED F. Fiber-reinforced polymers bars for compression reinforcement: A promising alternative to steel bars. *Construction and Building Materials* 209 (2019) 725–737.
- STELLET, Carolina Sepulveda. Estudo do cisalhamento e confinamento em vigas de concreto com armadura não metálica. 2018.98f. TCC (Graduação) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.
- TEIXEIRA, Bruna de Almeida Carvalho. Avaliação do comportamento de vigas de concreto armadas com barras de fibra de vidro – um estudo experimental. 2018. 179f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.