

Avaliação da resistência mecânica de uma ligação de cisalhamento

Felipe Rocha Romão⁽¹⁾; Daniel de Lima Araújo⁽²⁾; Vanessa Elizabeth dos Santos Borges⁽³⁾; Paulo Fernando Rodrigues⁽⁴⁾

Escola de Engenharia Civil (UFG), Rua Universitária, nº 1488, Qd 86, Lt Área, Setor Universitário. Goiânia – GO. CEP 74605-220. Tel: (62) 3209-6084

Palavras-Chave: Cisalhamento. Concreto Pré-moldado. Nichos

1 INTRODUÇÃO

Para a travessia de obstáculos, a escolha de pontes foi uma opção muito adotada. Países que expandiram, e expandem, suas malhas de transportes possuem milhares de pontes novas e antigas e, com estas, métodos construtivos variados.

Dentre os sistemas construtivos em questão, um dos mais comuns em pontes de concreto é a associação de vigas pré-moldadas com lajes moldadas no local. É um sistema que além de outras vantagens, representa uma maior rapidez de execução.

A engenharia atual vem considerando cada vez mais a velocidade de execução na hora de elaborar um projeto. Não é difícil mostrar com algumas simples análises de custo-benefício que uma forma mais ágil pode, em muitos casos, vir a ser a mais lucrativa e/ou a mais prática.

Tendo esta visão, é possível que o sistema construtivo com laje moldada no local seja ainda mais rápido se forem utilizadas não apenas as vigas pré-moldadas, mas também as lajes. E unindo-as por nichos concretados no local, o tempo de execução pode ser reduzido de forma significativa (Figura 1). Em casos de áreas com grande tráfego e que necessitam de manutenção, esta opção mostra-se uma alternativa extremamente atrativa, visto que é possível reduzir o tempo de intervenção e assim os transtornos.

Esta ideia já foi aplicada em alguns casos de pontes no Brasil, no entanto sem um bom conhecimento do comportamento da ligação. Do ponto de vista internacional, destaca-se a construção do viaduto *Bingley South Bog* (CHIODI, 2006), que utilizou o sistema de vigas e lajes pré-moldadas. Algumas vantagens importantes deste sistema construtivo é que quando bem planejado e executado, atende a exigências ambientais e estéticas, além de sua rápida

Revisado pelo orientador

(1) Aluno PIVIC, graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás. E-mail: felipe.rocha.romao@hotmail.com

(2) Orientador, Professor Doutor, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás. E-mail: dlaraujo@eec.ufg.br

(3) Mestranda em Geotecnia e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás. E-mail: vanessa.dctg@gmail.com

(4) Engenheiro Civil, Gerente de P&D do projeto de pré-moldados, Furnas Centrais Elétricas S. A. E-mail: pfer@furnas.com.br

execução (essa obra foi entregue três meses antes do previsto).

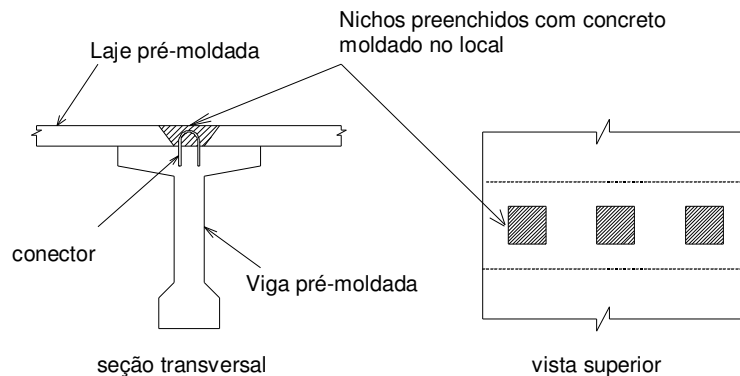


Figura 1 – Associação de viga pré-moldada com laje totalmente pré-moldada.

2 OBJETIVO

Esta pesquisa tem como objetivo fazer uma análise da resistência ao cisalhamento de ligações com nichos e superfície plana e rugosa, por meio de ensaio de cisalhamento em três blocos, conforme sugerido por Araújo (2002).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são apresentados os principais trabalhos de pesquisa relatados na literatura e que serviram de embasamento para a realização e compreensão do ensaio de cisalhamento direto desenvolvido nesta pesquisa.

