

METODOLOGIA PARA MEDIDA DE ROTAÇÃO E CURVATURA EM ZONA DE DISTÚRBO DE VIGAS DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO

Methodology for Rotation and Curvature Measurement in Disturbance Zone of Precast Concrete Beams

Bruna Catoia ¹, Carlos Alberto Tobal Justo ², Marcelo de Araujo Ferreira ³



PALAVRAS CHAVE:

Concreto pré-moldado;
Vigas;
Rotação;
Curvatura;
Instrumentação.

KEYWORDS:

Precast concrete;
Beams;
Rotation;
Curvature;
Instrumentation.

RESUMO: O objetivo deste trabalho é investigar e validar metodologias para medir rotação e curvatura, com o intuito de facilitar a instrumentação de modelos compostos por elementos de concreto pré-moldado. A fim de testar a viabilidade das metodologias para instrumentação, foram analisados ensaios de vigas biapoiadas, dimensionadas para alcançar a ruína nos domínios de deformação 2 (subarmada com deformação no aço 0,01), 3 (subarmada com deformação limite do concreto 0,0035) e no limite entre os domínios 3 e 4 (ruptura do concreto e aço no início do patamar de escoamento). Com os resultados desses estudos foi possível fornecer subsídios para racionalização e simplificação dos procedimentos experimentais, o que permite a utilização de elementos pré-moldados fornecidos diretamente pela indústria, diminuindo os custos e acelerando as pesquisas de modo significativo.

ABSTRACT: The aim of this research is to investigate and validate methodologies for rotations and curvature measurement in order to facilitate the instrumentation of models composed of precast concrete members. To assess the viability of the methodologies for instrumentation, tests of supported beams were carried out, designed to achieve failure in the strain domain 2 (under-reinforcement with steel strain of 0.01), domain 3 (under-reinforcement with concrete limit strain of 0.0035), and in the limit between domains 3 and 4 (balanced failure). With the results of these studies, it was possible to provide subsidies to rationalization and simplification of the experimental procedures that allow the employ of precast members provided directly by the industry, reducing the costs and accelerating the researches in a significant way.

* Contato com os autores:

Publicado em 27 de dezembro de 2022

¹ e-mail: bcatoia@ufscar.br (B. Catoia)

Doutora em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

² e-mail: justocivil@yahoo.com.br (C. A. T. Justo)

Engenheiro Civil, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

³ e-mail: netpre@ufscar.br (M. de A. Ferreira)

Professor Doutor, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

1. INTRODUÇÃO

Enquanto para as seções de concreto armado a relação momento-curvatura é obtida com base em modelos analíticos consagrados na literatura técnica, no caso da obtenção da relação momento-rotação nas ligações viga-pilar, a qual está relacionada à rigidez à flexão, ainda se faz necessária a realização de ensaios laboratoriais.

As deformabilidades (ou as suas relações inversas de rigidez) das ligações entre os elementos pré-moldados podem ser obtidas ou estimadas por procedimentos experimentais e/ou analíticos. Segundo o PCI Manual (1988), os resultados dos ensaios de ligações pré-moldadas deveriam gerar informações sobre o comportamento da ligação, visando a formulação de modelos analíticos racionais para o projeto. Entretanto, existem dificuldades práticas para o desenvolvimento de equações analíticas que representem o comportamento da rigidez à flexão das ligações viga-pilar em estruturas pré-moldadas, principalmente porque isto requer o conhecimento dos mecanismos internos de deformação presentes na região da ligação, onde se tem um comportamento complexo das tensões e deformações.

No Brasil, o estudo de ligações semirrígidas em estruturas pré-moldadas iniciou-se com a pesquisa de mestrado apresentada em Ferreira (1993). A partir do estudo sistemático sobre o comportamento dos mecanismos internos de deformação, foi proposto naquela pesquisa que o desenvolvimento de um modelo analítico que representasse a deformabilidade de ligações típicas poderia ser feito a partir do equacionamento adequado dos mecanismos internos de deformação das ligações. Como a limitação desta metodologia está na necessidade de validação experimental, em Ferreira (1999) foram realizados ensaios em ligações viga-pilar articuladas e com resistência à flexão por meio de chapas soldadas, onde os equacionamentos analíticos puderam ser comparados com os resultados experimentais. Outros trabalhos na EESC-USP que utilizaram metodologia semelhante foram Soares (1998) e Miotto (2002). Em pesquisas posteriores de pós-doutorados, na Inglaterra e no Brasil, os estudos teóricos e experimentais sobre ligações semirrígidas foram continuados, com o acréscimo do estudo e desenvolvimento de procedimentos de projeto e análise para estruturas pré-moldadas considerando o efeito das ligações semirrígidas. Os resultados destas pesquisas estão apresentados em Ferreira e Elliott (2002) e em Ferreira et al. (2003).

Outras pesquisas foram desenvolvidas com o intuito de analisar experimentalmente o comportamento de ligações viga-pilar, tais como em Souza (2006), Baldissera (2006), Catoia (2007), Jeremias Júnior (2007), Bertolucci (2010), Bachega (2013), Hadade (2016) e Barros (2018).

Apesar das metodologias experimentais serem consideradas uma boa aproximação para o comportamento real da ligação, existem várias dificuldades para se reproduzir em laboratório as mesmas condições das estruturas pré-moldadas nos canteiros. Por outro lado, além do alto custo envolvido nos ensaios estáticos para ligações, deve-se lembrar que os resultados desses ensaios só são aplicáveis para ligações com o mesmo detalhamento e dimensionamento das ligações ensaiadas (com parâmetros idênticos para materiais e geometria), sendo feitas ponderações por parte dos projetistas com relação à aplicação destes resultados em projetos de ligações semelhantes. Os procedimentos analíticos que estão baseados em modelos mecânicos procuram reproduzir o comportamento das ligações com base nas hipóteses de funcionamento dos mecanismos internos de deformação. Devido à dificuldade para desenvolver modelos que representem adequadamente o comportamento das ligações semirrígidas, uma opção interessante é o desenvolvimento de modelos mecânicos, corroborados por ensaios experimentais, onde são analisados os mesmos parâmetros internos considerados nos modelos teóricos.

Diante desse contexto, o objetivo geral deste trabalho foi investigar e validar metodologias experimentais com o emprego de diferentes instrumentos de medida para obter relações entre rotação e curvatura, dentro do estudo de deformabilidades de ligações viga-pilar em estruturas de concreto pré-

moldado. Para determinar a rotação foram empregados dois tipos de instrumentos: clinômetro, que fornece leitura direta, e transdutores, que indicam de forma indireta os valores da rotação. Tais resultados são essenciais para caracterizar as relações momento-rotação nas ligações viga-pilar. A curvatura foi determinada de acordo com medidas de deformação realizadas de forma interna e externa à estrutura pré-moldada. As medidas internas foram feitas com o emprego de extensômetros (strain-gages), e as externas foram realizadas por dois instrumentos: extensômetros elétricos de base removível, que fazem a leitura direta da deformação, e pelos transdutores, que fornecem os resultados de forma indireta.

A partir da racionalização e da simplificação dos procedimentos experimentais, este estudo foi justificado pela redução de custos e da duração dos ensaios de ligações, de modo a melhorar a confiabilidade dos resultados experimentais e possibilitar uma contribuição significativa para outras pesquisas.

