

# **PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS PARA A DETERMINAÇÃO DA DEFORMABILIDADE E DA RESISTÊNCIA DE UMA LIGAÇÃO VIGA-PILAR COM ELASTÔMERO SIMPLES E CHUMBADOR**

Marcelo de Araújo Ferreira<sup>1</sup> & Mounir Khalil El Debs<sup>2</sup>

## **RESUMO**

*No presente trabalho é apresentado um estudo de caso de uma ligação com almofada de elastômero e chumbador, para a qual é apresentado um desenvolvimento analítico para a determinação da deformabilidade ao cisalhamento e feita uma abordagem de um procedimento para a determinação da resistência ao cisalhamento. São apresentados os resultados dos ensaios de cisalhamento, onde foram variados a geometria da almofada e o diâmetro do chumbador.*

*A partir do modelo analítico para a determinação da deformabilidade ao cisalhamento da ligação obteve-se valores razoáveis em relação aos resultados experimentais, sendo em média 23% superiores. Todavia, tal modelo não se aplicou ao caso de uma ligação com almofada com um fator de forma maior do que cinco. As resistências ao cisalhamento calculadas corresponderam a valores entre 96 à 100% em relação aos valores experimentais.*

*Palavras-chave: concreto pré-moldado; ligações típicas; ligações semi-rígidas; mecanismos de deformação; deformabilidades de ligações.*

## **1 INTRODUÇÃO**

### **1.1 Informações preliminares**

O estudo do comportamento estrutural possui uma grande importância para o desenvolvimento dos sistemas construtivos em estrutura de concreto pré-moldado. Dentre as prioridades de pesquisa nesta área, as ligações entre os elementos estruturais são de grande interesse de estudo.

Do ponto de vista do comportamento estrutural, a presença das ligações é que diferencia basicamente uma estrutura de concreto pré-moldado de uma estrutura convencional. As ligações são regiões onde ocorrem concentrações das tensões que podem ou não mobilizar deslocamentos e esforços decorrentes dos elementos por elas ligados, fazendo com que haja uma redistribuição desses esforços ao longo da

---

<sup>1</sup> Doutor em Engenharia de Estruturas, EESC-USP, marcelof@sc.usp.br

<sup>2</sup> Professor Associado do Departamento de Engenharia de Estruturas, EESC-USP, mkdebs@sc.usp.br

estrutura. Desta forma, o desempenho de um sistema estrutural e, conseqüentemente, o êxito nas suas aplicações, está diretamente relacionado com o desempenho das suas ligações.

Ao contrário do que ocorre na análise das estruturas monolíticas de concreto, correntemente, as estruturas de concreto pré-moldado são concebidas e projetadas a partir da hipótese de que as suas ligações viga-pilar se comportam como articulações perfeitas. De fato, esta consideração ocorre em função de que a maior parte das estruturas pré-moldadas são empregadas em edificações com poucos pavimentos, tendo-se uma tendência maior para o emprego das ligações consideradas como articuladas.

Os procedimentos para a análise estrutural de pórticos com nós semi-rígidos estão amplamente divulgada na literatura técnica. Em MONFORTON & WU (1963), BRUN & PICARD (1976) e em FAFARD et al. (1990), encontram-se desenvolvimentos matemáticos, onde são apresentadas modificações para as matrizes de rigidez e para os esforços de bloqueio dos elementos da estrutura, para se levar em conta as deformabilidades das ligações. Estes desenvolvimentos estão apresentados de forma detalhada em FERREIRA (1993), onde também foram incorporadas deformabilidades axiais nas extremidades dos elementos de barra, além da flexão. Tais procedimentos podem ser aplicados diretamente na modificação de rotinas, que se utilizem do processo dos deslocamentos, para transformá-las em programas computacionais para o cálculo de pórticos com nós semi-rígidos. Por outro lado, atualmente existem vários programas disponíveis para o cálculo estrutural, os quais possuem em suas rotinas modelos para a consideração da rigidez das ligações nas extremidades dos elementos estruturais, com a utilização de molas que compõem os mecanismos de deformação da ligação.

Todavia, todo este conhecimento e mesmo os recursos computacionais atuais não são aplicados na prática para a análise das estruturas pré-moldadas, devido à falta do conhecimento que se tem sobre as deformabilidades das ligações típicas que compõem as estruturas pré-moldadas. Neste contexto, a determinação das deformabilidades nas ligações constitui-se em uma questão chave para a aplicação prática da análise das estruturas pré-moldadas.

## **1.2 Determinação analítica da deformabilidade de uma ligação**

A determinação dos valores das deformabilidades das ligações em estruturas de concreto pré-moldado tem sido feita, geralmente, por meio de resultados experimentais e, raramente, por meio de modelos analíticos ou numéricos. Entretanto, as metodologias que se baseiam somente nos procedimentos experimentais possuem um custo elevado e os resultados quantitativos obtidos nos ensaios, a rigor, são limitados apenas para as ligações com o mesmo detalhamento, materiais e dimensões da ligação ensaiada, tendo-se assim uma aplicação restrita do ponto de vista prático. Também, na maior parte dos trabalhos experimentais existentes tem-se a preocupação apenas com a determinação do valor global da rigidez da ligação, não sendo fornecidas maiores indicações sobre os parâmetros internos da ligação que interferem na deformabilidade da ligação. Por esta razão, ainda não se formou uma base de dados suficiente sobre o comportamento qualitativo da rigidez, nem se dispõe de critérios e diretrizes para o projeto de ligações típicas, que levem em conta a rigidez.

Entre as alternativas metodológicas para a abordagem da questão, é consenso entre os especialistas de que a utilização de modelos analíticos para a determinação da deformabilidade em ligações é de grande interesse para a aplicação nos procedimentos de projeto das ligações, uma vez que possibilitam ao projetista condições de avaliar a rigidez da ligação em função dos parâmetros dos componentes internos da ligação.

No presente trabalho é apresentada a aplicação de uma metodologia analítica para a determinação das deformabilidades em duas ligações viga-pilar típicas, a qual teve início em FERREIRA (1993) e foi consolidada posteriormente em FERREIRA (1999). Dentro dessa metodologia, os parâmetros internos relacionados com as deformações dos elementos que compõem a ligação são definidos como “mecanismos básicos de deformação”. O modelo analítico procura obter a deformabilidade de uma determinada ligação através de um equacionamento que represente o comportamento em conjunto dos mecanismos básicos de deformação presentes na ligação.

A expressão final para a deformabilidade da ligação resulta da associação das deformabilidades dos componentes da ligação. A associação dos mecanismos de deformação, por sua vez, é feita a partir da montagem do sistema de forças para a ligação na sua configuração deformada, associando-se a cada força uma deformação correspondente a um dado mecanismo de deformação (representada por uma mola), fazendo a compatibilidade dos deslocamentos.

## **2 PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS APLICADOS À LIGAÇÃO VIGA-PILAR COM ALMOFADA DE ELASTÔMERO NÃO FRETADO E CHUMBADOR**

As ligações viga-pilar com almofada de elastômero simples e chumbador têm sido largamente empregadas no Brasil, com aplicações em estruturas para galpões de uso múltiplo e também para edificações de mais de um pavimento com pequena altura, em razão do seu baixo custo e da sua simplicidade construtiva. Na figura 1 são apresentados alguns dos detalhamentos utilizados para essa ligação.

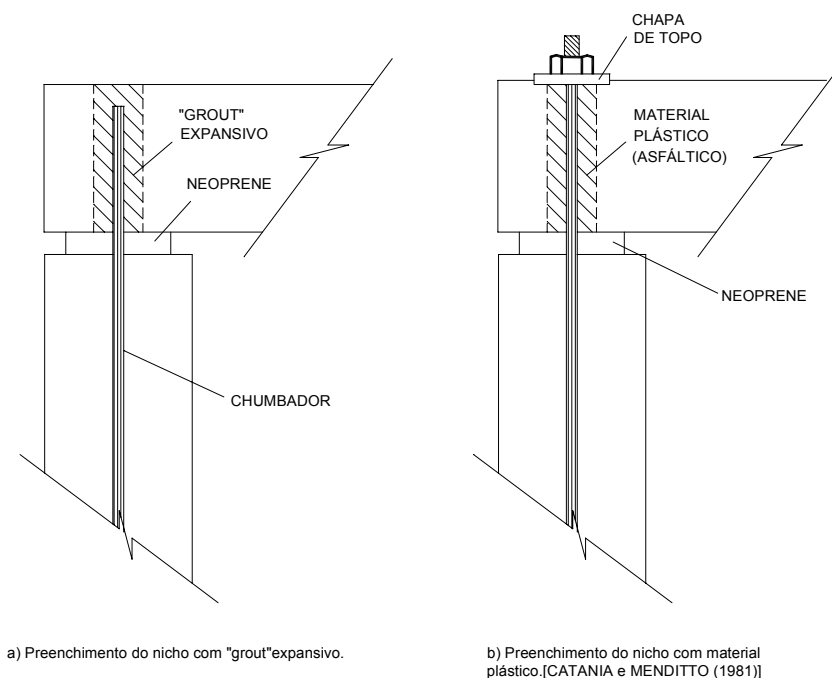


Figura 1 – Detalhamentos para a ligação viga-pilar com almofada de elastômero e chumbador

Tradicionalmente, considera-se que o chumbador possui apenas a função de garantir a estabilidade lateral do elemento de viga, não se levando em conta os esforços horizontais transmitidos pela ligação. Todavia, em razão do detalhamento construtivo corrente no Brasil, conforme indicado na figura 1a, onde o nicho do chumbador é preenchido com graute não retrátil, tem-se a solidarização do chumbador com ambos os elementos. Desta forma, a ligação oferece uma restrição parcial aos deslocamentos horizontais relativos, fazendo com que o chumbador transmita esforços horizontais da viga para a coluna. Compreender o funcionamento deste mecanismo é de suma importância para que se possa estimar os esforços de restrição na ligação.

A presença da almofada de elastômero na interface da ligação proporciona uma altura livre entre os elementos, fazendo com que haja uma excentricidade entre as forças de cisalhamento horizontais nos elementos, gerando solicitações combinadas de cortante e flexão no chumbador. Este fenômeno depende da relação existente entre o diâmetro do chumbador e da espessura da almofada na interface da ligação.

O comportamento ao cisalhamento da ligação, tanto com relação à sua deformabilidade quanto à sua resistência, é influenciado pelo efeito do atrito na interface da ligação entre os elementos de concreto. LIN (1991) verificou que a deformabilidade ao cisalhamento da ligação está inversamente relacionada com o atrito na almofada de elastômero. ENGSTRÖM (1992a) verificou que o efeito do atrito na ligação contribui para o acréscimo da resistência última ao cisalhamento da ligação, gerando uma tensão de tração no chumbador, sendo, neste para esta situação, necessário que o chumbador esteja ancorado em ambas as suas extremidades. Este mecanismo, conhecido como sistema "tie connections", foi estudado por LINDBERG (1992) para ligações viga-pilar com almofada de elastômero

em traves planas submetidas à forças horizontais. Para grandes deslocamentos relativos entre os elementos de viga e de coluna, os chumbadores atuam como tirantes, conferindo uma resistência residual para a estrutura.

## 2.1 Cálculo da deformabilidade ao cisalhamento da ligação

Em FERREIRA (1999) é apresentado um desenvolvimento de equacionamento analítico para o cálculo da deformabilidade ao cisalhamento da ligação, conforme apresentado a seguir. Inicialmente, considerou-se a ocorrência de três mecanismos de deformação presentes na ligação, sendo:

1. *Mecanismo de Deformação ao Cisalhamento no Elastômero Não fretado*, (MDCI-EN), associado à deformabilidade  $\lambda_{\tau n}$ ;
2. *Mecanismo de Deformação ao Cisalhamento de uma Barra Inserida no concreto*, (MDCI-BI), associado à deformabilidade  $\lambda_{\tau bi}$ ;
3. *Mecanismo de Deformação ao Cisalhamento de uma Barra bi-engastada em dois elementos de concreto com altura Livre entre si*, (MDCI-BL), associado à deformabilidade  $\lambda_{\tau bl}$ .

