



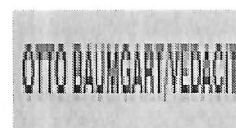
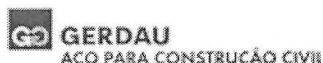
IBRACON Instituto Brasileiro
do Concreto

46° Congresso Brasileiro do Concreto Florianópolis – SC

46° Congresso Brasileiro do Concreto reivindica maior investimento na infraestrutura do país

O 46° Congresso Brasileiro do Concreto, evento que ocorreu de 14 a 18 de agosto de 2004, na cidade de Florianópolis, contou com a participação de 900 congressistas, entre engenheiros, arquitetos, empresários, professores e estudantes. O evento foi marcado, desde sua solenidade de abertura, pela expectativa positiva dos congressistas em relação à retomada do crescimento do setor de construção civil. Esta expectativa foi acentuada pela iminência de aprovação das Parcerias Público-Privadas pelo Congresso Nacional. "As PPPs são instrumento indispensável para o investimento na infra-estrutura do país, tendo em vista que, por exemplo, atualmente o crescimento por demanda de energia no Brasil supera o crescimento do nosso PIB", declarou o Prof. Paulo Helene, diretor-presidente do IBRACON.

Patrocinadores



SAP
25
/ 02
05

Análise experimental do comportamento mecânico de elementos pré-fabricados esbeltos produzidos com concreto leve modificado com polímero

João A. Rossignolo (1); Marcos V. C. Agnesini (2)

(1) Professor Doutor, Departamento de Arquitetura e Urbanismo da
Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
email: jarossig@sc.usp.br

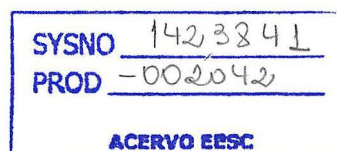
(2) Professor Doutor, Departamento de Arquitetura e Urbanismo da
Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
email: agnesini@sc.usp.br

Av. Trabalhador Sãocarlense, 400. CEP 13566-590. São Carlos S.P. BRASIL

Palavras Chaves: Concreto leve, Concreto modificado com polímero, Elementos pré-fabricados.

Resumo

Este trabalho apresenta os resultados da análise experimental de elementos pré-fabricados de pequena espessura produzidos com concreto leve de alto desempenho, submetidas preponderantemente à solicitação de flexão. Foram analisados 6 elementos pré-fabricados com 2,8 cm de espessura média e 3 m de comprimento, aos 7 dias de idade. Os materiais utilizados na produção do concreto estrutural leve foram cimento Portland de alta resistência inicial, sílica ativa, superplastificante acelerador de pega, látex de estireno butadieno (SB), areia natural e argila expandida ($D_{m\acute{a}x} = 9,5$ mm). Os valores da resistência à compressão aos 7 dias e da massa específica seca do concreto leve variaram entre 40,0 e 52,0 MPa e entre 1460 e 1605 kg/m³, respectivamente. Os resultados deste estudo demonstraram que as peças produzidas com concreto leve modificado com látex SB apresentaram desempenho superior às produzidas com concreto leve sem polímero.



1 Introdução

Nos últimos anos os concretos estruturais leves têm sido utilizados com mais frequência na construção civil em todo o mundo. Esse fato é consequência direta da recente evolução da tecnologia dos concretos, tornando possível a produção de concretos leves duráveis, com baixa massa específica (abaixo de 2.000 kg/m³) e com elevados valores de resistência à compressão (acima de 40 MPa) (ZHANG e GJØRV, 1991; ARMELIN et al., 1994; EVANGELISTA et al., 1996; ROSSIGNOLO, PAULON e AGNESINI, 2001).

Estudos realizados a partir de 1998 no Laboratório de Construção Civil (LCC) da Escola de Engenharia de São Carlos EESC/USP, indicam que o concreto produzido com agregados leves nacionais (argila expandida) apresenta grande potencial da utilização na construção civil nacional, especialmente com a utilização da tecnologia da pré-fabricação (AGNESINI e GOMES NETO, 1998).