Para o desenvolvimento deste trabalho foram dimensionadas três vigas biapoiadas, com aplicação de duas forças simétricas em relação ao centro das peças, com 1 m de distância uma da outra. Os critérios de cálculo foram baseados nos domínios de deformações para peças de concreto armado submetidas a flexão, sendo diferenciados pela menor ou maior quantidade de armadura de tração. Uma das vigas foi calculada para que a ruína ocorresse no domínio 2 (deformação plástica excessiva da armadura, admitida igual a 0,01), outra no domínio 3 (ruptura do concreto com deformação 0,0035 na fibra mais comprimida e armadura no patamar de escoamento) e a última no limite entre os domínios 3 e 4 (ruptura do concreto com armadura no início do patamar de escoamento). Esses critérios têm o objetivo de avaliar o que ocorre entre o estágio I (concreto não fissurado) e o estágio 2 (concreto fissurado), para os diferentes domínios, além de analisar o comportamento dos instrumentos de medida em vigas menos e mais deformáveis.

O enfoque do trabalho foi dado, justamente, aos métodos de instrumentação interna e externa em vigas de concreto pré-moldado. Nesse sentido, foi comparado o uso de diversos aparelhos para medir rotação e curvatura nas peças de concreto armado, a fim de apresentar procedimentos experimentais mais simplificados e mais otimizados.

2. CARACTERIZAÇÃO DOS ESTÁDIOS DE TENSÃO EM PEÇAS FLETIDAS

A partir de ensaios com vigas biapoiadas e aplicação de duas forças concentradas simétricas (Ensaio de Stuttgart) (Figura 1), podem ser identificados os estádios de tensão no concreto (I, II e III), que ocorrem em peças fletidas. Esses três estádios acontecem com o aumento da força, até o colapso da peça.

2.1 CARACTERÍSTICAS DE UMA SEÇÃO NO ESTÁDIO I

O estágio I caracteriza-se pelo não aparecimento de tensões de tração no concreto maiores que sua resistência à tração. Além disso, no estágio I não há o aparecimento de fissuras visíveis; o diagrama de tensões normais ao longo da seção transversal é linear; as tensões são proporcionais às deformações. Como as deformações específicas dos materiais concreto e aço são iguais em uma mesma camada, pode-se efetuar a homogeneização da seção transversal para a obtenção das características geométricas da seção ideal, na qual a área de aço é transformada em área de concreto equivalente, por meio da relação entre os seus módulos de elasticidade. Para efeito de cálculo, são consideradas a seção bruta de concreto e a respectiva área equivalente corrigida. Aspectos relativos a uma viga no estágio I são mostrados na Figura 1.

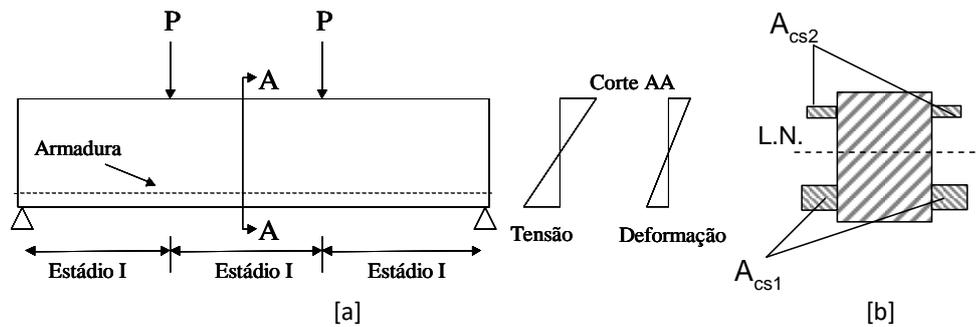


FIGURA 1: [a] Viga no estágio I. [b] Seção equivalente de concreto no estágio I.

2.2 CARACTERÍSTICAS DE UMA SEÇÃO NO ESTÁDIO II

Na medida que se aumenta o valor da força aplicada, com o conseqüente aumento do momento fletor na peça, o valor da tensão na borda tracionada ultrapassa a resistência do concreto à tração, iniciando-se, assim, a segunda fase, denominada estágio II, em que são observados os seguintes aspectos: as fissuras de tração são visíveis; os esforços de tração são resistidos apenas pela armadura; admite-se que a distribuição das tensões de compressão no concreto continua linear. É de fundamental importância, nesse estágio, conhecer o posicionamento da linha neutra, já que a parte fissurada da seção é desprezada no cálculo no estágio II. Na Figura 2 ilustram-se características de uma viga no estágio II.

A determinação da seção ideal, com a transformação da seção de aço na correspondente seção de concreto, segue a mesma relação entre os módulos de elasticidade (aço e concreto), sendo que para o concreto utiliza-se o módulo de elasticidade secante. A variação das deformações do aço e do concreto é admitida linear, valendo a hipótese de Bernoulli, ao longo da altura da seção transversal.

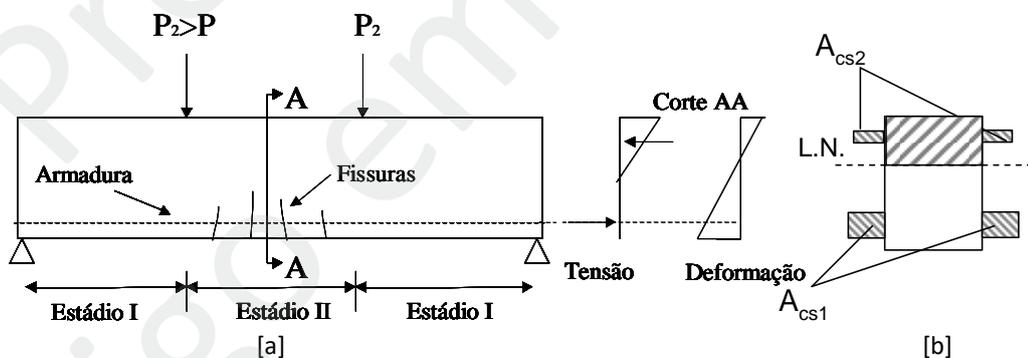


FIGURA 2: [a] Viga no estágio II. [b] Seção equivalente de concreto no estágio II.

2.3 CARACTERÍSTICAS DE UMA SEÇÃO NO ESTÁDIO III

O estágio III caracteriza-se pela ruptura do concreto comprimido, após sua plastificação. Verifica-se claramente que, próximo ao estágio III, há uma grande variação da curvatura, mesmo para pequenos acréscimos do momento fletor. Uma viga com a região central no estágio III é indicada na Figura 3. Os aspectos principais nesta fase são: a peça apresenta-se bastante fissurada, havendo um deslocamento da linha neutra em direção à face comprimida, com a redução da área de concreto comprimido; o diagrama de tensão não é linear e tende a ficar uniforme junto à face comprimida, com a maior parte das fibras trabalhando com sua tensão máxima, com deformações superiores a 0,002; a fibra mais comprimida atinge a deformação específica de ruptura, admitida igual a 0,0035; supõe-se que a distribuição de tensões no concreto se dê segundo um diagrama parábola-retângulo.