Na figura 2 é apresentada uma esquematização por meio de molas, as quais representam os mecanismos de deformação presentes na ligação. As deformabilidades  $\lambda_{\tau bi}$  e  $\lambda_{\tau bl}$  estão associadas em série entre si. Estas, por sua vez, estão associadas em paralelo à deformabilidade ao cisalhamento do elastômero não fretado,  $\lambda_{\tau n}$ . A partir destas associações entre os mecanismos básicos de deformação a deformabilidade total de cisalhamento na ligação,  $\lambda_{\tau lig}$ , pode ser escrita por:

$$\lambda_{\tau lig} = \left( \frac{1}{\lambda_{\tau n}} + \frac{1}{\lambda_{\tau bl} + \lambda_{\tau bi}} \right)^{-1} \quad (1)$$

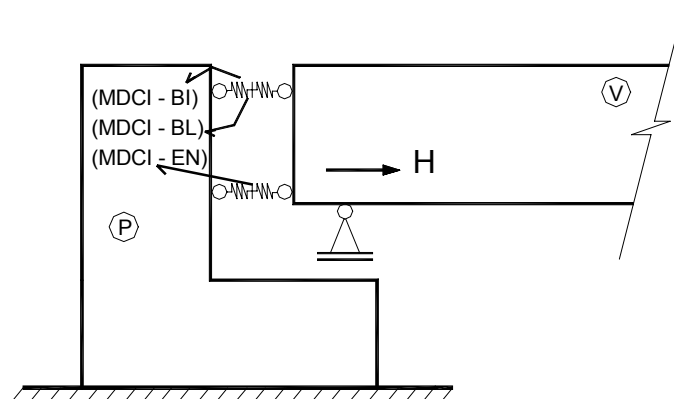


Figura 2 – Esquema com molas para o mecanismo de deformação ao cisalhamento em ligação viga-pilar com almofada de elastômero não fretado e chumbador

A deformabilidade ao cisalhamento da almofada de elastômero não fretado,  $\lambda_{\tau n}$ , é dada por:

$$\lambda_{tn} = \frac{h_n}{GA_o} \quad (2)$$

onde:

$h_n$  - espessura da almofada de elastômero

$A_o$  - área da superfície de apoio efetiva do elastômero

$G$  - módulo de deformação transversal

A deformabilidade ao cisalhamento da barra do chumbador na altura livre, considerada como uma barra bi-engastada com comprimento correspondente à espessura da almofada de elastômero,  $\lambda_{tbl}$ , é dada por:

$$\lambda_{tbl} = \frac{16 \cdot h_n^3}{3 \cdot \pi \cdot E_s \cdot \phi_b^4} \quad (3)$$

onde:

$E_s$  - módulo de elasticidade da barra do chumbador

$\phi_b$  - diâmetro da barra do chumbador

Em DEI POLI et al. (1992) é apresentado um desenvolvimento para o cálculo da deformabilidade ao cisalhamento de uma barra inserida em um elemento de concreto,  $\lambda_{tbi}$ , o qual foi baseado na analogia de uma viga sobre apoio elástico, solicitada transversalmente, ajustada por relações experimentais.

Todavia, no caso da ligação estudada tem-se uma barra inserida em dois elementos de concreto, com uma almofada de elastômero na interface da ligação, tendo-se assim uma excentricidade entre as solicitações horizontais nos elementos de concreto. Desta forma, tem-se uma alteração no mecanismo de deformação do chumbador nos trechos internos ao concreto, havendo a necessidade de se fazer alguns ajustes no equacionamento proposto originalmente por DEI POLI et al. (1992).

Procurando levar em conta esses efeitos, com base nas informações existentes na literatura e nos resultados experimentais obtidos em FERREIRA (1999), a deformabilidade ao cisalhamento de um dos trechos da barra inserido em um elemento de concreto, levando em conta os efeitos da interface da ligação na rigidez da barra, é dada por:

$$\lambda_{tlig} = \left[ 3,5 \cdot \alpha^3 \cdot E_s \cdot I_b \right]^{-1} \quad (4)$$

O fator “ $\alpha$ ” apresentado em DEI POLI et al. (1992), relaciona o módulo de rigidez do concreto com a rigidez da barra do chumbador, sendo dado pela expressão:

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{k_c \phi_b}{4E_s I_b}} \quad (4.1)$$

$$k_c = 127 \sqrt{f'_c} / (\phi_b)^{2/3} \text{ [MPa / mm]} \quad (4.2)$$

onde:

$K_c$  - módulo de rigidez de referência do concreto (em  $MPa/mm$ )  
 $\varnothing_b$  - diâmetro da barra (em  $mm$ )  
 $I_b$  - momento de inércia da barra  
 $f'_c$  - resistência à compressão do concreto (em  $MPa$ )

Para “n” barras dispostas em uma mesma linha da ligação, estando as mesmas inseridas em dois elementos de concreto com resistências diferentes, das quais derivam-se respectivamente os fatores “ $\alpha_1$ ” e “ $\alpha_2$ ”, a deformabilidade total de cisalhamento da ligação,  $\lambda_{dig}$ , pode ser obtida pela expressão:

$$\lambda_{\tau lig} = \left[ \frac{G \cdot A_o}{h_n} + (n \cdot E_s \cdot I_b) \cdot \left( \frac{h_n^3}{12} + \frac{1}{3,5 \cdot \alpha_1^3} + \frac{1}{3,5 \cdot \alpha_2^3} \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (5)$$

## 2.2 Resistência ao cisalhamento de uma barra inserida em um elemento de concreto submetida à ação de cisalhamento

Em ENGSTRÖM (1992a) é apresentada a teoria para o cálculo da resistência ao cisalhamento em barras inseridas em elementos de concreto. Para uma reação distribuída “q” ao longo do chumbador, para o concreto atingindo deformações plásticas, a capacidade ao cisalhamento do chumbador é obtida a partir da condição de equilíbrio para a seção de momento máximo  $M_{máx}$ . O mecanismo plástico da ligação ocorrerá quando forem formadas rótulas plásticas em ambos os lados restritos do chumbador.

Quando existe uma altura livre entre os dois elementos, devido à presença de uma almofada de elastômero, haverá uma excentricidade entre as solicitações horizontais de cisalhamento no chumbador, sendo que a excentricidade “e” deverá ser tomada como sendo a metade da altura livre entre os dois elementos, sendo  $e \cong h_n/2$ , onde  $h_n$  é a espessura da almofada de elastômero.

Segundo Engström, a força de cisalhamento correspondente ao escoamento da ligação é dada por:

$$F_{vy} = C_r \cdot C_e \cdot C_1 \cdot \phi_b^2 \cdot \sqrt{f_{cc} \cdot f_{sy}} \quad (6)$$

sendo:

$$C_1 = \sqrt{(K/3)} \quad (6.1)$$

$$K = q/(\phi_b \cdot f_{cc}) \quad (6.2)$$

$$1 < C_r < 1,42 \quad (\text{Dependendo do grau de restrição na ligação})$$

$$C_e = \sqrt{1 + (\varepsilon \cdot C_1)^2} - \varepsilon \cdot C_1 \quad (6.3)$$

$$\varepsilon = \frac{3 \cdot e}{\phi_b} \sqrt{f_{cc}/f_{sy}} \quad (6.4)$$

onde:

$C_r$  – fator de restrição

$C_e$  – fator de excentricidade

$K$  – constante de proporcionalidade

$\phi_b$  – diâmetro da barra do chumbador

$f_{cc}$  – resistência do concreto (corpo de prova cúbico, 150 mm)

$f_{sy}$  – tensão de escoamento do aço

$e$  – excentricidade entre as forças de cisalhamento nos elementos

Na tabela 1 são apresentados os valores para o fator  $C_1$  em função das resistências cúbica,  $f_{cc}$ , e cilíndrica,  $f_c$ , para o concreto.

Tabela 1 – Valores para o fator  $C_1$  em função de  $f_{cc}$  e  $f_c$

| $f_{cc}$ (MPa) | $C_1$ | $f_c$ (MPa) | $C_1$ |
|----------------|-------|-------------|-------|
| 20             | 1,15  | 15 – 20     | 1,19  |
| 30             | 1,18  | 25 – 30     | 1,22  |
| 40             | 1,21  | 35 – 40     | 1,25  |
| 50             | 1,23  | 45 – 50     | 1,27  |
| 60             | 1,25  | 55 – 60     | 1,29  |

Para o cálculo da capacidade total ao cisalhamento da ligação, ENGSTRÖM (1992a) propôs um modelo mais geral, o qual pode ser utilizado para estimar os efeitos combinados da ação de pino dentro do concreto e também dos efeitos do atrito na interface da ligação, dada pela expressão:

$$F_{v,tot} = C_1 \cdot \phi_b^2 \cdot \sqrt{f_{cc,max} \cdot f_{sy,red}} + \mu_f \cdot \sigma_{sm} \cdot A_s \quad (7)$$

sendo:

$$f_{sy,red} = f_{sy} - \sigma_{sm} \quad (7.1)$$

sendo, recomendados:

$$f_{sy,red} = 0,7 \cdot f_{sy}$$

$C_1 = 1,03$  (para o caso da resistência cúbica do concreto  $f_{cc}$ )

$C_1 = 1,07$  (para o caso da resistência cilíndrica do concreto  $f_c$ )

onde:

$\mu_f$  – coeficiente de atrito na interface da ligação (dado na tabela 2)

$f_{sy,red}$  – tensão de tração no chumbador relacionado com o efeito de pino

$\sigma_{sm}$  – tensão de tração no chumbador relacionado com o efeito de atrito

Parte da capacidade da tensão de tração no chumbador, dada por  $\sigma_{sm}$ , será utilizada para balancear a força normal relacionada com a força de atrito. A parcela restante, dada pela tensão  $f_{sy,red}$ , estará relacionada com o comportamento de pino do chumbador.

Tabela 2 – Valores para o Coeficiente de Atrito  $\mu_f$ . [ENGSTRÖM (1992a)]

| Superfícies de Contato na Interface da Ligação | $\mu_f$   |
|------------------------------------------------|-----------|
| Concreto-concreto                              | 0,6       |
| Aço-concreto                                   | 0,4       |
| Concreto-neoprene                              | 0,3 – 0,4 |

Na figura 3 é apresentado um estado de deformação simplificado para um chumbador inserido em dois elementos de concreto, no momento em que ocorre o mecanismo da formação das rótulas plásticas nos dois lados das seções solicitadas do chumbador.

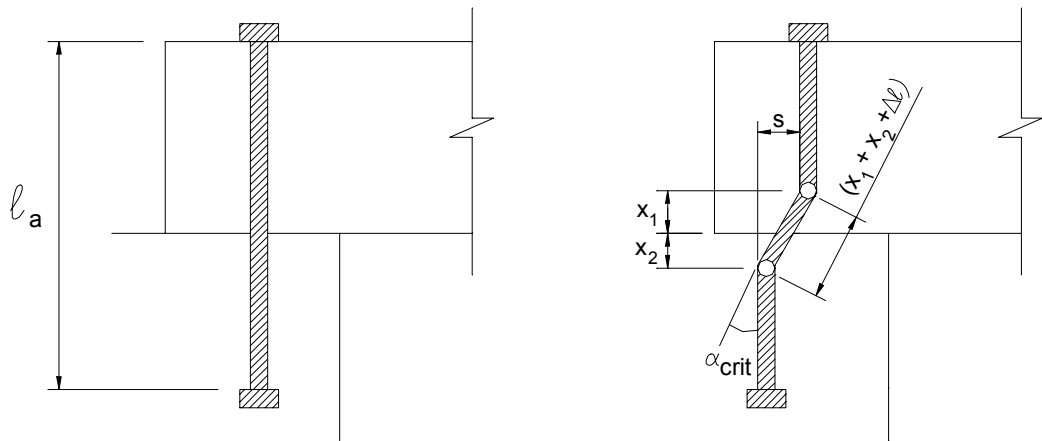


Figura 3 – Estado simplificado de deformação para o chumbador inserido em dois elementos de concreto [ENGSTRÖM (1992)]

O mecanismo da formação das rótulas plásticas ocorre quando o chumbador atinge uma deformação angular crítica, definida como  $\alpha_{crit}$ , expressa por:

$$\alpha_{crit} = 1,75 \cdot \frac{f_{sy,red}}{\phi_b \cdot E_s} \quad (8)$$

A distância “x”, da face do concreto até à seção de máximo momento no chumbador é dada por:

$$x = \frac{F_{v,red}}{q} = \frac{\sqrt{f_{sy,red} / f_{cc}}}{3 \cdot C_1} \cdot \phi_b \quad (9)$$

sendo:

$$q = 3 \cdot (C_1)^2 \cdot f_{cc} \cdot \phi_b \quad (9.1)$$

onde:

q – reação distribuída do concreto sobre o chumbador

A partir da deformação angular crítica  $\alpha_{crit}$ , o deslocamento horizontal relativo na ligação  $a_{vy}$ , que está associado ao momento da formação das rótulas plásticas no chumbador, pode ser obtido pelas seguintes expressões:

$$a_{vy} = \alpha_{crit} \cdot \ell_p \quad (10)$$

No caso de ligações com almofada de elastômero, com uma altura livre entre os elementos da ordem da espessura da almofada  $h_n$ , o comprimento  $\ell_p$  é dado pela expressão:

$$\ell_p = x_1 + x_2 + h_n \quad (11)$$

### 2.3 Diagrama simplificado para o comportamento da ligação

A partir da teoria exposta, em FERREIRA (1999) foi proposta a construção de um *Diagrama Simplificado*, com vistas a fornecer uma representação gráfica do comportamento da ligação, o qual relaciona a *força de cisalhamento* com o *deslocamento horizontal* da ligação, conforme apresentado na figura 4.