3.1 Mendonça (2002)

Essa dissertação teve por objetivo estudar a resistência de ligações de cisalhamento entre peças de concreto ligadas por meio de nichos. Existem estudos diversos sobre ligações de concretos de idades diferentes e também sobre o comportamento de peças pré-moldadas quando solicitadas ao cisalhamento direto, no entanto há pouco detalhamento e estudo no caso de ligações por meio de nichos.

O modelo ensaiado por esse autor consistia de três peças ligadas entre si, duas laterais e uma central, sendo que na peça central eram deixados expostos vergalhões de aço. As peças laterais eram produzidas com um espaço aberto no centro das mesmas. As peças

laterais com nicho eram posicionadas sobre a peça central, de forma que o vergalhão ficasse no centro do nicho, e então os nichos eram concretados.

Os principais objetivos desse trabalho eram:

- Verificar a influência da taxa de armadura transversal e da existência de armadura de travamento no nicho de ligação mesa-alma na resistência ao cisalhamento das conexões;

- Avaliar a ductilidade da ligação através de gráficos que relacionam a força na ligação e o deslizamento relativo entre os elementos;

- Comparar os resultados dos ensaios com fórmulas empíricas e analíticas para avaliar a resistência ao cisalhamento da interface e, se necessário, propor uma alternativa.

O autor concluiu que no início do carregamento as curvas de carga-deslizamento obtidas nos ensaios apresentaram comportamento linear. Isto até a quebra da adesão do concreto. Neste intervalo não ocorre quase nenhum deslizamento. E enfim após a perda de adesão, as curvas tem comportamento não linear e são registrados grandes deslocamentos.

Ele concluiu também que a resistência ao cisalhamento dos nichos de ligação é aproximadamente uma função linear.

3.2 Araújo (2002)

Essa tese tem como tema central o estudo da união de vigas e lajes pré-moldadas de concreto por meio de nichos preenchidos com concreto de alta resistência e concretos reforçados com fibras de aço. Nessa pesquisa também utilizado o modelo de ensaio de cisalhamento direto com três blocos.

Este estudo fez uma análise de diferentes tratamentos da superfície na ligação dos nichos, bem como analisou a influência sobre a resistência ao cisalhamento da ligação quando foi utilizado concreto de alta resistência no preenchimento dos nichos (com e sem fibras de aço) e quando foi variado o diâmetro do conector.

A particularidade deste estudo é a forma de carregamento no ensaio. Visto que o carregamento em pontes é cíclico, o ensaio de cisalhamento direto foi realizado utilizando carregamento cíclico não reversível, a partir do qual foi determinada a perda de rigidez da ligação.

Os resultados deste estudo foram satisfatórios em vários âmbitos. Em relação ao tratamento da superfície da ligação nos nichos, observou-se um aumento na resistência ao cisalhamento, em comparação com a superfície plana e lisa, de 165% quando esta era plana e

rugosa, e de até 250% quando se utilizou chave de cisalhamento. A adição de fibras metálicas aos nichos também aumentou a resistência da ligação. O aumento da resistência do concreto na ligação de 50 MPa para 100 MPa acarretou um aumento de até 35% na resistência da ligação. Já o aumento do diâmetro do conector de 8 mm para 12,5 mm implicou em um aumento de até 67% na resistência da ligação.

3.3 Issa *et al.* (2006)

Nesse trabalho, os pesquisadores comprovaram a total transferência dos esforços de cisalhamento horizontal que sugerem entre vigas e lajes pré-moldadas pelos conectores de aço. Desta forma, há uma ação composta eficiente entre esses elementos.

Além disto, os autores comprovaram que a orientação dos conectores presentes nos nichos tem pouca influencia na transmissão dos esforços de cisalhamento horizontal. Todavia, o comprimento dos conectores apresenta uma pequena influência nos resultados finais de ruptura.

3.4 Chung *et al.* (2010)

Neste trabalho foram realizados ensaios de cisalhamento direto, além de ensaios em vigas compostas com laje pré-moldada. Nos ensaios de cisalhamento realizados pelos autores, foi avaliada a influência do tipo do conector. Outra característica avaliada nesses ensaios foi a condição da superfície: rugosa, lisa e com chave de cisalhamento.

Quanto às forças normais, essas também foram avaliadas em três diferentes intensidades de carga, as quais foram apresentadas pelo autor como sendo: mínima, média e máxima. Entretanto, valores numéricos não foram quantificados para determinar tais forças. Finalmente, foi também analisada a influência de uma camada de almofada colocada entre as peças pré-moldadas.

