

Ligações viga-pilar reforçadas pela colagem de laminados de PRFC em entalhes no concreto



**Tatiana de Cássia
C. S. da Fonseca¹**



**Sandra Freire de
Almeida²**



**João Bento de
Hanai³**



**Luiz Vicente
Vareda⁴**

RESUMO

Neste trabalho, apresentam-se os resultados de ensaios em modelos reduzidos de ligação viga-pilar reforçados à flexão. Apresentam-se também propostas teóricas para estimativa da rigidez inicial destes modelos. A técnica de reforço usada consiste na colagem de laminados de polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC) em entalhes realizados no concreto de cobertura. Os modelos de ligação estudados foram concebidos para se assemelhar a um trecho de estrutura real com ligações por encaixe de dente Gerber e consolo, que têm comportamento articulado. Os mecanismos usuais de transferência de esforços deste tipo de ligação são chumbadores e almofadas de apoio. Nos modelos reforçados, acrescentaram-se novos mecanismos para transferência de tração (laminado de PFR) e compressão (grauteamento dos espaços vazios). Os modelos de ligação foram reforçados e submetidos a ensaios estáticos. Esses ensaios consistiram na aplicação de carregamento cíclico alternado de curta duração, solicitando-se os modelos a momento fletor positivo ou negativo. Os resultados experimentais demonstram que, com o reforço, as ligações apresentaram comportamento semi-rígido e adquiriram resistência à flexão compatível à de estrutura monolítica armada com barras de PRFC. O cálculo da rigidez inicial por meio das expressões desenvolvidas se mostrou satisfatório tendo havido uma diferença máxima entre os valores teóricos e experimentais de 26%.

PALAVRAS-CHAVE

Reforço estrutural, ligação viga-pilar, PRFC, NSM

¹ Escola de Engenharia de São Carlos - USP, Departamento de Engenharia de Estruturas, Av. Trabalhador Sãoocarlense, 400, São Carlos, SP, Brasil, CEP: 13566-590. tfonseca@sc.usp.br

² Escola de Engenharia de São Carlos - USP, Departamento de Engenharia de Estruturas, Av. Trabalhador Sãoocarlense, 400, São Carlos, SP, Brasil, CEP: 13566-590. salmeida@sc.usp.br

³ Escola de Engenharia de São Carlos - USP, Departamento de Engenharia de Estruturas, Av. Trabalhador Sãoocarlense, 400, São Carlos, SP, Brasil, CEP: 13566-590. jbhanaei@sc.usp.br

⁴ Escola de Engenharia de São Carlos - USP, Departamento de Engenharia de Estruturas, Av. Trabalhador Sãoocarlense, 400, São Carlos, SP, Brasil, CEP: 13566-590. lvvareda@sc.usp.br

1. INTRODUÇÃO

A primeira investigação científica sobre a colagem de laminados de PRF em entalhes é atribuída a Blaschko e Zilch [1]. O aspecto inovador desse trabalho consiste na utilização dos PRF, uma vez que 50 anos antes já se relatava o reforço por inserção de barras de aço no concreto de cobrimento, fixadas com uso de argamassa, em Asplund [2]. O trabalho de Blaschko e Zilch [1], contudo, impõe-se como um marco para o reforço mediante utilização de PRF, por apresentar solução para algumas deficiências inerentes à colagem externa, principalmente em relação ao descolamento prematuro do reforço. A técnica tem ainda por vantagens: execução menos trabalhosa, maior facilidade de ancoragem em membros adjacentes ao elemento reforçado, maior facilidade de pré-tensionamento, proteção pelo concreto de cobrimento e consequentemente menor exposição a danos mecânicos, impactos acidentais, fogo e vandalismo e a não interferência em aspectos estéticos das estruturas [3].