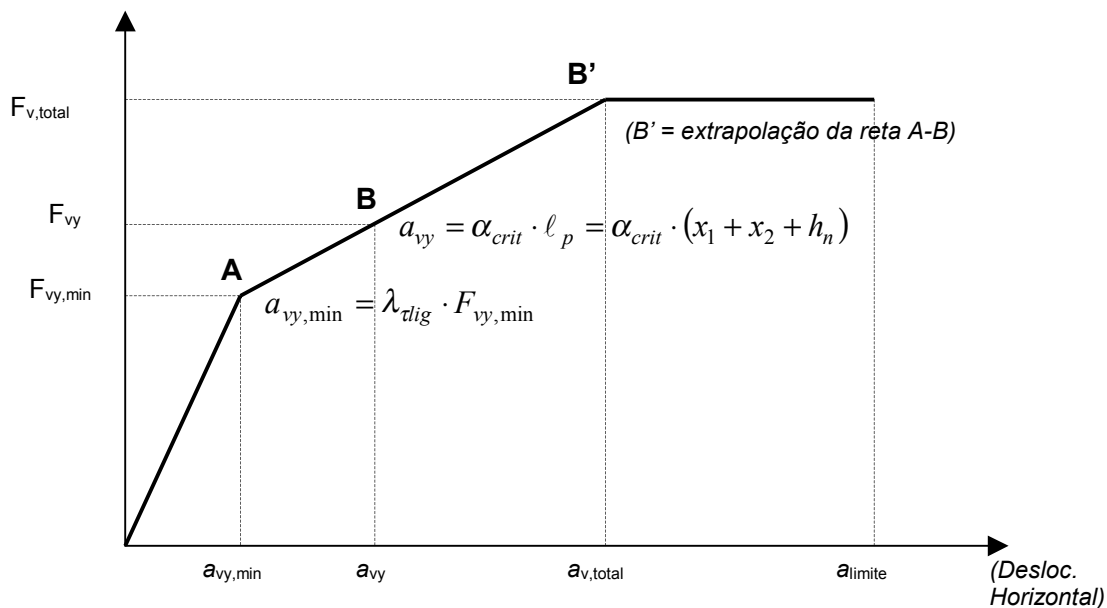


Figura 4 – Diagrama simplificado tri-linear da força de cisalhamento x deslocamento horizontal na ligação

## 3 ENSAIOS DE CISALHAMENTO

### 3.1 Descrição dos ensaios

Com a finalidade de se obter parâmetros de referência para a comparação com os equacionamentos teóricos, foram realizados ensaios de cisalhamento, onde cada protótipo foi composto por um elemento de viga, com 120 cm de comprimento e

seção 30x50 cm<sup>2</sup>, e um elemento de bloco suporte, com 50 cm de altura e seção 40x40 cm<sup>2</sup>, conforme indicadas na figura 5.

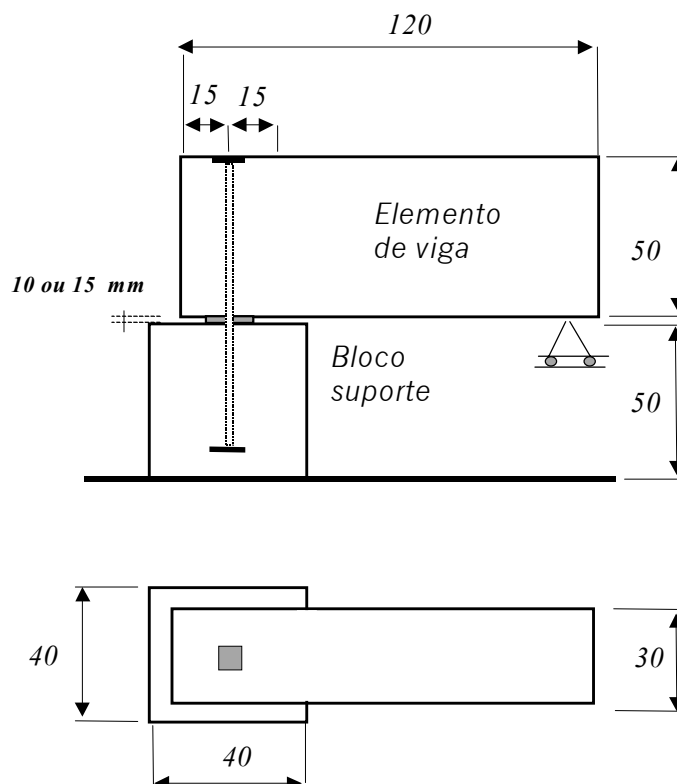


Figura 5 – Dimensões básicas utilizadas nos protótipos das ligações

Para a série de ensaios das ligações foram utilizados 4 protótipos, onde foram variados os diâmetros das barras dos chumbadores e as dimensões das almofadas de elastômeros, conforme indicados na tabela 3. Estes parâmetros estão relacionados com os mecanismos de deformação da barra do chumbador, na região da interface na ligação e internamente aos elementos de concreto, e com os mecanismos de deformação da almofada de elastômero.

Tabela 3 – Parâmetros variados nos protótipos ensaiados

| Protótipos  | Chumbador<br>(aço 1020) | Almofada de Elastômero |        |                     |
|-------------|-------------------------|------------------------|--------|---------------------|
|             |                         | A (mm)                 | B (mm) | H <sub>n</sub> (mm) |
| Protótipo 1 | 1 $\phi$ 16 mm          | 150                    | 300    | 10                  |
| Protótipo 2 | 2 $\phi$ 16 mm          | 150                    | 300    | 10                  |
| Protótipo 3 | 2 $\phi$ 25 mm          | 250                    | 300    | 10                  |
| Protótipo 4 | 2 $\phi$ 25 mm          | 200                    | 300    | 15                  |

Para os aparelhos de apoio nos protótipos, foram utilizadas almofadas de elastômero simples, com dureza Shore 60 A, módulo transversal  $G = 1000 \text{ kN/m}^2$  e coeficiente de Poisson  $\nu = 0,5$ .

Para os chumbadores, foram utilizadas barras lisas de aço 1020, com  $f_{yk} = 250 \text{ MPa}$ . Na extremidade inferior do chumbador, na região inserida no bloco suporte, a ancoragem foi conseguida por meio de um perfil soldado. A solidarização entre o chumbador e o elemento de viga foi conseguida por meio de grauteamento. A

ancoragem na extremidade superior do chumbador foi feita por meio de uma chapa parafusada, conforme indicada na figura 6. Embora esta não seja uma prática corrente. No decorrer dos ensaios observou-se a formação de um mecanismo de tirante no chumbador quando a ligação atingiu grandes deformações.

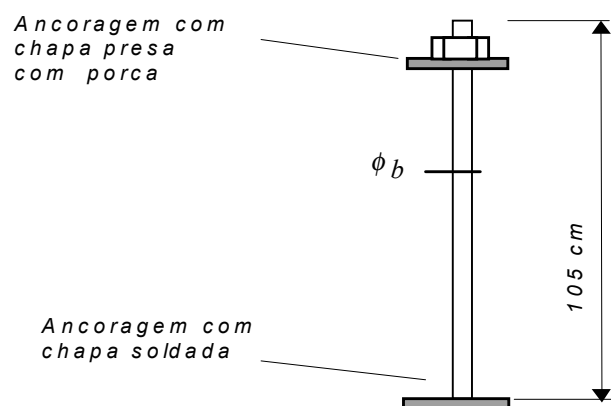


Figura 6 – Esquema da barra do chumbador

Nas figuras 7 e 8, são apresentados os detalhamentos das armaduras utilizadas nos elementos de viga e do bloco suporte, respectivamente.

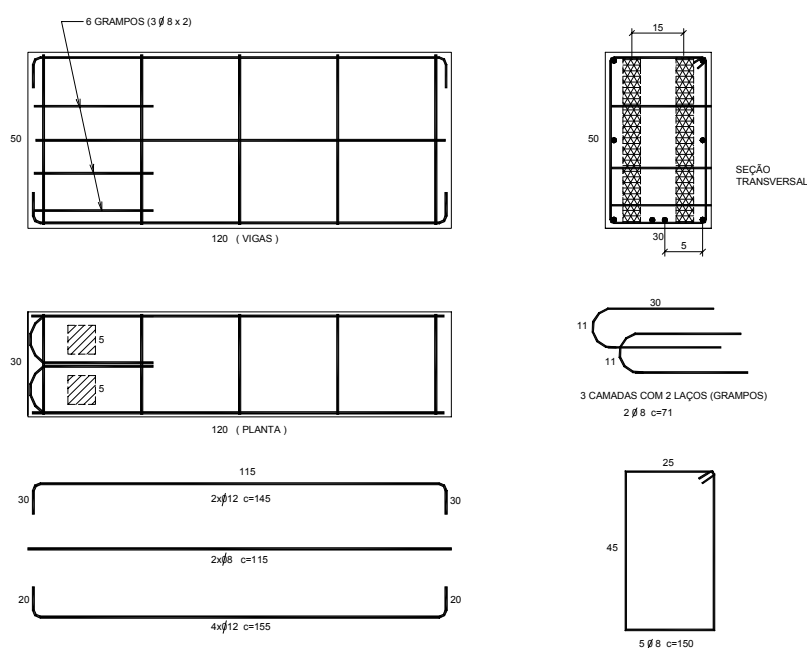


Figura 7 - Detalhamento da armadura do elemento de viga

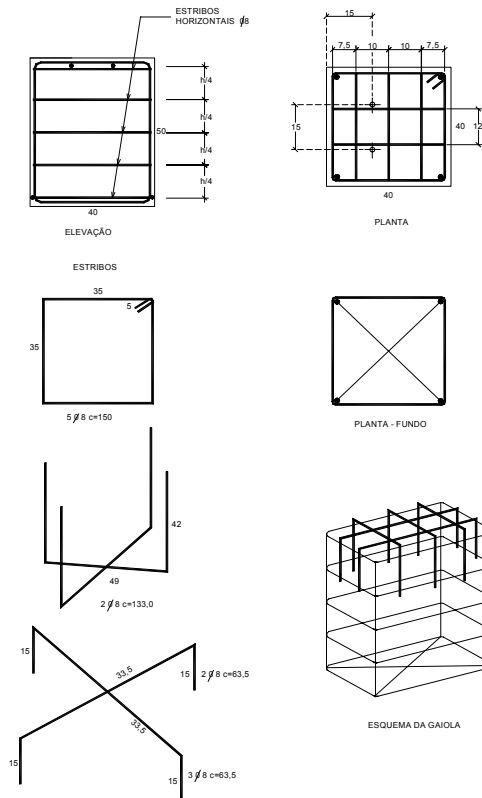


Figura 8 - Detalhamento da armadura do elemento do bloco suporte

Na tabela 4 são apresentadas as resistências de compressão médias dos concretos dos protótipos, para corpos de prova cilíndricos de 10x20 cm<sup>2</sup>, e as resistências de compressão médias dos grautes, para corpos de prova cilíndricos de 5x5 cm<sup>2</sup>, relativas às datas dos ensaios.

Tabela 4 – Valores médios das resistências dos concretos nas datas dos ensaios

| Protótipos  | $f_{cj(elementos)}$ (MPa) | $f_{cj(graute)}$ (MPa) |
|-------------|---------------------------|------------------------|
| Protótipo 1 | 55                        | 30                     |
| Protótipo 2 | 63*                       | 30                     |
| Protótipo 3 | 54                        | 30                     |
| Protótipo 4 | 53                        | 30                     |

\*. A data do ensaio teve um atraso de três dias.

A medição dos deslocamentos relativos entre o elemento de viga e o elemento do bloco suporte foi feita através de um conjunto de transdutores de deslocamentos elétricos, conforme indicados na figura 9. Para as medidas das tensões internas no chumbador foram utilizados 3 pares de extensômetros elétricos, os quais foram posicionados nas fibras superiores e inferiores em 3 seções das barras dos chumbadores, dispersas na região próxima à interface da ligação dentro do elemento do bloco suporte, conforme indicados nas figuras 10 e 11.