O dimensionamento das peças de concreto armado submetidas a momento fletor é feito no Estado Limite Último (ELU), correspondendo ao diagrama de tensões no estágio III, visando adequada segurança e economia, de forma que as estruturas resistam aos esforços, sem alcançar o colapso. As verificações de deslocamentos excessivos e de fissuração são feitas com base nos Estados Limites de Serviço (ELS), em que se levam em conta as ações reais atuantes, considerando-se os estádios I e II.

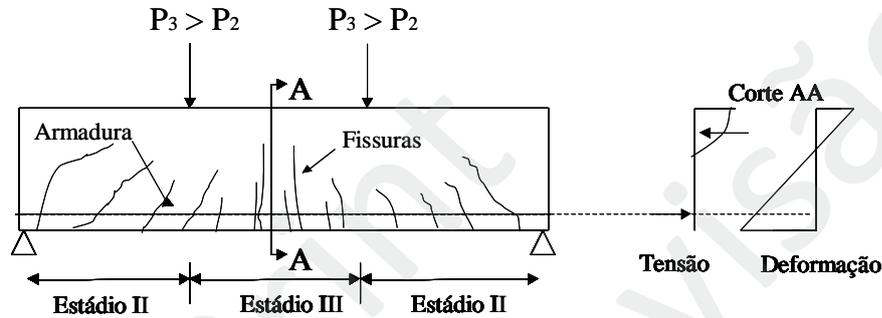


FIGURA 3: Viga com região central no estágio III.

3. DOMÍNIOS DE DEFORMAÇÃO

A ruína da seção transversal para qualquer tipo de flexão, no ELU, é caracterizada pelas deformações específicas de cálculo, do concreto e do aço, que atingem (uma delas ou ambas) os valores últimos das deformações específicas desses materiais.

Assim, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), são definidos seis domínios de deformação (Figura 4), a partir dos conjuntos de deformações específicas do concreto e do aço tracionado, ao longo de uma seção transversal submetida a tensões normais. Esses domínios representam as diversas possibilidades de ruína da seção. A cada par de deformações específicas de cálculo, no aço e no concreto, corresponde um esforço normal, se houver, e um momento fletor na seção.

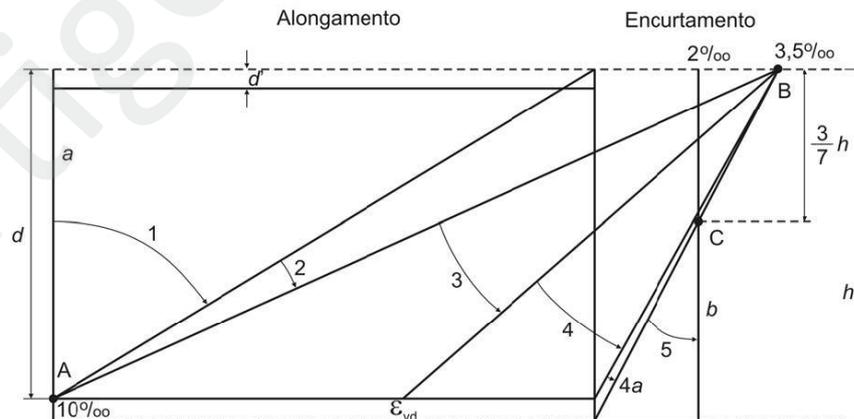


FIGURA 4: Domínios de deformação de uma seção no ELU.

FONTE: ABNT (2014).

4. DETERMINAÇÕES TEÓRICAS

A seguir são descritos alguns modelos teóricos para a determinação de parâmetros como curvatura, rotação, flecha e rigidez equivalente, utilizados para posterior comparação com resultados obtidos experimentalmente.

4.1 CARACTERÍSTICAS DE UMA SEÇÃO NO ESTÁDIO III

O Model Code 90 apresenta um modelo não-linear, mediante a relação momento-curvatura, sendo função da fissuração do concreto e, também, das equações constitutivas dos materiais aço e concreto (Figura 5).

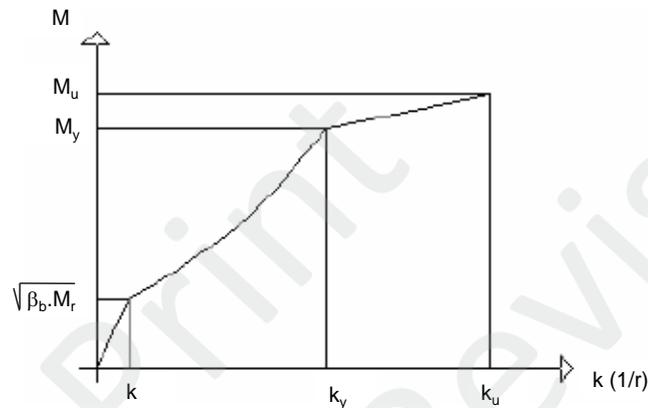


FIGURA 5: Relação momento versus curvatura de acordo com o MC 90.
FONTE: MC 90 [2]

Em que:

M = momento fletor no elemento;

M_r = momento de início de fissuração;

M_y = momento de escoamento do aço;

M_u = momento último;

$k (1/r)$ = curvatura;

β_b = produto de coeficientes, função da aderência das barras de aço e repetitividade dos carregamentos.

Ressalta-se aqui a maior confiabilidade da estrutura quando da avaliação dos deslocamentos e dos esforços solicitantes, na medida que se estimam melhor os parâmetros de rigidez do concreto armado.

A complexidade expressa pela não-linearidade do concreto fica evidente, uma vez que as seções apresentam rigidezes diferentes, conforme o nível de solicitação, correspondendo aos três estádios já descritos. Assim, a curvatura teórica da viga biapoiada pode ser determinada a partir de sua rigidez, conforme a Equação 1:

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{(EI)_{eq}} \quad \text{Eq. [1]}$$

Em que:

M = momento no meio do vão da viga (kN.mm);

$(EI)_{eq}$ = rigidez equivalente da viga (kN.mm²).

4.2 FLECHAS E ROTAÇÃO

Os modelos de avaliação de deformações em estruturas de concreto adotam, em geral, uma combinação de comportamento dos elementos estruturais nos estádios I (peça não fissurada) e II (peça fissurada). As flechas são avaliadas nas seções críticas dos elementos estruturais, que são analisados isoladamente.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) destaca que a deformação real da estrutura depende, sobretudo, do processo construtivo, das propriedades dos materiais, principalmente do módulo de elasticidade e da resistência à tração, na idade de sua efetiva solitação. Existe também uma grande variabilidade das deformações reais, não se podendo esperar grande precisão nas previsões de deslocamentos fornecidas pelos processos analíticos.

Para a análise de flechas imediatas em vigas de concreto armado, a NBR 6118 (ABNT, 2014) adota o momento de inércia equivalente, baseado na fórmula de Branson (1968), utilizada por diversas normas internacionais, consistindo em um valor intermediário entre o momento de inércia da seção no estágio I e no estágio II:

$$I_{eq} = \left(\frac{M_r}{M_{at}} \right)^n \cdot I_I + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_{at}} \right)^n \right] \cdot I_{II} \quad \text{Eq. [2]}$$

Em que:

I_{eq} = momento de inércia equivalente, para uma seção ou para toda a peça (mm^4);

I_I = momento de inércia no estágio I (da seção bruta ou homogeneizada) (mm^4);

I_{II} = momento de inércia no estágio II (mm^4);

M_r = momento de fissuração do concreto ($\text{kN}\cdot\text{mm}$);

M_{at} = momento atuante na seção mais solicitada ($\text{kN}\cdot\text{mm}$);

N = valor igual a 4, para situações em que a análise é feita em apenas uma seção, ou igual a 3, quando se faz a análise ao longo de todo o comprimento da peça (kN).

