

ESTUDO ANALÍTICO E EXPERIMENTAL DA TRANSFERÊNCIA DE ESFORÇOS DE CISALHAMENTO EM MODELOS DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE DA INTERFACE E A RESISTÊNCIA DO CONCRETO DE PREENCHIMENTO

ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE SHEAR TRANSFER IN PRE-CAST CONCRETE MODELS CONSIDERING THE INFLUENCE OF ROUGHNESS AND THE STRENGTH OF CONCRETE FILLING

Benício Lacerda¹, Maria Cristina Vidigal de Lima², Vanessa Cristina de Castilho³, Francisco Antonio Romero Gesualdo⁴

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil

¹Pós-graduando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, E-mail: benicio_lacerda@hotmail.com

²Professora Associada, E-mail: macris@ufu.br

³Professora Adjunta, E-mail: castilho@feciv.ufu.br

⁴Professor Titular, E-mail: gesualdo@ufu.br

RESUMO

Diante do amplo cenário de crescimento do setor da construção civil, novos processos construtivos estão sendo empregados para obras de pequeno e médio porte, como é o caso de sistemas formados por painéis duplos treliçados pré-moldados de concreto preenchidos com concreto moldado no local. Este artigo buscou investigar analiticamente e experimentalmente, os fatores que interferem na resistência a tensão de cisalhamento da interface entre concretos moldados em diferentes idades. O programa experimental consistiu no ensaio de vinte e seis modelos submetidos a tensão de cisalhamento direto com a espessura do concreto de preenchimento variando de sete, nove e treze centímetros, possuindo interfaces lisas e rugosas além, de diferentes resistências à compressão do concreto de preenchimento. Os resultados do estudo do comportamento dos modelos sob cisalhamento direto mostraram que a presença da armadura que cruza a interface, a resistência à compressão dos concretos envolvidos, a rugosidade e a menor relação entre a espessura da região de preenchimento de concreto e da região de concreto pré-moldado melhoram o comportamento do elemento estrutural. Em geral, os modelos de interfaces lisas deslizaram na ordem de 10^{-2} mm, enquanto os modelos de superfícies rugosas ficaram na ordem de 10^{-3} mm. **Palavras-chaves:** painéis duplos treliçados, cisalhamento direto, rugosidade, transferência de esforços de cisalhamento

ABSTRACT

Due the scenario in the civil construction industry, new constructive processes are being used for construction of small and medium size structures, as is the case of systems formed by double precast concrete panels lattice filled with concrete cast in place. This study aimed to investigate analitically and experimentally, the factors that affected the shear strength on the interface between concrete cast at different ages. In experimental program was tested 26 models subject to a direct shear taking into account different thickness of concrete filling as 7 cm, 9 cm and 13 cm, with smooth and rough interfaces, as well as different the concrete of compressive strength. The models results under direct shear showed that the reinforcement amount which crosses the interface, the concrete compressive strength, the interface surface and a lowest ratio between the thickness of the filling region of concrete and precast concrete improves the behavior of the structural element. In general, the models with smooth interface slid in the order of 10^{-2} mm while the rough surfaces models were in the order of 10^{-3} mm.

Keywords: double panels lattice, direct shear, roughness, transfer of shear forces.

1 – INTRODUÇÃO

Diante do amplo cenário de crescimento da construção civil no país, observa-se o aumento de pesquisas e inovações tecnológicas de sistemas estruturais para otimização dos processos construtivos.

Um sistema estrutural que vem ganhando espaço nos projetos de obras de grande e de pequeno porte são as estruturas pré-moldadas de concreto. O uso dos elementos pré-moldados tem demonstrado gerar rapidez na execução de obra, diminuição de fôrmas e interação da estrutura com outros tipos de sistemas estruturais.

De acordo com a ABNT NBR 6118:2007, durante as etapas de construção e de serviço (utilização da edificação) nas estruturas de concreto, devem ser atendidas as exigências que garantem a qualidade estrutural tais como:

resistência estrutural, desempenho em serviço e durabilidade das estruturas.

Segundo El Debs (2000), a pré-moldagem em concreto consiste em um processo construtivo em que parte da obra é moldada fora de seu local definitivo de utilização. De acordo com a ABNT NBR 9062:2006, elementos pré-moldados são aqueles previamente moldados fora do local de utilização definitiva da obra.

Os elementos pré-fabricados são elementos produzidos em escalas industriais com elevado controle de qualidade. As principais diferenças entre elementos estruturais de concreto pré-moldado e elementos de concreto moldados no local, consiste nas facilidades de manuseio e transporte dos elementos pré-moldados além das facilidades de montagem e execução das ligações destes elementos para formar a estrutura. Essas ligações, de acordo com Migliore

Júnior (2005), governam os aspectos econômicos da obra por influenciarem na estabilidade da estrutura, além de garantir a sua rigidez.

Segundo Araújo (2002), quando os elementos pré-moldados de concreto são preenchidos com concreto moldado no local, estes elementos recebem o nome de peças compostas (de seção parcial). A ABNT NBR 9062:2006 define peças compostas de seção parcial como elementos de concreto interligados por meio de moldagem distinta e que atua como peça única submetida a efeito de ações impostas após a sua solidarização. Um exemplo da utilização de peças compostas pode ser vistas no emprego de pontes, cuja laje da ponte é de concreto moldado no local e suas vigas de sustentação são elementos de concreto pré-moldados.

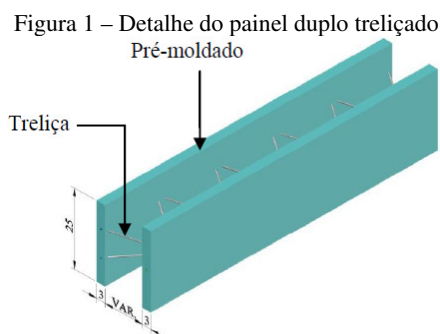
De acordo com El Debs (2000), uma seção é considerada composta, no caso de não ocorrer deslizamentos relativos entre as peças na superfície da interface. Caso haja deslocamento relativo, o efeito da maior retração do concreto moldado no local colabora para que ocorra deformação ao cisalhamento na interface da ligação.

As peças de seção parcial são utilizadas por reduzirem o consumo de fôrmas e escoramentos e é uma opção para peças com menor peso, viabilizando o transporte na montagem. Recentemente elas estão sendo empregadas no cenário da construção civil como painéis duplos treliçados, foco principal deste trabalho.

No entanto, embora este trabalho investigue o comportamento desses painéis duplos treliçados, é importante saber que não está restrito somente a esta aplicação e pode ser utilizado em painéis de maiores dimensões. Sabe-se que alguns parâmetros referentes às suas propriedades mecânicas ainda são desconhecidos. Esses parâmetros servem de referencial técnico para a elaboração de um projeto bem sucedido.

