

Determinação da rigidez de ligações viga-pilar por meio de ensaios estáticos e dinâmicos



Sandra Freire de Almeida¹



Tatiana de Cássia C. S. da Fonseca²



João Bento de Hanai³

RESUMO

Estuda-se nesta pesquisa uma metodologia experimental dinâmica para determinar a rigidez da ligação viga-pilar diretamente por sinais medidos por acelerômetros. Uma característica importante das estruturas de concreto pré-moldado é a existência de ligações entre os elementos. A necessidade de realizar as ligações, assim como de determinar o valor da rigidez, representa uma dificuldade na concepção e análise dessas estruturas. Usualmente as ligações são idealizadas como vinculações ideais (articuladas ou rígidas), porém o comportamento real pode ser considerado como intermediário, ou seja, semi-rígido. A utilização de ensaios dinâmicos representa uma vantagem na obtenção dos valores de deformabilidade, sem a necessidade de danificar a estrutura. Neste artigo é apresentada uma série de ensaios, na qual foram utilizados modelos em escala reduzida, cuja ligação é composta por dente e consolo, chumbador, almofada de apoio e graute. Os modelos foram reforçados conforme a técnica NSM (*near-surface mounted*), com a colagem de laminados de polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC) em entalhes no concreto de cobrimento. Foram realizados ensaios dinâmicos em diferentes etapas do carregamento e os resultados foram próximos aos obtidos com os ensaios estáticos.

PALAVRAS-CHAVE

Concreto pré-moldado, ligação viga-pilar semi-rígida, análise dinâmica experimental.

¹ Escola de Engenharia de São Carlos, USP, Departamento de Engenharia de Estruturas. Av. Trabalhador São Carlense, 400. São Carlos, SP, Brasil – 13566-590. salmeida@sc.usp.br

² Escola de Engenharia de São Carlos, USP, Departamento de Engenharia de Estruturas. Av. Trabalhador São Carlense, 400. São Carlos, SP, Brasil – 13566-590. tfonseca@sc.usp.br

³ Escola de Engenharia de São Carlos, USP, Departamento de Engenharia de Estruturas. Av. Trabalhador São Carlense, 400. São Carlos, SP, Brasil – 13566-590. jbhanai@sc.usp.br

1. INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto pré-moldado são caracterizadas por: facilidade de execução, mecanização da produção, melhor controle da qualidade dos materiais empregados, valorização e maior produtividade da mão-de-obra. Por outro lado, a necessidade de realizar as ligações representa uma desvantagem desse sistema construtivo podendo até mesmo configurar como um entrave a sua adoção. Em geral, as ligações, que são pontos de descontinuidade, são também os itens mais importantes no projeto de estruturas de concreto pré-moldado, tanto no que se refere à produção (execução de parte dos elementos adjacentes às ligações, montagem da estrutura e execução das ligações propriamente ditas), como para o comportamento da estrutura montada. Além das dificuldades inerentes à fase de execução das ligações, principalmente daquelas que transmitem esforços e procuram representar o comportamento de uma estrutura monolítica, permanecem algumas dúvidas: quanto ao comportamento em serviço, na determinação dos valores reais dos parâmetros de projeto e na confirmação das hipóteses e modelos de cálculo, como por exemplo, o valor efetivo da rigidez da ligação de uma estrutura existente.

Mesmo com o desenvolvimento de pesquisas na área de ligações entre elementos pré-moldados, existe ainda a necessidade de examinar a rigidez, ou outros parâmetros da ligação, nas condições de serviço, e com isso, fazer uma melhor previsão do comportamento futuro da estrutura a partir do estado de danificação atual. Apesar de já existirem pesquisas que objetivaram a determinação experimental da deformabilidade da ligação, observa-se que o resultado só pode ser aplicado em ligações idênticas às estudadas, em termos de materiais empregados, geometria e dimensionamento. A utilização de ensaios não-destrutivos dinâmicos pode representar uma vantagem na obtenção dos valores de deformabilidade por dois motivos. Primeiro, porque não é necessário levar o modelo físico à ruptura, ou seja, podem ser ensaiadas estruturas de grande porte em situação de serviço. Segundo, como o comportamento dinâmico das estruturas é direcionado pelas propriedades internas dos elementos e pelas ligações entre eles, qualquer alteração ocorrida nos elementos, ou variação das condições das ligações (danificação e conseqüente perda de rigidez), provoca um efeito direto nas propriedades dinâmicas do sistema (modos de vibração, frequências naturais e fatores de amortecimento). Assim sendo, ensaios de vibração podem ser utilizados na análise e verificação das condições de vínculo de estruturas pré-moldadas reais.