Assim, o valor da flecha imediata para viga biapoiada com duas forças concentradas e simétricas pode ser calculado teoricamente com a Equação 3:

$$f = \frac{F \cdot a}{24 \cdot E \cdot I_{eq}} \cdot (3 \cdot L^2 - 4 \cdot a^2) \quad \text{Eq. [3]}$$

Em que:

f = flecha imediata (mm);

F = força aplicada (kN);

a = distância entre o apoio e as forças concentradas (mm);

L = distância entre os apoios (mm).

A rotação teórica na extremidade da viga biapoiada pode ser obtida por meio da Equação 4:

$$\theta = \frac{L \cdot P \cdot a}{2 \cdot (E \cdot I)_{eq}} \cdot \left(L - \frac{a}{L} \right) \quad \text{Eq. [4]}$$

5. PROGRAMA EXPERIMENTAL

5.1 CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS ENSAIADOS

Foram ensaiadas três vigas com diferentes quantidades de armadura, para avaliar o comportamento da região entre o estágio I, em que a tensão no concreto não ultrapassa sua resistência à tração, e o estágio II, no qual o concreto não mais resiste as tensões de tração, na maioria dos pontos abaixo da linha neutra (LN). Para obter menor ou maior quantidade de armadura para cada uma das vigas (pouco armada, medianamente armada ou muito armada), elas foram dimensionadas considerando, como

critério, os domínios de deformação no estado limite último. As características de cada uma das vigas ensaiadas são indicadas na Tabela 1.

Todos os modelos têm seção transversal de 15 cm por 30 cm, vão de 395 cm e comprimento total de 415 cm. As armaduras de tração, para as três vigas, são constituídas por três barras de 8 mm, quatro barras de 12,5 mm e quatro barras de 16 mm, respectivamente. Os estribos são os mesmos para as três vigas: 33 estribos de 6,3 mm cada 12,5 cm. As duas barras longitudinais construtivas, localizadas na parte superior da viga, são de 8 mm para a viga 1, e de 12,5 mm, para as vigas 2 e 3.

TABELA 1: Características das vigas ensaiadas.

| Vigas | Características | Taxa de armadura (kg/m³) | Domínios de deformação |
|--------------|------------------------|--|--------------------------------|
| 1 | Pouco armada | 88,4 | Domínio 2 |
| 2 | Medianamente armada | 189,21 | Domínio 3 |
| 3 | Muito armada | 250,42 | Limite entre os domínios 3 e 4 |

FONTE: Autoria Própria.

5.2 CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS ENSAIADOS

O objetivo dos ensaios foi obter leituras de deformação, deslocamento e rotação. Neste contexto, para validar e comparar essas leituras, foi realizado o ensaio piloto em que foi feita uma instrumentação específica em uma viga biapoiada, como a apresentada na Figura 6. Na Figura 7 pode-se observar um modelo real ensaiado.

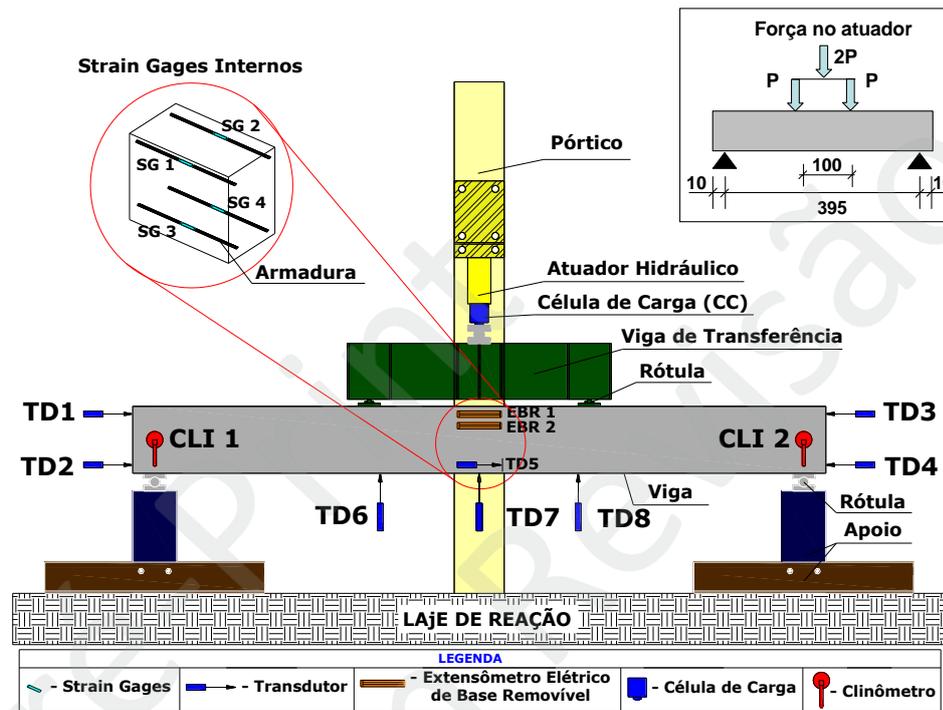


FIGURA 6: Instrumentação dos modelos ensaiados.
FONTE: Autoria Própria.



FIGURA 7: Modelo real ensaiado.
FONTE: Autoria Própria.

Foram empregadas e analisadas duas formas de medida de rotação: indireta, por meio de transdutores (Figura 8a) e medida direta, com clinômetros (Figura 8b). Os transdutores posicionados na região da extremidade da viga fornecem a rotação média, calculada a partir dos valores de deslocamentos obtidos, enquanto que os clinômetros fornecem medidas diretas na seção do eixo de rotação, onde foram posicionados. Para obter os dados de curvatura foram utilizados: para as medidas diretas de deformações, *strain gages* (Figura 8c) fixados na armadura e extensômetros elétricos de base removível (Figura 8d), os quais são frequentemente utilizados para aferições em corpos de prova, e foram oportunamente testados nas vigas desse experimento. O extensômetro elétrico de base removível foi posicionado na base exterior da viga devido à dificuldade de se instrumentar tal região com *strain gages* em sua pré-fabricação, acarretando, assim, uma redução no custo da instrumentação.

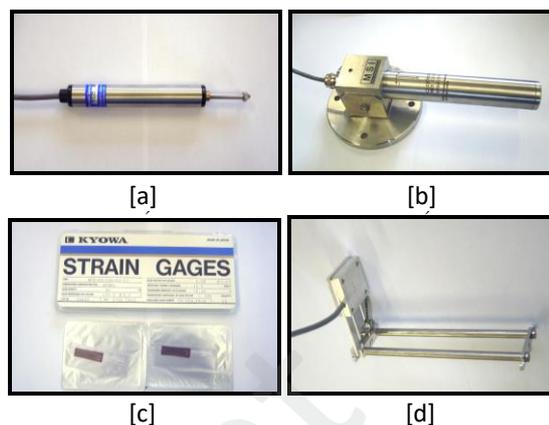


FIGURA 8: [a] Transdutor utilizado para medir deslocamentos; [b] Clinômetro utilizado para medir diretamente a rotação. [c] Strain gages utilizados para medir deformação em barras de armadura; [d] Extensômetro elétrico de base removível.

