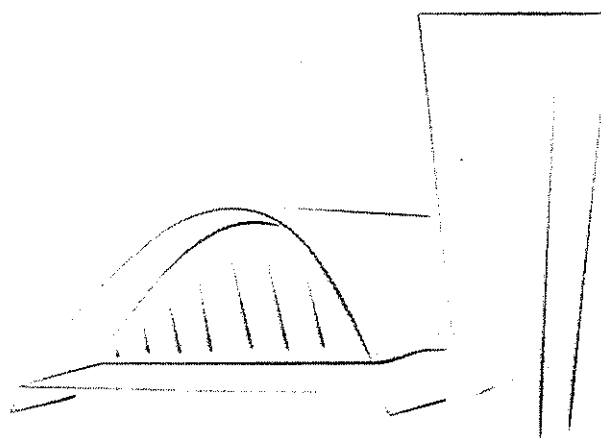


SET
04
09
02



IBRACON - 2002

44^º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO

De 17 a 22 de agosto de 2002
Belo Horizonte - MG

Análise da Capacidade Resistente de Elementos Pré-Moldados Ligados Através de Juntas de Argamassa

Mounir Kalil El Debs (1); Aline da Silva Ramos Barboza (2)

(1) *Professor Doutor, Departamento de Engenharia de Estruturas
Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
email: mkdebs@sc.usp.br*

(2) *Professor Doutor, Departamento de Engenharia Estrutural
Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas
email: alramos@fapeal.br*

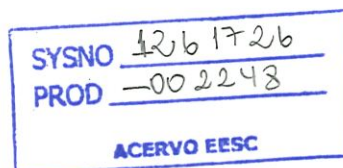
D288a

*Escola de Engenharia de São Carlos / Departamento de Engenharia de Estruturas
Av. Trabalhador São Carlense, 400 – Centro
CEP 13566-590 São Carlos - SP*

Palavras Chaves: pré-moldados, ligações, junta de argamassa

Resumo

O tipo de ligação mais comumente usado entre painéis pré-moldados numa estrutura de parede portante é a junta de argamassa, que consiste em intercalar uma camada de argamassa ou concreto de granulometria fina entre os elementos pré-moldados. Geralmente, a argamassa usada na junta tem uma resistência baixa se comparada aos elementos pré-moldados e como sua deformação transversal tende a ser maior que a do concreto pré-moldado, ocorre uma distribuição de tensões não uniforme na junta. Isso faz com que a capacidade resistente do sistema seja limitada pela capacidade resistente da argamassa. Para analisar o comportamento das juntas de argamassa nas quais a solicitação predominante é compressão e sua influência na capacidade resistente dos elementos pré-moldados foi desenvolvida uma análise teórico-experimental. Foram ensaiadas 20 amostras, e chegou-se à conclusão que para preenchimento com graute fluido auto-adensável, uma junta com 20mm de espessura permite um melhor comportamento, tanto em relação ao nível de resistência quanto à ductilidade e para um concreto pré-moldado com resistência à compressão em torno de 35MPa, tem-se uma redução de 10% na capacidade resistente dos elementos pré-moldados. Entretanto, usando-se uma argamassa seca, geralmente de alta resistência, pode-se chegar a nenhuma redução para a capacidade resistente.



1 Introdução

O desempenho estrutural de um sistema de elementos pré-moldados depende em grande parte do comportamento das ligações entre os elementos. Essas ligações representam pontos de descontinuidade da estrutura pré-moldada e problemas como concentração de esforços e compatibilidade geométrica dos elementos são bastante freqüentes, além de dificuldades na execução.

Freqüentemente, as juntas de argamassa moldadas no local são usadas como elementos de ligação entre painéis pré-moldados em estruturas de parede portante. Porém, esse tipo de ligação também aparece entre aduelas pré-moldadas de pontes e de torres e ainda em partes comprimidas de ligações sujeitas à flexão. Em geral, como a resistência da argamassa é menor que a resistência do concreto pré-moldado, a capacidade resistente dos elementos pré-moldados fica condicionada ao limite de resistência da camada de argamassa.

Fatores como a espessura da camada de argamassa e a relação entre as resistências da argamassa e do concreto pré-moldado, são parâmetros importantes para o comportamento da ligação.