Dentre esses estudos, destaca-se um projeto piloto com a finalidade de desenvolver a tecnologia do concreto leve de alto desempenho modificado com polímero, para aplicação em componentes pré-fabricados de pequena espessura como telhas, vigas e painéis estruturais e de vedação (ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2001; ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2002; ROSSIGNOLO et al., 2003; ROSSIGNOLO, 2003).

Este artigo apresenta alguns resultados obtidos nesse projeto piloto, mais especificamente, os resultados da análise experimental de elementos pré-fabricados de pequena espessura produzidas com concreto leve, submetidas preponderantemente à solicitação de flexão. O objetivo principal dessa análise experimental foi realizar um estudo comparativo do comportamento entre peças pré-fabricadas produzidas com concreto leve modificado com látex SB e com concreto leve sem polímero.

Para tanto, foram analisados elementos pré-fabricadas, do tipo viga calha, com 3 m de comprimento e 2,8 cm de espessura, aos 7 dias de idade, produzidas com concreto leve. Essa tipologia de elemento construtivo pode ser utilizada nos mais diversos tipos de construções, tanto com a função de vedação (telhado e painéis de vedação vertical) quanto com a função estrutural (elementos-de-laje). Assim, como essa tipologia mostra-se extremamente versátil e de fácil produção e transporte, foi adotada para a análise experimental do comportamento de peças esbeltas produzidas com concreto leve.

Os resultados desse estudo experimental possibilitaram a análise comparativa do comportamento das peças submetidas à flexão, produzidas com concreto leve modificado com látex SB e com concreto leve sem polímero.

2 Materiais e métodos

Para a produção do concreto leve modificado com látex SB foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV ARI – NBR 5733 e NBR 5737), com massa específica de 3,12 g/cm³ e área específica Blaine de 4.687 cm²/g. A sílica ativa empregada apresentou massa específica de 2,21 g/cm³, área específica de 18.000 cm²/g e teor de SiO₂ de 94,3 %. Os agregados utilizados foram areia natural quartzosa e dois tipos de argila expandida, Cinasita 0500 e Cinasita 1506, com dimensão máxima de 9,5 mm (Tabela 1). O superplastificante empregado foi do tipo SPA, segundo classificação da NBR-11768, com massa específica de 1,11 g/cm³ e teor de sólidos de 16,5%. Utilizou-se um látex formulada a partir do copolímero de estireno butadieno, com teor de sólidos de

50% e massa específica de $1,02 \text{ g/cm}^3$. Dados complementares sobre os materiais utilizados na produção dos concretos leves podem ser obtidos no estudo realizado por AGNESINI *et al.* (2000).

Tabela 1. Propriedades dos agregados

Tipo de agregado	D_{\max} (mm) NBR-7211	Massa específica (g/cm^3) NBR-9776	Massa unitária (g/cm^3) NBR-7251	Absorção de água * (% em massa)		
				5 min.	60 min.	24 hs
Areia	2,4	2,63	1,49	-	-	-
Cinasita 0500	4,8	1,51	0,858	0,7	2,7	6,0
Cinasita 1506	9,5	1,11	0,588	1,3	3,5	7,0

* Método proposto por TEZUKA, 1973.

As dosagens do concreto leve utilizadas na produção das peças são apresentadas na Tabela 2. Utilizou-se os teores de 5 e 10% de polímero de estireno butadieno (SB), em relação à massa de cimento, valores esses equivalentes a 10 e 20% de látex SB, respectivamente (teor de sólidos do látex = 50%).

Tabela 2. Dosagem do concreto leve de alto desempenho.

