

Análise experimental de uma viga de concreto armado reforçada com barras externas protendidas

Jorge Luiz de Souza Junior¹, Hidelbrando José Farkat Diógenes², Andrea Brasiliano Silva³, Marília Marcy Cabral de Araújo⁴, Mayara Cinthia de Oliveira Mesquita⁵

(1) (2) (3) e (5)

*Dept. de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba
Campus I, Cidade Universitária, João Pessoa, 58051-900, Paraíba, Brasil*

jr29souza@gmail.com¹, hjfd@academico.ufpb.br², andrea.brasiliano@academico.ufpb.br³, mayaracmesq@outlook.com⁵

(4)

*Dept. de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande
Rua Apígio Veloso 882, 58428-830, Paraíba, Brasil
mariliamarcy@gmail.com⁴*

Resumo. A degradação do concreto é uma condição natural que deve ser avaliada em cada caso. Na análise estática, a avaliação pode ser feita por meio de deslocamentos em um determinado intervalo de tempo. Na análise dinâmica, essa avaliação pode ser feita por meio da análise modal, que permite a identificação de frequências naturais, formas modais e taxas de amortecimento. As técnicas de armadura são soluções que produzem ganho de rigidez na recuperação estrutural, neste sentido, a utilização de barras externas protendidas em elementos danificados tem se mostrado bastante adequada, de forma que sua execução possa ocorrer sem maiores interferências destrutivas. Assim, para verificar a eficácia da utilização desta técnica, foi dimensionado e produzido um protótipo de viga de concreto armado que, posteriormente, foi submetido ao ensaio de flexão e ao ensaio de captura de frequências naturais com o software Sonelastic®. Com base nos resultados das análises, constatou-se que o sistema de barras externas protendidas pode ser eficiente na recuperação estrutural.

Palavras-chave: concreto armado, análise estrutural, dano, reforço estrutural, protensão externa.

1 Introdução

A degradação natural dos elementos de uma estrutura em concreto armado é uma problemática, geralmente, esperada no desempenho das edificações e que frequentemente surge nas construções. A deterioração das estruturas está diretamente relacionada à redução de sua durabilidade frente a vida útil definida em projeto, entre outros fatores [1]. Esse desgaste precoce do elemento acaba por culminar em maior consumo de materiais, bem como maiores custos para reparos e manutenções necessários à extensão da vida útil do elemento degradado [2].

A importância de estudos acerca do reforço estrutural se fundamentam em vários aspectos, um deles é o crescimento anual do mercado de reparos e reforços, devido à recorrência, por exemplo, de construções em áreas industriais e próximas do mar, o que culmina em muitos processos degradativos do concreto, principalmente, com relação à agentes corrosivos. Outros fatores, não menos importantes, e que também culminam na importância de estudos de reforço são as questões relacionadas à qualidade do material empregado ou mesmo à qualidade da execução das estruturas e, por consequente, das construções [3].

Os resultados de pesquisas na área de reforço estrutural contribuirão para uma visão mais crítica das

degradações, bem como para o desenvolvimento de novas técnicas e projetos de manutenção corretiva com a introdução de novos materiais adequados, a fim de prolongar a durabilidade e, conseqüentemente, a vida útil da estrutura reforçada. Atualmente, existem diversas alternativas de recuperação estrutural válidas, eficazes e viáveis como, por exemplo, a aplicação de fibras de polímeros, chapas de aço, aumento de seção transversal e aplicação de protensão [4]. No entanto, cada técnica adotada deve ser baseada em estudos, levantamentos de dados detalhados e, principalmente, resultados de análises teóricas, numéricas e experimentais, representativas e confiáveis, já que não há normatização específica caso a caso para todo e qualquer tipo de degradação.

Dentre as técnicas de reabilitação estrutural vigente, a técnica de interesse deste trabalho para o reforço de elementos de concreto armado danificados é aplicação de um tipo denominado protensão externa. A protensão é um sistema construtivo muito utilizado junto ao concreto na resolução de problemas estruturais que envolvem a concepção de construções que apresentam grandes vãos. Além disso, outra área em que este sistema vem ganhando espaço e sendo bastante utilizado, com alto nível de desenvolvimento técnico, é junto às estruturas de concreto armado, concreto pré-fabricado, estruturas metálicas e estruturas mistas de concreto e aço [4].