Com a utilização do concreto de alta resistência e a melhoria das técnicas de execução, pode-se fabricar elementos pré-moldados com resistência do concreto bem maior que anteriormente, além de usar argamassas pré-fabricadas de alta resistência na região da ligação. Essa evolução torna necessário avaliar que fator de redução da capacidade resistente deve agora ser considerado para o sistema estrutural.

Com isso, esse trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento da junta de argamassa solicitada à compressão, usando para preenchimento materiais comercialmente disponíveis, de forma que se tenha um melhor aproveitamento da capacidade resistente do elemento pré-moldado.

2 Análise teórica do comportamento da ligação

Considerando que as ligações são pontos cruciais para a segurança e economia de um sistema estrutural pré-moldado, foi estabelecido na Holanda um comitê denominado

SBR-Committee B7, com a finalidade de investigar de forma mais detalhada o comportamento estrutural das ligações usadas nas construções. Os resultados dos estudos experimentais, para avaliação da capacidade resistente da ligação com junta de argamassa, desenvolvidos por aquele comitê, que teriam sido incorporados nas recomendações da Norma Holandesa, foram apresentados no trabalho de DRAGOSAVIC (1978). Os experimentos mostraram que é razoável considerar que o valor da capacidade resistente da ligação está relacionado com a resistência à compressão da argamassa usada na junta, a resistência à compressão do concreto usado no elemento pré-moldado e as dimensões da camada de argamassa. A partir destas considerações foi estabelecido que:

- Quando a resistência à compressão da argamassa (f_{cm}) é maior que a resistência à compressão do concreto usado no elemento pré-moldado (f_c), a presença da camada de argamassa não reduz a capacidade resistente da junta. Conseqüentemente, a resistência à compressão da junta (f_j) é considerada igual a f_c .
- Quando $f_{cm} < f_c$ e a relação h_j/a (h_j =espessura/ a =menor largura da junta) é muito grande, ou seja, $h_j \gg a$, a capacidade resistente da junta (f_j) é igual a f_{cm} .
- Se $f_{cm} < f_c$ e a relação h_j/a é pequena, a resistência f_j é dada por:

$$f_j = \alpha \cdot f_c \quad \text{(Equação 1)}$$

O parâmetro α , considerado como sendo o fator que mede a eficiência da junta, é definido no intervalo: $f_m/f_c \leq \alpha \leq 1,0$ como mostra o gráfico da figura 1.

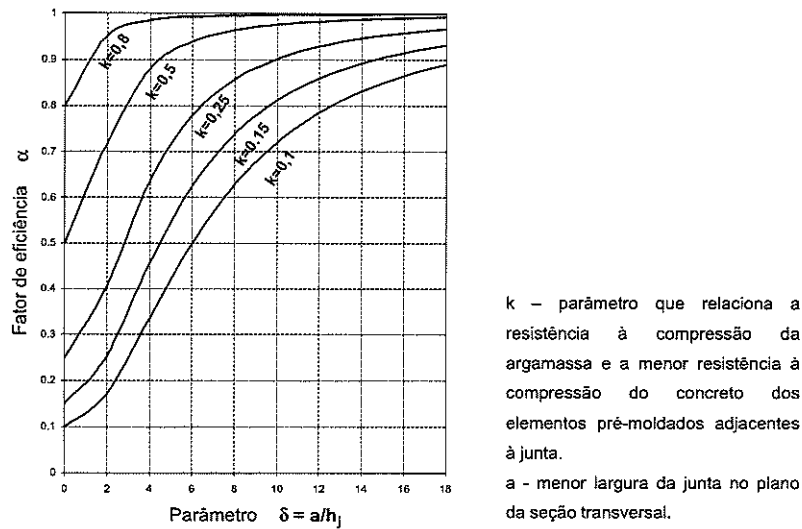


Figura 1 – Fator de eficiência da junta.