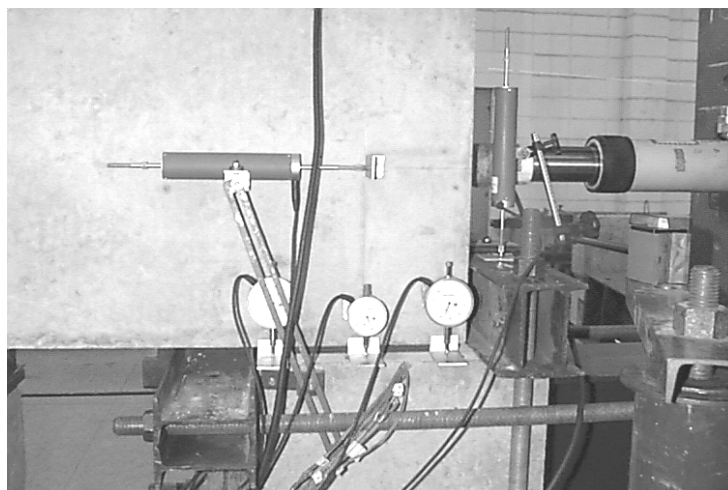


Figura 9 – Transdutores para as medidas dos deslocamentos relativos entre os elementos

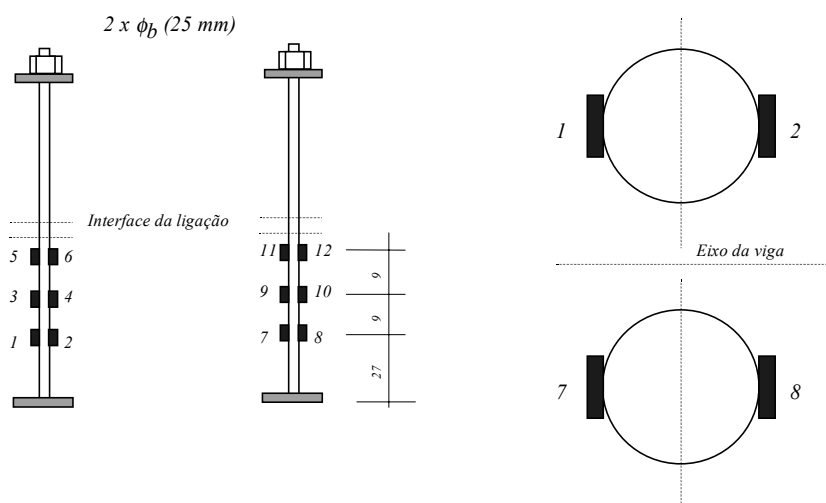


Figura 10 – Esquema dos extensômetros utilizados nos chumbadores dos Protótipos 3 e 4



Figura 11 – Vista da instrumentação nos chumbadores utilizada para os Protótipos 3 e 4

Para cada protótipo a aplicação das forças cisalhamento foram repetidas em alguns ciclos para avaliar o efeito das deformações residuais no comportamento da ligação. Na figura 12 são apresentadas vistas gerais da montagem dos ensaios.

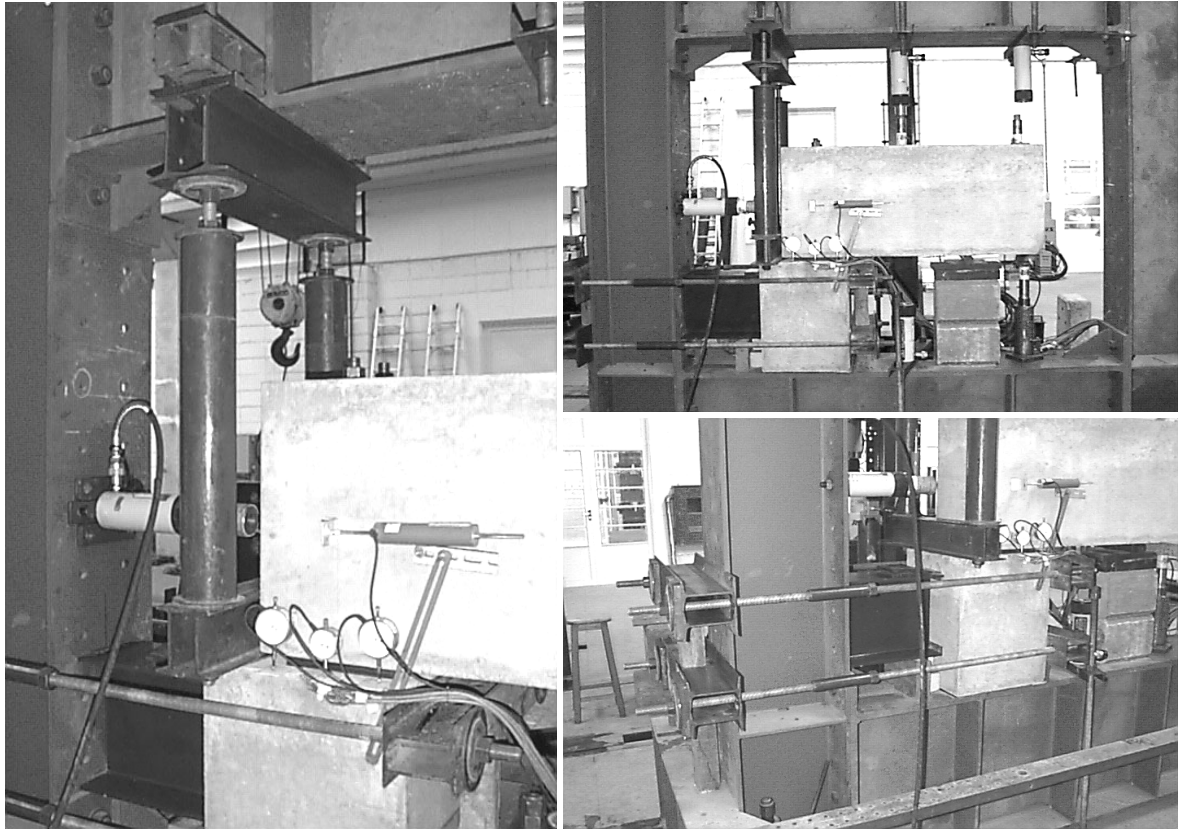


Figura 12 – Vista da montagem dos ensaios de cisalhamento

Além dos ensaios de cisalhamento, em FERREIRA (1999) são apresentados os resultados de alguns ensaios complementares que foram realizados para este tipo de ligação, conforme é apresentado na tabela 5.

Tabela 5 – Resumo dos ensaios realizados em FERREIRA (1999)

| Protótipo                                     | Ensaio de Cisalhamento                                                                                                                        | Ensaio Complementares                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Protótipo 1<br>1 $\phi$ 16 mm<br>(150x300x10) | <ul style="list-style-type: none"> <li>Cisalhamento na fase elástica e após o escoamento</li> </ul>                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>Flexão (ligação muito flexível)</li> </ul>                                                      |
| Protótipo 2<br>2 $\phi$ 16 mm<br>(150x300x10) | <ul style="list-style-type: none"> <li>Cisalhamento na fase elástica, após o escoamento, com esgotamento da resistência da ligação</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Flexão</li> <li>Torção na fase elástica</li> <li>Influência da força Normal</li> </ul>          |
| Protótipo 3<br>2 $\phi$ 25 mm<br>(250x300x10) | <ul style="list-style-type: none"> <li>Cisalhamento na fase elástica, após o escoamento, com esgotamento da resistência da ligação</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Flexão com carregamento alternado na fase elástica.</li> <li>Torção na fase elástica</li> </ul> |
| Protótipo 4<br>2 $\phi$ 25 mm<br>(200x300x15) | <ul style="list-style-type: none"> <li>Cisalhamento na fase elástica, após o escoamento, com esgotamento da resistência da ligação</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Flexão com carregamento alternado na fase elástica.</li> <li>Torção na fase elástica</li> </ul> |

### 3.2 Resultados experimentais

#### Protótipo 1

No protótipo 1 foram repetidos 3 ciclos de carregamento, cujas curvas *força de cisalhamento vs. deslocamento horizontal da ligação* encontram-se registrados na figura 13. Na tabela 6 é apresentado um resumo com os ciclos de carregamento. No primeiro ciclo foi aplicada uma força de 10 kN, que representou cerca de 30% da capacidade ao cisalhamento da ligação, onde se pretendeu que a ligação estivesse apenas no regime elástico. No segundo e no terceiro ciclos, os limites de escoamento da ligação, definidos pelas forças  $F_{vy,min}$  e  $F_{vy}$ , foram ultrapassados.

Na tabela 7 são apresentadas as inclinações das retas tangentes às curvas *força de cisalhamento vs. deslocamento horizontal da ligação*. Nos ciclos 1 e 2, a ligação apresentou inclinações semelhantes das retas tangentes iniciais, para  $F_v < 10$  kN, onde se verificou que a deformabilidade ao cisalhamento da ligação foi mantida, sendo mantidos assim os mecanismos de deformação.

Tabela 6 – Resumo dos ciclos de cisalhamento no Protótipo 1

| Ciclos de carregamento | $F_v$ (kN)                      | $\Delta_{hor}$ (mm)          | Observações                                                                                                                                                                                                                      |
|------------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ciclo 1                | 9,10                            | 0,20                         | ✓ O carregamento atingiu cerca de 30% da capacidade prevista para a ligação. (Regime elástico).                                                                                                                                  |
| Ciclo 2                | 10,0<br>17,80<br>30,10<br>28,70 | 0,22<br>0,41<br>2,10<br>3,43 | ✓ Comportamento na fase elástica semelhante ao do ciclo 1.<br>✓ Trecho linear inicial para $F_v < 17,8$ kN.<br>✓ A resistência da ligação foi alcançada, entrando no regime plástico, para $\Delta_{hor} < 4$ mm.                |
| Ciclo 3                | 9,80<br>34,10<br>28,70          | 0,88<br>5,34<br>5,80         | ✓ Aumento da deformabilidade na ligação, ainda com comportamento linear para $5 < F_v < 25$ kN.<br>✓ Atingiu-se a resistência da ligação, entrando no regime plástico, para $\Delta_{hor} > 5$ mm ( $\Delta_{hor,efet} > 7$ mm). |

Tabela 7 – Inclinações nos trechos retos dos ciclos de carregamento no Protótipo 1.

| Ciclos de carga | $F_v$ (kN)                          | Fator de Correlação     | Inclinação (kN/mm)   | Observações                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----------------|-------------------------------------|-------------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ciclo 1         | 0 – 9,10                            | 0,955                   | 45,8                 | ✓ A curva apresentou acomodações iniciais, fazendo com que a correlação não fosse muito alta.                                                                                                                                                                                                    |
| Ciclo 2         | 0 – 9,90<br>0 – 17,8<br>17,8 – 22,5 | 0,990<br>0,991<br>0,998 | 45,4<br>47,9<br>21,3 | ✓ O comportamento na fase linear se ajustou à do ciclo anterior.<br>✓ O início do escoamento da ligação se deu para uma força da ordem de 17,8 kN<br>✓ Após a fase linear inicial, a ligação apresentou um segundo trecho reto, compreendido entre 17,8 à 22,5 kN, com 40% da inclinação inicial |
| Ciclo 3         | 4,9 - 25,0                          | 0,999                   | 17,9                 | ✓ Após uma acomodação inicial da ligação, para $F_v < 4,9$ kN, a ligação apresentou novamente um comportamento linear até atingir 25 kN.                                                                                                                                                         |

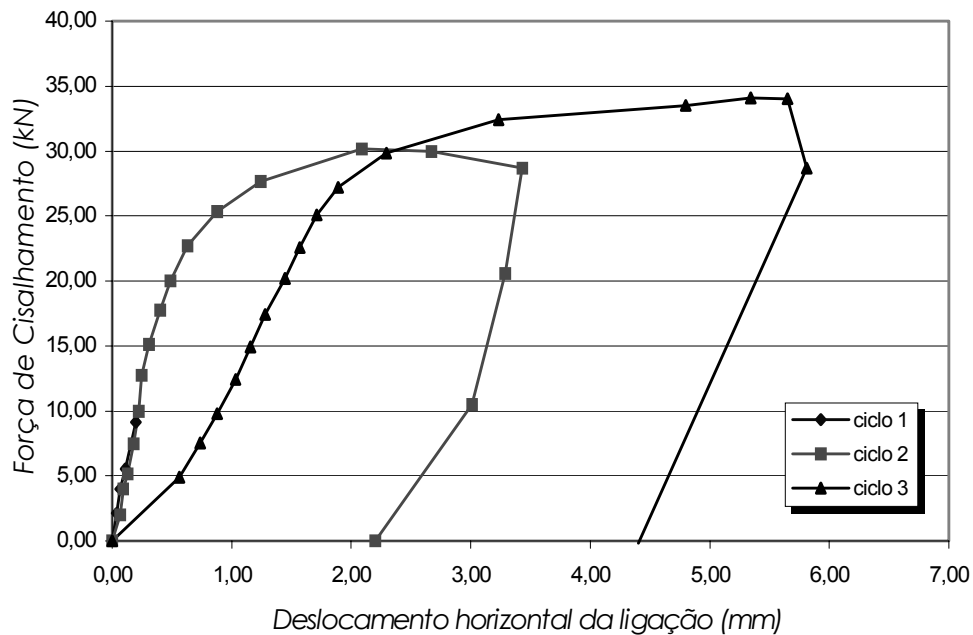


Figura 13 – Ciclos de cisalhamento – Protótipo 1 (partindo da origem)