Na análise experimental de estruturas, os ensaios usuais de investigação física e os procedimentos da análise estática podem ser complementados com ensaios dinâmicos de vibração livre ou forçada. A análise dinâmica está se tornando cada vez mais relevante para os projetos de estruturas civis, principalmente devido à utilização de estruturas mais leves e esbeltas, ao envelhecimento e degradação de edificações já construídas e à ocorrência de abalos sísmicos ou ações excepcionais do vento. Esse tipo de análise pode ser utilizado para detectar danos localizados ou generalizados, determinar a integridade estrutural, identificar vibrações excessivas, avaliar o conforto humano e fornecer informações a respeito de regiões singulares da estrutura, tais como as ligações entre elementos pré-moldados. Os ensaios não-destrutivos fornecem informações globais da estrutura a respeito da rigidez e do amortecimento, podendo ser repetidos e comparados ao longo do tempo.

Neste artigo, são apresentados ensaios que fazem parte de uma pesquisa de doutorado, cujo objetivo geral envolve o desenvolvimento da análise de ligações semi-rígidas entre elementos pré-moldados de concreto. Estuda-se nesta etapa, uma metodologia experimental dinâmica para determinar a rigidez de uma ligação viga-pilar de tamanho reduzido, diretamente com os sinais medidos por acelerômetros piezoelétricos. Foram ensaiados seis modelos de ligação, composta por encaixe de dente e consolo, com uso de chumbador, almofada de apoio e graute. Além dos dispositivos usuais da ligação, os modelos foram reforçados conforme a técnica conhecida como NSM – *near-surface mounted*, com a colagem de laminados de polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC), em entalhes no concreto de cobertura. Foram realizados ensaios dinâmicos de vibração livre e forçada em diferentes etapas do carregamento estático: no modelo no estado íntegro, no modelo fissurado e após a ruptura. Os ensaios estáticos foram realizados por FONSECA [1], que avaliou a aplicabilidade da técnica NSM no incremento da rigidez e da resistência de ligações.

2. DEFORMABILIDADE DAS LIGAÇÕES

Usualmente na análise estrutural, as ligações são concebidas como vinculações ideais (articuladas – que não transmitem momento fletor, ou rígidas – que transmitem momento fletor), porém o comportamento real pode ser considerado como intermediário entre esses extremos, ou seja, que existe certa deformabilidade das ligações, transmissão parcial de momentos e alguma possibilidade de deslocamento relativo entre os elementos (ligação semi-rígida). O desconhecimento ou a incerteza dos valores de deformabilidade pode gerar diferenças na idealização do comportamento estrutural e provocar erros na distribuição dos esforços solicitantes, afetando a rigidez e a estabilidade global da estrutura.

A deformabilidade de uma ligação é definida como a relação do deslocamento relativo entre os elementos que compõem a ligação e o esforço solicitante unitário atuante na direção desse deslocamento, e corresponde ao inverso da rigidez, conforme EL DEBS [2]. A deformabilidade à flexão (D_m) é a rotação relativa (ϕ) entre os elementos da estrutura que concorrem nesta ligação, causada pela ação de um momento fletor unitário (M), cujo valor pode ser expresso pela Eq. (1). A inversa da deformabilidade é a rigidez da ligação à flexão (K_m).

$$\text{Deformabilidade ao momento fletor: } D_m = \frac{\phi}{M} \quad \text{e} \quad \text{Rigidez: } K_m = \frac{M}{\phi} \quad (1)$$

A partir de ensaios experimentais, valores de deformabilidade das ligações podem ser obtidos com a utilização do diagrama momento-rotação, que representa a relação entre o momento fletor (M) aplicado na ligação e a rotação relativa (ϕ). O eixo das abscissas representa as ligações perfeitamente articuladas e o eixo das ordenadas representa as ligações perfeitamente rígidas. As ligações parcialmente rígidas apresentam comportamento não-linear, como pode ser visto na curva da Fig. 1.

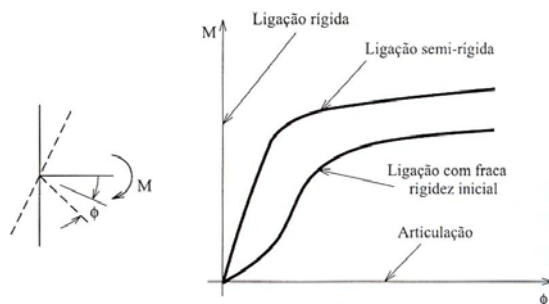


Figura 1. Tipos de diagrama momento fletor x rotação das ligações. Fonte: EL DEBS [2].