O objetivo geral do reforço com protensão externa é introduzir na estrutura ações ou deformações a fim de modificar seu estado de tensão, favorecendo assim o seu comportamento resistente, melhorando o seu desempenho e reduzindo as deformações, os deslocamentos e possíveis fissurações, além de apresentar consequente ganho da rigidez e da capacidade de carga [5]. As principais vantagens de utilização da técnica de protensão externa quando aplicada em vigas carregadas e deformadas, objeto de estudo deste trabalho, é a desnecessidade do descarregamento da peça, bem como da eliminação das deformações [6]. Essas vantagens se aplicam ao fato de que as condições de recuperação neste tipo de caso envolve a aplicação de forças de protensão em cabos, elementos que são posicionados externamente à peça estrutural e fixados por meio de dispositivos especiais [6].

Neste sentido, este trabalho discute o uso de barras externas protendidas em uma viga de concreto armado experimental, a fim de obter resultados no sentido de verificar a possibilidade da utilização de protensão externa como reforço estrutural em um elemento danificado.

2 Materiais e métodos

A viga de estudo foi produzida em concreto armado com dimensões de 3,20 metros x 0,30 metros x 0,14 metros (comprimento x altura x largura), considerando que o vão entre o eixo dos apoios foi de 3,00 metros. Além do peso próprio, esta foi projetada para suportar uma carga adicional de 49 kN, dispostos em duas cargas pontuais de 24,5 kN aplicadas nas seções A e B, conforme mostra a Fig. 1.

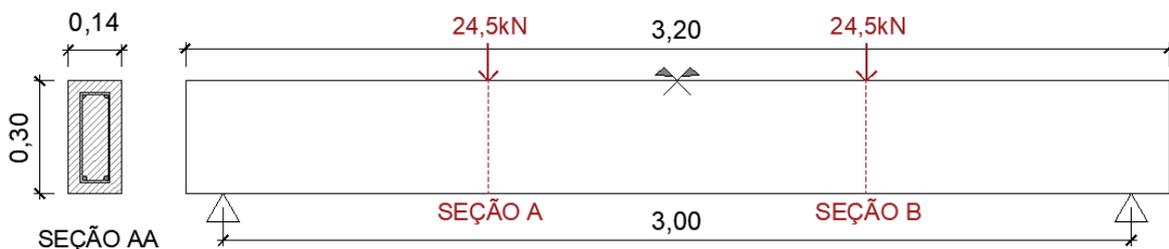


Figura 1. Representação do modelo da viga de estudo

Para a caracterização do concreto foram moldados dois corpos de prova (CP) cilíndricos com dimensões padronizadas de 0,10 metros de diâmetro x 0,20 metros de altura, sendo posteriormente, ao fim de 14 dias de cura, rompidos conforme as recomendações da Norma Brasileira (NBR) 5738 (2016) e NBR 5739 (2018). Os resultados e dados dos ensaios estão apresentados na Tab. 1 a seguir:

Tabela1. Caracterização do concreto utilizado na moldagem da viga de estudo

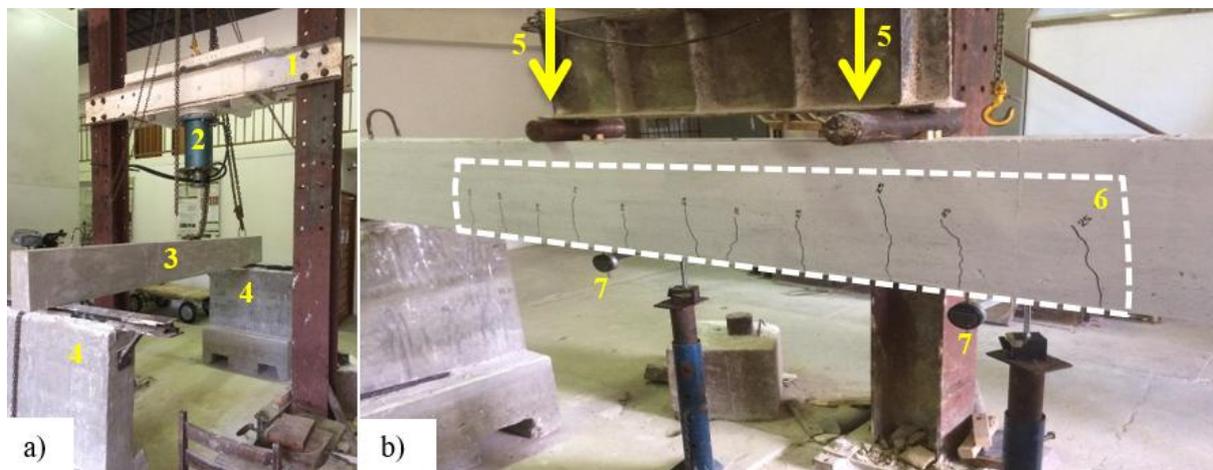
Materiais do concreto traço 1:1,8:2:0,50 (cimento/areia/brita/água)	Cimento CP II E RS - FORTE Agregado miúdo: areia natural (umidade 4,40%) Agregado graúdo: brita granítica nº 1 (19 milímetros) Água
Resistência média à compressão obtida na prensa (f_c)	CP1=25,77MPa 23,67±9% MPa CP2=21,57MPa

A partir do valor do f_c encontrado, pôde-se obter mais um parâmetro característico para o concreto de estudo, denominado: Módulo de elasticidade. Para obtenção do módulo de elasticidade secante, foram adotadas as considerações do item 8.2.8 da NBR 6118 (2014), resultando em um valor de 23.430,71 MPa. Para a análise dinâmica, considerou-se, um aumento do módulo de elasticidade da ordem de 20 a 40% [7], sendo assim, foi adotado um módulo de elasticidade secante dinâmico 30% maior, o que resultou em um valor de 30.459,93 MPa.

Outra característica importante para o ensaio foi a massa específica. Ainda segundo os critérios normativos, no item 8.2.2 da NBR 6118 (2014), recomenda-se que na ausência de dados relativos a esse parâmetro, deve ser adotado para o concreto armado um valor de 2.500 Kg/m³. Com isso, tem-se todas as características, relacionadas ao concreto, e necessárias para o desenvolvimento da análise experimental da viga em estudo. Para a execução da viga foram utilizadas as recomendações da NBR 14931 (2004).

Para a obtenção dos resultados experimentais, a viga de concreto armado foi submetida a uma série de ensaios realizados entre os dias 3 e 12 de abril de 2018, no Laboratório de Materiais e Estruturas da Universidade Federal da Paraíba.

O ensaio dinâmico foi não-destrutivo e buscou obter as frequências naturais experimentais da viga. Para isso foi utilizado o Sonelastic[®], um software que associado a um captador acústico adquire o som emitido pelo material devido a um pequeno impacto, realiza uma transformada rápida de Fourier (FFT) e encontra a função de resposta em frequência (FRF). Com a FRF é possível a determinação das frequências naturais. O segundo ensaio foi o de flexão. Nesta etapa buscou-se medir o desempenho da viga de concreto para resistência, deslocamentos e fissuração. Para isso, utilizou-se um atuador hidráulico ligado ao pórtico de reação, conforme a Fig 2 (a). Enquanto que, em paralelo a aplicação da carga, foram medidos os deslocamentos verticais nas seções A e B (Fig. 2) da viga com o auxílio de relógios comparadores digitais posicionados na face inferior, como na Fig.2 (b).



1: Pórtico de reação | **2:** Atuador hidráulico | **3:** Viga | **4:** Apoio Rotulado | **5:** Pontos de aplicação da carga
6: Panorama de fissuração – 25 kN | **7:** Relógios comparadores digitais

Figura 2. Esquema e resultado do ensaio de flexão com a viga íntegra

Com relação à protensão da estrutura, foi desenvolvido um sistema que consistia na utilização de duas chapas de aço em cada extremidade da viga, sendo uma ativa e outra passiva. Nesse sistema, duas barras de aço (em cada lado) foram posicionadas de modo a formar um desvio no eixo central da viga, essas barras foram rosqueadas na borda ativa, enquanto a borda passiva mantinha a barra fixa, produzindo um esforço axial na barra e, conseqüentemente, um deslocamento vertical de reação no elemento, como pode ser observado na Fig.3.

