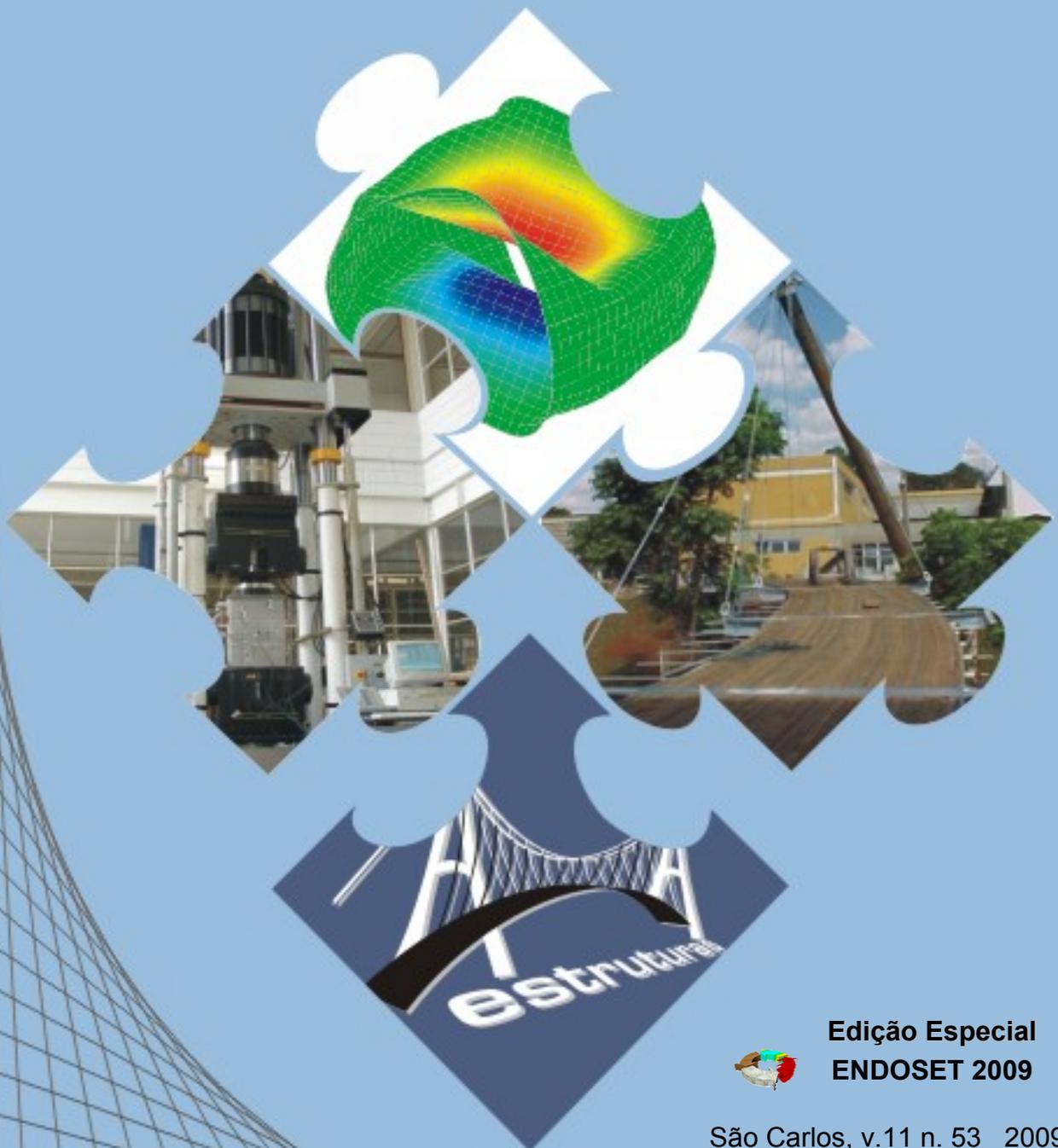




ISSN 1809-5860

Cadernos de **ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia de Estruturas



Edição Especial
ENDOSSET 2009

São Carlos, v.11 n. 53 2009

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Reitora:
Profa. Dra. SUELY VILELA

Vice-Reitor:
Prof. Dr. FRANCO M. LAJOLO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Diretor:
Profa. Dra. MARIA DO CARMO CALIJURI

Vice-Diretor:
Prof. Dr. EDUARDO MORGADO BELO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