A eficiência da técnica, comprovada por pesquisas que avaliaram o reforço à flexão de vigas, pilares e consolos e reforço ao cisalhamento de vigas motivaram esta investigação sobre o emprego da técnica no incremento de rigidez e resistência à flexão de ligações viga-pilar de estruturas de concreto pré-moldado. Não raro, as estruturas de concreto pré-moldado apresentam comportamento global insatisfatório evidenciado por sintomas patológicos tais como: flechas e deslocamentos laterais excessivos ou vibração excessiva. As manifestações patológicas que afetam as estruturas podem ter origens diversas, dentre as quais: erros de projeto e execução, alteração na funcionalidade da edificação, alteração das solicitações, ações excepcionais (ex.: terremotos, furacões). “Para cada origem há uma terapia mais adequada, embora o fenômeno e os sintomas possam ser os mesmos.” [4]

Em estruturas de concreto armado, monolíticas ou pré-moldadas, a reabilitação é geralmente empregada nos elementos de viga e pilar que a compõem. Certamente, para a maioria dos casos é o procedimento mais prático a adotar. Entretanto, se a questão a ser corrigida está relacionada ao comportamento global da estrutura, o reforço das ligações entre vigas e pilares deve ser considerado. Sobretudo, para estrutura de concreto pré-moldado em que o desempenho das ligações tem extrema importância. As ligações são responsáveis pela transferência de esforços e pela estabilidade na fase de montagem e de utilização da estrutura. Devem ser capazes de acomodar deslocamentos relativos necessários à mobilização de sua resistência, resistir a todas as ações resultantes da análise da estrutura como um todo, bem como da análise dos membros individualmente, ter resistência e deformabilidade que assegurem a estabilidade da estrutura como um todo [5]. Por meio desta investigação pretendeu-se avaliar uma alternativa de reabilitação das ligações que apresentem deficiência em alguma dessas funções. Os resultados experimentais obtidos demonstram ser a técnica promissora.

2. METODOLOGIA

A técnica de reforço em questão foi avaliada por meio de ensaios experimentais em modelos reduzidos de ligação. Os modelos foram concebidos para se assemelhar a um trecho de estrutura real (Fig. 1) contendo ligações por encaixe de dente Gerber e consolo, que têm comportamento articulado. As dimensões dos elementos conectados, trechos de vigas e de pilar, foram reduzidas num fator de aproximadamente 1:3. Aqui são apresentados resultados de ensaios em três modelos. Dois deles foram utilizados na avaliação do reforço a momento negativo e um na avaliação do reforço a momento positivo. Os modelos de ensaio são referenciados por nomenclatura com quatro campos, por exemplo, “N1 CJ”. O primeiro campo a define o tipo de reforço. A letra “N” significa reforço a momento fletor Negativo e “P” significa reforço a momento fletor Positivo. O segundo campo designa o número do modelo, podendo ser igual a 1 ou 2. O terceiro e o quarto campos (CJ) indicam que o modelo foi confeccionado Com Junta grauteada. O reforço com laminados, que possibilitou a transferência de esforços de tração, foi realizado na face lateral dos modelos. A transferência de esforços de compressão foi possibilitada pelo preenchimento dos espaços vazios da ligação com graute. As características dos modelos estão resumidas no Quadro 1.

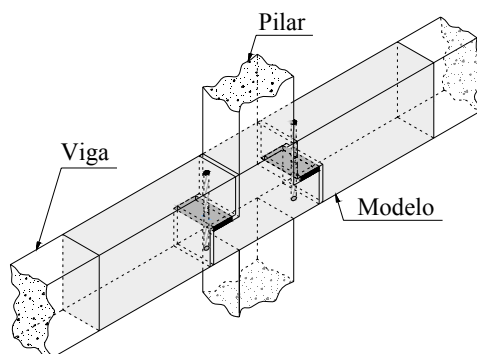


Figura 1 - Porção de uma estrutura com trecho equivalente ao modelo de ensaio em destaque.

Quadro 1 - Características dos modelos.

Modelo	Características
N1 CJ N2 CJ	Modelos compostos pela montagem dos elementos usuais de uma ligação articulada (encaixe de dente gerber e consolo, almofada de apoio, chumbador e grauteamento do furo do chumbador) reforçados para momento negativo pela colagem de laminado em entalhes no concreto de cobrimento na lateral do modelo e grauteamento dos espaços entre a viga e o pilar.
P1 CJ	Modelo composto pela montagem dos elementos usuais de uma ligação articulada (encaixe de dente gerber e consolo, almofada de apoio, chumbador e grauteamento do furo do chumbador) reforçado para momento positivo pela colagem de laminado em entalhes no concreto de cobrimento na lateral do modelo e grauteamento dos espaços entre a viga e o pilar.