Tipo	Proporcionamento (em massa) C: AS: A: AL1: AL2: SPA ¹	Consumo de cimento (kg/m^3)	Relação $a/(c+sa)$ ² (Índice de Consist. = $200 \pm 10 \text{ mm}$) ⁴		
			0% SB ³	5% SB ³	10 %SB ³
A	1: 0,1: 0,27: 0,315: 0,315: 0,015	700	0,37	0,33	0,31
B	1: 0,1: 0,57: 0,665: 0,665: 0,015	440	0,54	0,46	0,41

¹ cimento: sílica ativa: areia: agregado leve tipo 1: agregado leve tipo 2: superplastificante;

² Relação $a/(c+sa)$ efetiva (em massa), onde a = quantidade total de água presente na mistura;

³ Teor de sólidos em relação à massa de cimento;

⁴ Índice de consistência obtido segunda as recomendações da NBR 7215.

Os materiais foram misturados por 10 minutos em betoneira de eixo vertical, do tipo planetária com capacidade nominal de 60 dm^3 , à temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar de $65 \pm 15\%$ (ambiente do laboratório). A ordem de mistura dos materiais na betoneira foi o seguinte: 1º) cimento, areia e 50% da água; 2º) "lama" (mistura composta por sílica ativa, látex, superplastificante e 50% da água); 3º) agregado leve (sem saturação prévia).

As propriedades e características do concreto leve utilizado para a produção dos elementos construtivos são apresentadas na Tabela 3.

Foram moldadas 6 peças utilizando concreto leve nas dosagens A e B com os teores de 0, 5 e 10% de polímero SB. As peças foram moldadas em formas metálicas, compactadas utilizando vibração externa e desmoldadas após 24 horas. Em seguida foram submetidas à cura úmida, utilizando mantas têxteis úmidas, até a data do ensaio, ou seja, durante 6 dias. As Figuras 1 e 2 ilustram as características da peça e da armadura utilizada.

Tabela 3. Propriedades e características do concreto leve.

Tipo	SB(%)	Resistência à compressão aos 7 dias (MPa) ¹	Resistência à tração aos 7 dias (MPa) ¹	Massa específica (kg/m ³) ²
A	0	51.9	4.0	1605
	5	50.0	3.9	1585
	10	48.5	4.1	1593
B	0	39.7	2.7	1460
	5	39.5	3.4	1505
	10	39.5	3.7	1510

¹ Valor médio da análise de 5 corpos-de-prova;² Valor médio da análise de 3 corpos-de-prova.

Analisando as possibilidades de aplicação das cargas na peça, optou-se pela aplicação de duas forças de igual intensidade eqüidistantes dos apoios. Com isso foi possível obter uma grande região da peça (terço central) submetida à solicitação de momento fletor constante. As Figuras 3 e 4 apresentam as ilustrações da tipologia do carregamento aplicado na análise experimental das peças de concreto leve.