NÓBREGA [3] analisou o comportamento de pórticos de concreto pré-moldado de tamanho reduzido, por meio de ensaios experimentais e computacionais, estáticos e dinâmicos, inclusive com ligação viga-pilar semi-rígida. O autor avaliou a condição real das ligações e a sua influência nas propriedades modais do sistema. Um dos aspectos dessa pesquisa que merece destaque é a elaboração de uma metodologia experimental dinâmica para determinar a rigidez da ligação pilar-fundação diretamente pelos sinais medidos. Os resultados dos ensaios dinâmicos para os valores de rigidez obtidos por NÓBREGA [3], pelos métodos direto e indireto, foram muito próximos. O método de obtenção da rigidez utilizado nos ensaios, cujos resultados estão apresentados neste trabalho, deriva da metodologia proposta por NÓBREGA [3].

3. METODOLOGIA E PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Descrição dos modelos

Os ensaios estáticos e dinâmicos foram realizados no Laboratório de Estruturas, da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (LE-EESC-USP). Os modelos reduzidos

estudados neste trabalho também fizeram parte da pesquisa de mestrado desenvolvida por FONSECA [1], que avaliou o incremento de rigidez e resistência a momento fletor de ligação viga-pilar de estrutura de concreto pré-moldado, obtido pelo reforço com laminado de PRFC (Polímero Reforçado com Fibra de Carbono) inserido no concreto de cobrimento. O modelo, apresentado em destaque na Fig. 2, procura reproduzir o comportamento de uma estrutura de esqueleto de múltiplos pavimentos, com pilares contínuos.

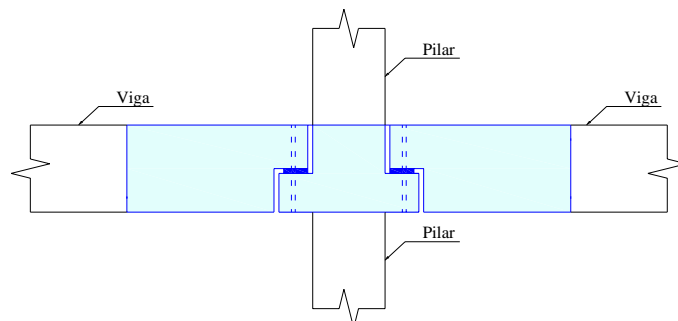


Figura 2. Representação esquemática do modelo de ligação viga-pilar. Fonte: FONSECA [1].

O tipo de ligação, reproduzido em modelos reduzidos, tem comportamento aproximadamente articulado e é composto por dente e consolo conectados por chumbador, almofada de apoio (elastômero simples) e graute nos vazios da ligação. Com o reforço por inserção e colagem do laminado de PRFC (técnica NSM – *near-surface-mounted*) no concreto de cobrimento, nas laterais do modelo, obtém-se incremento de rigidez e resistência à flexão.

Todos os modelos ensaiados possuem um trecho de pilar intermediário com dois consolos e dois trechos simétricos de viga de seção retangular com dente, sendo suas dimensões reduzidas aproximadamente por um fator de 1:3 em relação a um trecho de ligação em tamanho real. O dimensionamento desses componentes pré-moldados – consolos e dentes – foi baseado em EL DEBS [2]. Os chumbadores empregados na ligação são barras de aço CA-50, de diâmetro igual a 8 mm. A ancoragem de cada chumbador foi assegurada por um trecho de comprimento embutido dentro do consolo, sem laço ou solda. O material da almofada de apoio é borracha natural com espessura de 1,0 cm e dureza Shore 70A. As características principais do laminado de PRFC são: largura $L = 15,69$ mm; espessura $e = 2,11$ mm; resistência à tração igual a 1.388 MPa e módulo de elasticidade igual a 126 GPa. Para a colagem do laminado nos entalhes foi utilizada resina epóxi bi-componente da marca Sikadur® 330. Os entalhes foram realizados a 30 mm de distância da borda superior ou inferior do modelo, com 5 mm de espessura e 18 mm de profundidade. O graute utilizado no preenchimento dos vazios e nos furos dos chumbadores é do tipo auto-adensável, cujos valores de resistência variaram entre 38 e 40 MPa à compressão e 3,4 e 3,5 MPa à tração, com módulo de elasticidade entre 34 e 39 GPa. A resistência à compressão dos elementos de concreto (trechos de viga e pilar) apresentou valores dentro da faixa entre 30 e 48 MPa; a resistência à tração entre 2,9 e 3,0 MPa, e o módulo de elasticidade entre 29 e 35 GPa.