Em outros estudos, VAMBERSKY (1990) verificou que em muitos casos de juntas horizontais a capacidade resistente da ligação não era governada pela resistência ao esmagamento da argamassa, mas sim pelo descolamento do concreto nos elementos pré-moldados adjacentes a junta. Segundo VAMBERSKY (1990), as tensões que provocam o descolamento do concreto aparece como resultado de dois mecanismos:

- Como a deformabilidade da argamassa é diferente do concreto pré-moldado, quando ela é comprimida e não existe confinamento lateral ela é expulsa pelas extremidades, gerando assim forças de atrito na área de contato entre a argamassa e o elemento pré-moldado (figura 2). Estas forças de atrito provocam o aparecimento de tensões de tração no elemento;
- Devido ao mecanismo anterior a argamassa sofre esmagamento localizado nas extremidades e ocorre uma redistribuição de tensões, resultando com isso numa concentração de tensões no meio da junta. Essa distribuição de tensões não uniforme gera tensões de fendilhamento no elemento pré-moldado.

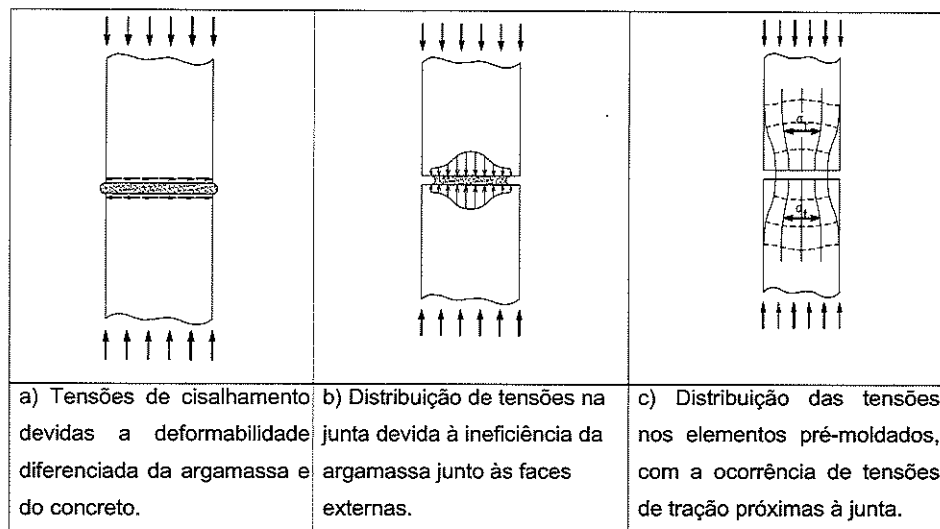


Figura 2 – Forças de atrito e distribuição de tensões na junta

Com a finalidade de propor uma atualização das recomendações contidas na Norma Holandesa, apresentadas anteriormente por DRAGOSAVIC (1978), considerando a melhoria alcançada para os materiais usados na junta VAMBERSKY (1990) analisou o comportamento de juntas de argamassa solicitadas à compressão e propôs a seguinte expressão para o cálculo da capacidade resistente da ligação:

$$f_j = \eta_0 \cdot \alpha \cdot f_c \quad \text{Equação (2)}$$

Onde: η_0 - fator de redução para a área da junta;

α - fator de eficiência da junta, definido pela equação 3;

f_j - menor resistência à compressão do concreto dos elementos pré-moldados adjacentes à junta.

O fator α , presente na expressão de VAMBERSKY (1990) corresponde ao mesmo já apresentado por DRAGOSAVIC (1978) através do gráfico mostrado na figura 1 e definido na equação 3.

$$\alpha = k \frac{5(1-k) + \delta^2}{5(1-k) + k\delta^2} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde: k - relação entre a resistência à compressão da argamassa e a menor resistência à compressão do concreto dos elementos pré-moldados adjacentes à junta, afetada por um coeficiente redutor η_m , que varia em função da qualidade da argamassa;

δ - relação entre a menor largura e a espessura da junta.

A atualização proposta por VAMBERSKY (1990) se refere aos parâmetros η_o e η_m . O coeficiente η_o é estabelecido através de resultados experimentais considerando-se as condições de execução da junta.

- $\eta_o = 0,9$ para argamassa fluida colocada na junta após a montagem dos elementos pré-moldados;
- $\eta_o = 0,7$ para argamassa seca colocada na junta após a montagem dos elementos pré-moldados;
- $\eta_o = 0,3$ se o elemento pré-moldado é colocado sobre argamassa já existente no local da junta.