Chefe do Departamento:
Prof. Dr. SERGIO PERSIVAL BARONCINI PROENÇA

Suplente do Chefe do Departamento:
Prof. Dr. MOUNIR KHALIL EL DEBS

Coordenador de Pós-Graduação:
Prof. Dr. MARCIO ANTONIO RAMALHO

Editor Responsável:
Prof. Dr. MÁRCIO ROBERTO SILVA CORRÊA

Coordenadora de Publicações e Material Bibliográfico:
MARIA NADIR MINATEL
e-mail: minatel@sc.usp.br

Editoração e Diagramação:
FRANCISCO CARLOS GUETE DE BRITO
MARIA NADIR MINATEL
MASAKI KAWABATA NETO
MELINA BENATTI OSTINI
RODRIGO RIBEIRO PACCOLA
TATIANE MALVESTIO SILVA



Cadernos de ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia de Estruturas



**Edição Especial
ENDOSSET 2009**

São Carlos, v.11 n. 53 2009

Departamento de Engenharia de Estruturas
Escola de Engenharia de São Carlos – USP
Av. Trabalhador São-carlense, 400 – Centro
CEP: 13566-590 – São Carlos – SP
Fone: (16) 3373-9481 Fax: (16) 3373-9482
site: <http://www.set.eesc.usp.br>
e-mail: cadernos@sc.usp.br

Fica aqui expresso o agradecimento especial aos realizadores, apoiadores e patrocinadores do ENDOSET 2009.

Realização
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas

Patrocínio



Apoio do Fundo de Fomento às Iniciativas de Cultura e Extensão Universitária

Apoio



SUMÁRIO

▪ ESTRUTURAS DE CONCRETO E DE ALVENARIA

| | |
|---|----|
| Efetividade do cobrimento em pilares encamisados com CAR <i>Alexandre Luis Sudano & João Bento de Hanai</i> | 1 |
| Cisalhamento em lajes alveolares protendidas <i>Bruna Catoia, Libânio Miranda Pinheiro & Marcelo de Araujo Ferreira</i> | 7 |
| Estudo de consolos e dentes de concreto moldados em etapas distintas para ligações de concreto pré-moldado <i>Christiane Mylena Tavares de Menezes & Mounir Khalil El Debs</i> | 13 |
| Comportamento de ligações viga-pilar parcialmente resistentes a momento fletor mediante chumbadores grauteados <i>Eduardo Aurélio Barros Aguiar & Mounir Khalil El Debs</i> | 17 |
| Estudo numérico e experimental de tubos de concreto armado submetidos à compressão diametral <i>Jefferson Lins da Silva & Mounir Khalil El Debs</i> | 21 |
| Estudo da ligação entre pilares mistos preenchidos e vigas pré-moldadas de concreto por meio de consolo metálico <i>Leonardo Melo Bezerra & Ana Lúcia Homce de Cresce El Debs</i> | 27 |
| Ligação viga-pilar em elementos pré-moldados de concreto solidarizados por concreto reforçado com fibras de aço: análises estática e dinâmica <i>Luiz Álvaro de Oliveira Júnior, Mounir Khalil El Debs & Daniel de Lima Araújo</i> | 33 |
| Análise numérica e experimental de blocos de concreto armado sobre duas estacas com cálice externo, embutido e parcialmente embutido <i>Rodrigo Barros & José Samuel Giongo</i> | 39 |
| Análise experimental e numérica do comportamento de junta da alvenaria <i>Rodrigo Carvalho da Mata & Marcio Antonio Ramalho</i> | 45 |
| Pré-moldados esbeltos em CAD <i>Rodrigo Vieira da Conceição & Jefferson Benedicto Libardi Liborio</i> | 51 |
| Análise dinâmica experimental para determinação da rigidez de ligações viga-pilar <i>Sandra Freire de Almeida & João Bento de Hanai</i> | 57 |

| | |
|---|----|
| Inserção de laminados de PRFC em ligações viga-pilar de um de pórtico de concreto <i>Tatiana de Cássia Coutinho Silva da Fonseca & João Bento de Hanai</i> | 63 |
|---|----|

▪ ESTRUTURAS DE MADEIRA

| | |
|--|----|
| Análise do sistema misto de ligação madeira-concreto em situação de incêndio <i>Julio Cesar Molina & Carlito Calil Junior</i> | 69 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| Avaliação da rigidez à flexão de toras de madeira por meio de vibração transversal <i>Marcelo Rodrigo Carreira & Antônio Alves Dias</i> | 75 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| Vibrações em passarelas de madeira <i>Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho & Antonio Alves Dias</i> | 81 |
|---|----|