Os modelos foram reforçados na região da ligação, de acordo com a idealização da ocorrência de esforços de tração, ou seja, a momento negativo com laminado inserido na região superior da viga, e a momento positivo com laminado na região inferior. Para estudar a influência da almofada de apoio e do graute na resistência e na deformabilidade, alguns modelos não possuíam juntas preenchidas por graute, nem almofadas de apoio, e sim, juntas perfeitamente conjugadas. Os aspectos geométricos dos modelos são relacionados na Fig. 3. Outros detalhes do dimensionamento e montagem dos modelos podem ser obtidos em FONSECA [1].

3.2 Descrição dos ensaios dinâmicos

Os ensaios dinâmicos foram realizados nos modelos no estado íntegro, intercalados durante a aplicação do carregamento estático de flexão e após a ruptura. A importância da realização dos ensaios nessas diferentes etapas é atribuída à possibilidade de analisar o comportamento dos

parâmetros relativos à ligação (rotação, rigidez) ao longo de um processo de danificação, por meio da comparação dos resultados dinâmicos. As amplitudes da vibração foram medidas em dois pontos da ligação, de forma a obter a rotação provocada pelo momento fletor entre as seções descontínuas – consolo e dente. Determinou-se a rigidez da ligação pelo método direto proposto por NÓBREGA [3]. Para o cálculo do fator de amortecimento, foi empregado o método do decremento logarítmico com os resultados de vibração livre, no domínio do tempo.