Os laminados para reforço dos modelos foram colados em entalhes realizados com seção de aproximadamente 18 mm x 5 mm, a uma distância de 30 mm da base, para reforço a momento positivo, ou do topo, para momento negativo. A Figura 2 ilustra as características do modelo reforçado a momento positivo (P1 CJ).

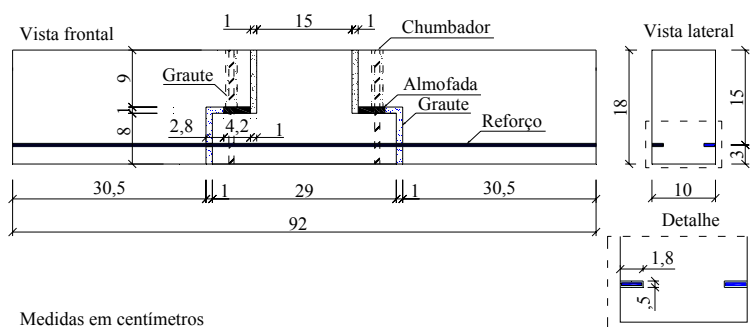


Figura 2 - Características do Modelo P1 CJ.

2.2 Propriedades dos materiais

A resistência à compressão do concreto dos trechos de vigas e pilares foi de 47,3 MPa. O graute usado para o preenchimento dos vazios da ligação foi o *Masterflow® 885 grout*, com a relação água/graute de 0,20, que apresentou resistência à compressão variando de 37,3 MPa a 40,3 MPa. Utilizou-se almofada de apoio de borracha natural *NR 1087* da marca *ORION*, dureza Shore 70 A. O laminado utilizado é da marca *Rogertec*. Possui seção de 2,11 mm x 15,69 mm, resistência à tração de 2068 MPa e módulo de elasticidade na tração de 126 GPa. Utilizou-se em sua colagem a resina epóxi *Sikadur® 330* que tem resistência à tração e módulo de elasticidade na tração de 30 MPa e 4500 MPa, respectivamente.

2.3 Confeção dos modelos

O concreto para confecção dos elementos do modelo de ligação foi misturado em betoneira, colocado nas fôrmas e adensado em mesa vibratória. Os trechos de viga e pilar foram levados à câmara úmida onde permaneceram em cura até a data de realização dos entalhes. Os entalhes foram realizados com uso de ferramenta elétrica com dois discos de corte justapostos, por via úmida (Fig. 3-a). As peças entalhadas foram lavadas com água e deixadas secar ao ar. Na data da execução do reforço, os entalhes foram limpos com jato de ar comprimido e estopa embebida em álcool isopropílico. A superfície dos elementos também foi limpa com álcool para retirada do resquício de desmoldante. Para montagem dos modelos, posicionaram-se as almofadas de apoio nos consolos, introduzindo-se os chumbadores nos furos das almofadas. Posicionaram-se os trechos de vigas apoiados sobre as almofadas de apoio e em peças de madeira, verificando o prumo (Fig. 3-b) e o alinhamento (Fig. 3-c). Executou-se a solidarização do modelo pela colagem do laminado (Fig. 3-d e Fig. 3-e). O furo do chumbador foi umedecido e preenchido com graute. Dois dias depois, deitou-se o modelo sobre pedaços de placas de madeira compensada. Vedaram-se as extremidades superior e inferior dos vazios entre os elementos da ligação com placas de madeira compensada. Umedeceram-se as superfícies a serem grauteadas. Efetuou-se o grauteamento dos vazios (Fig. 3-f).

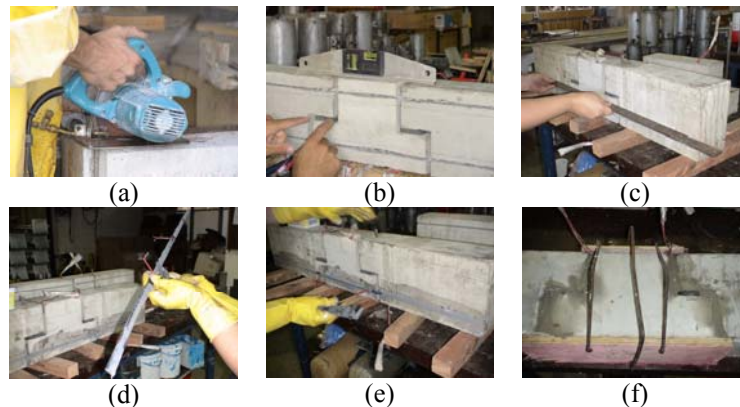


Figura 3 - Confeção dos modelos de ligação reforçados: (a) realização de entalhe; (b) conferência prumo; (c) conferência do alinhamento; (d) colagem do laminado; (e) acabamento do reforço; (f) preenchimento dos vazios com graute.