O parâmetro η_m que avalia a qualidade da argamassa colocada na junta é considerado da seguinte forma:

- $\eta_m = 0,75$ se a qualidade da argamassa é verificada através de ensaios aos 28 dias, de corpos de prova moldados no local da obra, cuja estocagem foi feita em ambiente controlado;
- $\eta_m = 1,0$ se a qualidade da argamassa é verificada através de ensaios usando-se amostras retiradas da junta executada.

3 Programa experimental

3.1 Descrição dos modelos

Para avaliar experimentalmente o comportamento da ligação foram ensaiados sete modelos. Esses modelos possuíam seção transversal quadrada de 175mm de lado e eram confeccionados unindo-se dois segmentos com altura de 400mm através da junta de argamassa como mostrado na figura 3. Nas extremidades dos modelos havia um reforço com anel metálico preenchido com micro-concreto de alta resistência, para evitar uma possível ruptura por concentração de tensões. A armadura adotada para os modelos era composta de 4 barras de diâmetro 10mm dispostas longitudinalmente e estribos de diâmetro 5mm espaçados a cada 9cm. O cobrimento adotado para a armadura foi de 25mm.

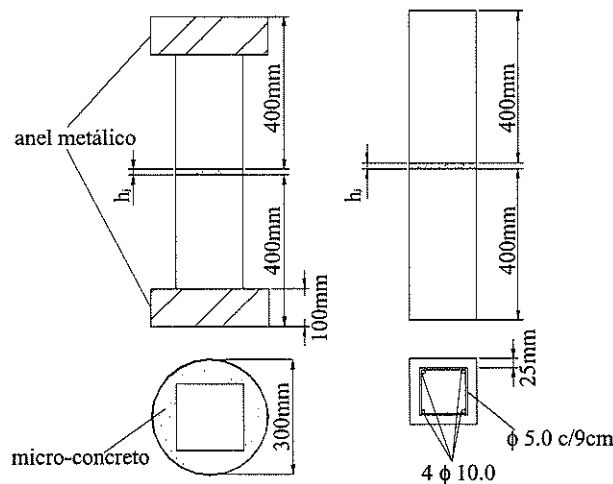


Figura 3 – Configuração dos modelos ensaiados

3.2 Execução dos modelos

Os modelos foram confeccionados moldando-se cada metade separadamente na posição vertical. Após a moldagem os segmentos dos modelos permaneciam na forma durante dois dias sendo curados através de uma manta de espuma molhada posicionada na parte superior.

No terceiro dia, as formas eram retiradas e era feito o enrijecimento nas extremidades dos segmentos. Após o enrijecimento, os modelos eram deixados em temperatura ambiente no laboratório de ensaios. No sétimo dia, contado a partir da primeira concretagem, os segmentos eram posicionados num pórtico metálico para execução da junta. O preenchimento da junta de argamassa foi feito com grautes e argamassas pré-fabricadas disponíveis comercialmente com a finalidade de avaliar o tipo de material de preenchimento que seria mais adequado para uso num sistema estrutural real. A fim de comparação foram ensaiados dois modelos sem junta, simplesmente apoiando um segmento sobre o outro e considerando uma possível descontinuidade na superfície de apoio.

3.3 Variáveis de ensaio

As variáveis adotadas nos modelos foram escolhidas considerando-se os estudos realizados por DRAGOSAVIC (1978) e VAMBERSKY (1990). Essas variáveis foram: a espessura da camada de argamassa, a relação entre as resistências da argamassa e do concreto pré-moldado, a resistência do concreto pré-moldado e o material de preenchimento da junta. As variáveis exploradas em cada modelo e as resistências dos materiais estão mostradas na Tabela 1. Para cada modelo foram confeccionadas duas ou três amostras para prevenir falhas de execução, totalizando 20 amostras.