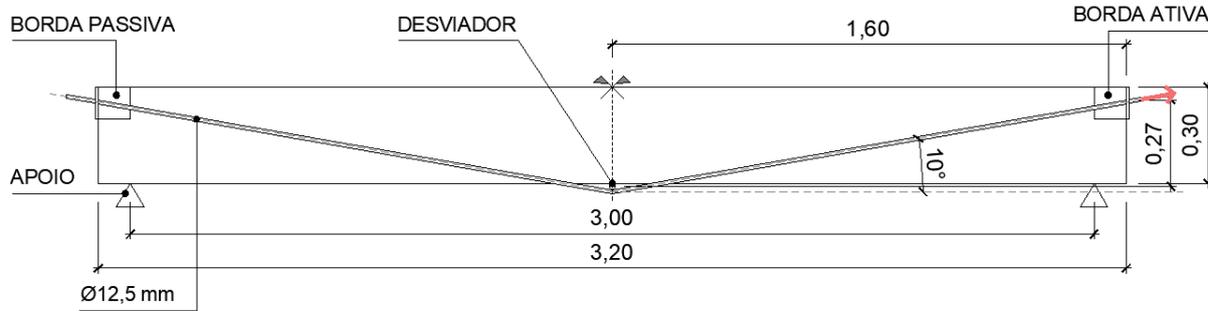


Figura 3. Esquema de protensão da viga

3 Resultados e Discussões

3.1 Análise estática

Foram realizados dois ensaios de flexão na viga. O primeiro com a viga íntegra para uma carga de até 25 kN e o segundo com a viga protendida, até a carga de ruptura. Do primeiro ensaio, obteve-se os deslocamentos verticais da viga a cada aplicação de 5 kN, chegando à carga final de serviço, com a viga em processo de danificação, a qual não se atingiu a ruptura entretanto, apresenta certo panorama de fissuração. O segundo ensaio foi realizado quando a viga foi submetida ao reforço proposto com protensão externa, após cessada a aplicação do carregamento. Pretendeu-se avaliar a eficácia da protensão na viga, que já havia sido danificada. Assim como no primeiro caso, procurou-se obter os deslocamentos verticais da viga, a cada aplicação de 5 kN. Os resultados dos dois ensaios estão reunidos na Tab.2, que apresenta os resultados da viga danificada até a carga de fissuração (25 kN) e para a viga protendida até a carga próxima a de ruptura (70 kN).

Tabela 2. Deslocamentos verticais dos ensaios de flexão da viga

Força (kN)	1º Ensaio (danificação)		2º Ensaio (reforço)	
	Deslocamento (milímetros)		Deslocamento (milímetros)	
	Seção A	Seção B	Seção A	Seção B
5	-1,66	-1,47	-1,72	-1,54
10	-2,38	-2,23	-2,19	-2,32
15	-3,26	-3,04	-3,23	-3,06
20	-4,66	-4,30	-4,47	-4,15
25	-6,02	-4,71	-5,21	-4,78
30	-	-	-5,97	-5,59
35	-	-	-6,95	-6,62
40	-	-	-8,06	-7,73
45	-	-	-9,20	-8,86
50	-	-	-10,30	-9,99
55	-	-	-11,43	-11,12
60	-	-	-12,10	-11,79
65	-	-	-12,80	-13,10
70	-	-	-16,53	-17,10

Graficamente, essa situação pode ser evidenciada na Fig.4. Ambos os gráficos trazem a relação entre o carregamento aplicado e os deslocamentos nas seções especificadas, afim de comparar, para cada caso, como o efeito do reforço influenciou no deslocamento a cada incremento de carga. Comparando os dois ensaios, na seção A, Fig. 4(a), percebe-se um comportamento de recuperação para a protensão, que inicia com deslocamentos superiores a situação da viga em processo de danificação mas, à medida que o reforço é demandado, os deslocamentos tornam-se menores. Na seção B, Fig. 4(b), no entanto, percebe-se um comportamento semelhante para ambos os casos. Entretanto, é possível notar também que o modelo danificado, a partir da carga de 20kN sofre um deslocamento mais acentuado, tendendo a aumentar mais significativamente a partir desse ponto, o que pode ser justificável, se pensarmos que é a partir desse ponto a viga passa para o estado de fissuração, e o concreto fissurado na região tracionada da viga passa a ser desprezado, resultando em uma inércia menor. Outro fator importante a ser extraído da Fig. 4 (a) e (b) está no comportamento da viga protendida frente à viga danificada. No caso da protensão usada como reforço, à proporção que a viga sofre maior solitação de carga ela vai apresentando maior resistência ao deslocamento vertical.