2.3 Instrumentação e esquema de ensaio

Os modelos foram dotados da instrumentação externa ilustrada nas Figs 4 e 5. Utilizou-se um transdutor de deslocamento posicionado verticalmente a meio vão da viga para medição da flecha. As reações nos apoios foram obtidas nas leituras de células de carga posicionadas sob os apoios. Foram utilizados transdutores de deslocamento, fixados em quadros para suporte da instrumentação presos ao concreto por parafusos, para obtenção do deslocamento relativo entre as seções descontínuas. A instrumentação externa apresenta simetria em relação ao plano perpendicular que contém o eixo longitudinal da peça. O primeiro número na nomenclatura dos transdutores posicionados horizontalmente (Fig. 4) particulariza o transdutor na parte posterior do modelo e o segundo, o transdutor na parte anterior. Buscou-se um posicionamento dos transdutores que permitisse a aferição da deformação tanto das juntas tracionadas quanto das juntas comprimidas. O quadro para suporte da instrumentação foi posicionado em um plano equidistante a dois outros planos de referencia no concreto em que foram coladas cantoneiras metálicas, conforme Figs 4 e 5. Mantiveram-se as distâncias verticais de 11 cm entre os transdutores e 17 cm entre os parafusos de fixação do quadro para suporte da instrumentação e a distância horizontal de 4 cm entre os planos referenciais. Colaram-se extensômetros elétricos nos laminados, na seção da junta da ligação, para obter sua deformação ao longo do ensaio.

O esquema estático do ensaio foi o mesmo para todos os modelos (Figs 4 e 5). O modelo de ligação foi bi-apoiado em dispositivos prismáticos de seção semicircular. O carregamento foi aplicado por

atuador servo-hidráulico e distribuído, com a utilização de blocos metálicos, em uma área que corresponderia à seção do pilar. A Figura 5 é um registro do ensaio realizado no modelo P1 CJ. Destaca-se que os modelos reforçados a momento fletor negativo foram submetidos a ensaio em posição diversa (rotacionados em 180°) da que ocupariam em uma estrutura real.

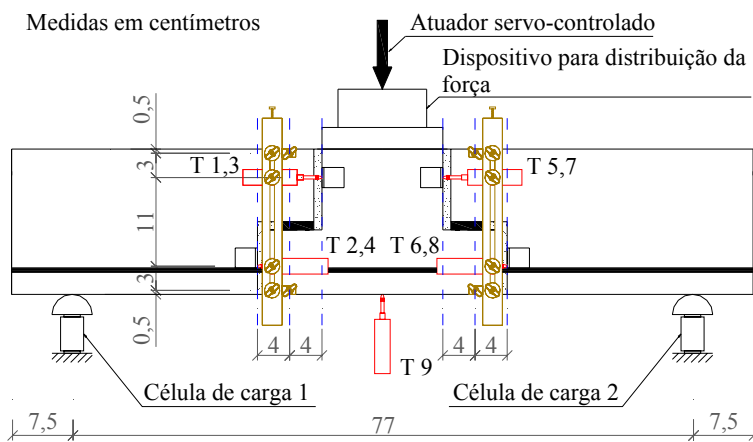


Figura 4 - Configuração esquemática do ensaio e instrumentação externa para os modelos P1CJ.