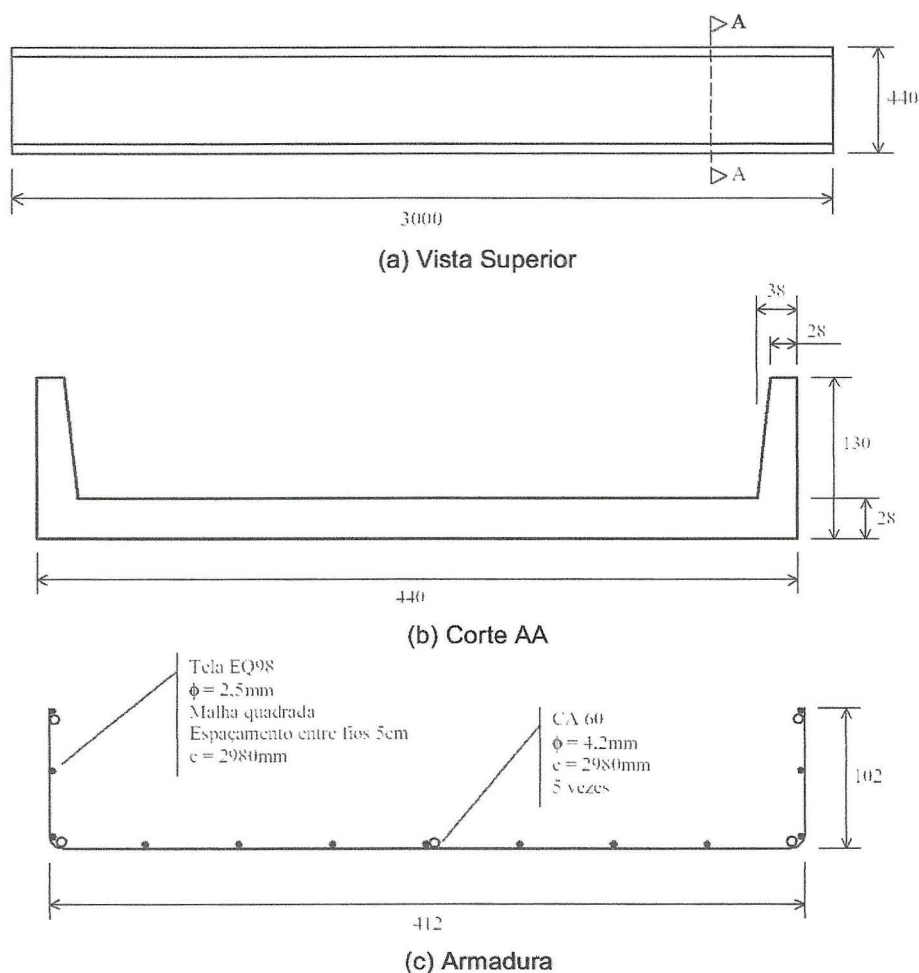


Figura 1. Características das peças pré-fabricadas e da armadura. Sem escala (mm).

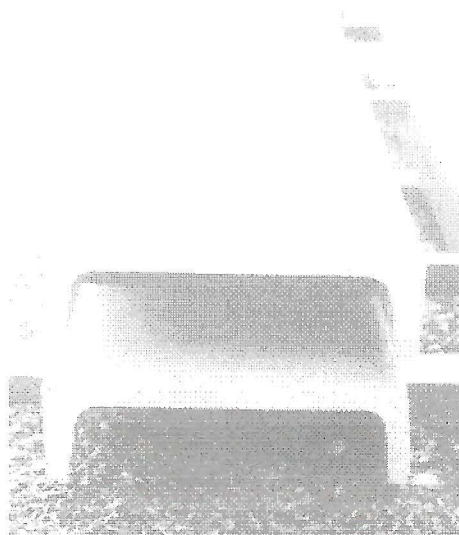


Figura 2. Ilustração da peça pré-fabricada.