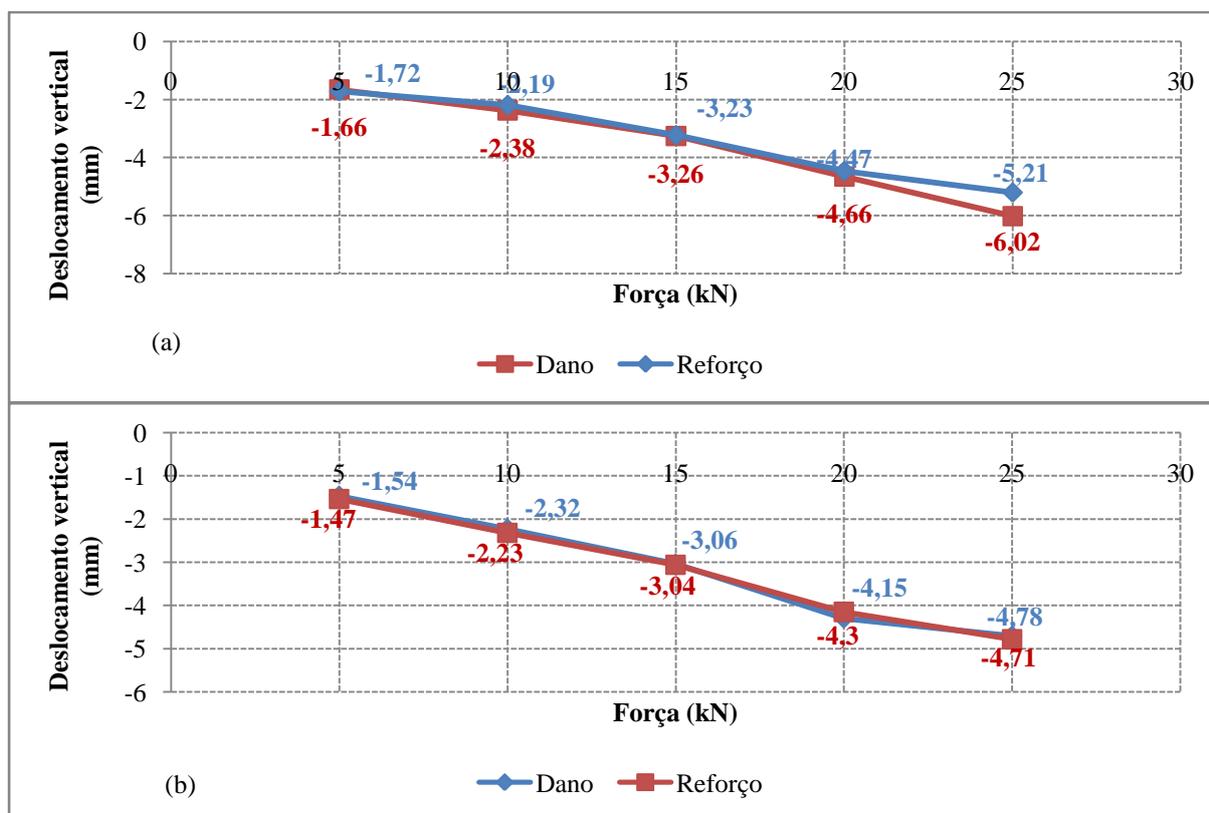


Figura 4. Variação do deslocamento vertical ao incremento de carga nas seções A e B da viga

Considerando a capacidade da viga, foi possível obter a carga máxima suportada pela seção. Esta carga é resultado do momento resistente, dado em função da resistência característica do concreto e das características geométricas da seção. Esta carga seria de aproximadamente 50 kN. No entanto, após ser danificada e posteriormente submetida à protensão, a carga de ruptura obtida foi de aproximadamente 80 kN, o que representa um ganho de carga de suporte de 30 kN, considerando o fato de que antes de ser protendida esta sofreu uma perda de redução resultante do ensaio de flexão e, conseqüentemente, partiu para o ensaio de protensão com uma capacidade de carga ainda menor que a prevista quando em seu estado íntegro.