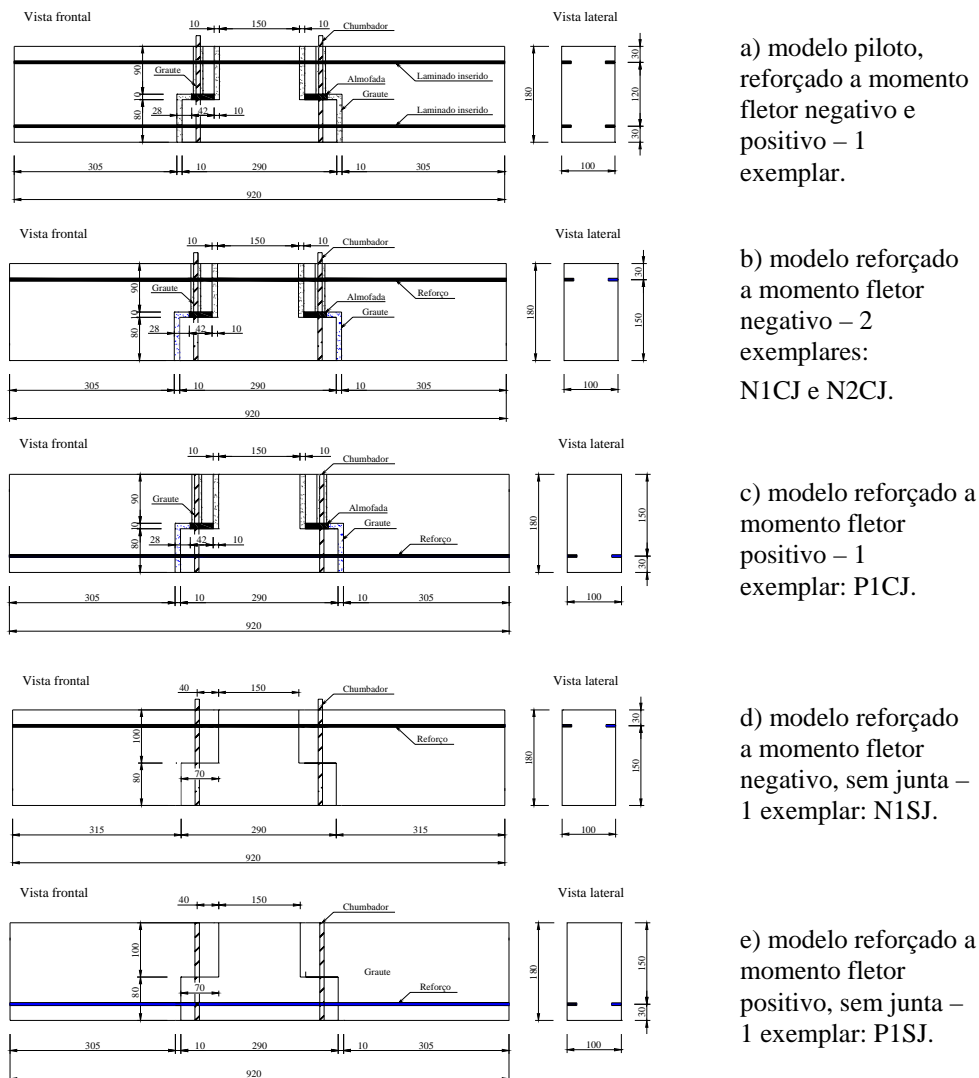


Figura 3. Desenho esquemático dos modelos.

3.2.1 Método direto – NÓBREGA [3]

A técnica consiste em usar um par de acelerômetros uniaxiais colocados a uma pequena distância um do outro, fixados à estrutura, conforme a Fig. 4.

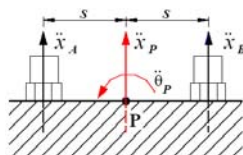


Figura 4. Arranjo para medição da resposta rotacional. Fonte: NÓBREGA [3].

Calcula-se a translação e a rotação do ponto P da estrutura pelas expressões:

$$\ddot{x}_P = \frac{\ddot{x}_B + \ddot{x}_A}{2} \quad \text{e} \quad \ddot{\theta}_P = \frac{\ddot{x}_B - \ddot{x}_A}{2s} \quad (2)$$

NÓBREGA [3] estabeleceu uma sequência de procedimentos para a obtenção da rigidez da ligação de forma direta: 1) Fixação de acelerômetros, um em cada lado do elemento. É recomendável que a distância entre os acelerômetros e a ligação seja a menor possível; 2) Excitação da estrutura com um sinal senoidal, com frequência correspondente à frequência natural da estrutura; 3) Medição da excitação imposta (força) e das respostas dos acelerômetros (aceleração) no domínio do tempo; 4) Cálculo das respostas dos sensores, em termos de deslocamento, no domínio do tempo. A Equação (3) relaciona a aceleração translacional e o deslocamento, e também a aceleração angular e a rotação, considerando ω como a frequência da excitação, em rad/s.

$$x = \frac{\ddot{x}}{\omega^2} \quad \text{e} \quad \theta = \frac{\ddot{\theta}}{\omega^2} \quad (3)$$

5) Cálculo do ângulo de rotação do elemento pela Eq. (4), sendo Δx o deslocamento relativo entre os dois acelerômetros e $2s$ a distância entre eles.

$$\theta = \frac{\Delta x}{2s} \quad (4)$$

6) Cálculo do momento dinâmico (M_{din}) na extremidade da viga pela Eq. (5). O M_{din} é diretamente proporcional ao momento M (calculado sem a consideração dos parâmetros dinâmicos, definido pelo produto entre a amplitude da força de excitação e a distância ao ponto de aplicação). Considera-se também o fator de amplificação dinâmica (D), que depende do valor de β (relação entre a frequência de excitação e a frequência natural) e do fator de amortecimento (ζ), segundo a Eq. (6).

$$M_{\text{din}} = D \cdot M \quad (5)$$

$$D = \left[\left(1 - \beta^2 \right)^2 + (2\zeta\beta)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

7) Cálculo da rigidez à flexão K pela Eq. (7).

$$K = \frac{M_{\text{din}}}{\theta} \quad (7)$$

NÓBREGA [3] esclarece que as expressões expostas anteriormente são válidas para sistemas de 1 grau de liberdade (GDL), com amortecimento viscoso, submetidas a um carregamento harmônico simples. Para a expansão desses princípios para sistemas de múltiplos GDL, a estrutura deve exibir: modos de vibração pouco acoplados, frequências naturais não próximas e fatores de amortecimento baixos.

3.2.2 Instrumentos, sensores e sistema de aquisição

No Quadro 1, estão relacionadas as informações a respeito dos instrumentos, sensores e sistema de aquisição de dados utilizados nos ensaios dinâmicos.

Quadro 1. Informações sobre os ensaios dinâmicos.