Os autores firmam que, em geral, o escoamento dos conectores ocorre depois de atingir um escorregamento igual a 10% do valor de seu diâmetro e, diante dessa constatação, avaliaram a resistência última do conector como sendo a força máxima obtida após atingir tal escorregamento.

Uma considerável variação nos resultados relativos à resistência de aderência foi observada. Três parâmetros podem ter influenciado de forma particular esse comportamento, dos quais o mais preponderante parece ter sido as condições da interface. Confirmando essa

afirmação, os corpos-de-prova com chave de cisalhamento apresentaram os maiores valores de resistência à aderência.

4. METODOLOGIA

O ensaio realizado consistiu na confecção e união de três peças de concreto. Desta forma, seguiu-se um modelo experimental de análise da resistência ao cisalhamento da ligação com nichos semelhante ao desenvolvido em Araújo (2002).

Os ensaios foram realizados com a superfície de ligação plana e rugosa e conectores com diâmetros de 8 mm, 10 mm e 12,5 mm.

4.1 Confecção dos corpos de prova

A concretagem dos corpos-de-prova deu-se em três etapas. Na primeira etapa foram concretados os três blocos, ou seja, a peça central (que representa a viga) e as peças laterais (que representam a laje). Nas laterais da fôrma da peça central, os vergalhões foram deixados expostos antes da primeira concretagem. Para que estes fossem posicionados corretamente, houve a necessidade de se fazer um corte na fôrma de compensado. Depois de feito o corte, preparou-se um pequeno suporte de isopor com cortes em circunferência que permitiam o posicionamento da armadura. Em seguida o suporte de isopor foi devidamente impermeabilizado com massa para calafetar nas faces interna e externa da forma (Figura 2b).

Nessa etapa, foi utilizado também um tecido para aplicação do Aditivo Retardador Superficial de Pega na fôrma antes da concretagem da peça central. Esse aditivo tinha a função de retardar a pega do concreto e, assim, permitir a exposição do agregado graúdo na região da ligação com as peças laterais, formando uma superfície rugosa (Figura 2c).

Depois de dois dias da concretagem dos blocos, foi realizada a concretagem de um dos nichos. A peça central foi posicionada com uma parte lateral virada para cima. Depois de posicionada a peça, uma pequena camada de graxa foi aplicada na superfície da peça central, em volta do nicho a ser concretado. Por fim, a peça lateral foi posicionada em cima da peça central (Figura 2d). Foram vedadas as partes laterais inferiores do nicho de modo a evitar a perda de nata de cimento durante a concretagem do nicho (Figura 2e). Depois de dois dias da realização dessa ligação, foi efetivada a ligação da segunda peça lateral pela concretagem do segundo nicho, formando assim o corpo de prova a ser ensaiado (Figura 2f). O ensaio foi realizado 28 dias após a concretagem do segundo nicho.



a) Fôrmas para concretagem da primeira etapa – peças



b) Detalhe do conector na fôrma da peça central



c) Superfície rugosa na interface com o concreto dos nichos



d) Posicionamento da peça lateral sobre a peça central



e) Concretagem do primeiro nicho.



f) Vista lateral do corpo-de-prova totalmente concretado.

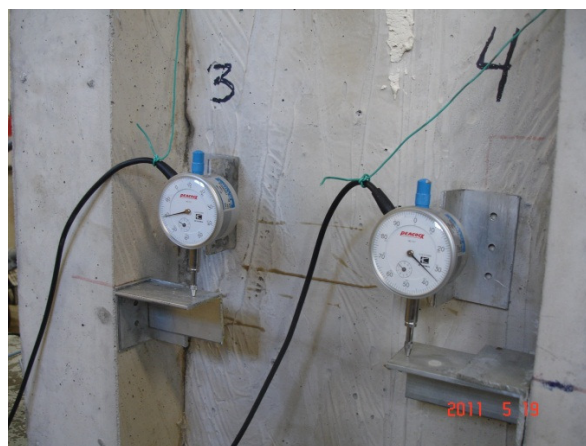
Figura 2 – Etapas da confecção dos corpos-de-prova de três blocos.

4.2 Esquema de Ensaio

Atingida a idade de 28 dias, o modelo foi posicionado no equipamento de ensaio. Para o correto nivelamento do modelo, foi utilizada uma pasta de gesso na base das duas peças laterais em contato com a mesa e na superfície da peça central na qual era posicionada uma placa de aço, deixando-a nivelada para apoio de uma célula de carga usada para medir a força aplicada durante o ensaio (Figura 3).