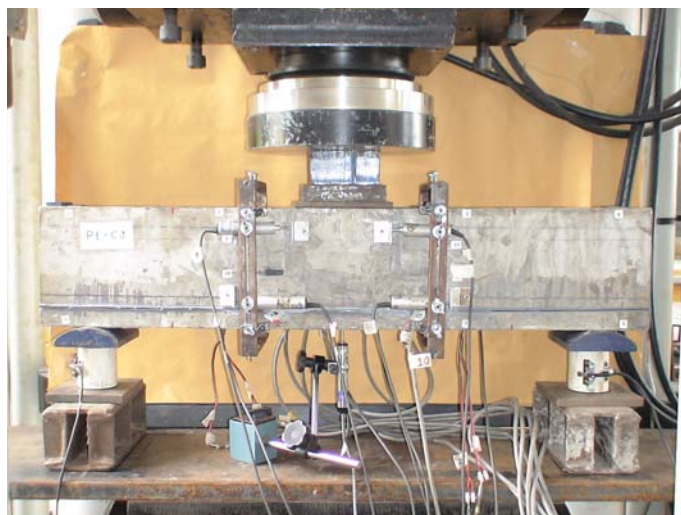


Figura 5 - Registro da instrumentação externa utilizada no ensaio do modelo P1CJ.

Os ensaios foram realizados em ciclos de carga e descarga na máquina universal de ensaios servo-hidráulica INSTRON, sob controle de deslocamento do pistão a uma taxa de 0,005 mm/s. O sistema de aquisição de dados utilizado foi o System 5000 da Vishay. A realização do carregamento em ciclos visou à estabilização do processo de fissuração dos modelos. Nos dois primeiros ciclos de carregamento, aplicou-se uma força de 12 kN (aproximadamente 15% da força máxima estimada). No terceiro e quarto ciclos, aplicou-se uma força de 24 kN (aproximadamente 30% da força máxima estimada). Em seguida realizou-se um ciclo com força de 36 kN (aproximadamente 45% da força máxima estimada). O modelo foi levado à ruptura no sexto ciclo de carregamento.

2. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os modelos romperam devido ao arrancamento do laminado em um processo em que se observaram fissuras inclinadas concentradas principalmente na região próxima às juntas. Na ruptura, observou-se arrancamento de porções de concretos, algumas delas com camadas de laminados ainda aderidas. A Figura 6 ilustra o processo de fissuração do modelo P1 CJ e seu aspecto após a ruptura.

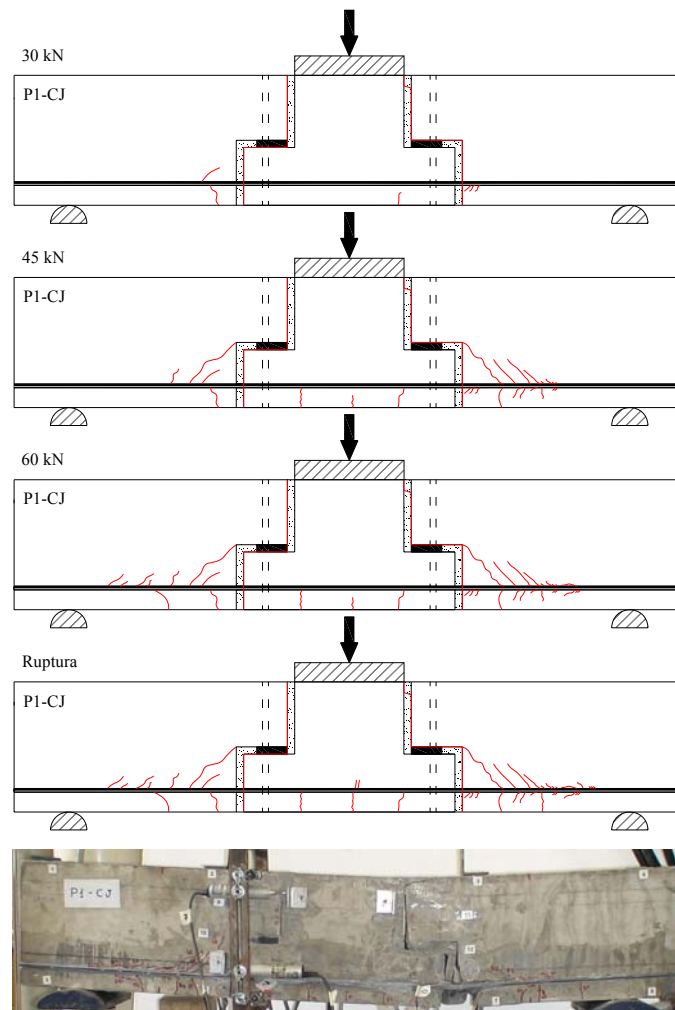


Figura 6 - Processo de fissuração do modelo P1 CJ.