FONTE: Autoria Própria.

6. RESULTADOS E ANÁLISES

Com o uso de planilhas e de processos de cálculo, foi possível realizar simulações e cálculos teóricos e, conseqüentemente, obter curvas momento-curvatura, momento-rotação, dados de deslocamentos e de rigidez, para as três vigas em estudo.

Os cálculos foram processados nas planilhas segundo um critério de informações fornecidas como, por exemplo, dimensões necessárias das vigas, resistência à compressão, entre outras, e combinadas com as fórmulas teóricas previamente estudadas, sendo determinados: as curvaturas teóricas por meio da equação 1; os momentos de inércia equivalentes teóricos por meio da Equação 2; as flechas imediatas teóricas pela Equação 3 e as rotações teóricas na extremidade da viga por meio da Equação 4. A partir daí foram criados gráficos para a comparação com os dados experimentais.

6.1 VIGA NO DOMÍNIO 2

Foi aplicado, no modelo em questão, um carregamento incremental monotônico com o emprego de um atuador hidráulico com capacidade de 500 kN. Antes desse procedimento, foi realizado um ciclo de escorvamento, com carregamento da ordem de 4,5 kN. Após essa fase, iniciou-se novamente a aplicação do carregamento, atingindo uma força última da ordem de 30 kN (momento fletor de 22,125 kN.m no centro da viga). A força de projeto no Estado Limite Último foi estimada em 27 kN, no atuador central (momento fletor de 19,91 kN.m no centro da viga), força essa que foi dividida em dois pontos de aplicação, no trecho central da viga, distantes de 1 m entre si, resultando na reação de 13,5 kN nos apoios. Adicionalmente, a carga prevista para o Estado Limite de Serviço (ELS) foi estimada em 12 kN (8,85 kN.m no centro da viga).

Na Figura 9a, pode-se observar os gráficos momento versus flecha, considerando valores teóricos e experimentais. As leituras experimentais de flecha foram obtidas a partir do deslocamento no transdutor posicionado no centro da viga (TD7). Considerando os carregamentos de 12 kN e 27 kN, as flechas no ELS e no ELU foram de 2,9 mm e 16,4 mm, respectivamente. A flecha máxima alcançada no ensaio foi de 23,1 mm, para o carregamento de 30 kN no atuador central. Na Figura 9b, estão apresentados os gráficos de momento versus rotação nos apoios, considerando as rotações obtidas de forma direta, com os clinômetros, e indiretamente, por meio dos transdutores, ambos posicionados na extremidade da viga. Com os clinômetros, foi possível obter leituras globais de rotação, enquanto que os transdutores

fornecheram leituras relativas entre a viga e o pilar, ou seja, da ligação propriamente dita. A partir dos dados apresentados na Figura 9b, pode-se observar que as rotações obtidas, tanto pelos clinômetros e pelos transdutores quanto a estimativa teórica, estão próximas, atestando a qualidade e a confiabilidade do uso do clinômetro para medida de rotações.

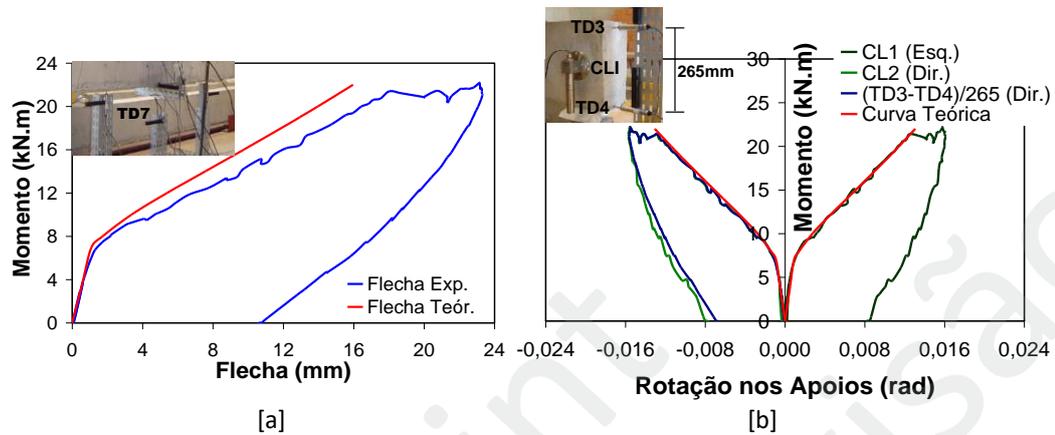


FIGURA 9: Viga no domínio 2: [a] Gráfico momento versus flecha; [b] Gráfico momento versus rotação, na extremidade livre.

FONTE: Autoria Própria.

Para determinar a curvatura no meio do vão da viga, foram empregados três procedimentos: leituras de deslocamentos verticais, obtidos pelos transdutores; rotações das extremidades da viga, obtidas pelos clinômetros; e por meio do extensômetro elétrico de base removível, juntamente com o *strain gage*. Na Figura 10a, pode-se observar os gráficos de momento versus curvatura, para os três métodos considerados. A partir desses gráficos, pode-se constatar a consistência dos resultados obtidos, considerando os métodos empregados. Além disso, na Figura 10b, pode-se verificar as rigidezes da viga, obtidas por meio de flechas, rotações, curvaturas e procedimento teórico.

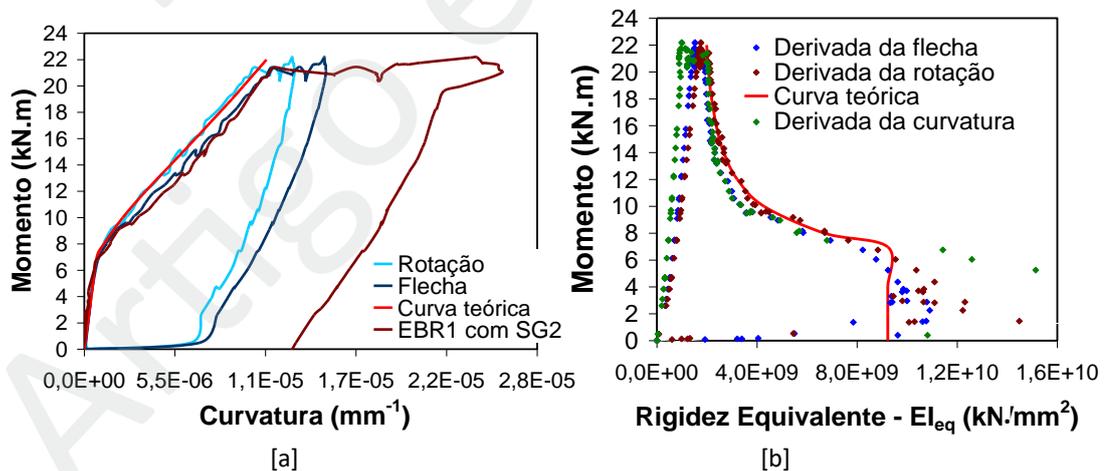


FIGURA 10: Domínio 2: [a] Gráfico momento versus curvatura, na extremidade livre da viga; [b] Gráfico momento versus rigidez equivalente, no meio do vão.