(a) Vista Frontal



(b) Vista de trás

Figura 5 – Detalhamento da instrumentação.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

As propriedades mecânicas do concreto estão listadas na Tabela 1. Já a resistência da ligação em cada modelo ensaiado é mostrada na Tabela 2. Observa-se que a mudança no diâmetro do conector da ligação de 8 mm para 10 mm aumentou em 55% a resistência ao cisalhamento da ligação. Por outro lado, o aumento no diâmetro do conector de 10 mm para 12,5 mm proporcionou uma redução de 17% na resistência da ligação.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do concreto.

| Modelo | Diâmetro do conector (mm) | Especificação | f_{cm} (MPa) ⁽¹⁾ | $f_{ctm,sp}$ (MPa) ⁽²⁾ |
|--------|---------------------------|--------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 8 | Blocos pré-moldados | 25,42 | 3,17 |
| | | Nichos (Lado A / Lado B) | 27,34 / 37,90 | 2,95 / 3,44 |
| 2 | 10 | Blocos pré-moldados | 25,24 | 2,80 |
| | | Nichos (Lado A / Lado B) | 34,53 / 31,54 | 3,06 / 2,71 |
| 3 | 12,5 | Blocos pré-moldados | 29,07 | 3,14 |
| | | Nichos (Lado A / Lado B) | 34,53 / 31,54 | 3,06 / 2,71 |

(1) Resistência média à compressão, determinada pela norma NBR 5739 (ABNT, 2007).

(2) Resistência média à tração por compressão diametral, determinada pela norma NBR 7222 (ABNT, 2010).

A partir das leituras dos relógios, traçaram-se os gráficos de deslizamento na ligação versus força resistida por cada ligação. Os gráficos estão mostrados nas Figuras 6, 7 e

8 da seguinte forma: o primeiro gráfico da figura apresenta a medição até o deslizamento de 2 mm, e o segundo possui a medição até o deslizamento de 10 mm, apresentando uma escala menor.

Tabela2 – Resistência da Ligação.

| Modelo | Diâmetro do conector (mm) | F _{máx} (kN) |
|--------|---------------------------|-----------------------|
| 1 | 8 | 96,87 |
| 2 | 10 | 135,27 |
| 3 | 12,5 | 112,55 |

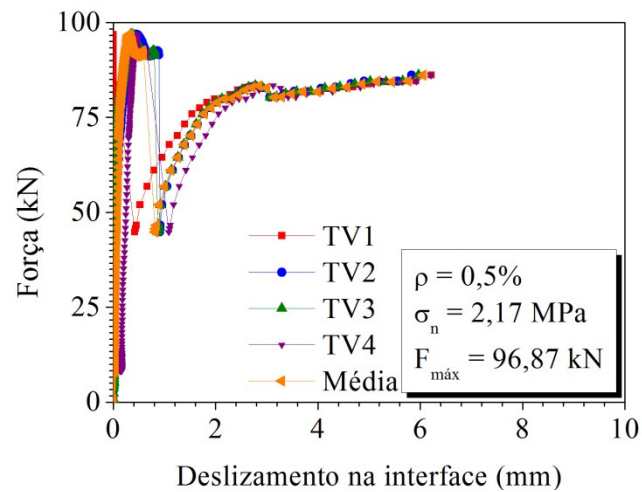
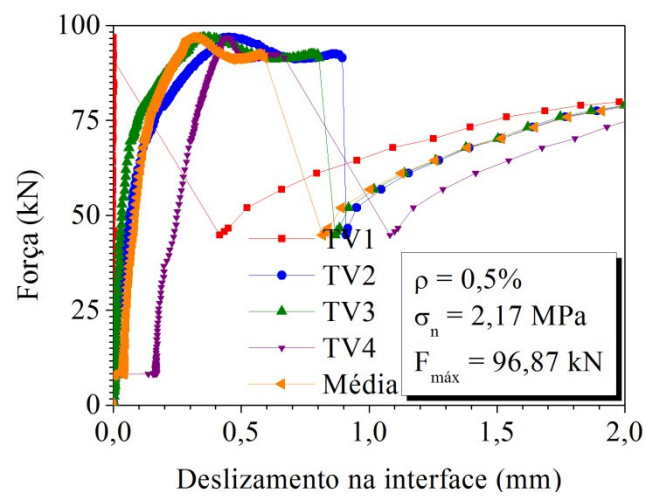


Figura 6 – Curva Força versus Deslizamento na ligação para conector de 8 mm.