## Protótipo 2

Tabela 8 – Resumo dos ciclos de cisalhamento no Protótipo 2

| Ciclos de carga                      | $F_v$ (kN)                                                  | $\Delta_{hor}$ (mm)                                   | Observações                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ciclo 1                              | 20,59                                                       | 0,29                                                  | ✓ A força $F_v$ atingiu cerca de 30% de $F_{vu}$ , capacidade prevista para a ligação. Regime elástico linear.                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Ciclo 2<br>Com Normal<br>$N = 10$ kN | 20,35                                                       | 0,27                                                  | ✓ A força $F_v$ atingiu cerca de 30% de $F_{vu}$ . Regime elástico linear.<br>✓ Com a presença da força normal, $N=10$ kN, não houve alterações significativas no comportamento da ligação.                                                                                                                                                                                                                                  |
| Ciclo 3<br>Com Normal<br>$N = 30$ kN | 20,70                                                       | 0,27                                                  | ✓ A força $F_v$ atingiu cerca de 30% de $F_{vu}$ . Regime elástico linear.<br>✓ Com a presença da força normal, $N=30$ kN, não houve alterações significativas no comportamento da ligação.                                                                                                                                                                                                                                  |
| Ciclo 4                              | 20,5<br>30,5<br>40,0<br>31,8                                | 0,40<br>0,70<br>1,15<br>1,92                          | ✓ A ligação apresentou um acréscimo na sua deformabilidade já na fase inicial, para $F_v < 20,47$ kN.<br>✓ No ponto de $F_{vu} = 40$ kN, ocorreu uma falha no tirante de fixação do bloco suporte, permitindo-o girar, produzindo um salto ainda maior na deformabilidade da ligação.                                                                                                                                        |
| (ciclo 4B)                           | 20,7<br>40,0<br>48,7                                        | 1,05<br>1,56<br>4,20                                  | ✓ Após ajustes de travamento no sistema de fixação do bloco suporte, o ciclo 4 foi reiniciado (ciclo 4 B), atingindo 48 kN, quando a ligação apresentou $\Delta_{hor} > 4$ mm.                                                                                                                                                                                                                                               |
| Ciclo 5                              | 19,80<br>39,58<br><br>56,50<br>59,0<br>60,0<br>60,0<br>50,0 | 1,41<br>2,4<br><br>5,4<br>7,5<br>10,5<br>20,0<br>25,0 | ✓ Após novos ajustes no sistema de fixação do bloco suporte, o ciclo 5 foi iniciado.<br>✓ A ligação foi carregada até a sua máxima resistência, a qual foi mantida, fazendo com que a ligação plastificasse, atingindo grandes deformações.<br>✓ Na marca de $\Delta_{hor} = 20$ mm, ocorreu um salto brusco para $\Delta_{hor} = 25$ mm, ocorrendo ao mesmo tempo um levantamento vertical de 5 mm na interface da ligação. |

Para o protótipo 2 foram aplicados 5 ciclos da força de cisalhamento. Na tabela 8 é apresentado um resumo das forças e deslocamentos para cada ciclo. Nos

três primeiros ciclos, a ligação foi solicitada por uma força que correspondeu a cerca de 30% da  $F_{vu}$  estimada. Nos ciclos 2 e 3, além da força de cisalhamento, foram aplicadas na ligação forças normais de 10 kN e 30 kN, respectivamente. Na tabela 9 são apresentadas as inclinações dos trechos retos das curvas *força de cisalhamento vs. deslocamento horizontal da ligação* para cada ciclo de carregamento.

Tabela 9 – Inclinações nos trechos retos dos ciclos de carregamento no Protótipo 2.

| Ciclos de carga                    | $F_v$ (kN)  | Fator de Correlação | Inclinação (kN/mm) | Observações                                                                                                                                  |
|------------------------------------|-------------|---------------------|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ciclo 1                            | 0 – 20,6    | 0,965               | 69,0               | ✓ A ligação apresentou acomodações iniciais, fazendo com que o fator de correlação não fosse muito alto.                                     |
| Ciclo 2<br>Com Normal<br>N = 10 kN | 0 – 20,4    | 0,997               | 72,0               | ✓ O trecho reto inicial apresentou uma inclinação semelhante à obtida no ciclo 1.                                                            |
| Ciclo 3<br>Com Normal<br>N = 30 kN | 0 – 20,7    | 0,992               | 70,0               | ✓ O trecho reto inicial apresentou uma inclinação semelhante às obtidas nos ciclos 1 e 2.                                                    |
| Ciclo 4<br><br>(4 B)               | 0 – 20,5    | 0,992               | 51,2               | ✓ Deformabilidade acrescida em 37% com relação aos ciclos anteriores para $F_v < 20$ kN.<br>✓ A ligação começou escoar para $F_v = 30,5$ kN. |
|                                    | 0 – 30,5    | 0,987               | 47,0               |                                                                                                                                              |
|                                    | 30,5 – 40,0 | 0,997               | 21,0               |                                                                                                                                              |
|                                    | 0 – 20,7    | (1,0)               | 21,0               |                                                                                                                                              |
| Ciclo 5                            | 0 – 40,0    | 0,997               | 26,0               | ✓ A ligação iniciou o ciclo 5 já com uma deformabilidade alta, mas apresentando um comportamento linear para $F_v < 39,6$ kN                 |
|                                    | 0 – 19,80   | 0,992               | 14,1               |                                                                                                                                              |
|                                    | 0 – 39,60   | 0,992               | 16,4               |                                                                                                                                              |
|                                    | 39,6 – 50,8 | 0,995               | 10,32              |                                                                                                                                              |

Na figura 14 são apresentados de forma simultânea os 3 primeiros ciclos. Na figura 15 estão apresentados de forma simultânea os 5 ciclos de cisalhamento.

As barras dos chumbadores atingiram a tensão de escoamento no ciclo 4 para uma força de cisalhamento da ordem de  $F_v = 31$  kN. De fato, na tabela 9 pode-se observar que até a força de cisalhamento da ordem  $F_v = 31$  kN, a inclinação se manteve em torno de 50 kN/mm. Já no trecho compreendido entre 31 à 40 kN, a inclinação caiu para 21 kN/mm, com uma redução de cerca de 60%.

Durante o ciclo 4, ocorreu uma falha em um dos tirantes verticais que prendiam o bloco suporte, por falta de rosqueamento da barra dentro de uma luva de prolongamento. Isto se deu quando a ligação estava sendo solicitada por uma força de 40 kN. O ensaio foi interrompido, procedeu-se um novo ajuste de todo o sistema de tirantes, e o ciclo 4 foi então repetido como ciclo 4B.

No ciclo 5, a ligação teve um acréscimo na sua deformabilidade inicial. Todavia, ainda foi observado um trecho linear, com inclinação média da ordem de 15 kN/mm, até a força de 40 kN. A ligação atingiu uma capacidade ao cisalhamento da ordem de 60 kN, a qual foi associada a um deslocamento horizontal na ligação da ordem de 10 mm.

A configuração final da ligação foi caracterizada por um deslocamento horizontal final da ordem de 25 mm e por um deslocamento vertical (para cima) da ordem de 5 mm.

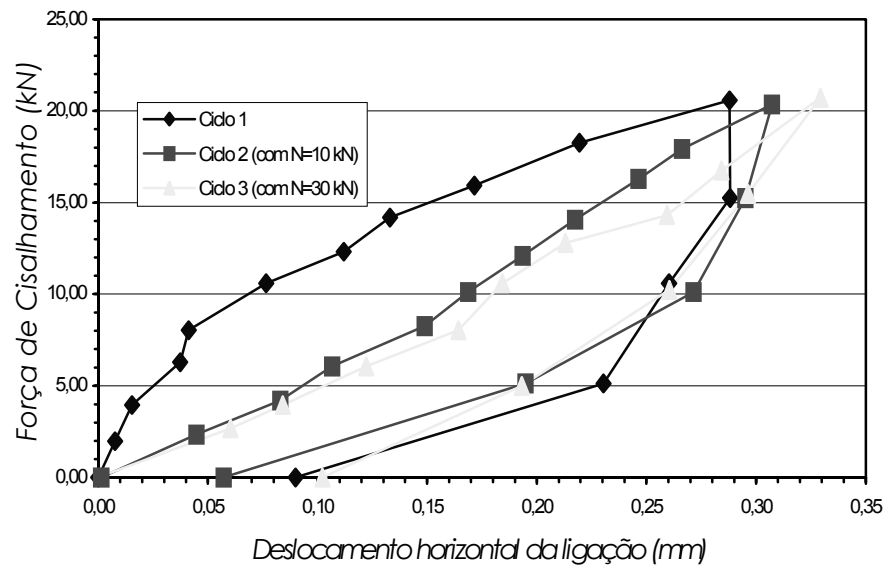


Figura 14 - Ensaio de cisalhamento - Protótipo 2 (Avaliação da interferência da força normal)

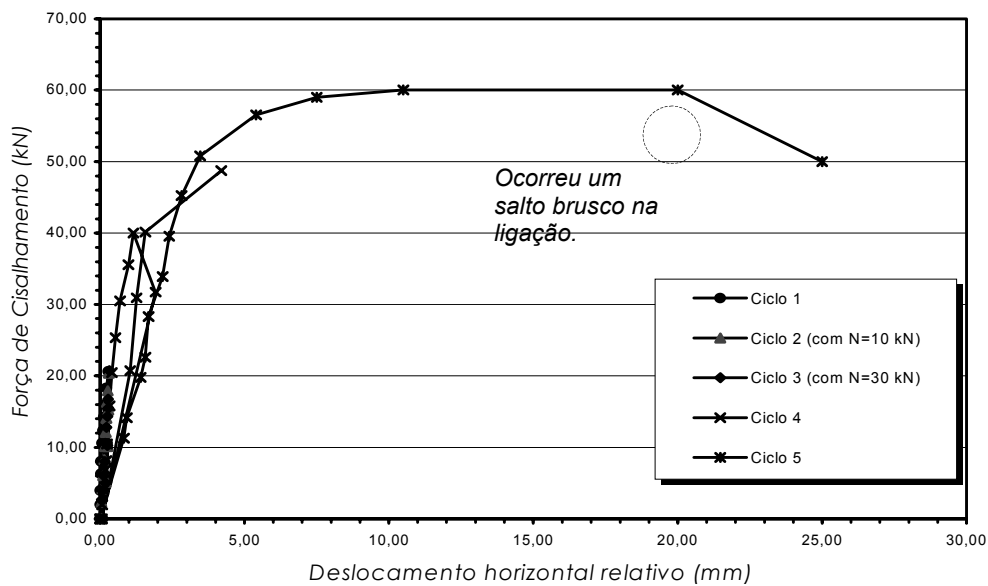


Figura 15 – Ciclos da força de cisalhamento no Protótipo 2

### Protótipo 3

Para o protótipo 3 foram utilizados dois chumbadores de 25 mm de diâmetro e uma almofada de elastômero não fretado com dimensões 250x300x10 mm<sup>3</sup>. Com estes novos parâmetros, buscou-se estudar o comportamento de uma barra "rígida" inserida em elementos de concreto e, também, estudar a interferência da largura da almofada no comportamento da ligação.

Foram aplicados 3 ciclos de carregamento para a força de cisalhamento sobre a ligação. Na tabela 10 é apresentado um resumo com os ciclos de carregamento no Protótipo 3. No Ciclo 1 a ligação atingiu uma força de cisalhamento de 70 kN, equivalente a 40% da força última. No Ciclo 2, atingiu uma força de 167 kN e, no Ciclo 3, atingiu uma força de 170 kN. As *curvas força de cisalhamento vs. deslocamentos horizontais* na ligação para os 3 ciclos de carregamento estão apresentadas de forma simultânea na figura 16.

Tabela 10 – Resumo dos ciclos de carregamento de cisalhamento no Protótipo 3

| Ciclos de carga | $F_v$ (kN)                                      | $\Delta_{hor}$ (mm)                          | Observações                                                                                                                                                |
|-----------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Ciclo 1</i>  | 70,1<br>0,0                                     | 0,30<br>0,01                                 | ✓ O efeito do giro relativo na ligação fez com aumentasse o flexão localizada no chumbador, fazendo com que o mesmo começasse a escoar para $F_v = 15$ kN. |
| <i>Ciclo 2</i>  | 70,7<br>101,4<br>139,7<br>167,7<br>0,0          | 0,24<br>0,39<br>0,73<br>2,10<br>0,44         | ✓ Como o efeito do giro relativo minimizado, a barra do chumbador começou a escoar para $F_v = 60$ kN.                                                     |
| <i>Ciclo 3</i>  | 30,0<br>131,0<br>170,7<br>170,1<br>121,4<br>0,0 | 1,04<br>2,49<br>4,73<br>5,14<br>5,28<br>2,02 | ✓ Após uma acomodação inicial da ligação, para $F_v = 30$ kN, a ligação apresentou um comportamento linear até atingir 130 kN.                             |

No Ciclo 1, para o intervalo da força de cisalhamento  $F_v < 70$  kN, o elemento do bloco suporte atingiu uma rotação da ordem de 0,0025 rad (anti-horário), fazendo com que houvesse uma rotação relativa entre o elemento de viga e o elemento de bloco da ordem de 0,001 rad (horário). A partir deste giro relativo, houve um aumento significativo da flexão localizada na barra do chumbador, fazendo com que a mesma começasse a escoar, na fibra mais tracionada da seção de máximo momento na barra, para uma força da ordem de  $F_v = 15$  kN.