Tabela 1 – Variáveis do ensaio e resistência dos materiais

Modelo	f_c (MPa)	f_t (MPa)	f_m (MPa)	f_{tm} (MPa)	Relação f_m/f_c	Tipo de enchimento	Espessura da junta (mm)
M1	32,5	2,4	24,4	3,0	0,75	Graute	15
M2	44,4	3,7	33,8	2,6	0,76	Graute	22,5
M3	35,1	4,1	25,7	3,6	0,73	Graute	30
M4	36,6	3,4	31,9	2,9	0,90	Graute	15
M5	40,0	4,3	50,4	4,3	1,26	Argamassa seca	15
M6	67,9	4,2	25,3	1,8	0,40	Graute	15
M7	30,5	3,3	-	-	-	Sem junta	-

f_c – resistência à compressão do concreto usado no segmento pré-moldado;

f_t – resistência à tração do concreto usado no segmento pré-moldado;

f_m – resistência à compressão da argamassa usada na junta;

f_{tm} – resistência à tração da argamassa usada na junta;

As resistências à tração e à compressão do concreto usado nos modelos e das argamassas usadas nas juntas foram obtidas através de ensaios padronizados em corpos de prova cilíndricos de 100mmx200mm e 50mmx100mm, respectivamente, realizados aos catorze dias de idade para o concreto e sete dias de idade para as argamassas.

Nos modelos M1, M2, e M3 foi usado um graute fluido a base de cimento cuja mistura é composta por cimento Portland, agregados com diâmetro máximo pequeno e aditivos especiais para controlar a retração.

Nos modelos M4 e M6 foi usado um graute não retrátil a base de cimento, cuja mistura é composta por cimento Portland, agregados graduados e aditivos químicos que controlam a expansão no estado plástico e minimizam a demanda de água na mistura.

No modelo M5 foi usada uma argamassa seca do tipo "Dry Pack" que na forma endurecida é isenta de retração e no modelo M7 não foi executada junta. Esse modelo foi ensaiado apoiando-se um segmento sobre o outro.

3.4 Instrumentação dos modelos

Os modelos foram ensaiados aos 14 dias de idade, numa máquina servo-hidráulica INSTRON com capacidade para 300t e com controle digital por computador. A instrumentação dos modelos foi feita posicionando-se dois transdutores de deslocamentos em cada face, como mostra a figura 4, sendo um com base de medida 51,0 cm centralizado ao longo da face do pilar e outro com base de medida 6,0cm posicionado próximo à junta. Os ensaios foram feitos aplicando-se o carregamento através de deformação controlada a uma velocidade de 0,002 mm/s e o registro de dados foi feito a cada 2 segundos.

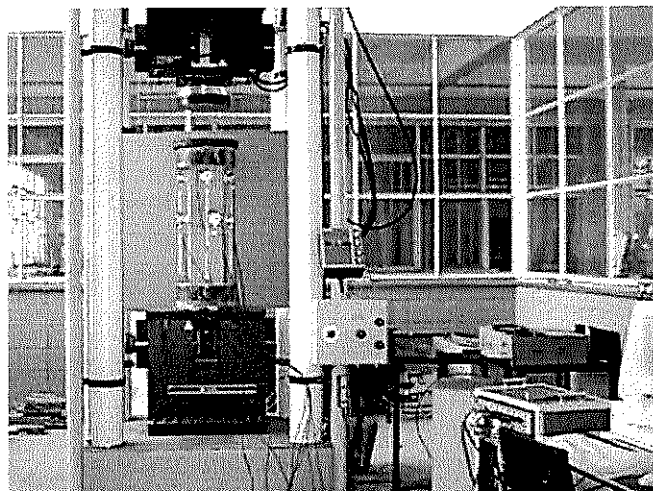


Figura 4 – Posicionamento dos modelos para o ensaio.

4 Análise dos resultados

O valor atingido em cada ensaio foi comparado com o valor dado pela equação 4, considerando-se o valor teoricamente resistido pelo concreto pré-moldado, e com o valor teórico dado pelas equações 1 e 2, desenvolvidas por DRAGOSAVIC (1978) e VAMBERSKY (1990), respectivamente. Esta comparação é mostrada na tabela 3 e na figura 5.

$$P_u = A_c \cdot f_c$$

Equação (3)

Onde: A_c – área de concreto;

f_c – resistência à compressão do concreto pré-moldado;

Tabela 3 – Comparativo para a carga última obtida para os modelos

Modelo	Carga última experimental (kN)	P _u (kN)	P _{exp} /P _u	Carga Dragosavic (kN)	Carga Vambersky (kN)
M1	956,6	1032,3	0,93	983,3	884,9
M2	1292,5	1395,5	0,93	1325,6	1193,1
M3	855,5	1111,4	0,77	1022,8	920,5
M4	873,1	1157,3	0,75	1113,5	1002,1
M5	1183,4	1261,1	0,94	1224,9	857,4
M6	1210,3	2113,4	0,57	1949,8	1754,8
M7	831,8	971,0	0,86	-	-