FONTE: Autoria Própria.

6.2 VIGA NO DOMÍNIO 3

Assim como na viga calculada no domínio 2, foi aplicado um carregamento incremental monotônico por meio de um atuador hidráulico, também com capacidade para 500 kN. Antes desse procedimento, foi realizado um ciclo de escorvamento, com carregamento aplicado da ordem de 9 kN, mas

que não acomodou a peça de concreto armado da mesma forma que a viga do domínio 2. Após essa etapa, iniciou-se a aplicação do carregamento, atingindo uma força última da ordem de 84 kN (momento fletor de 61,95 kN.m no centro da viga). A força de projeto no ELU foi estimada em 70 kN no atuador central (momento fletor de 51,62 kN.m no centro da viga), que produziu uma reação de 35 kN nos apoios.

Na Figura 11a é apresentada a flecha, no meio do vão da viga, obtida a partir do deslocamento no transdutor central (TD7). Considerando os carregamentos de 70 kN, a flecha no ELU foi de 22 mm. A flecha máxima alcançada no ensaio foi de 28,8 mm, para o carregamento de 84 kN no atuador central. Na Figura 11b estão apresentadas as rotações, que foram obtidas por meio dos clinômetros, posicionados no eixo de giro da peça, sendo coincidente com o eixo da rótula do apoio da extremidade. Além disso, na Figura 11b, são mostradas as rotações deduzidas com o uso dos transdutores, posicionados nas extremidades da viga e fixados no elemento de apoio. A partir dos dados experimentais apresentados na Figura 11b, pode-se observar que as rotações obtidas, tanto pelos clinômetros quanto pelos transdutores, foram satisfatoriamente próximas.

A curvatura no meio da viga foi deduzida primeiro com as leituras de deslocamentos verticais, apresentadas pelos três transdutores (TD6, TD7 e TD8), posicionados nos pontos de aplicação da força e no centro do vão. Outra forma para a obtenção da curvatura foi sua dedução por meio da rotação na extremidade e, também, por meio do extensômetro elétrico de base removível, junto com o *strain gauge*.

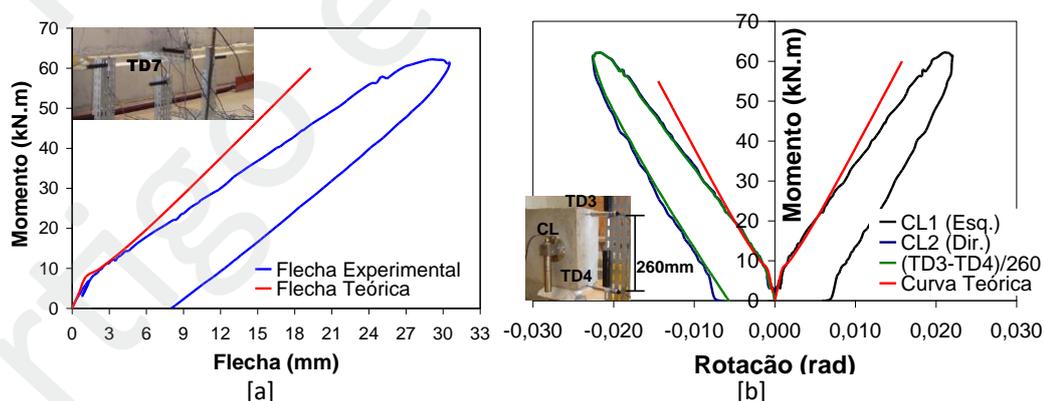


FIGURA 11: Viga calculada no domínio 3: [a] Gráficos de momento versus flecha; [b] Gráficos de momento versus rotação livre.

FONTE: Autoria Própria.

Como pode ser visto na Figura 12a, todas as curvas obtidas foram satisfatoriamente próximas, no início do ensaio, até um momento de 20 kN.m. A partir desse ponto, as curvaturas deduzidas por meio dos transdutores e dos clinômetros seguem com valores próximos, mas distanciando-se dos dados teóricos e da medida deduzida com o auxílio do extensômetro de base removível 1 (EBR1) e do *strain gauge* 4. Isso pode ser explicado pelo fato das leituras tanto dos *strain-gages* como dos extensômetros de base removível serem mais suscetíveis à fissuração em relação às leituras de flecha e rotação. Dessa forma, ao serem utilizados, é importante que os *strain gages* e os extensômetros sejam sempre posicionados em regiões onde não ocorre a concentração de fissuras, em regiões comprimidas. Na Figura 12b, são apresentados os dados relativos às rigidezes da viga calculada no domínio 3, que mostram a proximidade com os valores teóricos calculados. Pode-se observar que com o início da fissuração tem-se uma brusca redução da rigidez da viga, após o espalhamento das fissuras observa-se que a rigidez se mantém com pouca variação até alcançar o ELU, com a ruína da viga.

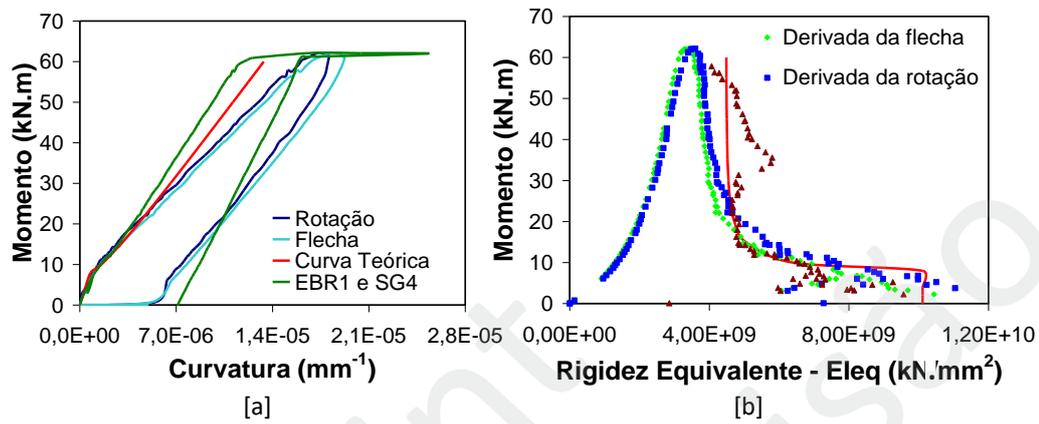


FIGURA 12: Viga calculada no domínio 3: [a] Gráfico momento versus curvatura; [b] Gráfico momento versus rigidez equivalente.

FONTE: Autoria Própria.

6.3 VIGA NO LIMITE ENTRE OS DOMÍNIOS 3 E 4

Aplicou-se nesta viga um carregamento incremental monotônico com a utilização do mesmo atuador hidráulico, com capacidade para 500 kN. No início, realizou-se um ciclo de escorvamento, com carregamento aplicado da ordem de 8 kN. Após essa fase, iniciou-se a aplicação do carregamento, atingindo uma carga última da ordem de 133 kN no atuador central (momento de 98,08 kN.m).