Por outro lado, no Ciclo 2, para o mesmo intervalo  $F_v < 70$  kN, quando a rotação do bloco suporte foi minimizada para 0,0002 rad (anti-horário), fazendo com que a rotação relativa do elemento de viga em relação ao bloco fosse da ordem de 0,0013 rad (anti-horário), teve-se um efeito compensador da flexão localizada na barra do chumbador. Deste forma, a mesma barra do chumbador atingiu o escoamento para uma força  $F_v = 60$  kN.

Na tabela 11 são apresentadas as inclinações nos trechos retos das curvas experimentais de cada ciclo de carregamento, com os respectivos coeficientes de correlação. A partir desta tabela, pode observar-se que a inclinação do trecho reto inicial do Ciclo 1 foi inferior à do Ciclo 2. Portanto, a deformabilidade ao cisalhamento da ligação no Ciclo 1 foi inferior que à apresentada no Ciclo 2. A explicação para isto pode estar relacionada com o efeito do giro relativo da ligação sobre o mecanismo de deformação da barra do chumbador, tenha sido maior no Ciclo 1 do que no Ciclo 2, fazendo com que a deformabilidade da ligação fosse maior no Ciclo 1.

Tabela 11 – Inclinações nos trechos retos dos ciclos de carregamento no Protótipo 3

| Ciclos de carga | $F_v$ (kN)                              | Fator de Correlação            | Inclinação (kN/mm)              | Observações                                                                                                                                          |
|-----------------|-----------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ciclo 1         | 70,1                                    | 0,94                           | 233,0                           | ✓ Devido ao efeito do giro relativo na ligação sobre a flexão localizada na barra do chumbador, teve-se um aumentando da deformabilidade da ligação. |
| Ciclo 2         | 70,7<br>101,4<br>101,4-139<br>139-167,7 | 0,994<br>0,997<br>0,98<br>0,95 | 271,7<br>257,5<br>112,7<br>19,3 | ✓ Minimizando-se o giro relativo na ligação, diminuiu-se a flexão localizada na barra do chumbador, diminuindo a deformabilidade da ligação.         |
| Ciclo 3         | 0 – 30<br>30 – 131<br>131 – 170         | 0,988<br>0,999<br>0,975        | 29,0<br>74,3<br>16,7            | ✓ Após o escoamento da ligação ter sido atingido no Ciclo 2, houve um sensível aumento da deformabilidade da ligação.                                |

Através destes ensaios, pode-se também observar que o que altera o mecanismo de deformação na ligação, de um ciclo anterior para um ciclo seguinte, não é quando o escoamento da barra do chumbador é atingido, mas sim quando o escoamento da ligação, caracterizado pela formação do mecanismo de rótula plástica na barra do chumbador, é atingido.

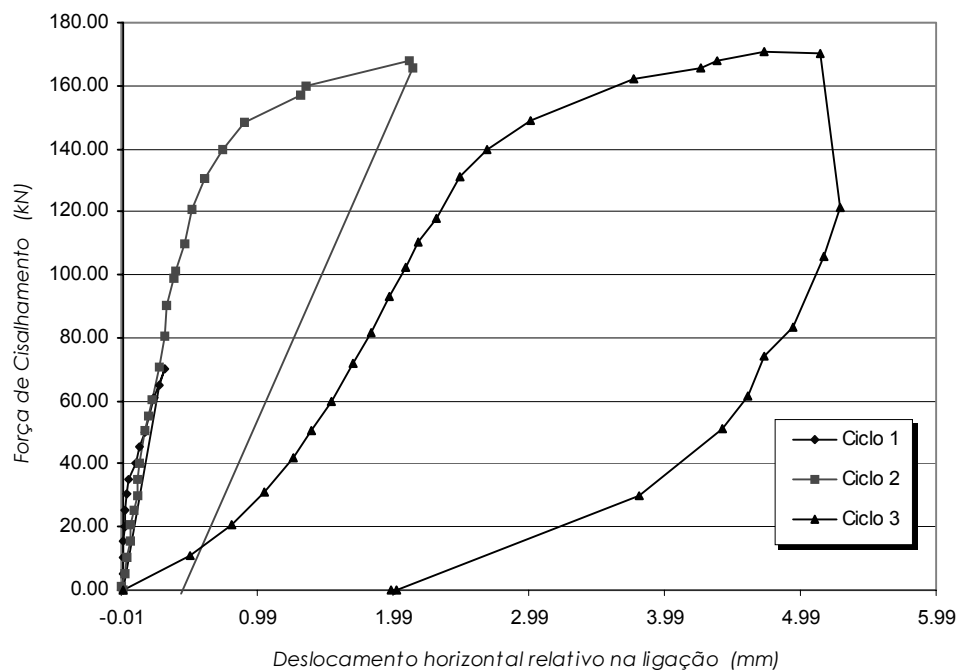


Figura 16– Ensaio de cisalhamento no Protótipo 3 – Ciclos 1,2 e 3

#### Protótipo 4

Para o Protótipo 4 foram utilizados dois chumbadores de 25 mm de diâmetro e uma almofada com 15 mm de espessura e 200 mm de comprimento, com um fator de forma B equivalente aos das almofadas utilizadas nos protótipos 1 e 2. O objetivo foi avaliar o desempenho da ligação, mantendo o diâmetro do chumbador, para uma almofada mais espessa, aumentando-se assim a altura na interface da ligação em relação ao protótipo 3.

Na tabela 12 é apresentado um resumo com os ciclos de carregamento. Para o protótipo 4 foram aplicados dois ciclos para a força de cisalhamento na ligação. No primeiro ciclo atingiu-se  $F_v = 30$  kN, cerca de 25% da capacidade prevista para a ligação. No segundo ciclo a ligação atingiu  $F_{vu} = 156$  kN, esgotando-se a sua capacidade.

Tabela 12 – Resumo dos ciclos de cisalhamento no Protótipo 4

| Ciclos de carga | $F_v$ (kN) | $\Delta_{hor}$ (mm) | Observações                                                                    |
|-----------------|------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Ciclo 1</i>  | 30         | 0,28                | ✓ <i>Ligação se comportando no regime linear</i>                               |
| <i>Ciclo 2</i>  | 30         | 0,25                | ✓ <i>Ligação se comportando no regime linear para ações da ordem de 100 kN</i> |
|                 | 65         | 0,67                |                                                                                |
|                 | 80         | 0,91                |                                                                                |
|                 | 100        | 1,48                |                                                                                |
|                 | 110        | 1,81                |                                                                                |
|                 | 150        | 7,81                |                                                                                |

Na tabela 13 são apresentadas as inclinações obtidas para curvas experimentais.

Tabela 13 – Inclinações nos trechos retos das curvas experimentais no Protótipo 4

| Ciclos de carga | $F_v$ (kN) | Fator de Correlação | Inclinação (kN/mm) | Observações                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------|------------|---------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Ciclo 1</i>  | 30         | 0,99                | 103,6              |                                                                                                                                                                                                                             |
| <i>Ciclo 2</i>  | 30         | 0,98                | 134,4              | ✓ <i>Em comparação com o Ciclo 2 do Prot. 3, a inclinação foi de cerca de 50%, significando que, com o aumento da espessura da almofada, a deformabilidade da ligação foi dobrada para o Prot. C em relação ao Prot. B.</i> |
|                 | 65         | 0,98                | 113,0              |                                                                                                                                                                                                                             |
|                 | 70         | 0,98                | 108,0              |                                                                                                                                                                                                                             |
|                 | 75         | 0,98                | 102,0              |                                                                                                                                                                                                                             |
|                 | 110        |                     |                    |                                                                                                                                                                                                                             |

Na figura 17 são apresentadas de forma simultânea as curvas experimentais para nos ciclos 1 e 2, para o regime linear. Na figura 18 é apresentada a curva experimental para o ciclo 2.

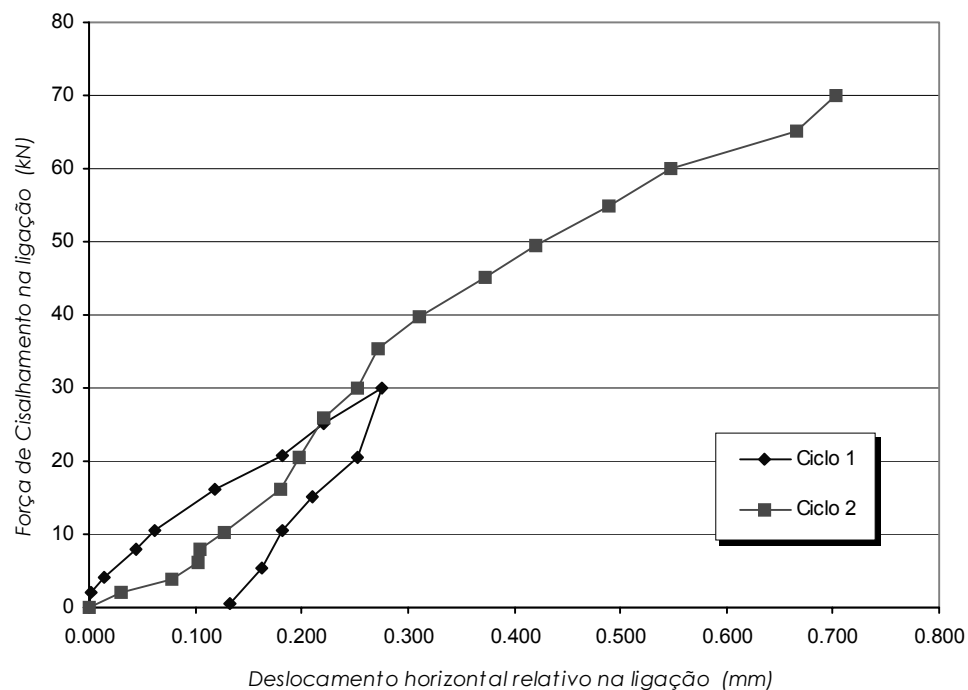


Figura 17 – Ensaio de cisalhamento no Protótipo C – Ciclos 1 e 2

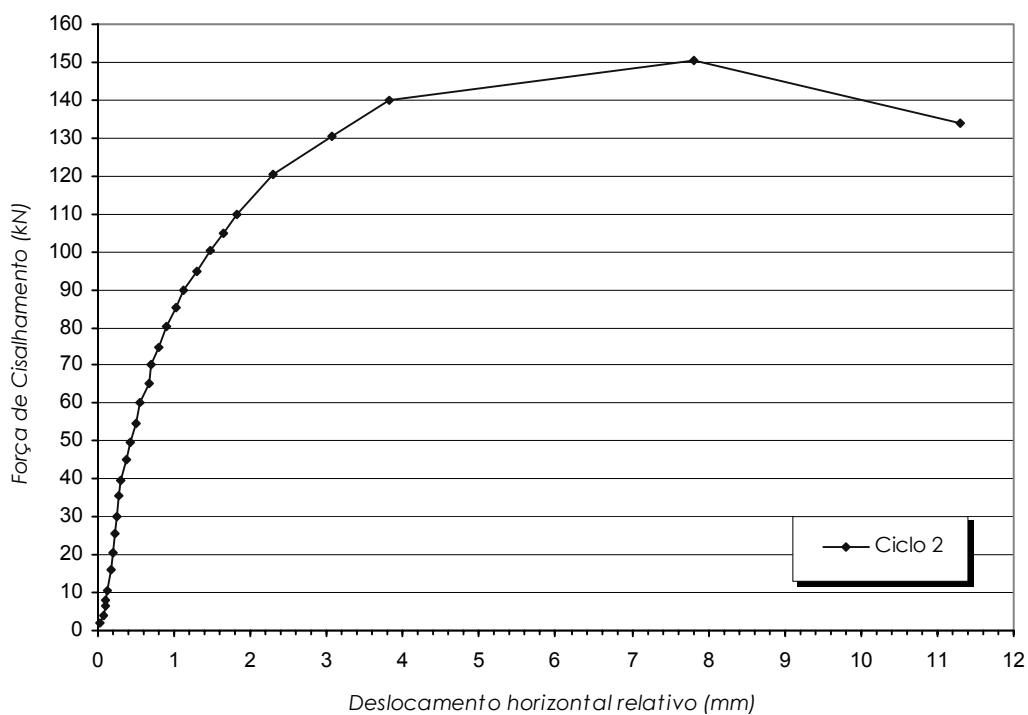


Figura 18 – Ensaio de cisalhamento no Protótipo C – Ciclo 2

#### 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS

Os valores das forças  $F_{vy,min}$  e  $F_{vy}$  estão relacionados com a formação dos mecanismos de rótulas plásticas nos pontos de máximos momentos na barra do chumbador, segundo as resistências mínimas e máximas dos elementos de concreto.