▪ ESTRUTURAS METÁLICAS

| | |
|--|----|
| Estudo do comportamento de ligações viga-pilar preenchido submetidas a ações cíclicas <i>Marcela Novischi Kataoka & Ana Lúcia Homce de Cresce El Debs</i> | 87 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| Desenvolvimento e aplicação de código computacional para análise de estruturas de aço em situação de incêndio <i>Ronaldo Rigobello & Jorge Munaiar Neto & Humberto Breves Coda</i> | 93 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| Análises numérica e experimental de perfis de aço formados a frio comprimidos submetidos à temperaturas elevadas <i>Saulo José de Castro Almeida & Jorge Munaiar Neto</i> | 99 |
|--|----|

| | |
|--|-----|
| Análise teórica e experimental de barras em dupla cantoneira de aço formadas a frio submetidas à compressão <i>Wanderson Fernando Maia & Maximiliano Malite</i> | 105 |
|--|-----|

▪ MATERIAIS E MECÂNICA DOS MATERIAIS

| | |
|--|-----|
| Estudo da técnica de dopagem de agregados em concretos de alto desempenho <i>Ana Paula Moreno Trigo & Jefferson Benedicto Libardi Liborio</i> | 111 |
|--|-----|

| | |
|--|-----|
| Estudo do comportamento de um sólido elástico-linear transversalmente isotrópico via MHA e via MEF <i>Edmar Borges Theóphilo Prado & Adair Roberto Aguiar</i> | 117 |
|--|-----|

Modelagem de meios porosos saturados considerando danificação via Método dos Elementos de Contorno
Eduardo Toledo de Lima Junior & Wilson Sergio Venturini 123

Subsídios para produção de ladrilhos e revestimentos hidráulicos de alto desempenho
Thiago Catoia & Jefferson Benedicto Libardi Liborio 129

▪ MECÂNICA DAS ESTRUTURAS

Análise da propagação de fissuras em fadiga usando Método dos Elementos de Contorno
Edson Denner Leonel & Wilson Sergio Venturini 135

▪ MÉTODOS NUMÉRICOS

Análise da interação edifício-solo com uma combinação MEC/MEF
Ana Paula Ferreira Ramos & João Batista de Paiva 141

Um modelo para projeto ótimo baseado em confiabilidade aplicado a vigas em concreto armado
Caio Gorla Nogueira & Wilson Sergio Venturini 145

Desenvolvimento e implementação de um Método de Elementos Finitos paralelo para análise não linear de estruturas
Célia Leiko Ogawa Kawabata, Wilson Sergio Venturini & Humberto Breves Coda 151

Desenvolvimento e aplicação de técnicas do MEC acopladas ao MEF na análise da interação solo-estrutura
Dimas Betioli Ribeiro & João Batista de Paiva 157

Análise não linear geométrica de sólidos elásticos com gradação funcional via MEF-P
João Paulo Pascon & Humberto Breves Coda 161

Utilização do acoplamento MEC/MEF e de técnicas de CID em problemas inversos
Manoel Dênis Costa Ferreira & Wilson Sergio Venturini 167

Método da Partição na análise de múltiplas fissuras
Michell Macedo Alves & Sergio Persival Baroncinni Proença 171

Formulações híbrido-mistas de elementos finitos em análise não-linear
Raimundo Gomes de Amorim Neto & Sergio Persival Baroncini Proença 177

| | |
|---|-----|
| Uma formulação para identificação e solução do impacto bidimensional entre estrutura e anteparo rígido utilizando multiplicadores de Lagrange <i>Roberson Luiz Minski & Humberto Breves Coda</i> | 181 |
| Análise de interação fluido-estrutura pelo Método dos Elementos Finitos <i>Rodolfo André Kuche Sanches & Humberto Breves Coda</i> | 187 |

EFETIVIDADE DO COBRIMENTO EM PILARES ENCAMISADOS COM CAR

Alexandre Luis Sudano¹ & João Bento de Hanai²

Resumo

O modo de reforço de pilares de concreto mais empregado é o encamisamento com concreto de alta resistência e armadura transversal adicional. Esta técnica de reforço apresenta suas vantagens e inconvenientes. Como vantagem destaca-se o vasto conhecimento a este respeito e a aceitabilidade do mercado. Já como inconveniente, esta técnica de reforço apresenta um aumento considerável na área da seção transversal do pilar, e a ineficiência da parte não confinada da camisa de reforço, o cobrimento. Este trabalho tem por objetivo quantificar e explicitar a colaboração do cobrimento na capacidade resistente de pilares encamisados com concreto de alta resistência e armadura transversal. Os resultados das análises mostram que esta colaboração é limitada, principalmente em pilares de seção quadrada e retangular.