2 – PAINÉIS DUPLOS TRELIÇADOS

O painel duplo treliçado é constituído de duas placas de concreto pré-moldado com espessura da ordem de 3 a 3,5 cm e altura em torno de 25 cm. São interligadas por meio de uma armação treliçada eletrossoldada sendo que a distância entre as placas variam conforme a exigência do projeto (Figura 1).



Algumas das vantagens de se utilizar este sistema estrutural em obras, com base na publicação de El Debs (2000) são: maior velocidade de produção da obra; redução no consumo de concreto; diminuição de gasto com

armadores e carpinteiros, uma vez que o painel serve como fôrma; redução significativa de madeira e de cimbramentos; redução de resíduos gerados durante a etapa construtiva, o que garante maior economia de custos quanto à limpeza da obra.

Conforme alguns fabricantes produtores dos painéis treliçados pré-moldados de concreto, a sua montagem pode ser feita pelos próprios trabalhadores da obra.

Porém, os elementos formados por painéis duplos treliçados possuem limitação quanto à forma, por exemplo, peças curvas, e ao tamanho, pelo fato da montagem ser manual, pois, uma peça de maior peso dificultaria o processo.

A ligação dos painéis duplos treliçados é feita com a utilização do concreto moldado no local, por ser uma ligação mais simples de se executar.

De acordo com Araújo (2002), deve ser feita uma avaliação quanto ao comportamento dessas ligações, na interface dos concretos, uma vez que, por possuírem características e idades diferentes, podem influenciar no seu comportamento mecânico, como por exemplo, na transferência de esforços de cisalhamento na interface.

Outros parâmetros que pode influenciar no comportamento mecânico do sistema são a largura entre os painéis, a resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) moldado no local, utilizado para realizar a ligação, além da rugosidade superficial dos painéis pré-moldados.

De acordo com Acker (2002), os fabricantes de elementos pré-moldados adotam uma variação de seções transversais e padronizam as outras dimensões da peça. Esta padronização permite aos projetistas selecionarem qual a peça mais adequada a ser empregada na obra, respeitando limites de comprimento, largura e capacidade de carregamento.

Os painéis pré-moldados apresentam em sua fabricação, espessuras fixas, porém, a altura e a sua largura apresentam dimensões variadas.

A concretagem de cada uma das faces dos painéis duplos ocorre em um intervalo de 24 horas após a concretagem da face anterior.

Para avaliar os benefícios econômicos do emprego desse sistema estrutural, deve ser feito levantamento de custos que envolvem desde o processo de fabricação até o destino final na obra, o que inclui as etapas de transporte e solidarização da peça em seu local definitivo de utilização.

Os elementos estruturais formados por painéis duplos treliçados são comumente empregados em escadas, pontes, cortinas, obras comerciais e residenciais.

Esses elementos podem ser designados por: painéis duplos em cortina (Figura 2-a), pré-pilares (Figura 2-b), pré-baldrames (Figura 2-c) e pré-vigas (Figura 2-d), sendo considerados como elementos de seção parcial.

Figura 2 – Aplicação dos painéis duplos na construção civil



Após a solidarização, o comportamento estrutural é influenciado pela transferência de esforço interno de forças cortantes em sua interface. Com a solidarização do painel duplo treliçado ocorre a retração diferencial e a fluência no concreto pré-moldado e concreto moldado no local, uma vez que, possuem idades e características diferentes. A aderência entre as superfícies de contato é um parâmetro importante a ser investigado, pois, influencia na transferência de esforços de cisalhamento em sua interface.

Assim, este trabalho buscou analisar a resposta estrutural de modelos de cisalhamento direto obtidos experimentalmente e compará-los com os resultados encontrados de expressões propostas na literatura técnica. Para isso, foi realizado o ensaio experimental de modelos de 50 cm de comprimento, com espessuras do concreto de preenchimento variáveis de 7 cm, 9 cm e 13 cm, além de serem considerados interfaces lisas e rugosas.

3 – MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA POR CONTATO ENTRE SUPERFÍCIES

A transferência do esforço cisalhante na superfície de contato entre dois materiais de concreto ocorre pela aderência e pode ser dividida em:

a) Aderência por adesão

Trata-se do primeiro mecanismo a ser mobilizado na interface entre as peças de concreto quando há força cortante. Este mecanismo depende do tipo de superfície: lisa ou rugosa. Nas estruturas de vigas de concreto armado, Leonhardt e Mönnig (1977) explicam que a aderência por adesão ocorre devido à interação entre o aço e a nata de cimento por uma ação de colagem. Essa interação depende da rugosidade e da limpeza da superfície das armaduras.

b) Aderência por atrito

Após o rompimento do mecanismo de adesão, a resistência da interface da peça pode ser garantida pelo atrito existente entre as superfícies de contato. Isto ocorre quando há um deslizamento pequeno e pela existência de tensões de cisalhamento que cruzam a interface.

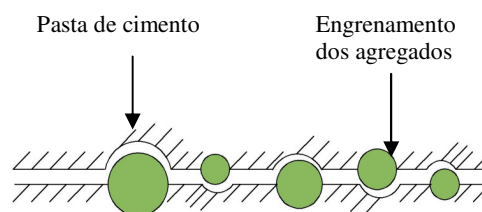
De acordo com Leonhardt e Mönnig (1977), as pressões nas peças de concreto armado podem ocorrer devido às forças externas, pela retração ou pela expansão do concreto na peça. Essas tensões transversais surgem devido à aplicação de pressões entre os materiais.

O coeficiente de atrito μ pode variar de 0,3 a 0,6 dependendo da rugosidade superficial do aço. Essa parcela de transferência de esforços na interface por atrito é diretamente influenciada pela rugosidade da superfície. Dessa forma, a rugosidade é um fator importante a ser considerado na resistência por atrito.

c) Aderência por ação mecânica

A transferência de esforços por ação mecânica ocorre quando há deslizamentos relativos entre duas superfícies de contato. Esta forma de transferência ocorre por meio do engrenamento mecânico e que forma um “dente”, quando esses deslizamentos são solicitados ao cisalhamento. Nas superfícies rugosas o engrenamento mecânico é garantido pelo agregado graúdo que atravessa essa interface conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Transferência de esforços por ação mecânica
Fonte: Adaptado de Rizzo (2008)

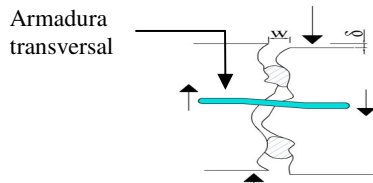


d) Transferência pela armadura transversal à interface

Quando ocorre um deslizamento em uma superfície estando em contato, a armadura transversal, existente na interface, colabora na transferência de tensões de cisalhamento por efeito de pino. Segundo Araújo (2002), a resistência por ação do pino devido à armadura transversal, geralmente, apresenta valores muito inferiores às parcelas de atrito e ação mecânica. Essa armadura transversal tem a função de aumentar a resistência por atrito entre as superfícies quando aplicada uma força normal à interface.