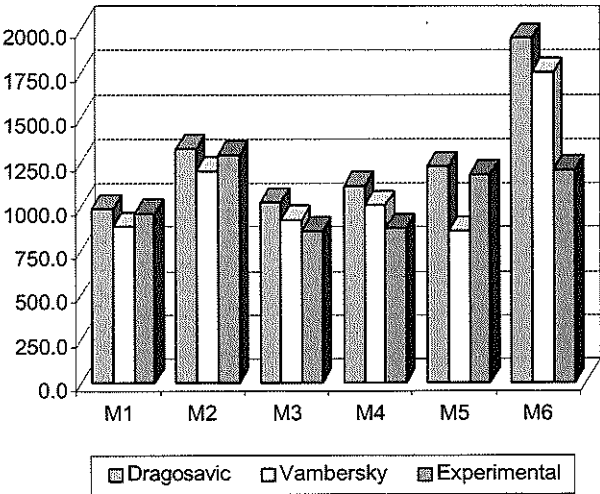


Figura 5 – Comparativo da carga última dos ensaios.

Para os modelos M1, M2, M3 e M4, cuja junta de argamassa foi preenchida com graute fluido, as expressões apresentadas por DRAGOSAVIC (1978) e VAMBERSKY (1990), conseguem avaliar de maneira satisfatória a capacidade resistente da ligação. Já para o modelo M5 preenchido com argamassa seca, a expressão de VAMBERSKY (1990) apresenta uma diferença de 38% em relação ao resultado experimental, que quando comparado ao valor teoricamente absorvido pelo concreto pré-moldado vê-se que

praticamente não houve perda na capacidade resistente do modelo.

Para o modelo M6 executado com concreto de alta resistência, nenhuma das expressões apresentou resultados satisfatórios para a capacidade resistente da ligação. Utilizando-se graute fluido no preenchimento da junta, obteve-se baixa redução na capacidade resistente da ligação com uma relação f_m/f_c menor, em comparação com o modelo M5 cuja junta foi preenchida com argamassa do tipo "Dry Pack". Entretanto, viu-se que com esse material tem-se uma maior uniformidade para a espessura da junta e menor quantidade de vazios.

No modelo M4 foi usado um graute com agregado maior que o usado nos modelos M1, M2 e M3. Isso resultou no aparecimento de vazios na interface concreto pré-moldado junta e numa maior deformabilidade da junta. Para as condições de execução do modelo, usando graute fluido, a junta com espessura de 22,5mm foi a mais adequada. Observando-se a configuração de ruína desses modelos, mostrada na figura 6 vê-se que quanto mais espessa a junta menor a região danificada, porém menor capacidade resistente.

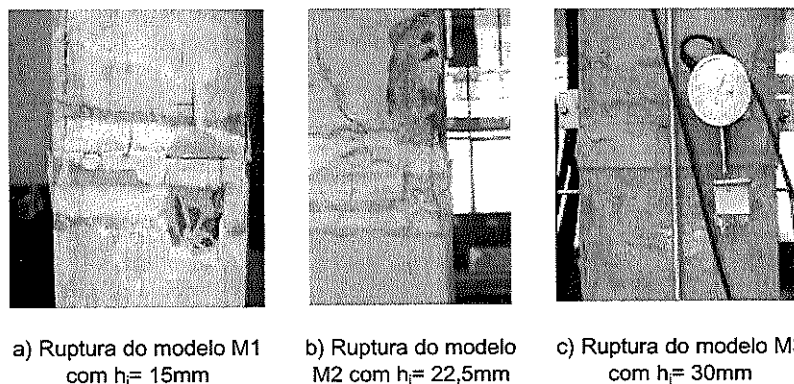


Figura 14 – Configuração de ruína dos modelos M1, M2 e M3.

No modelo M6 de alta resistência, a baixa relação f_{cm}/f_c e a influência das tensões de fendilhamento, fizeram com que houvesse uma redução de 57% em relação ao valor teoricamente resistido pelo concreto pré-moldado. Essa redução foi ainda maior que a dos modelos sem junta. Além disso, a deformabilidade da junta foi muito alta quando

comparada aos outros modelos, ocasionando uma maior danificação dos elementos pré-moldados, como mostra a figura 7.