3.2 Análise dinâmica

A partir dos ensaios realizados pelo Sonelastic[®], do valor médio das três aquisições em cada ponto, obteve-

se os valores de frequências para os 3 modelos de estudo. Esses resultados estão reunidos na Tab. 3:

Tabela 3. Frequências naturais experimentais obtidas no Sonelastic®

Modos de Vibração	Frequências Experimentais (Hz)			Média (Hz)	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)	
	Íntegra	Danificada	Protendida				
1	Íntegra	102,83	102,00	102,24	102,36	0,35	0,34
	Danificada	46,36	44,99	48,25	46,53	1,34	2,87
	Protendida	102,24	48,25	94,67	94,82	0,58	0,61
2	Íntegra	532,19	535,70	535,55	534,48	1,62	0,30
	Danificada	129,73	130,66	132,26	130,88	1,04	0,80
	Protendida	491,84	495,67	494,04	493,85	1,57	0,32
3	Íntegra	1127,29	1143,93	1010,07	1093,76	59,57	5,45
	Danificada	439,28	460,15	462,87	454,10	10,54	2,32
	Protendida	733,62	1001,80	999,50	911,64	125,88	13,81

A Tab. 3 traz a variação das frequências médias esperadas quando avaliamos cada caso de estudo da viga de concreto. Para os dois primeiros modos de vibração, o erro associado é baixo, variando entre 0,30% e 2,87% enquanto que no modo de vibração 3, o erro associado aumenta, visto que na aquisição de frequência para cada aumento do modo de vibração aumentam as dissipações do som e as amplitudes diminuem o que pode gerar maiores fatores de alteração, principalmente entre aquisições diferentes.

A frequência é uma propriedade tipificada também pela rigidez do elemento estrutural assim, quando danificada, a viga passa a ter uma taxa menor de oscilação, tornando-se mais perigosa e perceptível à sensibilidade humana. É o que mostra a Fig. 5, que reúne os dados de frequência para os três primeiros modos de vibração do elemento, que ao ser danificado sofre uma redução expressiva de sua frequência natural. No entanto, ao passar pelo processo de reforço, a viga ganha um incremento de rigidez oriundo do controle da fissuração da viga danificada, assim sua frequência aumenta. A inércia da seção passa a reconsiderar parte do concreto fissurado ora inviabilizado na fase de dano. Vale salientar no entanto, que esse incremento de rigidez precisa ser avaliado segundo criteriosa estimativa da força de protensão aplicada, pois em situação real de utilização, o incremento da força de compressão gerada pela protensão na viga geraria uma diminuição na sua frequência natural o que indica que há um limite da força de protensão para qual o controle da fissuração pode não ser eficaz, gerando ainda mais redução nas frequências.

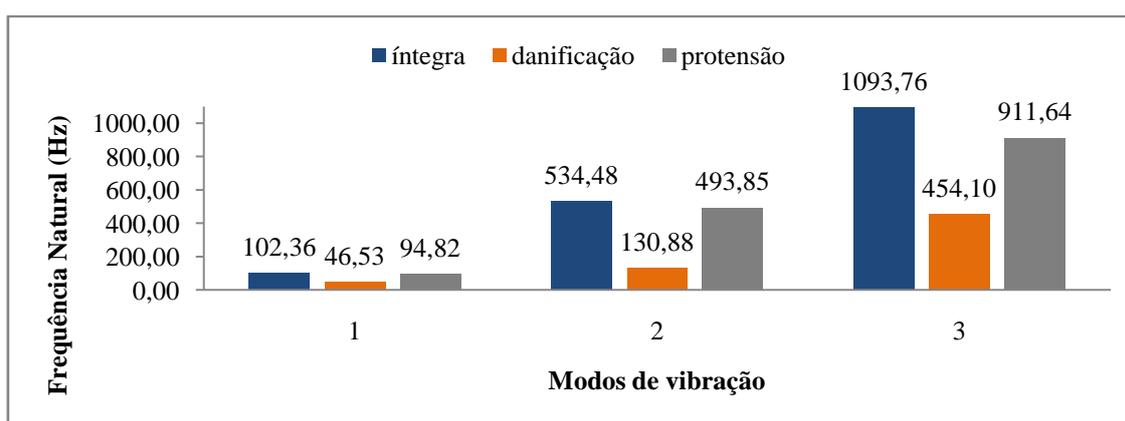


Figura 5. Variação da frequência natural da viga para os modelos íntegro, danificado e protendido da viga