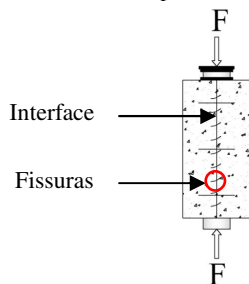
Se a superfície for rugosa, poderá ocorrer um afastamento transversal que somado ao deslizamento entre as superfícies pode provocar um alongamento da armadura, conforme apresentada na Figura 4. Ao ocorrer este processo, a resistência por atrito entre as superfícies de contato aumenta devido à reação da armadura, criando-se uma tensão normal de compressão na interface.

Figura 4 – Transferência de esforços por efeito de pino
Fonte: Adaptado de Rizzo (2008)



Araújo (2002) explica que deve ser definida claramente uma interface para peças de concreto com alta concentração de armaduras normais ao plano da interface e submetidas a esforços tangenciais. Caso não haja essa preocupação, inúmeras fissuras inclinadas ao plano de cisalhamento serão formadas como mostrada na Figura 5.

Figura 5 – Fissuras inclinadas ao plano de cisalhamento
Fonte: Adaptado de Araújo (2002)



3.1 Expressões Analíticas de Normas Técnicas

Nesta seção são relatadas algumas expressões de normas técnicas que podem ser utilizadas para o cálculo das tensões de cisalhamento.

3.1.1 Conforme a ABNT NBR 9062:2006

A ABNT NBR 9062:2006 descreve que deve ser levado em consideração, o cálculo das tensões existentes na parte pré-moldada antes do endurecimento do concreto no processo de fabricação, as propriedades mecânicas correspondentes à solidarização da peça pelo preenchimento de concreto moldado no local e às propriedades mecânicas do concreto pré-moldado.

Outro fator a considerar no cálculo das tensões de cisalhamento é a redistribuição de esforços decorrentes da retração e da fluência, além dos esforços de deslizamento da superfície em contato. Segundo a mesma norma, a tensão solicitante de cálculo τ_{sd} deve ser menor ou igual ao valor último da tensão de cisalhamento τ_u . Deve ser considerado o valor médio da força de compressão ou de tração F_{md} que age na interface ao longo do comprimento l_v e a largura de interface b_{int} .

$$\tau_{sd} \leq \tau_u \quad (1)$$

$$\tau_{sd} = \frac{F_{md}}{l_v \cdot b_{int}} \quad (2)$$

$$\tau_u = \beta_s \cdot \frac{f_{yd} \cdot A_{sw}}{b_{int} \cdot s} + \beta_c \cdot f_{ctd} < 0,25 f_{cd} \quad (3)$$

Em que:

f_{yd} : resistência de cálculo do aço;

f_{cd} : resistência de cálculo à compressão do concreto conforme a ABNT NBR 6118:2007;

A_{sw} : área da armadura que atravessa perpendicularmente à interface;

b_{int} : largura da interface;

s : espaçamento da armadura A_s ;

l_v : distância entre os momentos nulos e máximos de um elemento estrutural simplesmente apoiado;

f_{ctd} : resistência à tração de cálculo obtido segundo a ABNT NBR 6118:2007, para o menos resistente dos concretos em contato;

β_s : coeficiente de minoração aplicado à armadura;

β_c : coeficiente de minoração aplicado ao concreto.

O coeficiente de minoração β , aplicado ao concreto e ao aço, é válido para superfície de ligação áspera com rugosidade mínima de 5 mm a cada 30 mm, cujos valores encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1– Coeficientes de minoração das parcelas resistentes do aço e do concreto

$A_{sw}/b_{int} \cdot s$ (%)	β_s	β_c
$\leq 0,20$	0	0,3
$\geq 0,50$	0,9	0,6

Fonte: ABNT NBR 9062 (2006)

3.1.2 Conforme o PCI (2004)

A verificação da resistência ao cisalhamento deve atender a condição apresentada na Equação (4), descrita no manual do PCI (2004), para uma seção composta na ocorrência de momentos positivos e negativos:

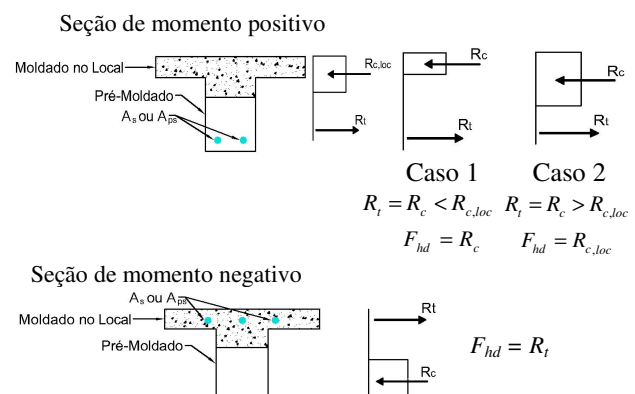
$$F_{hd} \leq F_{hu} \quad (4)$$

Em que:

F_{hd} : força horizontal solicitante de cálculo, conforme a Figura 6;

F_{hu} : força última que atua na interface.

Figura 6 – Cisalhamento em uma seção composta



Fonte: Adaptado do PCI (2004)

R_t : resultante de tração das armaduras;
 R_c : resultante de compressão;
 $R_{c, loc}$: resultante de compressão na região do concreto moldado no local, cujo valor é de $0,85 \cdot f_{cd} \cdot A_{c, loc}$;
 $A_{c, loc}$: área da peça composta pelo concreto moldado no local.

Existem três casos para a realização do dimensionamento de seções compostas:

Caso 1 – Quando $F_{hd} \leq 0,56 \cdot b_{int} \cdot l_v$ (tensão de 0,56 MPa)

Neste caso, se a superfície for “intencionalmente” rugosa, a armadura de cisalhamento pode ser dispensada. No manual do PCI (2004), é importante notar que não há indicação sobre quais casos em que a interface pode ser considerada como “intencionalmente rugosa”. Na falta desta informação pode-se considerar as indicações propostas conforme os níveis estabelecidas pela FIP (1982), a qual estabelece a classificação da rugosidade superficial em dez níveis conforme o seu processo moldagem.

Caso 2 – Para $0,56 \cdot b_{int} \cdot l_v < F_{hd} < 2,45 \cdot b_{int} \cdot l_v$

A condição deste caso é aplicável para as superfícies de interface intencionalmente rugosa, cuja amplitude de rugosidade seja até $\frac{1}{4}$ de polegadas ou 6,35 mm.