Instrumentação:	Foram coladas chapas metálicas (2 cm x 2 cm) para fixação da base magnética do acelerômetro. Acelerômetros piezoelétricos, sensibilidades: 104 e 105,5 mV/g. Sensor de força dinâmico piezoelétrico, sensibilidade = 10,8 mV/lbf.
Equipamentos:	Máquina universal de ensaios servo-hidráulica para aplicação da carga estática, para fixação do pilar (simulação do engaste na base e no topo). Excitador eletrodinâmico de 40 lbf (<i>shaker</i>). Martelo de impacto instrumentado, sensibilidade: 0,95mV/lbf.
Sist. aquisição de dados:	<i>SignalCalc ACE</i> da <i>Data Physics Corporation</i> (placa PCMCIA) e computador <i>laptop</i> .
Parâmetros do sistema:	Janela <i>hanning</i> para redução dos dados; $dF = 1,250$; $F_{\text{span}} = 2000$; $\text{lines} = 1600$; $\text{overlap} = 50\%$; $\text{average} = 100$, <i>stable</i> .

3.2.3 Metodologia experimental

A metodologia de ensaio obedeceu à sequência:

- 1) Realização de ensaio dinâmico de vibração livre nos modelos, no estado íntegro e após a ruptura, para a determinação das frequências naturais e dos fatores de amortecimento. Nesse caso, foi utilizado um martelo de impacto instrumentado, acelerômetro e o sistema de aquisição dinâmico. O modelo foi suspenso por fios de nylon, para simular a condição de contorno livre-livre (Figs. 5 e 6a).
- 2)

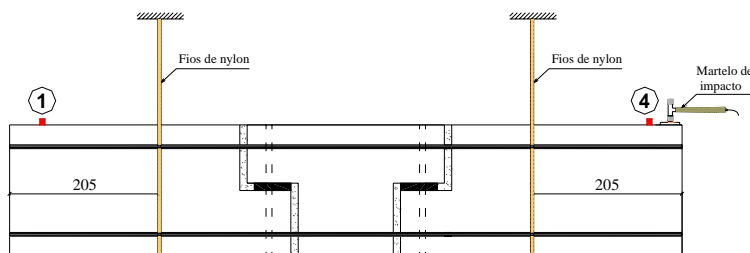


Figura 5. Desenho esquemático do ensaio de vibração livre – condição de contorno livre-livre.

2) Determinação das frequências naturais do modelo no estado íntegro, por meio de ensaio de vibração forçada, utilizando o excitador eletrodinâmico. Foi feita uma varredura de frequências, com um sinal de excitação aleatório. O sinal de resposta foi obtido com um acelerômetro, instalado em uma das extremidades livres da viga, conforme a Fig. 7. As condições de contorno dos ensaios dinâmicos de vibração forçada foram diferentes dos ensaios estáticos, ou seja, as vigas possuíam as extremidades livres (em balanço – Fig. 7), e o pilar estava engastado no topo e na base (engastamento garantido com a aplicação de uma carga de compressão de 10 kN, pela máquina servo-hidráulica).



Figura 6. Ensaios dinâmicos: a) vibração livre; b) vibração forçada, com extremidade da viga em balanço; c) vibração forçada, com acelerômetros no dente e no consolo.

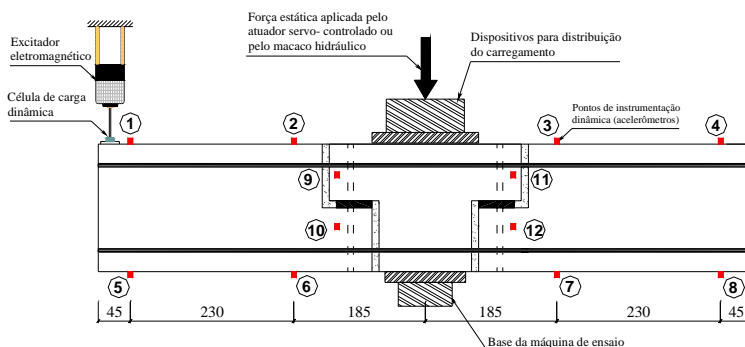


Figura 7. Desenho esquemático da instrumentação e da aplicação do carregamento do ensaio dinâmico de vibração forçada.