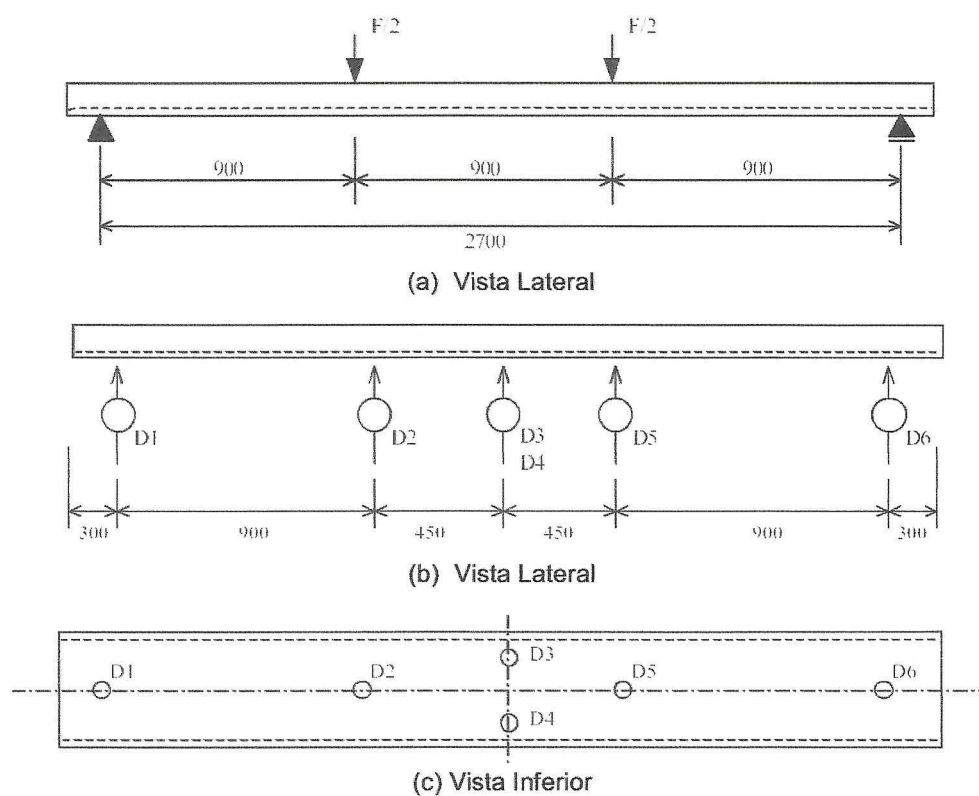


Figura 3. Ilustração do posicionamento das forças e dos defletômetros para realização do ensaio. Sem escala (mm).

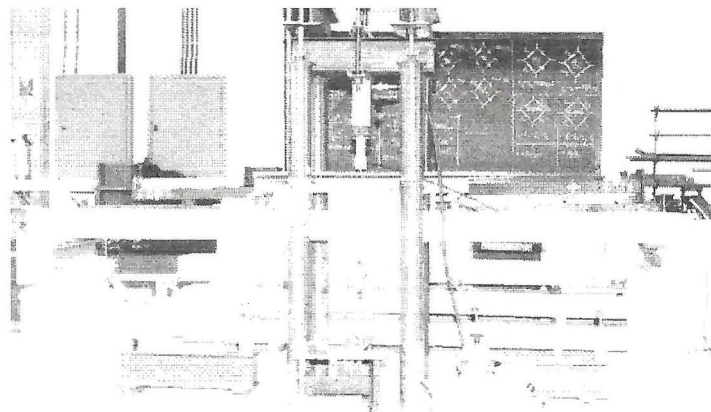


Figura 4. Peça de concreto leve posicionada para realização da análise experimental.

Para a execução da análise experimental empregou-se o sistema pertencente ao Laboratório de Engenharia de Estruturas, Departamento de Estruturas EESC/USP, constituído por laje de reação e equipamentos complementares. Utilizou-se um cilindro hidráulico de capacidade máxima de 100 kN, acionado por bomba hidráulica manual. Para a medição dos deslocamentos foram utilizados defletômetros mecânicos da marca Mitutoyo, com precisão nominal de centésimo de milímetro e com curso total de 50 mm.

O carregamento aplicado nas peças foi dividido em 15 etapas. O intervalo entre as etapas de aplicação de carga foi de 5 minutos e as leituras dos defletômetros foram feitas após 2 minutos da aplicação de cada carga.

No início do ensaio foram aplicadas duas etapas de carga para acomodação da peça com descarregamento total posterior. Em seguida, os carregamentos foram novamente aplicados até o instante em que ocorresse o colapso da peça ou deslocamento de $l/300$ (compatível com lajes) no centro da peça.

3 Apresentação e Discussão dos Resultados

As peças apresentaram valores médios de peso de 93 kg cada uma, enquanto a mesma peça moldada com concreto tradicional apresentaria valores médios de 140 kg. No processo de produção das peças com o concreto leve observou-se que os métodos de mistura, moldagem, adensamento e cura adotados foram adequados, não apresentando quaisquer problemas. O concreto leve apresentou propriedades no estado fresco, tais como consistência e coesão, adequadas ao processo de moldagem e adensamento utilizados, não sendo observado os fenômenos de exsudação e segregação (ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2000).