Caso 3 – Para $F_{hd} > 2,45 \cdot b_{int} \cdot l_v$

Quando a força horizontal solicitante de cálculo for maior que $2,45 \cdot b_{int} \cdot l_v$, é necessária a colocação de uma armadura ao longo do comprimento l_v expressa por:

$$A_{sw} = \frac{F_{hd}}{\phi \cdot \mu_e \cdot f_y} \quad (5)$$

Em que:

A_{sw} : área da armadura transversal que atravessa a interface e que se encontra ancorada;
 f_y : resistência de escoamento do aço;
 μ_e : coeficiente efetivo de atrito-cisalhamento;
 ϕ : coeficiente de redução de resistência, igual a 0,75.

O coeficiente efetivo de atrito-cisalhamento pode ser calculado por:

$$\mu_e = \frac{6,9\lambda \cdot b_{int} \cdot l_v \cdot \mu}{F_{hd}} \quad (\text{tensão de 6,9 MPa})$$

O fator de correção λ , que leva em conta a densidade do concreto e vale 1,0 para concreto de densidade normal e 0,75 para concreto de baixa densidade.

O coeficiente de atrito interno μ está apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores recomendados dos coeficientes atrito-cisalhamento

Tipos de Interface	μ Recomendado	μ_e Máximo
Concreto x concreto, moldados monoliticamente	1,4 λ	3,4
Concreto x concreto pré-moldados, com superfície rugosa	1,0 λ	2,9
Concreto x concreto	0,6 λ	2,2
Concreto x aço	0,7 λ	2,4

Fonte: Adaptado do PCI (2004)

3.1.3 Conforme a FIB MC 2010

A Seção 6.3.4 da *Fédération Internationale du Béton* (FIB, 2010), explica o procedimento de projetos de ligações e adota a seguinte expressão para avaliar a resistência ao cisalhamento da ligação:

$$\tau_u = \underbrace{\tau_c}_{\text{Adesão}} + \underbrace{\mu \cdot (\rho_{sw} \cdot \kappa \cdot f_y + \sigma_n)}_{\text{Atrito}} + \underbrace{\alpha \cdot \rho_{sw} \cdot \sqrt{f_y \cdot f_{cc}}}_{\text{Efeito de pino}} \leq \beta \cdot v \cdot f_{cc} \quad (6)$$

A expressão (6) é composta por três parcelas. A primeira parcela corresponde à tensão de adesão entre as duas partes de concreto, a segunda parcela corresponde à contribuição do atrito entre a armadura e o concreto e a última parcela corresponde o efeito de pino da armadura que atravessa a interface.

Em que:

τ_c : tensão de adesão entre as duas partes de concreto expressa por:

$$\tau_c = \beta \cdot f_{ct,m} \quad (7)$$

Em que: $f_{ct,m}$ = resistência média à tração do concreto, dada por:

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad \text{com } f_{ck} \text{ em MPa}$$

ρ_{sw} = taxa geométrica da armadura que atravessa a interface expressa por:

$$\rho_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_{int} \cdot h} \geq 0,001$$

τ_u : tensão máxima de cisalhamento;

σ_n : tensão de compressão normal devido às forças externas aplicadas perpendicularmente ao plano da interface;

b_{int} : largura da interface;

h : altura da seção de interface;

v : corresponde a um coeficiente relativo à força axial expressa por:

$$v = \frac{N_{sd}}{A_c \cdot f_{cd}} \quad \text{Em que: } N_{sd} \text{ é a força axial de cálculo que age na}$$

interface de concreto;

f_{cd} : resistência de cálculo à compressão do concreto;

A_c : área da interface de concreto dada por:

$$A_c = b_{int} \cdot h \quad (8)$$

f_{cc} : resistência à compressão média do concreto em corpos de prova cilíndrico, em MPa.

Os fatores κ e α consideram que a armação ou a ligação estão sujeitas a forças axiais e de flexão. Dependendo da rugosidade da interface, da ancoragem das armaduras os seguintes valores podem ser adotados:

$$\kappa = \frac{\sigma_{sw}}{f_y} \leq 1,0 \quad (9)$$

σ_{sw} : tensão na armadura;

f_y : resistência de escoamento do aço, em MPa.

β e μ : coeficientes extraídos da seção 6.10.2 da CEB 90; Para superfícies rugosas $\kappa = 0,5$ e $\alpha = 0$, quando a superfície for lisa $\kappa = 0$ e $\alpha = 1,5$.

Dois tipos de aspereza da superfície de ligação são considerados à fim de avaliar os coeficientes β e μ , conforme mostrados nas Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 3 – Tipos de aspereza para superfície lisa segundo CEB-FIP MC 90

Categoria 1 (lisa)	
I	Superfícies lisas obtidas pelo lançamento do concreto em fôrmas metálicas ou de madeira
II	Superfícies alisadas com alguma ferramenta para torná-la lisa, de forma a ficar idêntica a (I)
III	Superfícies com pequenas ondulações
IV	Superfície feita por fôrmas deslizantes ou régua vibratórias
V	Superfícies feitas por extrusão
VI	Superfície com textura feita pela escovação do concreto fresco

Fonte: CEB-FIP MC 90 (1993)

Tabela 4 – Tipos de aspereza para superfície rugosa segundo CEB-FIP MC 90

Categoria 2 (rugosa)	
I	Igual a classe VI da categoria 1, porém, com textura aparentando ter sido escarificada ou raspada para obter rugosidade
II	Superfície bem compactada, sem estar texturizada, com agregado graúdo exposto, mas firme na matriz de concreto
III	Superfície de concreto jateada para exposição do agregado graúdo
IV	Superfície com dentes

Fonte: CEB-FIP MC 90 (1993)

Assim, β e μ obedecem às categorias das superfícies mostradas na Tabela 3 e na Tabela 4, cujos valores encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores dos coeficientes β e μ do CEB-FIP MC 90

Coeficientes	Superfície Categoria 1	Superfície Categoria 2
β	0,2	0,4
μ	0,6	0,9

Fonte: CEB-FIP MC 90 (1993)

3.2 Expressões Analíticas da Literatura Técnica

Algumas equações sobre transferência do esforço cisalhante, relacionado com armaduras que atravessam perpendicularmente a interface estudada por alguns pesquisadores, estão descritas a seguir. O termo $\rho_{sw} \cdot f_y$ refere-se à contribuição da armadura que resiste apenas à tensão normal, μ é o coeficiente de atrito interno e τ_u é a tensão máxima de cisalhamento.