Na Figura 13a é apresentada a flecha no meio da viga, obtida a partir do deslocamento do transdutor central (TD7). O momento de projeto no ELU foi estimado em 72,47 kN.m no centro da viga (força de 98,26 kN no atuador central), correspondendo a uma flecha de cerca de 24 mm. A flecha máxima alcançada no ensaio foi de 36,5 mm, para o carregamento de 133 kN. Na Figura 13b, pode-se observar as rotações da extremidade livre da viga, obtidas com os clinômetros, transdutores e teoricamente. A partir dos gráficos ilustrados na figura. 13b, pode-se observar que as rotações obtidas, tanto pelos clinômetros quanto pelos transdutores, foram próximas das relativas à simulação teórica, para o trecho antes do momento de fissuração da viga. Além disso, observa-se a simetria nas medidas de rotação entre o clinômetro fixado na extremidade esquerda e o fixado na direita, demonstrando um ensaio bem estável em relação às possíveis acomodações que a peça poderia sofrer.

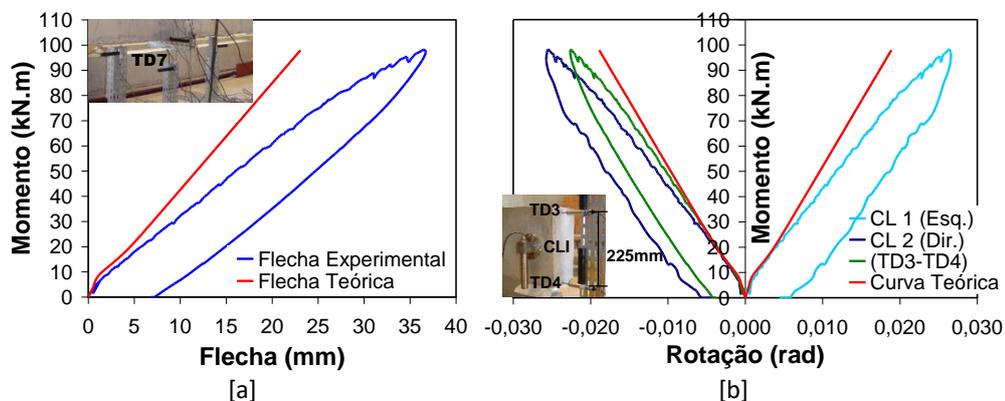


FIGURA 13: Viga calculada no limite dos domínios 3 e 4: [a] Momento versus flecha; [b] Momento versus rotação.

FONTE: Autoria Própria.

A curvatura no meio da viga foi obtida primeiramente com as medidas de deslocamentos verticais mostradas pelos três transdutores (TD6, TD7 e TD8), posicionados nos pontos de aplicação da força e no centro do vão, no meio do vão. A curvatura também foi obtida de outras duas formas: pela dedução da rotação na extremidade e pelo uso dos extensômetros de base removível EBR1 e EBR2.

Como pode ser observado na Figura 14a, os gráficos apresentaram-se muito próximos, ao longo de todo o ensaio. Todos esses resultados deduzidos apresentaram semelhança com a simulação teórica, até o valor de 20 kN.m. A partir desse ponto, as curvaturas deduzidas por meio dos transdutores, clinômetros e extensômetros de base removível seguem com valores próximos. Na Figura 14b, são apresentados os valores relativos às rigidezes da viga calculada no limite dos domínios 3 e 4, que mostram uma menor tendência à proximidade com os valores teóricos, diferenciando-se, assim, dos outros modelos ensaiados. Observaram-se fissuras com abertura de até 0,7 mm, para uma carga de 128kN no atuador central (momento fletor de 94,4 kN.m no centro da viga), no ensaio da viga dimensionada para trabalhar no limite entre os domínios 3 e 4.

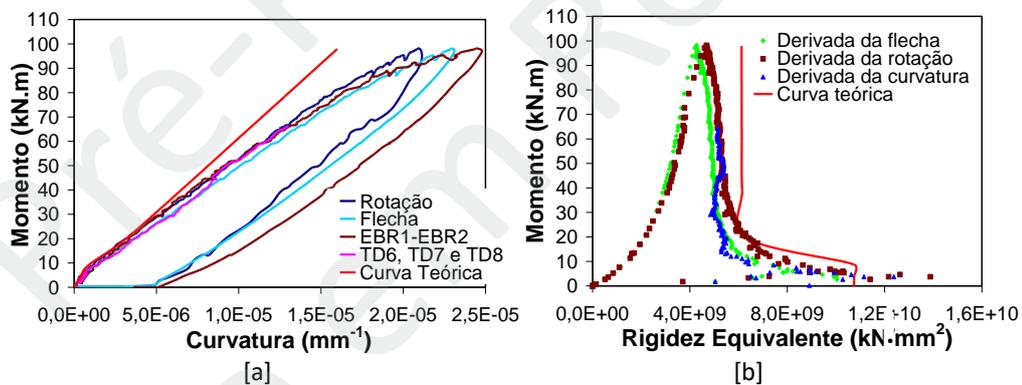


FIGURA 14: Limite dos domínios 3 e 4: [a] Momento x curvatura; [b] Momento x rigidez.

FONTE: Autoria Própria.

6.4 FISSURAÇÃO DOS MODELOS

Durante os ensaios foram marcadas nas vigas as configurações das fissuras, de acordo com o aumento da força aplicada pelo atuador central. Essas configurações podem ser melhores entendidas com base na Figura 15, na qual se pode observar que a configuração da fissuração se comportou como o esperado, ou seja, fissuras características de flexão.

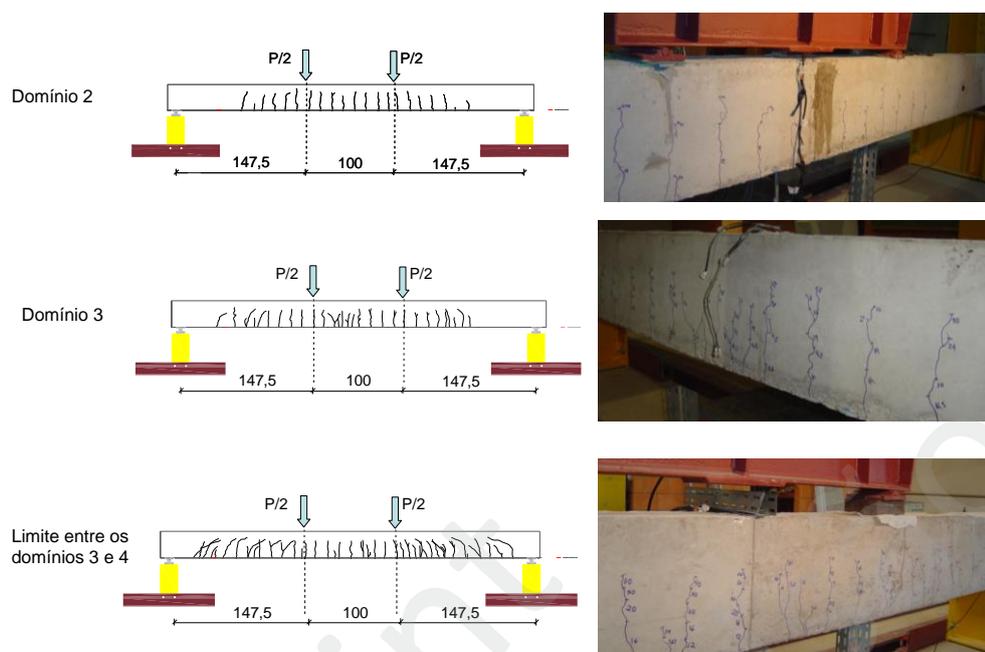


FIGURA 15: Fissuração das vigas calculadas nos domínios 2, 3 e no limite entre 3 e 4.