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos na análise experimental das peças pré-fabricadas. As Figuras 5 e 6 apresentam os diagramas 'força x deslocamento absoluto' para as peças analisadas. Nesses diagramas são apresentados os deslocamentos absolutos observados no centro da peça, obtido pela média dos valores apresentados nos defletômetros D3 e D4, descontando-se os deslocamentos dos apoios (defletômetros D1 e D6).

Tabela 4. Propriedades das peças pré-fabricadas de concreto leve

Propriedade	Tipo de concreto leve					
	Dosagem A			Dosagem B		
	0% SB	5% SB	10% SB	0% SB	5% SB	10% SB
Força necessária para o aparecimento da 1ª fissura (kN)	5,5	6,3	6,8	3,7	4,6	5,4
Deslocamento 1ª fissura ¹ (mm)	3,2	4,0	5,6	2,8	3,2	4,4
Momento fletor para o aparecimento da 1ª fissura (kN.m)	2,5	2,8	3,1	1,7	2,1	2,4
Força necessária para obter o deslocamento l/300 (kN) ²	6,9	7,6	7,6	5,9	6,3	6,8
Momento fletor para a deformação de l/300 (kN.m)	3,1	3,4	3,4	2,7	2,8	3,1
Tenacidade l/300 (kN.mm) ³	50,2	53,4	50,2	39,0	43,7	45,6

(1) Deslocamento absoluto no centro da peça no aparecimento da 1ª fissura;

(2) l/300 = 9,9 mm;

(3) Tenacidade calculada pelo diagrama força-deslocamento absoluto até o deslocamento de l/300.

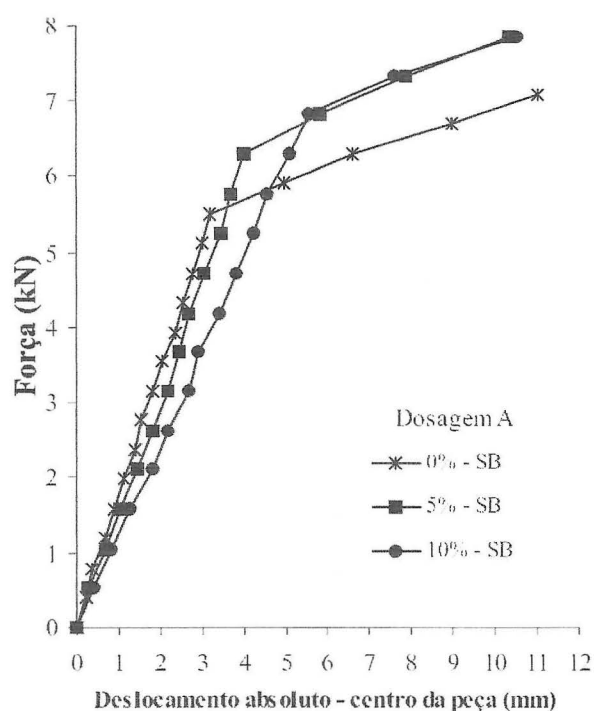


Figura 5. Diagrama força-deslocamento absoluto no centro da peça (Dosagem A)