3) Conhecidas as frequências naturais, o modelo foi submetido a uma excitação forçada com sinal senoidal de frequência constante e igual à primeira frequência natural, com o objetivo de medir o valor da força dinâmica aplicada e os deslocamentos dos pontos determinados. Dois acelerômetros foram utilizados nesta etapa e fixados no dente da viga e no consolo do pilar (pontos 09 e 10 e pontos 11 e 12, na Fig. 7), ou nas partes superior e inferior da viga (pontos 02 e 06 e pontos 03 e 07, na Fig. 7), de tal forma que a rotação entre os dois pontos fosse obtida pela diferença de amplitude entre eles, segundo método direto. As amplitudes medidas são as acelerações, que fornecem os valores dos deslocamentos (Equação 3). Para isso, os sensores foram posicionados com o eixo longitudinal paralelo ao eixo da viga (Fig. 6c);

4) Realização do ensaio estático até o início da fissuração (modelo piloto) ou até 24 kN (outros modelos), com aplicação de carregamento cíclico alternado, de curta duração, na máquina servo-hidráulica com controle de deslocamento, solicitando o modelo de ligação a momento fletor positivo ou negativo. Nessa etapa, as vigas foram bi-apoiadas e foi retirado o engaste no topo e na base do pilar;

5) Repetição do ensaio dinâmico de vibração forçada do modelo fissurado (descrito anteriormente);

6) Continuação do ensaio estático até a ruptura do modelo;

7) Repetição do ensaio dinâmico de vibração forçada (descrito anteriormente) para obtenção dos parâmetros dinâmicos da estrutura rompida; Repetição do ensaio dinâmico de vibração livre.

Com o valor da força dinâmica foi possível calcular o momento dinâmico aplicado, e com a relação momento dinâmico – rotação foi possível obter a rigidez da ligação segundo o método direto.

4. RESULTADOS

Os resultados dos ensaios de vibração livre forneceram os valores de frequência natural e fator de amortecimento, relativos ao primeiro modo de vibração, para a condição de contorno livre-livre, no estado íntegro (Quadro 2) e após a ruptura (Quadro 3). Utilizando o gráfico da Função de Resposta em Frequência (FRF), obteve-se a 1ª frequência natural, enquanto o fator de amortecimento foi calculado pelo método do decremento logarítmico, utilizando o sinal da aceleração no domínio do tempo.

Quadro 2. Resultados dos ensaios de vibração livre – modelos no estado íntegro.

Modelos (Estado íntegro)	Peso (íntegro) (kg)	f_1 – (freq. natural do 1º modo) (Hz)	ζ – Fator de amortecimento
Modelo Piloto	43,90	456,56	3,32%
Modelo 1 - P1-CJ	44,20	631,56	5,37%
Modelo 3 - N1-CJ	44,05	682,81	5,93%
Modelo 4 - N2-CJ	44,30	720,94	6,36%
Modelo 5 - N1-SJ	45,10	644,38	6,30%
Modelo 6 - P1-SJ	44,75	629,69	7,32%
MÉDIA	44,38	627,66	5,77%

Quadro 3. Resultados dos ensaios de vibração livre – modelos após a ruptura.

Modelos (Rompidos)	Peso (rompido)		f_1 – (freq natural do 1º modo)		ζ – Fator de amortecimento
	Peso (kg)	Redução em relação ao íntegro	f_1 – (Hz)	Redução em relação ao íntegro	
Modelo Piloto	---	---	402,34	11,9%	5,37%
Mod. 1 - P1-CJ	43,85	0,79%	151,56	76,0%	6,71%
Mod.3 - N1-CJ	43,95	0,23%	254,38	62,7%	6,91%
Mod.4 - N2-CJ	44,15	0,34%	229,38	68,2%	5,39%
Mod.5 - N1-SJ	44,55	1,22%	301,25	53,2%	7,69%
Mod.6 - P1-SJ	44,10	1,45%	330,94	47,4%	5,75%
MÉDIA	44,12	0,81%	278,31	53,25%	6,31%

O ensaio de vibração forçada foi realizado com os modelos no estado íntegro, durante a aplicação do carregamento estático (com aproximadamente 30 % da carga máxima) e após a ruptura. Os valores obtidos das frequências são listados no Quadro 4.

Quadro 4. Resultados dos ensaios de vibração forçada – frequência natural.