Palavras-chave: Reforço de pilares. Confinamento. Cobrimento de concreto. PRF.

COVER EFFECTIVENESS ON HSC JACKETED COLUMNS

Abstract

The most used concrete columns strengthening technique is the high strength concrete jacketing and additional reinforcement. This technique has enhanced its advantages and disadvantages. It can be pointed as a benefit the vast knowledge about it and the market acceptability. On the other hand, as a negative aspect, this technique has a significant increase in cross-sectional area of the original column, and the inefficiency of the unconfined part of the strengthening jacket, the concrete cover. This paper is intended to quantify and explain the collaboration of the concrete cover on the strength of jacketed concrete columns. The analysis results show that this collaboration is limited, especially on square and rectangular cross sectioned columns.

Keywords: Columns strengthening. Confinement. Concrete cover. FRP.

Linha de Pesquisa: Estruturas de Concreto e de Alvenaria

1 INTRODUÇÃO

O reforço de pilares por encamisamento tem sido alvo de vários trabalhos científicos, em função da sua eficiência na solução de problemas de manutenção e atualização das estruturas de concreto existentes. Os principais tipos de encamisamento abordados na literatura são o encamisamento com concreto armado e o encamisamento com polímeros reforçados com fibras (PRF). Em ambos os casos, o reforço do pilar original se dá em função, parcial ou integralmente, do efeito de confinamento do núcleo de concreto, que corresponde à restrição da expansão lateral do concreto do pilar original, promovida pelas pressões exercidas pela armadura transversal da camisa de reforço ou pela camisa de PRF.

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, alsudano@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, jbhanai@sc.usp.br



O reforço por encamisamento com concreto armado é aplicado, em grande parte dos casos, sem considerar a colaboração do pilar original na capacidade portante do pilar reforçado. Porém, alguns pesquisadores, como Takeuti [1], demonstraram que o uso de adequada taxa de armadura transversal, na camisa de reforço, possibilita tal colaboração, em função do confinamento adicional imposto ao pilar original. Neste caso, a capacidade resistente do pilar reforçado é dada pela somatória das componentes providas por todo o núcleo confinado, que neste caso inclui o concreto do pilar original e parte do concreto da camisa de reforço (a que fica envolvida pela armadura transversal do reforço).

Ainda no encamisamento com concreto, existe uma parte que é negligenciada na capacidade resistente do pilar reforçado, que é a parte do concreto da camisa de reforço não envolvida pela armadura, o cobrimento.

Diante deste cenário, busca-se neste trabalho analisar, o comportamento da parte não confinada da camisa de reforço, com base em modelos teóricos encontrados na literatura e nos resultados obtidos experimentalmente.

2 METODOLOGIA

A metodologia empregada baseia-se na determinação de resistência de pilares com diferentes seções transversais, reforçados com CAR utilizando-se métodos de cálculo, encontrados na literatura, para a determinação da resistência do núcleo confinado, considerando ainda a colaboração do cobrimento de concreto na resistência do pilar reforçado e comparar com os resultados de uma análise experimental.

A análise experimental realizada em 12 pilares curtos, com diferentes seções transversais (circular, quadrada e retangular) e 60 cm de altura, submetidos à compressão simples. Os pilares testados foram preparados a partir de um pilar original de concreto sem armadura, com posterior instalação da armadura longitudinal e transversal e concretagem do cobrimento, mantendo-se a mesma forma da seção. Configurou-se assim, um pilar de concreto armado, porém com concretos de diferentes resistências no núcleo confinado e no cobrimento da armadura. Posteriormente, 6 destes pilares foram encamisados com uma camada de polímero reforçado com fibra de carbono para avaliar a validade da superposição da resistência de cada uma das parcelas do pilar reforçado.

Com os resultados desta simulação experimental, procedeu-se a presente análise confrontando-se o comportamento tensão-deformação obtido experimentalmente com as curvas sugeridas por modelos de cálculo encontrados na literatura, considerando-se ou não a superposição dos efeitos de confinamento.

3 DESENVOLVIMENTO

Para a previsão do comportamento tensão-deformação dos pilares ensaiados foram utilizados os modelos de Razvi & Saatcioglu [3], para o confinamento com aço, e de Lam & Teng [4], para o confinamento com PRF, sendo que neste último foram necessárias algumas modificações para considerar a forma da seção transversal, já que este modelo foi originalmente formulado para pilares de seção transversal circular.