Figura 7 – Configuração de ruína do modelo de alta resistência M5.

No modelos ensaiados sem junta observou-se que mesmo para uma superfície plana não existe um contato perfeito entre os elementos pré-moldados e as tensões de contato entre as peças provocou uma redução de 24% na capacidade resistente dos elementos pré-moldados. Vê-se na figura 8 que o processo de danificação dos modelos ocorre de forma localizada.

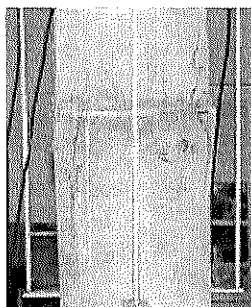


Figura 16 – Configuração de ruína do modelo M7 sem junta de argamassa.

5 Considerações finais e conclusões

Pelos resultados obtidos pode-se observar que o apoio direto de elementos pré-moldados, uns sobre os outros, reduz consideravelmente a capacidade resistente do sistema estrutural. Nos elementos produzidos com concreto de alta resistência isso representaria desperdício de material e conseqüentemente maior custo para o sistema, justificando assim a necessidade de um elemento de ligação entre as peças. Nesse caso, a junta de argamassa que representa o tipo mais simples de ligação nas situações cuja solicitação predominante é compressão, tanto pela sua popularidade quanto pela sua facilidade de execução, seria uma alternativa interessante. O nível de exigência em relação à mão de obra para a execução da junta tem ficado cada vez menor pela disponibilidade de materiais pré-fabricados que podem ser utilizados no preenchimento, de acordo com a necessidade do nível de resistência e das dimensões da mesma.

Considerando os materiais utilizados no desenvolvimento do trabalho podem ser tiradas as seguintes conclusões:

- a) Quanto se deseja obter alta resistência no sistema como um todo, um material de alta resistência é mais indicado.
- b) A espessura da camada de argamassa representa um fator preponderante para a escolha do tipo de material a ser usado no preenchimento da junta. Com os resultados obtidos pode-se dizer que a utilização do graute fluido seria mais adequada para uma junta com 20mm de espessura, pois tende a apresentar menos falha de execução devido a qualquer irregularidade na superfície dos elementos pré-moldados.
- c) A argamassa do tipo "Dry Pack" é uma alternativa viável quando se tem uma espessura delgada, devido a uma menor incidência de vazios e por geralmente já ser um material de alta resistência.
- d) Para um concreto pré-moldado de resistência à compressão em torno de 35MPa, a redução na capacidade resistente dos elementos pré-moldados foi menor que 10%, quando se tratava de uma junta mais delgada.

- e) Para o concreto de alta resistência, obteve-se uma redução de 57%. Entretanto, deve-se ressaltar que o graute usado para preenchimento da junta tinha baixa resistência quando comparada à dos elementos pré-moldados. Nesse caso, a utilização de um material de alta resistência na junta poderia trazer um melhor aproveitamento para a capacidade resistente do modelo. Essa possibilidade merece ser posteriormente avaliada em outros estudos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à CAPES e FAPESP pela ajuda financeira destinada ao desenvolvimento do trabalho. E a empresa FOSROC pela doação dos materiais de preenchimento da junta

6 Referências

DRAGOSAVIC, M. **Load-bearing capacity of joints between precast elements**. In: RILEM-CEB-CIB SYMPOSIUM MECHANICAL & INSULATING PROPERTIES OF JOINTS OF PRECAST REINFORCED CONCRETE ELEMENTS, Athens, 1978. *Proceedings*. Athens, RILEM/CEB., p.29-40, 1978.

VAMBERSKY, J. N. J. A. **Mortar joints loaded in compression**. In: INTERNATIONAL SEMINAR DELFT, The Netherlands, 1990. *Proceedings-Prefabrication of concrete structures*. Delft, Delft University Press. p.167-180, 1990.

BARBOZA, A. S. R. **Comportamento de juntas de argamassa solicitadas à compressão na ligação entre elementos pré-moldados**. São Carlos, Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos-USP, 154p.