Equação de Birkeland e Birkeland (1966)

Birkeland e Birkeland (1966) foram os primeiros a introduzir uma equação parabólica para a resistência ao cisalhamento ao longo da interface:

$$\tau_u = 2,78 \cdot \sqrt{\rho_{sw} \cdot f_y} \quad (\text{MPa}) \quad (10)$$

Equação de Mast (1968)

A equação proposta por Mast (1968) foi baseada no modelo da teoria atrito-cisalhamento e avaliava a resistência ao cisalhamento em interfaces rugosas. Nesse modelo a interface rugosa foi substituída por "dentes" inclinados de $tg\phi$.

Quando a interface está sendo solicitada por uma força de compressão, surgirá uma força horizontal que tenderá tracionar as armaduras transversais. Deve-se assumir que a armadura transversal à interface pode atingir a sua resistência ao escoamento. A resistência da interface ao cisalhamento pode ser avaliada por:

$$\tau_u = \rho_{sw} \cdot f_y \cdot tg\phi \leq 0,15 \cdot f_c \cdot tg\phi \quad (11)$$

Em que:

$tg\phi = 0,7$ para ligação de concreto com concreto e interface lisa;

$tg\phi = 0,7$ para ligação de concreto com aço e conectores metálicos soldados;

$tg\phi = 1,0$ para ligação de concreto com aço em vigas compostas;

$tg\phi = 1,4$ para ligação de concreto com concreto e interface rugosa;

ρ_{sw} : taxa geométrica de armadura transversal à interface deve ser menor que 0,015;

f_c : resistência à compressão do concreto.

Complementando as equações de Mast (1968), as pesquisas realizadas por Hofbeck, Ibrahim, Mattock (1969) sugeriram que o limite absoluto da tensão de resistência da interface ao cisalhamento fosse de 4,14 MPa para a tensão normal de compressão, ou seja, $\rho_{sw} \cdot f_y \cdot tg\phi \leq 4,14 \cdot tg\phi$.

Equação de Shaikh (1978)

Com base em estudos desenvolvidos desde 1966, a fim de estimar a resistência ao cortante horizontal em interfaces,

Shaikh (1978) concluiu que a resistência ao cisalhamento das ligações deve ser determinada por:

$$\tau_u = \phi \cdot \rho_{sw} \cdot f_y \cdot \mu_e \quad (12)$$

Em que:

$$\mu_e = \frac{6,9\lambda^2 \cdot \mu}{\tau_u} \quad (\text{MPa}) \quad (13)$$

μ_e : coeficiente de atrito efetivo;

μ : coeficiente de atrito interno;

μ : vale 1 para interface rugosa entre concretos, 0,4 para interfaces lisas entre concretos e 0,6 para interface entre concreto e aço.

ϕ : é um coeficiente de redução que vale 0,85;

λ : é uma constante que leva em consideração a densidade do concreto;

λ : vale 1,0 para concreto de densidade normal;

λ : igual a 0,75 para concreto de baixa densidade (concreto leve);

Equação de Mattock (1988)

Segundo Mattock (1988), a resistência por aderência entre duas superfícies de concreto submetidas ao cisalhamento direto pode ser expressa em função da resistência à compressão f_c e pode ser estimada pela primeira parcela da equação ao cisalhamento:

$$\tau_u = 0,467 \cdot f_c^{0,545} + 0,8 \cdot (\rho_{sw} \cdot f_y + \sigma_n) \leq 0,3 \cdot f_c \quad (\text{MPa}) \quad (14)$$

Equação de Loov e Patnaik (1994)

Loov e Patnaik (1994) procuraram estudar a influência da resistência do concreto f_c na capacidade de resistência ao cisalhamento pela interface:

$$\tau_u = k \cdot \sqrt{\rho_{sw} \cdot f_y \cdot f_c} \quad (\text{MPa}) \quad (15)$$

Em que: k é uma constante que vale 0,5 para interface inicialmente não fissurada.

4 – ENSAIOS EXPERIMENTAIS

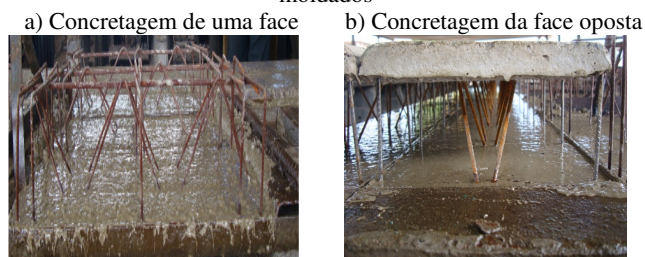
Foram realizados ensaios de cisalhamento direto em modelos prismáticos de 50 cm de altura, com carregamento crescente. Nesses modelos as variáveis consideradas nas análises foram a espessura interna do painel, referente ao concreto de preenchimento, a rugosidade da interface entre concretos (lisa ou rugosa) e a resistência à compressão do concreto moldado no local.

Foram ensaiadas três séries de painéis duplos treliçados de 50 cm de altura, totalizando vinte e seis modelos, tendo sido moldados em duas etapas. As faces externas dos painéis têm em média 3 cm de espessura. Primeiramente, moldou-se um dos lados do painel e, após três dias, foi moldado o segundo lado do painel (Figura 7).

Os elementos de concreto pré - moldado são interligados por meio de treliça eletrossoldada e estribos, sendo posteriormente preenchidos com concreto moldado no local.

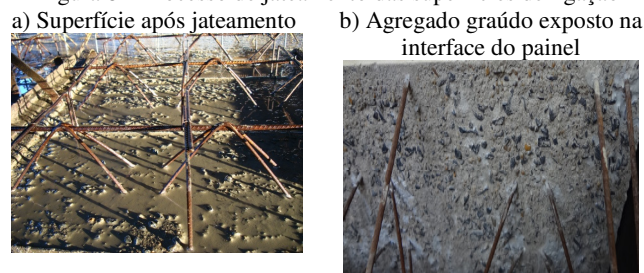
A segunda etapa consistiu em preencher os modelos com concreto moldado *in loco*, (CML) entre as camadas de concreto pré-moldado (CPM) do painel, resultando em um elemento estrutural com concretos de diferentes idades. Essa etapa foi realizada no Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da UFU.

Figura 7 – Moldagem das faces externas dos painéis pré-moldados



Com relação às interfaces entre CPM e CML, das três séries ensaiadas, apenas uma série tem superfície rugosa na interface entre os concretos, apresentado os agregados expostos como mostra a Figura 8. As interfaces das outras séries foram mantidas naturalmente com a concretagem do painel.

Figura 8 – Processo de jateamento das superfícies de ligação



A rugosidade da superfície foi obtida por meio do jateamento com água após a concretagem, e posterior limpeza com escova para retirada do pó na data da concretagem. As interfaces das outras séries foram mantidas conforme a concretagem realizada, sem alteração por meio de jateamento, sendo consideradas lisas neste trabalho.