Na Quadro 2, comparam-se os valores de momento máximo ($M_{máx}$) e deformação máxima no laminado ($\epsilon_{L,máx}$), obtidos nos ensaios, com os valores estimados teoricamente ($M_{u,FIB}$ e ϵ_{FIB}) de acordo com o FIB 9.3 TG [5], que enfoca o projeto de estruturas de concreto armadas com barras de FRP. Pelo modelo de cálculo, previu-se a ruptura por esmagamento do concreto do banzo comprimido e assumiu-se a perfeita aderência entre o reforço e o concreto. Embora isso não tenha sido observado, os valores experimentais de momento e deformação foram próximos dos teóricos.

Quadro 2 - Comparação entre valores experimentais e teóricos de momento e deformação.

Modelo	$M_{u,FIB}$ (kN.m)	$M_{máx}$ (kN.m)	$M_{u,FIB}/M_{máx}$	ϵ_{FIB} (‰)	$\epsilon_{L,máx}$ (‰)	$\epsilon_{FIB}/\epsilon_{L,máx}$
N1 CJ	12,83	11,30	1,14	11,37	8,62	1,32
N2 CJ	12,83	13,47	0,95	11,37	9,83	1,16
P1 CJ	12,83	12,78	1,00	11,37	11,27	1,01

As rigidezes dos modelos de ligação foram avaliadas em função das curvas “momento x rotação”. O momento foi calculado na seção intermediária em relação às juntas (Eq. 1), ou seja, a seção em que se fixou o quadro para suporte da instrumentação. Os valores da distância entre o apoio e a seção referencial para a determinação do momento fletor (ℓ_m) e da distância vertical entre os transdutores (dv) foram de 11 cm e 27 cm, respectivamente (Fig. 7). A rotação foi calculada pela Eq. 2, em função da leitura dos transdutores de deslocamento e da distância vertical entre eles. É uma média das rotações obtidas para os dois lados da ligação de cada modelo.

$$M = -\frac{F}{2} \cdot \ell_m \quad (1)$$

$$\phi = \frac{\text{média}(T1/3/5/7) - \text{média}(T2/4/6/8)}{d_v} \quad (2)$$

Onde:

M - momento na seção

F - Força aplicada (soma das leituras das células de carga posicionadas nos apoios)

ℓ_m - distância do apoio à seção referencial

ϕ - rotação

$\text{média}(T1/3/5/7)$ - média das leituras dos transdutores superiores

$\text{média}(T2/4/6/8)$ - média das leituras dos transdutores inferiores

d_v - distância vertical entre os transdutores superiores e inferiores

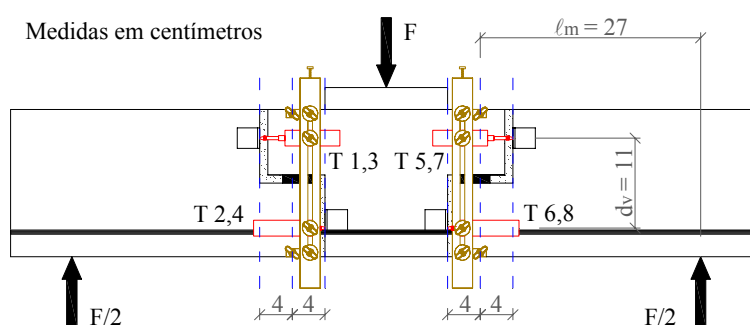


Figura 7 – Esquema estático.

A curva “momento x rotação” é notadamente não-linear com os trechos inicial e final próximos da linearidade (Fig. 8). Em vista disso, adotou-se uma simplificação do comportamento da ligação dividindo-o em dois estágios. Aproximou-se a curva a um comportamento bi-linear. As inclinações dos trechos inicial (K_i) e final (K_f) foram definidas pela regressão linear (Fig. 8). No primeiro caso, de 0 a 30% da carga de ruptura. No segundo, de 70% até a carga de ruptura. O momento atuante na transição do primeiro para o segundo estágio é, por simplificação, denominado momento de transição da ligação (M_{tr}). Os valores do momento de transição variaram de 54% a 64% do momento máximo na face do pilar (Quadro 3). Os valores das rigidezes inicial e final, momentos máximos e momento de transição para todos os modelos estão reunidos no Quadro 3.