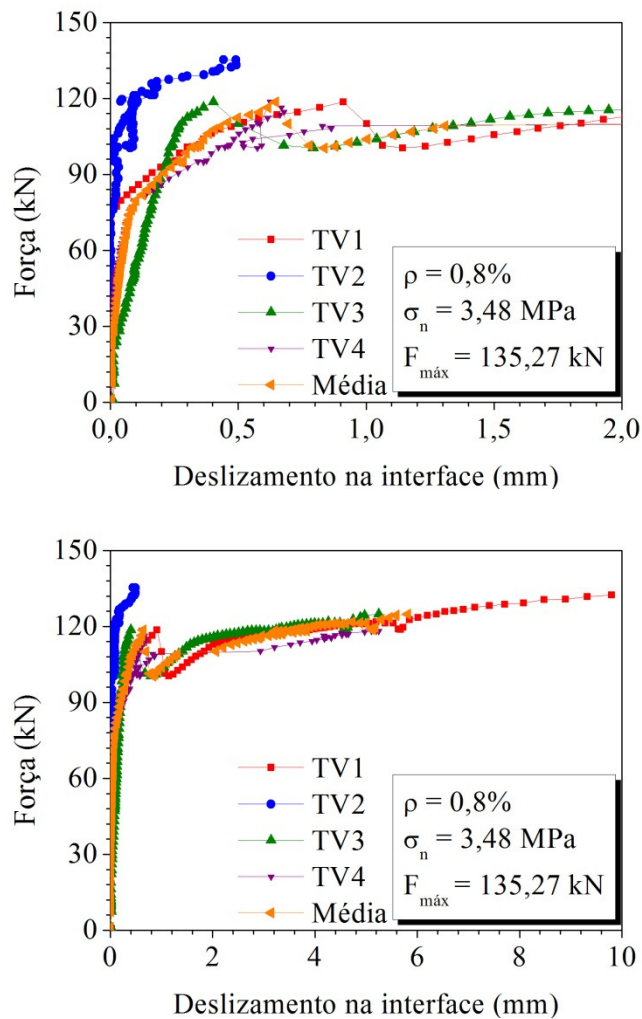


Figura 7 – Curva Força versus Deslizamento na ligação para conector de 10 mm.

É possível perceber um padrão no comportamento da curva força versus deslizamento. No início do ensaio o corpo-de-prova suporta um grande aumento da força aplicada, com pouco ou nenhum deslizamento, até o rompimento da ligação. Em seguida, há uma queda da força resistida pela ligação e a mobilização de outros mecanismos resistentes, como o efeito de pino do conector. Esses mecanismos permitem novamente a mobilização da ligação, que volta a apresentar resistência semelhante à observada na primeira ruína da ligação. O ensaio prosseguiu até o corte do conector (nos modelos com conector de 8 mm e 12,5 mm de diâmetro) ou até o esmagamento do concreto da peça central na região do conector (no modelo com conector de 10 mm de diâmetro).

Em todos os modelos, a primeira ruptura da ligação ocorreu com deslizamentos semelhantes, da ordem de 0,6 mm. Após essa primeira ruptura, o modelo com conector de 8 mm de diâmetro apresentou uma redução acentuada da resistência, sendo que o corte do conector aconteceu para um deslizamento de cerca de 6 mm. Já no modelo com conector de

10 mm de diâmetro, após a primeira ruptura, o modelo apresentou uma menor redução na resistência da ligação, sendo que o esmagamento do concreto aconteceu para deslizamentos de até 10 mm. Isso demonstra a maior ductilidade da ligação com o conector de 10 mm de diâmetro.

O modelo com o conector de 12,5 mm de diâmetro apresentou um resistência para a ligação menor que a observada no modelo com o conector de 10 mm de diâmetro, entretanto não foi observado nesse modelo, com maior taxa de armadura norma à interface, redução da resistência depois de atingida a força máxima da ligação. Isso sugere que, nesse modelo, a interface na ligação apresentou menor rugosidade, resultando na redução da resistência da ligação mesmo com uma maior tensão normal à interface (σ_n). Esse fato pode ser confirmado se for observado que a rigidez tangente inicial da ligação com o conector de 12,5 mm de diâmetro é menor que a da ligação com o conector de 10 mm de diâmetro.