A resistência à compressão do concreto de preenchimento variou entre 20 MPa e 28,4 MPa para modelos de interfaces lisas e 29 MPa para modelos de interfaces rugosas.

Assim, as séries dos modelos de interfaces lisas com 20 MPa foram denominadas por A, B e C, os modelos de interfaces rugosas com 29 MPa por D, E e F e os modelos de interfaces lisas com 28,4 MPa por G, H e I, conforme Lacerda (2013).

A concretagem dos painéis pré-moldados ocorreu em uma empresa fabricante, cujo traço do concreto utilizado, em volume, foi de 2:3:3 (cimento: areia: agregado graúdo)

para um saco de cimento de 40 kg, e resultou em uma resistência média de 27,5 MPa aos 28 dias.

O traço do concreto moldado no local está apresentado na Tabela 6.

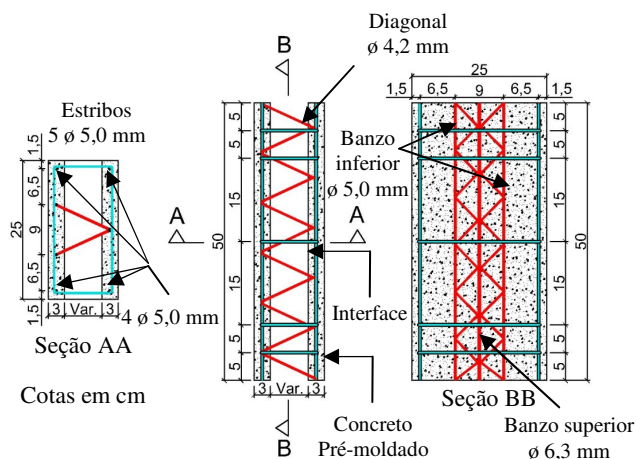
Tabela 6 – Composição dos traços por metro cúbico de concreto

Elementos de Concreto Moldado no Local			
Traço	Massa/m ³	Traço	Massa/m ³
1:1,97:2,97		1:1,42:2,42	
Cimento CII-F	365,82 kg	Cimento CII-F	451,59 kg
Brita 1 (19mm)	1086,49 kg	Brita 1 (19mm)	1092,85 kg
Areia	735,08 kg	Areia	654,08 kg
Água	195,71 l	Água	196,44 l

A espessura interna dos modelos representada pela espessura do concreto de preenchimento foi considerada variável sendo de 7 cm, 9 cm e 13 cm, para fins de estudo do efeito da relação entre as espessuras de concreto, uma vez que a espessura do CPM é constante e igual a 3 cm.

Os detalhes das armaduras longitudinais, transversais e da treliça bem como as dimensões dos modelos utilizados nos ensaios estão detalhados na Figura 9.

Figura 9 – Detalhes das armaduras dos painéis duplos treliçados



A denominação da série é acompanhada de uma letra arábica. A identificação do modelo segue o seguinte formato XL/Y - Exp Z, para modelos de interfaces lisas e XR/Y - Exp Z, para modelos de interfaces rugosas.

O valor de X corresponde à espessura da região de preenchimento do concreto. As letras L ou R correspondem ao tipo de interface que pode ser Lisa ou Rugosa. Em seguida, a barra inclinada que separa o valor da resistência à compressão do concreto na região de preenchimento é definida por Y. Finalmente, o modelo experimental é designado por Exp seguido de um numeral correspondente ao número de ensaio para uma mesma série.

Em todos os modelos foi aplicado carregamento crescente até a ruptura. A aplicação do carregamento foi realizada pela Máquina Universal EMIC, sobre o elemento central, em sua direção longitudinal, na superfície de concreto moldado no local da região do preenchimento. Para obter o deslocamento relativo entre os elementos

moldados em diferentes idades, utilizaram-se dois transdutores de deslocamento da marca HBM, modelo 1-WI/10 mm, com cursor de 10 mm e saída nominal de 80 mV/V. Foram colocados dois transdutores, sendo um na face frontal do protótipo (A) e outro na face oposta (B), conforme apresentada na Figura 10. Foi desenvolvido um aparato de madeira fixado ao CPM servindo de referência na leitura dos deslocamentos relativos entre a parte pré-moldada e a concretada *in loco*, cujo esquema de posicionamento pode ser visualizado na Figura 11.

Figura 10 – Posicionamento dos transdutores de deslocamento utilizados nos ensaios de cisalhamento direto

- a) Transdutor posicionado na face A b) Transdutor posicionado na face B

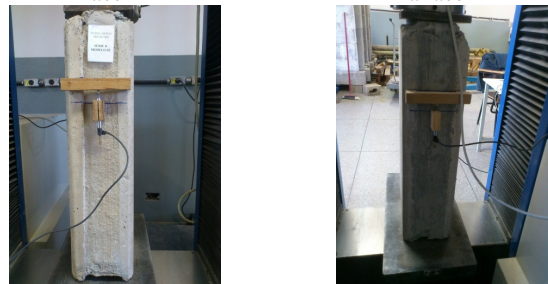
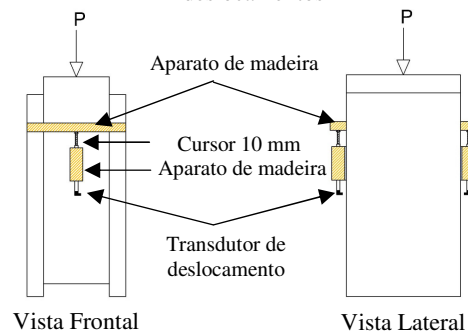


Figura 11 – Esquema do posicionamento dos transdutores de deslocamentos



Cada transdutor registrou a medida do deslizamento entre as superfícies dos elementos pré-moldados nas laterais e o elemento central de concreto moldado no local.

A aplicação do carregamento foi realizada por meio da Máquina Universal EMIC com capacidade de até 600 kN. Para sincronizar a leitura da força aplicada e os deslocamentos nos dois transdutores, empregou-se também uma célula de carga de 300 kN.

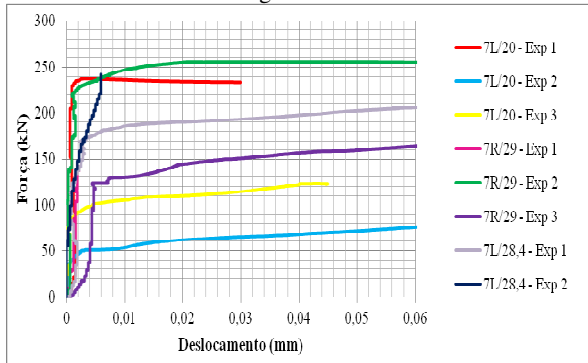
A célula e os dois transdutores foram acoplados a um sistema de aquisição de dados (Spider 8) da marca HBM. Para o armazenamento dos valores dos ensaios foi designada uma frequência de 10 Hertz. A duração de cada ensaio foi de aproximadamente vinte e cinco minutos.