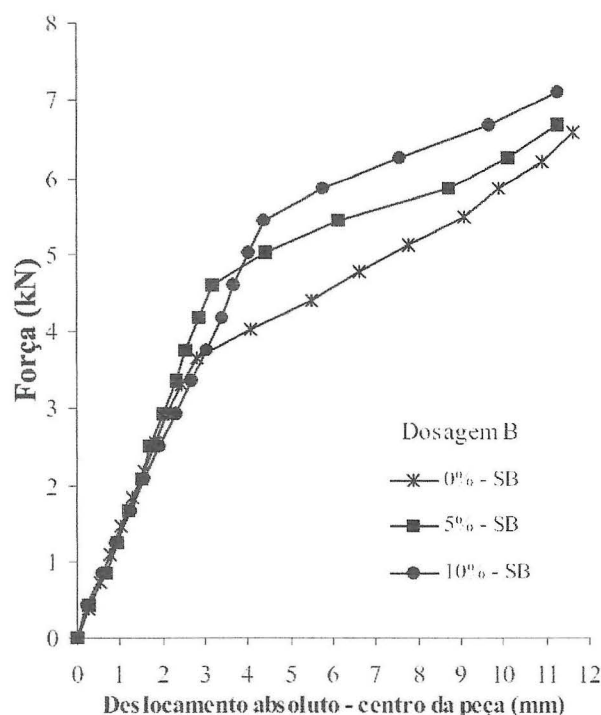


Figura 6. Diagrama força-deslocamento absoluto no centro da peça (Dosagem B)

Analisando os resultados apresentados na Tabela 4, observa-se que as peças moldadas com o concreto leve modificado com látex SB apresentaram desempenho significativamente superior às moldadas com concreto leve sem polímero.

Com relação ao início da fissuração das peças, observa-se que a força necessária para o aparecimento da primeira fissura foi maior nas peças com concreto leve modificado com látex SB do que a observada nas peças com concreto leve sem polímero. Observa-se, ainda, que esse aumento foi mais significativo nas peças moldadas com concreto leve da dosagem B (consumo de cimento de 440 kg/m³), sendo esse acréscimo de 26% para concreto com 5% de SB e de 48% para concreto com 10% de SB. Nas peças com concreto leve da dosagem A (consumo de cimento de 700 kg/m³) esse aumento foi de 14% para concreto com 5% de SB e de 23% para concreto com 10% de SB.

Analisando os deslocamentos absolutos no momento do aparecimento da primeira fissura nas peças, observa-se que para as duas dosagens analisadas houve um aumento significativo desses deslocamentos para as peças moldadas com concreto leve com látex SB em relação às com concreto sem polímero. Para as peças moldadas com o concreto da dosagem A esse acréscimo de deslocamento foi de 25% para concreto com 5% de SB e de 73% para concreto com 10% de SB. Já para as peças moldadas com o concreto da dosagem B, esse aumento de deslocamento foi de 13% para concreto com 5% de SB e de 55% para concreto com 10% de SB.

O aumento da força necessária para o aparecimento da primeira fissura nas peças moldadas com concreto leve modificado com SB podem ser atribuídos, essencialmente, à maior resistência à tração desse material em relação ao concreto leve sem polímero (ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2002).

Analisando os resultados apresentados nas Figuras 5 e 6 observa-se que todas as peças apresentaram diagrama força-deslocamento com grande linearidade até o aparecimento da primeira fissura. Observa-se, também, que as peças moldadas com o concreto leve da dosagem B apresentaram diagramas com inclinação semelhante. Entretanto, com relação a dosagem A, observa-se que os diagramas para as peças moldadas com concreto modificado com látex SB apresentaram menor inclinação do que a observada para as peças com concreto sem polímero, indicando assim a maior ductilidade das peças moldadas com concretos leves modificados com látex SB.

Todas as peças analisadas apresentaram fissuras concentradas no terço central da peça, com abertura inferior a 0,05 mm até atingirem o deslocamento $l/300$.

Para todas as peças analisadas o carregamento foi interrompido no momento em que o deslocamento $l/300$ foi atingido, ou seja, nenhuma das peças analisadas apresentou colapso até o deslocamento de $l/300$.

Em vários dos pilares do trecho supracitado foram detectadas fissuras passantes, as quais se situavam nos consolos das vigas, como pode ser observado na figura 2. Estas fissuras propagavam-se de forma aproximadamente vertical, em direção à base do pilar. Existia a incerteza quanto à manutenção desta direção de propagação.

4 Conclusões

Observou-se que o método utilizado para a análise das peças foi adequado para o estudo comparativo de desempenho das peças moldadas com concreto leve modificado com látex SB e com concreto leve sem polímero.