Na tabela 14 são apresentados os valores experimentais para  $F_{vy,min}$ ,  $F_{vy}$  e  $F_{vu}$ .

Tabela 14 – Valores experimentais para  $F_{vy,min}$ ,  $F_{vy}$  e  $F_{vu}$

|             | $F_{vy,min}$ (exp) (kN) | $F_{vy}$ (exp) (kN) | $F_{vu}$ (exp) (kN) |
|-------------|-------------------------|---------------------|---------------------|
| Protótipo 1 | 17,5                    | 22,5                | 34,0                |
| Protótipo 2 | 40,0                    | 50,0                | 60,0                |
| Protótipo 3 | 100,0                   | 140,0               | 170,0               |
| Protótipo 4 | 80,0                    | 110,0               | 156,0               |

Na tabela 15 são apresentados os valores das deformabilidades a partir dos ensaios nos protótipos.

Tabela 15 – Valores experimentais para  $\lambda_{dig}$

|             | Ciclo de Referência | Inclinação (kN/mm) | $\lambda_{dig}$ (mm/kN) |
|-------------|---------------------|--------------------|-------------------------|
| Protótipo 1 | Ciclos 1 e 2        | 45,5               | 22,0x10 <sup>-3</sup>   |
| Protótipo 2 | Ciclos 1, 2 e 3     | 70,0               | 14,0x10 <sup>-3</sup>   |
| Protótipo 3 | Ciclo 2             | 272,0              | 3,7x10 <sup>-3</sup>    |
| Protótipo 4 | Ciclo 2             | 135,0              | 7,5x10 <sup>-3</sup>    |

Na tabela 16 são apresentados os parâmetros de resistência para os protótipos que foram calculados a partir do desenvolvimento teórico.

Tabela 16 – Cálculo das resistências ao cisalhamento dos protótipos

| Parâmetros                             | Obtenção       | Protótipo 1     | Protótipo 2     | Protótipo 3 | Protótipo 4 |
|----------------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------|-------------|
| $f_{ck,min}$ (MPa)                     | Graute         | 30,0            | 30,0            | 30,0        | 30,0        |
| $f_{ck,máx}$ (MPa)                     | Concreto       | 51,5            | 59,0            | 50,2        | 49,0        |
| $f_y$ (MPa)                            | Dado inicial   | 250,0           | 250,0           | 250,0       | 250,0       |
| $H_n$ (m)                              | Dado inicial   | 0,01            | 0,01            | 0,01        | 0,015       |
| $\phi_b$ (m)                           | Dado inicial   | 0,016           | 2 x 0,016       | 2 x 0,025   | 2 x 0,025   |
| $e$ (m)                                | Dado inicial   | 0,005           | 0,005           | 0,005       | 0,0075      |
| $C_1$                                  | Tabela 1       | 1,24            | 1,24            | 1,24        | 1,24        |
| $C_r$                                  | Adotado        | 1               | 1               | 1,15        | 1,1         |
| $C_e$                                  | Eq. (6.3)      | 0,60            | 0,58            | 0,72        | 0,62        |
| $F_{vy,min}$ (kN)                      | Eq. (6)        | 16,6            | 32,1            | 111,3       | 91,7        |
| $F_{vy}$ (kN)                          | Eq. (6)        | 21,7            | 45,0            | 143,9       | 117,4       |
| $f_{s,red}$ (MPa)                      | 0,7 . $f_{sy}$ | 175,0           | 175,0           | 175,0       | 175,0       |
| $\sigma_{sm}$ (MPa)                    | Eq. (7.1)      | Não considerado | Não considerado | 75,0        | 75,0        |
| $\mu \cdot \sigma_{sm} \cdot A_s$ (kN) | Eq. (7)        | —               | —               | 36,83       | 29,46       |
| $F_{v,red}$ (kN)                       | Eq. (7)        | —               | —               | 120,68      | 119,47      |
| $F_{v,total}$ (kN)                     | Eq. (7)        | 29,9            | 64,1            | 157,50      | 148,93      |

Na tabela 17 são comparados os valores teóricos e experimentais para as resistências ao cisalhamento das ligações.

Tabela 17 – Comparação das resistências ao cisalhamento teóricas e experimentais

| Parâmetros             | Protótipo 1 | Protótipo 2 | Protótipo 3 | Protótipo 4 |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $F_{vy,min,calc}$ (kN) | 16,6        | 32,1        | 111,3       | 91,7        |
| $F_{vy,min,exp}$ (kN)  | 17,5        | 40,0        | 100,0       | 80,0        |
| Calc. / Experm.        | 0,95        | 0,80        | 1,11        | 1,15        |
| $F_{vy,calc}$ (kN)     | 21,7        | 45,0        | 143,9       | 117,2       |
| $F_{vy,exp}$ (kN)      | 22,5        | 50,0        | 140,0       | 110,0       |
| Calc. / Experm.        | 0,96        | 0,90        | 1,03        | 1,07        |
| $F_{vu,calc}$ (kN)     | 29,9        | 64,1        | 157,5       | 149,0       |
| $F_{vu,exp}$ (kN)      | 34,0        | 60,0        | 170,0       | 150,0       |
| Calc. / Experm.        | 0,88        | 1,07        | 0,93        | 0,99        |

Na tabela 18 são apresentados os parâmetros que foram utilizados para o cálculo da deformabilidade ao cisalhamento na ligação através da equação (5), apresentada no item 2.1. Na tabela 19 são feitas comparações entre as deformabilidades teóricas e experimentais.

Tabela 18 – Cálculo das deformabilidades ao cisalhamento nos protótipos

| Parâmetros                   | Obtenção      | Protótipo 1           | Protótipo 2           | Protótipo 3           | Protótipo 4           |
|------------------------------|---------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $f_{ck,min}$ (MPa)           | Graute        | 30,0                  | 30,0                  | 30,0                  | 30,0                  |
| $f_{ck,máx}$ (MPa)           | Concreto      | 51,5                  | 59,0                  | 50,2                  | 49,0                  |
| $K_{c1}$ (MPa/mm)            | (Eq. 4.2)     | 109,55                | 109,55                | 81,36                 | 81,36                 |
| $K_{c2}$ (MPa/mm)            | (Eq. 4.2)     | 148,33                | 154,3                 | 105,24                | 104,19                |
| $\alpha_1$ ( $m^{-1}$ )      | (Eq. 4.1)     | 28,72                 | 28,72                 | 19,08                 | 19,08                 |
| $\alpha_2$ ( $m^{-1}$ )      | (Eq. 4.1)     | 30,98                 | 31,29                 | 20,34                 | 20,29                 |
| $E_s$ (MPa)                  | Adado         | 200.000               | 200.000               | 200.000               | 200.000               |
| $\phi_b$ (m)                 | Dado inicial  | 0,016                 | 2 x 0,016             | 2 x 0,025             | 2 x 0,025             |
| $I_b$ ( $m^4$ )              | Dado inicial  | $3,22 \times 10^{-9}$ | $3,22 \times 10^{-9}$ | $1,92 \times 10^{-8}$ | $1,92 \times 10^{-8}$ |
| $G$ (MPa)                    | (Dureza 60 A) | 1,0                   | 1,0                   | 1,0                   | 1,0                   |
| $N_a$ ( $m^2$ )              | Dado inicial  | 0,045                 | 0,045                 | 0,075                 | 0,06                  |
| $H_n$ (m)                    | Dado inicial  | 0,01                  | 0,01                  | 0,01                  | 0,015                 |
| $\lambda_{\tau,lig}$ (mm/kN) | (Eq. 5)       | $29,3 \times 10^{-3}$ | $15,5 \times 10^{-3}$ | $9,17 \times 10^{-3}$ | $9,49 \times 10^{-3}$ |

Tabela 19 – Comparação das deformabilidades ao cisalhamento teóricas e experimentais

|                                             | Protótipo 1           | Protótipo 2           | Protótipo 3           | Protótipo 4           |
|---------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $\lambda_{\tau,lig}$ (mm/kN) (calculado)    | $29,3 \times 10^{-3}$ | $15,5 \times 10^{-3}$ | $9,17 \times 10^{-3}$ | $9,49 \times 10^{-3}$ |
| $\lambda_{\tau,lig}$ (mm/kN) (experimental) | $22,0 \times 10^{-3}$ | $14,0 \times 10^{-3}$ | $3,7 \times 10^{-3}$  | $7,5 \times 10^{-3}$  |
| Calc. / Experm                              | 1,33                  | 1,11                  | 2,48                  | 1,26                  |

Na tabela 20 são apresentados os deslocamentos horizontais na ligação que foram calculados com base no desenvolvimento teórico apresentado no item 2.2 do presente trabalho.

Tabela 20 – Cálculo dos deslocamentos horizontais nas ligações

|                           | Dados               | Protótipo 1           | Protótipo 2           | Protótipo 3           | Protótipo 4           |
|---------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $F_{vy,min}$ (kN)         | Eq. (6)             | 16,6                  | 32,1                  | 111,3                 | 91,7                  |
| $\lambda_{v,lig}$ (mm/kN) | (Eq. 5)             | $2,93 \times 10^{-2}$ | $1,55 \times 10^{-2}$ | $9,17 \times 10^{-2}$ | $9,49 \times 10^{-2}$ |
| $A_{vy,min}$ (mm)         |                     | 0,50                  | 0,61                  | 0,97                  | 0,87                  |
| $f_{ck,min}$ (MPa)        | Graute              | 30,0                  | 30,0                  | 30,0                  | 30,0                  |
| $f_{ck,máx}$ (MPa)        | Concreto            | 51,5                  | 59,0                  | 50,2                  | 49,0                  |
| $f_{s,red}$ (MPa)         | $0,7 \cdot f_{sy}$  | 175,0                 | 175,0                 | 175,0                 | 175,0                 |
| $\alpha_{crit}$ (rad)     | (Eq. 8)             | 0,096                 | 0,096                 | 0,061                 | 0,061                 |
| $\phi_b$ (m)              | Dado inicial        | 0,016                 | $2 \times 0,016$      | $2 \times 0,025$      | $2 \times 0,025$      |
| $C_1$                     | Adotado             | 1,24                  | 1,24                  | 1,24                  | 1,24                  |
| $X_1$ (m)                 | Eq. (9)             | 0,010                 | 0,010                 | 0,016                 | 0,016                 |
| $X_2$ (m)                 | Eq. (9)             | 0,008                 | 0,007                 | 0,013                 | 0,013                 |
| $H_n$ (m)                 | Dado inicial        | 0,01                  | 0,01                  | 0,01                  | 0,015                 |
| $\ell_a$ (m)              | Eq. (11)            | 0,028                 | 0,028                 | 0,039                 | 0,044                 |
| $A_{vy}$ (mm)             | Eq. (10)            | 2,71                  | 2,66                  | 2,38                  | 2,69                  |
| $a_{v,total}$ (mm)        | Extrapolação Linear | 5,45                  | 5,78                  | 4,96                  | 3,00                  |

A partir das deformabilidades iniciais ao cisalhamento, das resistências de cisalhamento e dos deslocamentos associados foram construídos diagramas para representar o *comportamento força de cisalhamento vs deslocamento horizontal* nos protótipos. Nas figuras 19 a 22 são apresentadas as comparações entre as curvas experimentais e os diagramas teóricos.