5 – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E EXPRESSÕES ANALÍTICAS

Na Figura 12 é ilustrada a relação entre o carregamento e os deslocamentos relativos médios da interface para modelos de 7 cm de espessura na região do CML.

As Séries A e G de interface lisa tiveram um deslocamento relativo de interface maior que a Série D de interface rugosa, para um mesmo nível de carregamento.

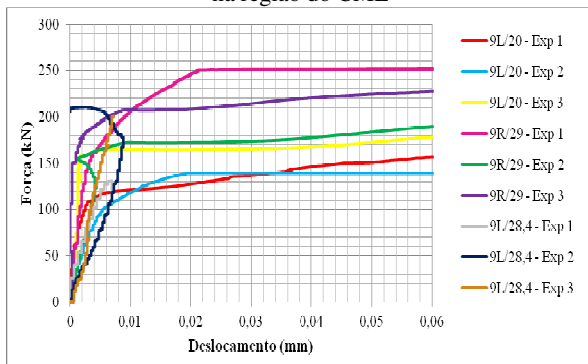
Figura 12 – Diagrama força x deslocamento para os painéis duplos sob cisalhamento direto A, D e G com 7 cm de espessura na região do CML



Na Figura 13 é ilustrada a relação entre o carregamento e os deslocamentos relativos médios de interface para modelos de 9 cm de espessura na região do CML.

A Série B de interface lisa foi o que teve maior deslocamento relativo de interface do que os outros modelos para um mesmo nível de carregamento. Isto pode ser explicado pelo fato de possuir uma resistência à compressão na região do CML menor do que os outros modelos, permitindo assim um maior deslocamento relativo de interface.

Figura 13 – Diagrama força x deslocamento para os painéis duplos sob cisalhamento direto B, E e H com 9 cm de espessura na região do CML

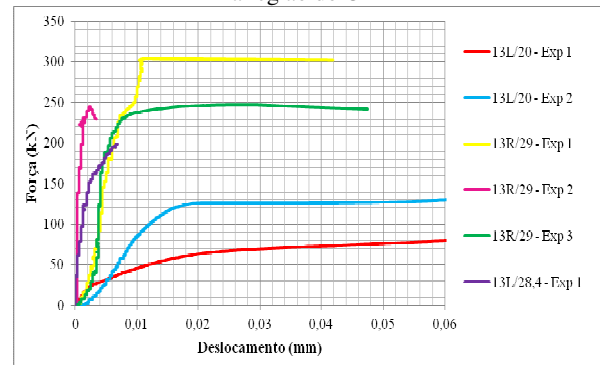


Na Figura 14 é ilustrada a relação entre o carregamento e os deslocamentos relativos médios de interface para modelos de 13 cm de espessura na região do CML.

A Série C de interface lisa foi o que teve maior deslocamento relativo de interface do que os outros modelos para um mesmo nível de carregamento. Isto pode ser explicado pelo fato de ter uma menor resistência à compressão na região do CML do que os outros modelos.

Apesar deste texto não contemplar a influência na resistência às tensões de cisalhamentos pela variação das espessuras do concreto na região de preenchimento, a sua análise foi realizada e pode ser obtida em Lacerda (2013), tendo sido objetivo de avaliação numérica.

Figura 14 – Diagrama força x deslocamento para os painéis duplos sob cisalhamento direto C, F e I com 13 cm de espessura na região do CML



Na Tabela 7 é apresentado um resumo dos valores da resistência ao cisalhamento devido o efeito de pino, da resistência do concreto e da rugosidade superficial de interface para as expressões analíticas de alguns pesquisadores, a partir da força de ruptura média F_{rup} obtidas experimentalmente.

Observou-se que as resistências ao cisalhamento da interface do modelo analítico proposto por Birkeland e Birkeland (1966) foram constantes em todos os ensaios, pois, a equação desenvolvida pelos pesquisadores (equação 10) considera apenas o efeito do pino por meio das propriedades mecânicas do aço f_y e taxa geométrica ρ_{sw} . Como esses parâmetros foram constantes em todos os modelos, o resultado da aplicação da equação 10 não varia, uma vez que não leva em consideração a resistência do concreto e nem a influência do tipo de interface.

A resistência da interface ficou limitada pela armadura transversal que atravessava a interface (efeito de pino), não havendo diferença ao variar a resistência à compressão do concreto na região de preenchimento do modelo e nem pelo tipo de rugosidade da superfície de ligação.

Tabela 7 – Resumo dos valores da resistência ao cisalhamento dos modelos sob cisalhamento direto aplicados por equações de diversos pesquisadores

Série	F_{rup} média (kN)	τ méd. Exp. (MPa)	f_c (MPa)	τ_u (MPa)				
				Birkeland e Birkeland (1966)	(MPa) Mast (1968)	(MPa) Shaikh (1978)	(MPa) Mattock (1988)	(MPa) Loov e Patnaik (1994)
A-7L/20	150,59	2,00	20	4,92	2,10	1,60	4,89	3,96
B-9L/20	153,61	2,04	20	4,92	2,10	1,60	4,89	3,96
C-13L/20	223,56	2,98	20	4,92	2,10	1,60	4,89	3,96
D-7R/29	167,62	2,23	29	4,92	4,40	2,67	5,44	4,77
E-9R/29	247,47	3,29	29	4,92	4,40	2,67	5,44	4,77
F-13R/29	245,86	3,27	29	4,92	4,40	2,67	5,44	4,77
G-7L/28,4	237,49	3,16	28,4	4,92	2,10	1,60	5,40	4,72
H-9L/28,4	205,71	2,74	28,4	4,92	2,10	1,60	5,40	4,72
I-13L/28,4	199,21	2,65	28,4	4,92	2,10	1,60	5,40	4,72

Em relação aos modelos analíticos propostos por Mast (1968) e Shaikh (1978), a diferença dos resultados de resistência da superfície de ligação se deve pela introdução

em suas expressões do efeito de pino e do fator de rugosidade superficial da ligação entre os concretos.

Os resultados mostraram que a resistência ao cisalhamento do modelo de Mast (1968), para a interface lisa, foi 31,25 % superior em relação ao modelo de Shaikh (1978) e de 64,80 % superior para interface rugosa.