Analisando os resultados obtidos, constatou-se que as peças moldadas com concreto leve modificado com látex SB apresentaram desempenho significativamente superior ao observado para as peças produzidas com concreto leve sem polímero. Os valores das forças necessárias para o surgimento da primeira fissura e para atingir o deslocamento de $l/300$ foram significativamente maiores nas peças produzidas com concreto leve modificado com polímero, demonstrando assim que o látex SB melhora significativamente o desempenho das peças esbeltas produzidas com concreto leve submetidas à solicitação preponderante de flexão, como telhas, elementos-de-laje, painéis de vedação, entre outras.

Todas as peças analisadas apresentaram valores de abertura de fissuras inferiores a 0,05 mm até o fim do ensaio, determinado pelo deslocamento absoluto de $l/300$ no meio do vão.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP – Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, o apoio financeiro que possibilitou a realização dessa pesquisa. Agradecem, também, o apoio das seguintes empresas: CIMINAS S.A.; Microsílica Tecnologia, Ind. e Com. Ltda.; CINASITA S.A.; e MBT Brasil Ind. e Com. Ltda

5 Referências

AGNESINI, M.V.C.; GOMES NETO, D.P. Microconcretos leves com argila expandida: influência da adição de sílica ativa no fator de eficiência em dosagem de pré-fabricados

de pequena espessura: estudo de caso. **40º Congresso Brasileiro do Concreto**. Rio de Janeiro, IBRACON, 1998.

AGNESINI, M.V.C.; ROSSIGNOLO, J.A.; MORAIS, J.A. Pré-fabricados de pequena espessura: materiais e dosagem de microconcretos leves de alto desempenho – Estudo de caso. **42º Congresso Brasileiro do Concreto**, Fortaleza, 2000.

ARMELIN, H.S.; LIMA, M.G.; SELMO, S.M.S. Alta resistência com argila expandida. **Revista IBRACON**, n.09, pp.42-47, 1994.

EVANGELISTA, A.C.J.; SHEHATA, L.C.D.; ALMEIDA, I.R. Características mecânicas de concretos leves de alta resistência com argila expandida, produzidos no Brasil. **International Congress on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures**. Florianópolis, pp.170-189, 1996.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos - Dosagem, Produção, Propriedades e Microestrutura**. Tese (doutorado). Interunidades EESC/IFSC/IQSC da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.

ROSSIGNOLO, J.A., AGNESINI, M.V.C.; MORAIS, J.A. Properties of High-Performance LWAC for Precast Structures with Brazilian Lightweight Aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v.25, n.1, pp.77-82, 2003.

ROSSIGNOLO, J.A.; AGNESINI, M.V.C. Mechanical properties of polymer-modified lightweight aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v.32, n.3, pp.329-334, 2002.

ROSSIGNOLO, J.A.; AGNESINI, M.V.C. **Durability of polymer-modified lightweight aggregate concrete**. In: Composites in Constructions, edited by J. FIGUEIRAS et al., v.1, pp.61-66. Lisse, Holanda. Ed. A. A. Balkema Publishers, 2001

ROSSIGNOLO, J.A.; AGNESINI, M.V.C. Propriedades no estado fresco dos microconcretos leves de alto desempenho modificados com polímero – Estudo de caso. **IV Congresso de Engenharia Civil**. Juiz de Fora, UFJF, v.1, pp.511-522, 2000.

ROSSIGNOLO, J.A.; PAULON, V.A.; AGNESINI, M.V.C. Concreto leve de elevado desempenho. **Revista Engenharia e Construção**, n.56, pp.24-30. Ed. Luso Brasileira Ltda. Curitiba, 2001.

TEZUKA, Y. Concreto leve à base de argila expandida. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1973.

ZHANG, M.H.; GJØRV, O.E. Mechanical properties of high-strength lightweight concrete. **ACI Materials Journal**, v.88, n.3, pp.240-247, 1991.