FONTE: Autoria Própria.

A abertura das fissuras foi analisada por meio de fissurômetro. Observou-se, por exemplo, fissuras com abertura de até 0,7 mm para uma carga de 128 kN, no ensaio da viga dimensionada para trabalhar no limite entre os domínios 3 e 4. Nesse ensaio, verificou-se também que o espalhamento das fissuras foi até a carga de 80 kN (momento fletor de 59 kN.m no centro da viga). Em seguida foi verificado que as fissuras apenas se abriam e não se espalhavam mais. Foram verificadas, nas extremidades, fissuras verticais de flexão, que posteriormente caracterizaram o início da influência do cisalhamento.

7. CONCLUSÕES

Com a investigação experimental realizada, foi possível a análise de procedimentos experimentais para medida de rotação e de curvatura em elementos fletidos de concreto armado, visando a aplicação de diferentes aparelhos de medição. No caso desta pesquisa, as rotações consideradas referem-se ao giro livre nos apoios de uma viga de concreto armado submetida à flexão simples. Neste contexto, em todos os modelos ensaiados, observou-se que as rotações medidas diretamente, a partir dos clinômetros, estiveram muito próximas daquelas obtidas indiretamente, por meio dos transdutores posicionados na extremidade da viga. Com os ensaios foi possível também constatar que os valores das rotações obtidas com os clinômetros e com os transdutores foram muito próximos. Isto é possível desde que eles tenham o mesmo centro de rotação e o mesmo referencial com relação ao giro.

Quanto à análise de procedimentos para a obtenção da curvatura na região central da viga, os ensaios realizados mostraram que, a partir de leituras externas de deslocamentos verticais no trecho central da viga, é possível obter uma curvatura média para o trecho considerado. De fato, para o ensaio específico de uma viga apoiada, submetida à flexão simples (com carregamento em dois pontos distantes de aproximadamente $0,25 L$, sendo L a distância entre os apoios), observou-se que a curvatura média na região central da viga coincidiu com as curvaturas deduzidas a partir das expressões para a flecha e para a rotação livre nos apoios, obtidas considerando as hipóteses da Resistência dos Materiais.

Assim, aplicando-se a Fórmula de Branson nessas expressões teóricas, foi possível obter uma boa previsão para as curvaturas dos três modelos ensaiados. Com base nessa constatação, a curvatura média de uma viga submetida às mesmas condições de carregamento poderia ser deduzida a partir apenas das leituras experimentais da flecha no meio do vão e de rotações medidas por meio de clinômetros nas extremidades da viga, junto aos eixos dos apoios rotulados.

Os extensômetros elétricos de base removível são mais indicados para a instrumentação da região comprimida da face lateral da viga, em virtude das leituras desses equipamentos serem mais afetadas para condições de maior fissuração. Para o caso da viga calculada no limite entre os domínios 3 e 4 (modelo mais deformável), foi possível obter a curvatura a partir das leituras dos extensômetros de base removível.

Portanto, neste trabalho, foi possível validar as metodologias de ensaio empregadas, obtendo-se resultados coerentes com os valores teóricos. Com isso, tais metodologias e os resultados experimentais obtidos beneficiarão estudos futuros sobre a deformabilidade de elementos de concreto armado.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto** - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

BACHEGA, L.A. **Estudo teórico-experimental de ligação viga-pilar com consolo metálico embutido em estruturas pré-moldadas de concreto**. São Carlos. Dissertação (Mestrado em estruturas) – Universidade Federal de São Carlos, 2013.

BALDISSERA, A.B. **Estudo experimental de uma ligação viga-pilar de concreto pré-moldado parcialmente resistente a momento fletor**. 149p. Dissertação Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

BARROS, L. S. P. **Verificação do comportamento de ligações viga-pilar com continuidade de armadura negativa por meio de luvas rosqueadas**. 142p. Mestrado em Estruturas e Construção Civil - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

BERTOLUCCI, F. S. **Investigação de compósitos cimentícios para preenchimento de juntas da interface e de nichos em ligações e estruturas pré-moldadas**. Ilha Solteira. 185f. Dissertação (Mestrado em materiais) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2010.

BRANSON, D. E. **Procedures for computing deflections**. ACI Journal, 65. New York, September, 1968.

CATOIA, B. **Comportamento de Vigas Protendidas Pré-moldadas com Ligações Semi-rígidas**. São Carlos. 149f. Dissertação (Mestrado em estruturas). Universidade Federal de São Carlos, 2007.

Concrete Institute. 2. PCI Connections Committee. **Design and Typical Details of Connections for Precast and Prestressed Concrete**, 2nd ed. Chicago, IL: Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI), 1988.

FERREIRA, M. A. **Estudo das Deformabilidades das Ligações para Análise Linear em Pórticos Planos de Elementos Pré-moldados de Concreto**, 166 p., Dissertação de Mestrado. EESC-USP, 1993.

FERREIRA, M.A. **Deformabilidade de ligações viga-pilar de concreto pré-moldado**. São Carlos, 231 pp, Tese de Doutorado, EESC-USP, 1999.

FERREIRA, M. A., ELLIOTT, K.S. **Analytical Design Procedure for Semi-Rigid Connections in Precast Concrete Structures** (80 pp.), University of Nottingham, UK. RESEARCH REPORT (English), 2002.

FERREIRA, M.A., El Debs, M.K., Elliott, K.S. **Determinação Analítica da Relação Momento-Rotação em Ligações Viga-Pilar de Estruturas Pré-Moldadas de Concreto**. V SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO. Junho. São Paulo. SP, 2003.

HADADE, M. Â. S. **Comportamento de ligações viga-pilar típicas com continuidade de armadura negativa em estruturas pré-fabricadas**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 228p. Tese (Doutorado), 2016.

JEREMIAS, A. C. J. **Análise da estabilidade de estruturas pré-moldadas de concreto: influência das ligações semirrígidas.** Dissertação (Mestrado em estruturas). São Carlos. Universidade Federal de São Carlos, 2007.

MIOTTO, A. M. **Ligações viga-pilar de estruturas de concreto pré-moldado com ênfase ao estudo da deformabilidade ao momento fletor.** São Carlos. Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.

SOARES, A. M. M. **Análise estrutural de pórticos planos de elementos pré-fabricados de concreto considerando a deformabilidade das ligações.** São Carlos. 178p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998.

SOUZA, A.S. **Comportamento de elementos pré-moldados de concreto com ligações semirrígidas.** São Carlos. 96f. Dissertação (Mestrado em estruturas) – Universidade Federal de São Carlos, 2006.