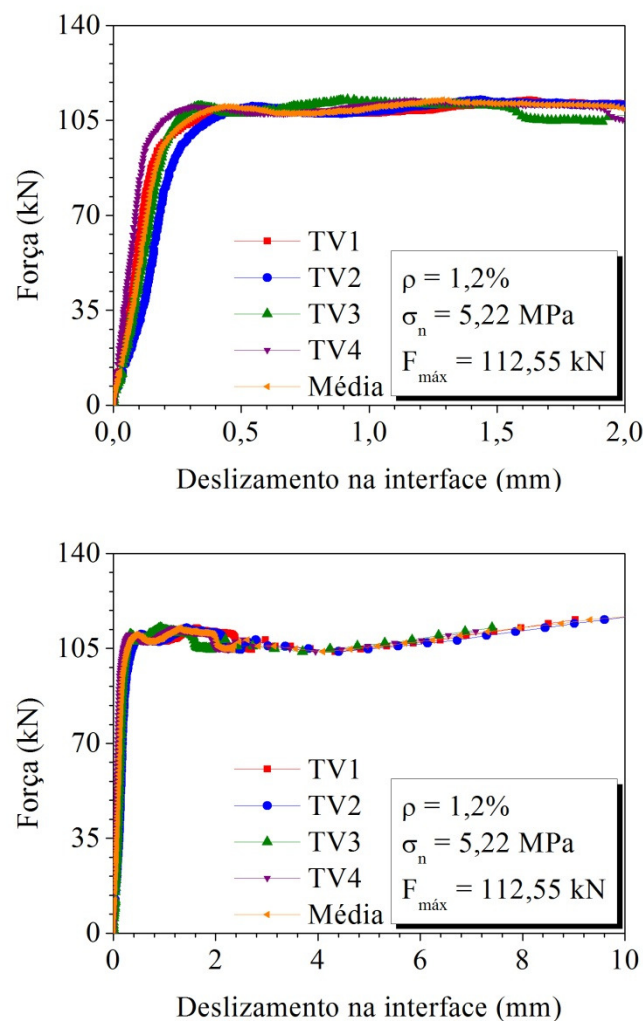


Figura 8 – Curva Força versus Deslizamento na ligação para conector de 12,5mm.

6. Conclusões

A partir dos resultados da pesquisa, pode-se concluir que a união de peças pré-moldadas utilizando a concretagem em nichos é uma opção viável, tomando-se em consideração a velocidade de execução e os resultados satisfatórios das ligações.

Nos ensaios realizados observou-se que o diâmetro do conector na ligação tem grande influência no aumento da resistência ao cisalhamento e na ductilidade desse tipo de ligação. Dessa forma, sugere-se que caso seja empregada superfície plana com a rugosidade da ligação obtida por meio de retardador superficial de pega, seja utilizado um conector de pelo menos 10 mm de diâmetro para os nichos com as dimensões estudadas nesta pesquisa.

7. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todos os colaboradores da empresa Eletrobrás FURNAS, aqui representada pelo seu Departamento de Apoio e Controle Técnico DCT.C., sediada em Aparecida de Goiânia, e pelo financiamento dos ensaios dessa pesquisa dentro de seu programa de Pesquisa e Desenvolvimento apoiado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Agradecemos, ainda, à empresa MC Bauchemie do Brasil pela doação do aditivo utilizado na pesquisa.

8. Referências Bibliográficas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5739**: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 7222**: Determinação da resistência à tração por compressão diametral do corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2010.

ARAÚJO, D.L. **Cisalhamento entre viga e laje pré-moldadas ligadas mediante nichos preenchidos com concreto de alto desempenho**. São Carlos. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.

CHIODI, L. **Conceptual design and construction of a fully precast, semi-integral viaduct**. In: 2nd International Congress, Naples, 2006. **Proceedings**. Naples, 2006, 11p.

CHUNG, C.H.; SHIM, C.S.; HYUN, B.H.; KIM, Y.J. Shear connections in prestressed beams with precast slabs. **Proceedings of the ICE – Structures and Buildings**, London, v. 163, n, SB5, p. 317-330, 2010.

ISSA, M.A.; SALAS, J.S.; SHABILA, H.I.; ALROUSAN, R.Z. Composite behavior of

precast concrete full-depth panels and prestressed girders. Chicago, **PCI Journal**, Setembro-Outubro, p. 132-145, 2006.

MENDONÇA, E.C.G. **Resistência ao cisalhamento de nichos de concreto utilizados na ligação laje-viga em estruturas pré-moldadas.** Rio de Janeiro. Tese (Mestrado). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.