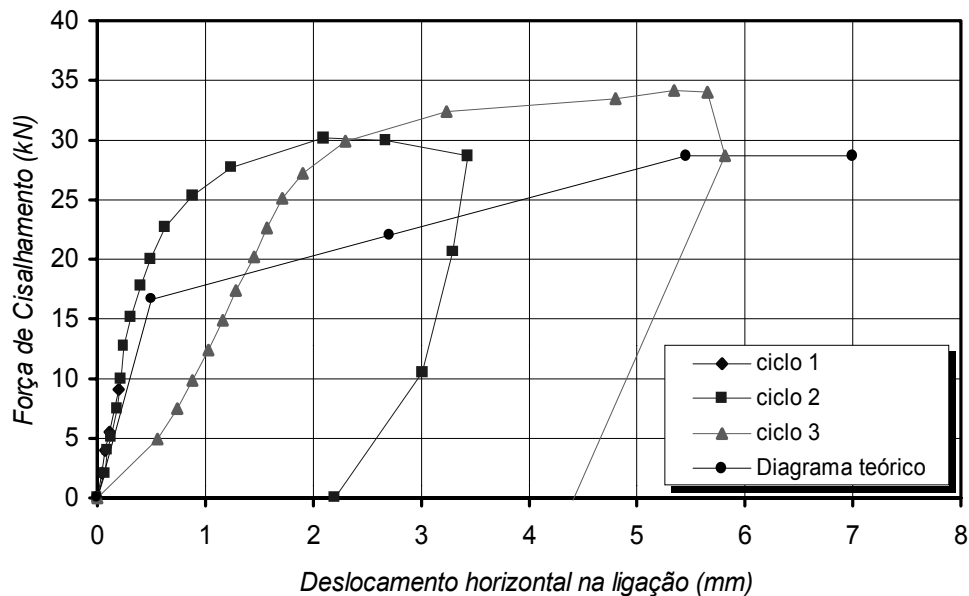


Figura 19 – Diagrama teórico para o Protótipo 1

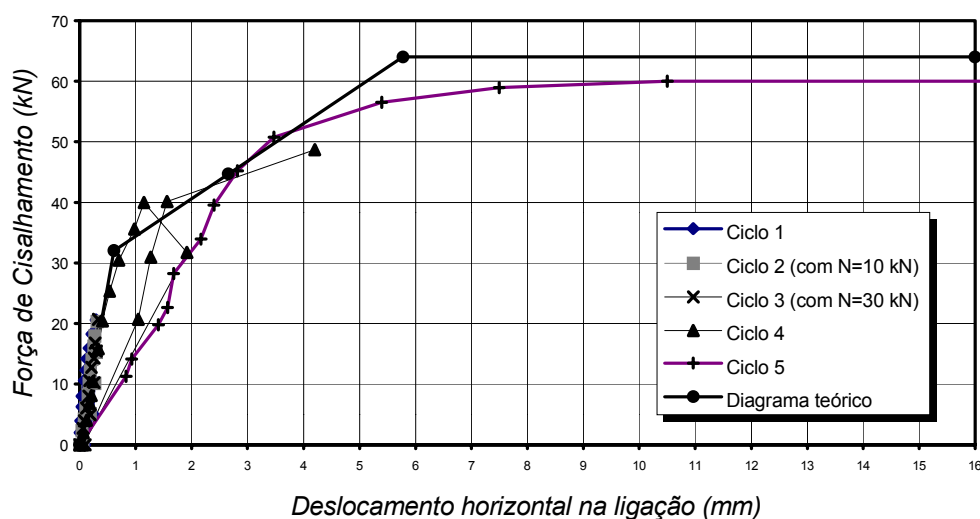


Figura 20 – Diagrama teórico para o Protótipo 2

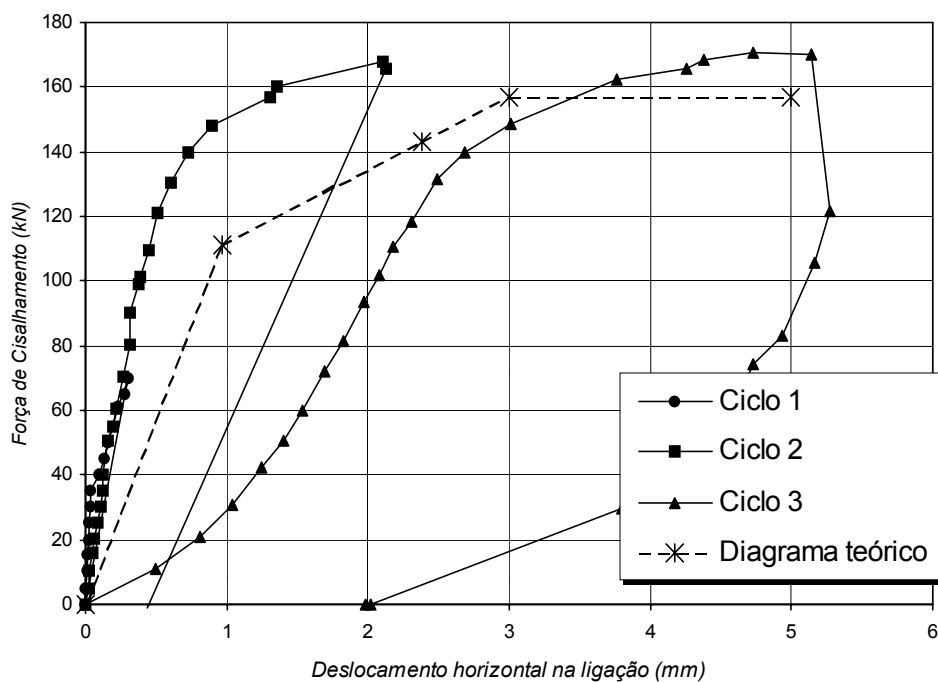


Figura 21 – Diagrama teórico para o Protótipo 3

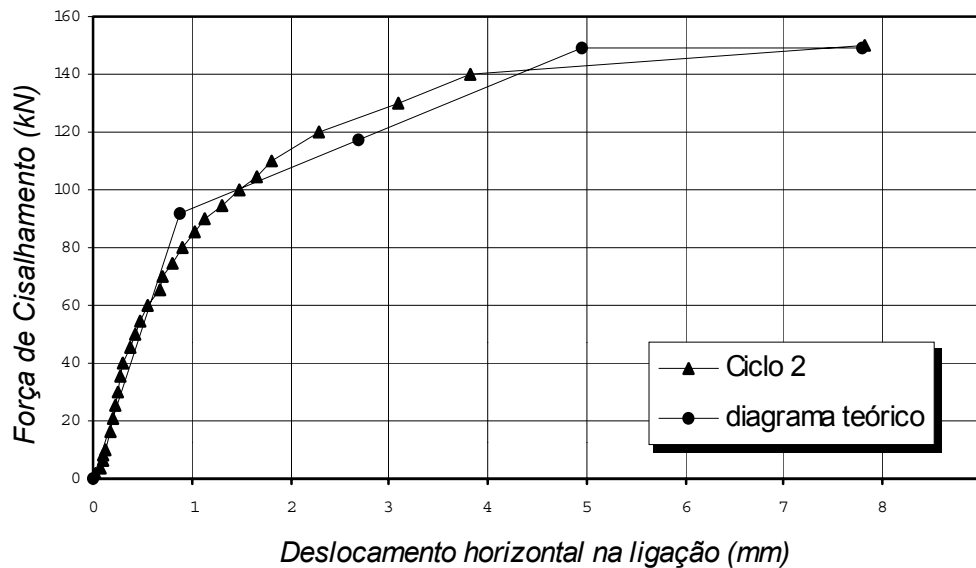


Figura 22 – Diagrama teórico para o Protótipo 4

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

Os procedimentos teóricos propostos por ENGSTRÖM (1992), para o cálculo da resistência ao cisalhamento da ligação, forneceram uma ótima estimativa para os valores experimentais. Obteve-se, em média, uma relação entre os valores teóricos e os resultados experimentais de 100%, com um coeficiente de variação de 16%, para o cálculo de  $F_{vy,min}$ , uma relação de 99%, com um coeficiente de variação de 7,5%, para o cálculo de  $F_{vy}$  e uma relação de 96%, com um coeficiente de variação de 8%, para o cálculo de  $F_{vu}$ .

A partir do equacionamento proposto para o cálculo da deformabilidade ao cisalhamento da ligação, obteve-se uma boa estimativa para a deformabilidade da ligação, para os casos de ligações com almofadas com um fator de forma  $B < 5$ . Obteve-se, em média, uma relação entre os valores teóricos e os resultados experimentais da ordem de 123%, com um coeficiente de variação de 11%.

A deformabilidade ao cisalhamento de uma ligação é inversamente proporcional ao fator de forma da almofada de elastômero. A espessura da almofada influi no mecanismo de deformação das barras do chumbador (quanto maior a espessura, maior a deformabilidade). O aumento da espessura da almofada faz com que haja um aumento da excentricidade entre as forças de cisalhamento nos elementos de viga e de pilar, aumentando o efeito da flexão nas barras do chumbador. A geometria da almofada interfere nos efeitos do atrito na ligação, surgindo tensões de tração na barra do chumbador, que no caso de barras lisas podem não ser desprezíveis, principalmente para solicitações próximas à resistência da ligação. Desta forma, quando se pretende explorar a resistência ao cisalhamento da ligação, faz-se necessária a utilização de mecanismos de ancoragem na extremidade superior do chumbador.

Assim, acredita-se que a razão pela qual o Protótipo 3 tenha apresentado um desempenho particular, em relação aos demais protótipos, está no fato de ter sido empregada uma almofada com um fator de forma alto,  $B=6,81$ , com espessura de 10 mm e comprimento de 250 mm. Acredita-se que em função da geometria da almofada, tenha ocorrido algum mecanismo de restrição às rotações relativas entre os elementos, simultaneamente à aplicação da força de cisalhamento, modificando o mecanismo de deformação da barra do chumbador e aumentando o efeito do atrito na interface da ligação, diminuindo assim a deformabilidade ao cisalhamento da ligação.

No caso da resistência ao cisalhamento, com o aumento da almofada tem-se uma área de contato maior, aumentando o atrito na interface da ligação. Também, a restrição parcial às rotações, por parte da almofada de elastômero, faz com que haja um aumento da força de tração na barra do chumbador, aumentando assim a colaboração do efeito do atrito na capacidade ao cisalhamento da ligação.

Com base na observação da influência da geometria da almofada sobre o comportamento da ligação, recomenda-se almofadas com fator de forma  $B < 5$ , para uma relação entre o comprimento e a espessura da almofada dada por  $a / h_n < 20$ . Também, um importante parâmetro a ser levado em conta seria a relação existente entre a altura da almofada em função do diâmetro, onde recomenda-se que essa relação seja  $\phi_b / h_n > 1$  e, quando se deseja um desempenho maior para a rigidez da ligação, recomenda-se uma relação  $\phi_b / h_n > 1,5$ .

Finalmente, a partir dos resultados experimentais, demonstrou-se que através da utilização em conjunto dos procedimentos teóricos para a obtenção da resistência e da deformabilidade da ligação, pode-se obter uma boa estimativa para os valores experimentais, constituindo-se assim em uma alternativa viável e em uma ferramenta de grande potencial a ser explorado para o projeto das ligações de concreto pré-moldado.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRUN, P.; PICARD, A. (1976). **Étude d'un assemblage imparfaitement rigide et des effets de son utilisation dans un multi-étage**. Quebec, Université Laval, Departament de Génie Civil. 236 p. (Rapport gct76-03).

CHEOK, G.S.; LEW, H.S. (1991). Performance of precast concrete beam-to-column connections subject to cyclic loading. **PCI Journal**, v.36, n.3, p.56-67, May-June.

DEI POLI, S.; DI PRISCO, M.; GAMBAROVA, P.G. (1992). Shear response, deformations and subgrade stiffness of dowel bar embedded in concrete. **ACI Structural Journal**, v.89, n.6, p.62-74.

DOLAN, CW, PESSIKI, S.P. (1989). Model testing of precast concrete connections. **PCI Journal**, v.32, n.2, p.62-74.

DOLAN, C.W.; STANTON, S.F.; ANDERSON, R.G. (1987). Moment resistant connections and simple connections. **PCI Journal**, n.2, p.84-103, Mar.-Apr.

ENGSTRÖM, B. (1992). Combined effects of dowel action on friction in bolted connections. In: WORKSHOP ON SEMI-RIGID BEHAVIOUR OF CIVIL

ENGINEERING STRUCTURAL CONNECTIONS, 1<sup>st</sup>, E.N.S.A.I.S., Strasborg. **COST 1: Proc.**

FAFARD, M.; PICARD, A.; BEAULIEU, D. (1990). Analyse des structures avec joints à rigidité partielle: une approche unifiée. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v.17, p.730-738.

FERREIRA, M.A. (1993). **Estudo de deformabilidades de ligações para análise linear em pórticos planos de elementos pré-moldados de concreto**. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

FERREIRA, M.A. (1999). **Deformabilidade de ligações viga-pilar de concreto pré-moldado**. São Carlos. 231p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

JOHAL, L.S.; JENNY, D.P.; SHAIKH, A.F. (1991). Impact of past research and future research needs of the precast and prestressed concrete industry. **PCI Journal**, v.36, n.6, p.52-59.

LIN, C. (1993). Friction connection of precast concrete construction. In: HASSELWANDER, G.B., ed. **Anchorage to concrete**. Detroit, American Concrete Institute. p.27-46. (ACI SP-103)

LINDBERG, R. (1992). Semi-rigid behaviour of a rc portal frame. In: WORKSHOP ON SEMI-RIGID BEHAVIOUR OF CIVIL ENGINEERING STRUCTURAL CONNECTIONS, 1<sup>st</sup>, E.N.S.A.I.S., Strasborg. **COST 1: Proc.**

MONFORTON, G.R.; WU, T.S. (1963). Matriz analysis of semi-rigidly connected frames. **Journal of the Structural Division**, ASCE, v.89, p.13-42, December.

STANTON, J.F.; ANDERSON, R.G.; DOLAN, C.; McCLEARY, D.E. (1986). **Moment resistant connections and simple connections**. Chicago, Precast/Prestressed Concrete Institute. 436p. (PCI Special Research Project N.º 1/ 4)