Modelos	f_1 – (frequência natural do 1º modo) – Vibração forçada (Hz)				
	Íntegro	Durante o carregamento estático	Redução em relação ao íntegro	Após a ruptura	Redução em relação ao íntegro
Modelo Piloto	111,67	110,00	1,49%	106,25	4,85%
Mod. 1 - P1-CJ	103,75	97,50	6,02%	93,33	10,04%
Mod. 3 - N1-CJ	105,00	95,00	9,52%	100,94	3,87%
Mod. 4 - N2-CJ	95,63	78,44	17,97%	102,00	-6,67%
Mod. 5 - N1-SJ	105,83	70,00	33,86%	27,19	74,31%
Mod. 6 - P1-SJ	124,17	102,19	17,70%	61,88	50,17%
MÉDIA	107,67	92,19	14,38%	81,93	23,91%

Alguns valores de frequência obtidos quando o modelo já estava rompido resultaram maiores que os obtidos durante o carregamento estático (caso dos modelos 3 e 4), ou até mesmo maior que a frequência no estado íntegro (caso do modelo 4). Essa diferença pode ter sido causada pelas alterações nas condições de contorno do modelo nas diferentes etapas.

A rigidez da ligação é a relação entre o momento dinâmico (produto da força dinâmica pela distância até o ponto de aplicação, corrigido pelo fator de amplificação D) e o ângulo de rotação (resultante das medidas experimentais obtidas com os acelerômetros). Os resultados, apresentados no Quadro 5, representam a média das posições estudadas: dente e consolo e partes superior e inferior da viga.

Quadro 5. Valores da rigidez da ligação – Ensaios dinâmicos.

Modelos	Rigidez da ligação – Ensaio dinâmico (kN.m/rad)		
	Íntegro	Durante o carregamento estático	Após a ruptura
Modelo Piloto	3.939,5	1.107,0	1.592,3
Modelo 1 - P1-CJ	3.061,6	1.383,0	842,3
Modelo 3 - N1-CJ	1.146,7	1.216,6	3.278,9
Modelo 4 - N2-CJ	3.163,3	2.698,0	792,0
Modelo 5 - N1-SJ	1.741,2	3.195,0	253,2
Modelo 6 - P1-SJ	2.099,3	2.488,2	958,1

Os resultados obtidos com os ensaios estáticos, nos mesmos modelos reduzidos, utilizando o trecho linear do gráfico momento-rotação até 30% da carga de ruptura (Quadro 6) indicam algumas diferenças, nos valores da rigidez à flexão da ligação viga-pilar, entre os dois métodos de ensaio.

Quadro 6. Valores da rigidez da ligação – Ensaios estáticos.

Modelos	Rigidez da ligação – Ensaio estático (kN.m/rad)	Comparação entre a rigidez obtida com o ensaio estático e o dinâmico (estado íntegro)
Modelo Piloto	1.723,2	0,44
Mod. 1 - P1-CJ	1814,8	0,59
Mod. 3 - N1-CJ	1514,1	1,32
Mod. 4 - N2-CJ	1489,7	0,47
Mod. 5 - N1-SJ	1736,3	1,00
Mod. 6 - P1-SJ	1484,1	0,71

5. CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios com modelos reduzidos foram bastante satisfatórios, pois forneceram valores de rigidez da ligação da mesma ordem de grandeza que os ensaios estáticos usuais (que utilizam transdutores de deslocamento). Os valores obtidos para a maioria dos modelos nos ensaios dinâmicos foram próximos aos dos ensaios estáticos.

Uma vantagem observada com a utilização do modelo em escala reduzida foi a redução significativa da influência do ruído provocado pela vibração da estrutura de reação.

Pela análise dos resultados alcançados, acredita-se que o estudo da rigidez de ligações entre elementos pré-moldados por meio de ensaios dinâmicos, especialmente a ligação viga-pilar, apresenta vantagens e deve ser aprimorado, visando a determinação do valor da rigidez com base no método direto, que apresenta um procedimento bastante simples para cálculo da rotação entre os elementos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de doutorado e pelo Projeto Temático, intitulado “*Nucleação e incremento da pesquisa, inovação e difusão em concreto pré-moldado e estruturas mistas para a Modernização da Construção Civil*”, que financiou esta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FONSECA, Tatiana de Cássia Coutinho Silva da – Reforço e incremento da rigidez à flexão de ligações viga-pilar de estruturas de concreto pré-moldado com polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007. 203 p. Dissertação de Mestrado.
- [2] EL DEBS, M. K. – Concreto pré-moldado: Fundamentos e aplicações. 1ª ed. São Carlos: EESC-USP, 2000. 465 p. ISBN 85-85205-35-0.
- [3] NÓBREGA, Petrus Gorgônio Bulhões – Análise dinâmica de estruturas de concreto: Estudo experimental e numérico das condições de contorno de estruturas pré-moldadas. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004. 285 p. Tese de Doutorado.