Os resultados de Mattock (1988) e Loov e Patnaik (1994) levam em consideração o efeito de pino e a resistência à compressão do concreto na superfície de ligação. Verificou-se que com o aumento da resistência à compressão do concreto houve um ganho na tensão máxima cisalhante de 11,24 % nos resultados de Mattock (1988) e 20,45 % de Loov e Patnaik (1994) para os modelos de interfaces rugosas de 29 MPa.

Da mesma maneira, ao aumentar a resistência à compressão na região de preenchimento de 20 MPa para 28,4 MPa, os resultados de Mattock (1988) elevou-se para 10,42% e as de Loov e Patnaik (1994) teve a tensão cisalhante máxima aumentada para 19,19 %. Porém, não houve diferença significativa na resistência ao cisalhamento ao variar a rugosidade superficial de ligação, para os modelos com proximidade de resistência à compressão do concreto moldado no local (Séries D, E, F, G, H, I). Isto pode ser explicada pelas equações de Mattock (1988) e Loov e Patnaik (1994) não levarem em conta a rugosidade da superfície de ligação da interface. Experimentalmente o aumento da resistência à compressão no concreto na região de preenchimento para modelos de interfaces lisas tiveram sua força de ruptura aumentada em torno de 36,61%.

CONCLUSÕES

O entendimento do mecanismo de transferência de cisalhamento na interface entre concretos leva em conta os valores das resistências à compressão dos concretos envolvidos, a rugosidade da interface, a relação entre as espessuras dos concretos e a taxa de armadura que cruza a interface. A resistência ao cisalhamento pela interface é mobilizada por mecanismos de transferências como a adesão, atrito, ação mecânica e efeito de pino.

As principais conclusões deste trabalho estão alinhadas a seguir:

- Nas análises sob cisalhamento direto, os resultados experimentais indicaram que a transferência de tensões na interface ocorreu com a perda da adesão, resultante do descolamento entre as superfícies, ação do atrito e mecânica, da contribuição do efeito de pino até ocorrer o deslizamento entre os dois concretos e ruptura com esmagamento do concreto pré-moldado na região dos apoios;
- A rugosidade superficial da região da interface de ligação consistiu em um importante parâmetro no aumento da resistência ao cisalhamento direto, uma vez que os modelos de interfaces lisas tiveram maiores deslizamentos do que os modelos de interfaces rugosas;
- Os modelos que apresentaram maior deslocamento relativo na interface foram os de interfaces lisas. A rugosidade superficial influenciou também na ordem dos deslocamentos relativos da interface. Em geral, na

ruptura, enquanto os modelos lisos deslizaram na ordem de 10^{-2} mm, o deslizamento relativo da interface dos modelos de superfícies rugosas ficou na ordem de 10^{-3} mm;

- Quanto à contribuição da resistência à compressão do concreto da região de preenchimento (CML), foi verificado o aumento da resistência ao cisalhamento direto para concretos com maiores resistências à compressão. Em virtude da grande dispersão de resultados devido ao número limitado de modelos existentes para os ensaios experimentais o valor médio dessa contribuição ficou prejudicada;
- Dentre as expressões propostas na literatura técnica para avaliação da resistência ao cisalhamento, as expressões analíticas que mais se aproximaram dos resultados experimentais foram a expressão de Mast (1968) para interface lisa e a expressão de Shaikh (1978) para interface rugosa. Apesar das equações de Mattock (1988) e Loov e Patnaik (1994) levarem em conta, além do efeito de pino, a resistência à compressão do concreto e a influência da rugosidade da interface, os resultados analíticos pouco se aproximaram dos resultados experimentais. Em relação às equações de Birkeland e Birkeland (1966), o resultado foi constante por levarem em conta apenas o efeito de pino.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, pela bolsa de mestrado concedida para a realização dessa pesquisa e à Premon Indústria de Pré-Moldados, pelo apoio à pesquisa e fornecimento dos painéis duplos treliçado pré-moldados de concreto.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. Rio de Janeiro, 2006.
- ACKER, A. V. **Manual de Sistemas Pré-Fabricados de Concreto**. Tradução de Marcelo de Araújo Ferreira. Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto - ABCIC, São Paulo, 2003.
- ARAÚJO, D. L. **Cisalhamento Entre Vigas e Lajes Pré-Moldadas Ligadas Mediante Nichos Preenchidos com Concreto de Alto Desempenho**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.
- BIRKELAND, P. W., BIRKELAND, H. W. Connections in Precast Concrete Construction. **Journal of the American Concrete Institute, Proceedings**, v. 63, n. 3, p. 345-367, mar. 1966.
- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP Model Code 1990, Design Code**. Thomas Telford Services Ltda., London, 1993.
- EL DEBS, M. K. **Concreto Pré-Moldado: Fundamentos e Aplicações**. EESC. Universidade de São Paulo. São Carlos: EDUSP, 2000.

- FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON - FIB.
Model Code 2010 – First Complete Draft, v. 1, Switzerland, 2010.
- FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAÎNTE. **Shear At The Interface of Precast and In Situ Concrete: FIP Guide Good Practice**. 1982.
- HOFBECK, J. A., IBRAHIM, I. O., MATTOCK, A. H. Shear Transfer in Reinforced Concrete, **ACI Journal, Proceedings**, v. 66, n. 2, p. 119-128, feb. 1969.
- LACERDA, B. M. **Estudo Numérico e Experimental do Comportamento de Painéis Duplos Treliçados Preenchidos com Concreto Moldado no Local**. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2013.
- LEONHARDT, F., MÖNNIG, E. **Construções de Concreto: Princípio Básico do Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado**. Rio de Janeiro: Interciência, 1977.
- LOOV, R. E., PATNAIK, A. K. Horizontal Shear Strength of Composite Concrete Beams With a Rough Interface. **PCI Journal**, v. 39, n. 1, p. 48-69, jan./feb. 1994.
- MAST, R. F. Auxiliary Reinforcement in Concrete Connections. **Journal of the Structural Division, ASCE**, v. 94, p. 1485-1504, jun. 1968.
- MATTOCK, A. H. Influence of Concrete Strength and Load History on the Shear Friction Capacity of Concrete Members. **PCI Journal**, v. 33, n. 1, p. 166-168, jan./feb. 1988.
- MIGLIORE JUNIOR, A. R. **Edifício Pré-Moldado com Ligação Rígida**. In: 1^o Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Execução em Concreto Pré-Moldado, São Carlos, 2005.
- PRECAST AND PRESTRESSED CONCRETE. **PCI Design Handbook**. 6. ed. Chicago, USA, 2004.
- RISSE, M. A. C. **Resistência ao Cisalhamento de Ligações de Concreto de Diferentes Idades Providas de Chumbadores de Expansão**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- SHAIKH, A. F. Proposed Revisions to Shear-Friction Provisions. **PCI Journal**, v. 23, n. 2, p. 12-21, mar./apr. 1978.