4 Conclusões

Considerando os resultados obtidos no caso da análise estática através do Ensaio de flexão, os

deslocamentos obtidos para a viga após a protensão mostram sinais de recuperação, tendendo a ser menores, principalmente no caso da seção A, e mais sensível no caso da seção B. Outro fator observado diz respeito à capacidade de suporte da viga, que foi projetada para suportar 50 kN e após o uso da protensão passou a suportar a ordem de 80 kN, um incremento de 30 kN (equivalente a 60% do total da força para a qual foi originalmente projetada), sem considerar os fatores como a degradação da viga anterior à protensão e a consequente redução da inércia referente a este elemento estrutural.

Com relação aos resultados obtidos na análise dinâmica, o índice de recuperação pode ser observado quando com a utilização da técnica de recuperação para o controle da fissuração pode-se perceber um aumento da frequência natural. Tomando como exemplo somente os dados do modo de vibração 1, a partir da viga danificada, $f=46,53$ Hetz, para a viga protendida, $f=94,82$ Hertz, houve um aumento de 103,78% e em relação a viga em seu estado íntegro, $f=102,36$ Hertz, uma aproximação de 92,63% havendo quase um retorno completo da situação inicial.

Assim, dos resultados obtidos por meio dos ensaios realizados, verifica-se que a protensão externa pode ser um método eficaz de reforço estrutural em vigas de concreto armado, quando submetidas a certos níveis de danificação e quando considerados com critérios o nível da força de protensão aplicada.

Agradecimentos. Queremos agradecer aos professores orientadores Hidelbrando J. F. Diógenes, Marília M. C. Araújo e Andrea B. Silva pelo apoio e orientações de aperfeiçoamento que formaram o conteúdo final deste artigo, desde do era um Trabalho de Conclusão de Curso. Ao grupo de estudos do Laboratório de Modelagem da Informação da Construção e Modelagem da Experimentação de Estruturas (MIMME). Ao Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas (LABEME) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e seus colaboradores. E por fomento à pesquisa no Brasil nosso agradecimento ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Declaração de autoria. Os autores confirmam que são os únicos responsáveis pela autoria deste trabalho, e que todo o material aqui incluído como parte do presente trabalho é propriedade (e autoria) dos autores, ou tem a permissão dos proprietários para ser incluído aqui.

Referências

- [1] T. T. de Araújo e W.N. Silva Júnior, “Reforço estrutural em fibras de carbono para estruturas de concreto armado”. 6ª Conferência sobre patologia e reabilitação de edifícios (PATORREB), 2018.
- [2] M. H. F. de Medeiros, J. J. de O. Andrade e P. Helene, “Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto”. Concreto Ciência e Tecnologia. IBRACON, 2011.
- [3] B. M. G. de Oliveira, P. R. G. Moura e J. C. Del Pino, “Corrosão em concreto: fatores aceleradores da deterioração, prevenção e reparos”, XX Seminário Interinstitucional de Ensino, Pesquisa e Extensão, 2015.
- [4] R. M. Romanichen e R. A. Souza, “Consolos de concreto armado reforçados com protensão externa”. Revista IBRACON de estruturas e materiais, v. 12, n. 4, pp. 812-831, 2019.
- [5] A. C. H. Nelsen e A. S. C. de Souza, “Vigas mistas de aço e concreto com protensão externa: conceitos e aplicações”. Construmetal, 2012.
- [6] J. A. P. Vitorio e R. C. de Barros, “Reforço e Alargamento de Pontes Rodoviárias com a Utilização de Protensão Externa”. 7º Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas (CIMPAR), 2011.
- [7] P. K. Mehtae P. J. M. Monteiro, “Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais”. Nicole PaganHasparyk, 2014.