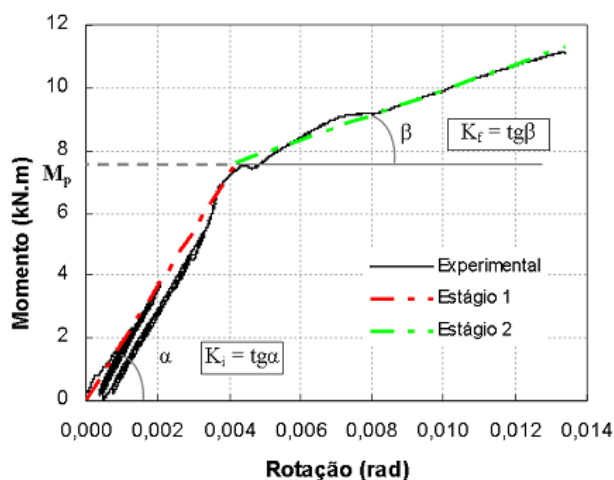


Figura 8 - Curva “momento x rotação” do modelo P1 CJ e a aproximação bi-linear.

Quadro 3 - Resultados relacionados à curva “momento x rotação”.

Modelo	$M_{m\acute{a}x}$ (kN.m)	K_i (kN.m/rad)	K_f (kN.m/rad)	M_{lr} (kN.m)	$M_{lr}/M_{m\acute{a}x}$ (%)
N1 CJ	11,30	1514,10	191,70	6,67	59
N2 CJ	13,47	1489,70	185,45	8,31	62
PI CJ	12,78	1814,80	398,20	7,61	60

Os limites de classificação quanto à rigidez segundo o Eurocode 3 [6] têm como variável o comprimento, L, da viga conectada pela ligação. Para que se pudessem classificar as ligações estudadas, estimou-se que o comprimento de uma viga compatível com a seção do trecho de viga do modelo (10 cm x 18 cm) seria em torno de 1,80 m. Os limites de classificação segundo o Eurocode 3 [6] foram calculados para esse comprimento de viga. Como todos os valores experimentais de rigidez foram menores que o limite superior ($K_{superior}$) e maiores que o limite inferior ($K_{inferior}$) do Eurocode 3 [6], as ligações são classificadas como semi-rígidas (Quadro 4).

Quadro 4 - Classificação das ligações quanto à rigidez.

Modelo	K_i (kN.m/rad)	$K_{superior}$ (kN.m/rad)	$K_{inferior}$ (kN.m/rad)
N1 CJ	1514,1	26141,13	522,82
N2 CJ	1489,7	26141,13	522,82
PI CJ	1814,8	26141,13	522,82

Buscou-se um meio teórico de estimar a rigidez inicial da ligação. Considerou-se para isso que a rigidez da ligação é função da deformabilidade do concreto no trecho em que se verifica a descontinuidade. A rotação da ligação, ϕ , foi considerada como a razão entre o encurtamento da fibra mais comprimida do concreto, $\Delta\ell_c$, ao longo do comprimento ℓ_L (Fig. 9) e a distância à linha neutra, x.

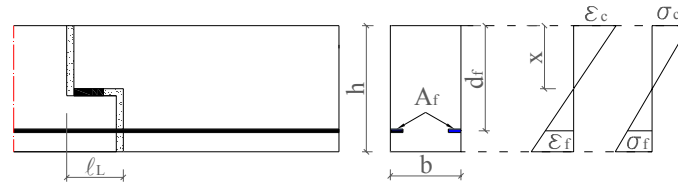


Figura 9 - Aspectos geométricos em que se baseou a formulação para estimativa da rigidez inicial.

$$\phi = \frac{\Delta\ell_c}{x} \quad (3)$$

O encurtamento na fibra mais comprimida pode ser determinado por:

$$\Delta\ell_c = \ell_L \epsilon_c \quad (4)$$

Onde:

ϵ_c - deformação no concreto

Admite-se a Eq. 5 para cálculo da deformação

$$\epsilon_c = \frac{\sigma_c}{E_c} \quad (5)$$

Onde:

E_c - módulo de elasticidade do concreto

σ_c - tensão no concreto

Adotando-se a inércia da seção fissurada, I_{II} , calcula-se a tensão no concreto.

$$\sigma_c = \frac{Mx}{I_{II}} \quad (6)$$

Onde:

M - momento atuante na seção

A expressão para o cálculo do encurtamento resulta em:

$$\Delta \ell_c = \frac{\ell_L Mx}{E_c I_{II}} \quad (7)$$

Substituindo na Eq. 3.

$$\phi = \frac{\ell_L M}{E_c I_{II}} \quad (8)$$

A rigidez é a razão entre o momento e a rotação.

$$K_i = \frac{M}{\phi} \quad (9)$$

Por fim, define-se a Eq. 10 para estimativa da rigidez inicial da ligação. No Quadro 5 comparam-se os valores experimentais de rigidez inicial com aqueles calculados por meio da Eq. 10 (K_i , teórico).

$$K_i = \frac{E_c I_{II}}{\ell_L} \quad (10)$$

Quadro 5 - Comparação entre os valores teóricos e experimentais da rigidez inicial.

<i>Modelo</i>	$K_{i, \text{teórico}}$ (kN.m/rad)	K_i (kN.m/rad)	$K_{i, \text{teórico}} / K_i$
<i>N1 CJ</i>	1875,65	1514,1	1,24
<i>N2 CJ</i>	1875,65	1489,7	1,26
<i>P1 CJ</i>	1875,65	1814,8	1,03

A formulação para o cálculo da rigidez inicial conduziu a valores coerentes e aceitáveis considerando-se a simplicidade da idealização do comportamento da ligação. As diferenças percentuais entre os valores de K_i , calculados pela Eq. 10 e obtidos experimentalmente, variaram de 3% a 26%

3. CONCLUSÕES

Neste trabalho avaliou-se a aplicabilidade da técnica NSM no reforço e incremento de rigidez de ligações viga-pilar de estruturas pré-moldadas. Para tanto, foram realizados ensaios em modelos reduzidos de ligação reforçados pela técnica proposta. Os resultados dos ensaios foram avaliados e permitiram as seguintes conclusões:

- O estudo realizado demonstrou que a técnica NSM é aplicável ao incremento da rigidez e da resistência de ligações de estruturas de concreto pré-moldado, com rapidez e eficiência compatíveis com o processo industrializado;
- O processo de execução inerente à técnica de reforço foi testado, concluindo-se que ele tem condições de ser assimilado sem grandes dificuldades pelos agentes executores;
- No tipo de ligação e configuração particularmente analisada, a aplicação do graute mostrou-se satisfatória, praticamente reconstituindo a condição de ligação monolítica, em relação aos esforços de compressão;
- Desenvolveram-se expressões teóricas que oferecem uma boa estimativa da rigidez inicial da ligação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia de Estruturas, onde foram realizados os ensaios experimentais, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) que financia o projeto temático “Nucleação e incremento da pesquisa, inovação e difusão em concreto pré-moldado e estruturas mistas para a modernização da Construção Civil” do qual fez parte esta investigação.

REFERÊNCIAS

- [1] BLASCHKO M.; ZILCH, K. - Rehabilitation of Concrete Structures with PRFC Strips Glued into Slits. Proceedings of the Twelfth International Conference on Composite Materials, Paris, 1999.
- [2] ASPLUND, S.O. Strengthening bridge slabs with grouted reinforcement. Journal of the American Concrete Institute, v. 20, n. 6, p. 397-406, Jan., 1949.
- [3] DE LORENZIS, L.; TENG, J. G. Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures. Composites: Part B, 38, Available online 18 October 2006. www.sciencedirect.com/locate/compositesb
- [4] HELENE, P. R. L. Manual para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto. PINI, São Paulo, 1992.
- [5] FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON. FIB 9.3 TG – FRP as reinforcement in concrete (proposta de norma). Sheffield, Inglaterra, 2003.
- [6] COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. CEB-FIP Model Code for Concrete Structures. Paris, 1990.