Para a análise experimental, os pilares originais a serem reforçados, foram preparados com as formas circular (15 cm de diâmetro), quadrada (12,9 cm x 12,9 cm) e retangular (7,6 cm x 20,2 cm), todos com 60 cm de altura, sem armadura e com concreto de aproximadamente 20 MPa. Na etapa seguinte, instalou-se, em todos os pilares, a armadura longitudinal, composta de 4 barras de 8 mm de diâmetro, juntamente com a armadura transversal de fios de 5 mm de diâmetro, espaçados de 50 mm. Esta última foi constituída por uma espiral, no caso de seção transversal circular, e estribos, no caso



de seções quadradas e retangulares. Uma camisa de concreto, com 25 mm de espessura, foi moldada de modo a envolver o pilar original e a armadura de reforço. O concreto aplicado foi de aproximadamente 60 Mpa, significativamente superior à do concreto do pilar original, para evidenciar o comportamento diferenciado da camada de cobrimento. Após o reforço com concreto armado, os pilares passaram a ter as dimensões apresentadas na Fig.1.

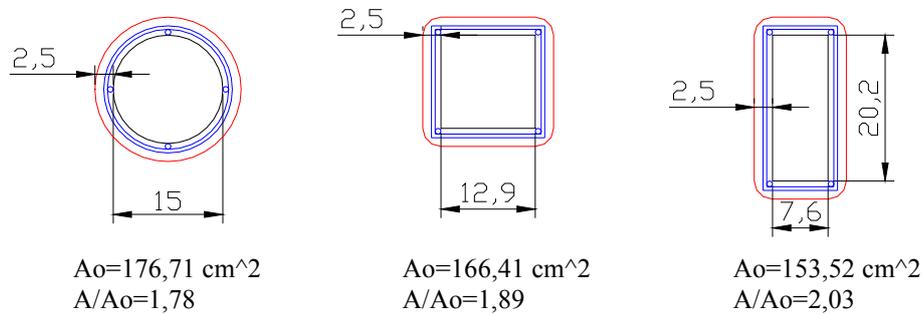


Figura 1 – Seção transversal dos pilares após o encamisamento com concreto armado.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Na apresentação dos resultados, utiliza-se a seguinte nomenclatura: $X mn$, onde X pode ser C , Q ou R , para seção transversal circular, quadrada ou retangular, respectivamente; m pode ser 0 ou 1 para os pilares originais encamisados apenas com concreto armado ou com concreto armado e uma camada de PRFC, respectivamente; n pode ser 1 ou 2 , que é o exemplar, já que foram ensaiados 2 exemplares para cada configuração. Para os pilares originais utiliza-se apenas $PO-Xn$, sendo o PO significando pilar original e o X e n com os mesmos significados anteriores. A seguir apresenta-se separadamente os resultados dos pilares ensaiados de e da estimativa teórica do comportamento tensão – deformação de acordo com a forma da seção transversal.

Pode-se observar nos diagramas tensão deformação referentes aos pilares sem o encamisamento adicional com PRFC que a resistência dos pilares, determinada analiticamente, independente da forma da seção transversal, é superior à obtida nos ensaios, e que suas correspondentes deformações são menores que as experimentais. A explicação que se dá para este fato é que a simples somatória das resistências do núcleo confinado, da armadura longitudinal e do cobrimento não é válida. Neste caso, a somatória simples das componentes da resistência do pilar, as quais foram calculadas considerando-se a colaboração plena do cobrimento, não correspondem à realidade. Já a previsão teórica do trecho descendente destes mesmos diagramas forneceram bons resultados, principalmente no caso dos pilares de seção transversal quadrada e retangular, o que já era de se esperar, visto que o modelo de cálculo utilizado foi feito com base em resultados de ensaios de pilares com estas seções.

Analisando agora os pilares que receberam o confinamento adicional da camisa de PRFC, percebe-se que no caso dos pilares circulares a previsão analítica forneceu bons resultados, o que indica que reafirma a hipótese de que o cobrimento de concreto não colabora plenamente na resistência do pilar reforçado se este não estiver confinado, como acontece no caso da utilização da camisa de PRFC. Já nos pilares de seção transversal quadrada e principalmente retangular, a previsão analítica do comportamento dos pilares encamisados também com PRFC não forneceu bons resultados por causa da superestimativa da resistência do conjunto sem a camisa de PRFC, pois o efeito de arqueamento das pressões de confinamento nestes casos, é maior e portanto a área não efetivamente confinada é maior e conseqüentemente a colaboração do cobrimento de concreto na capacidade resistente do pilar reforçado é menor.



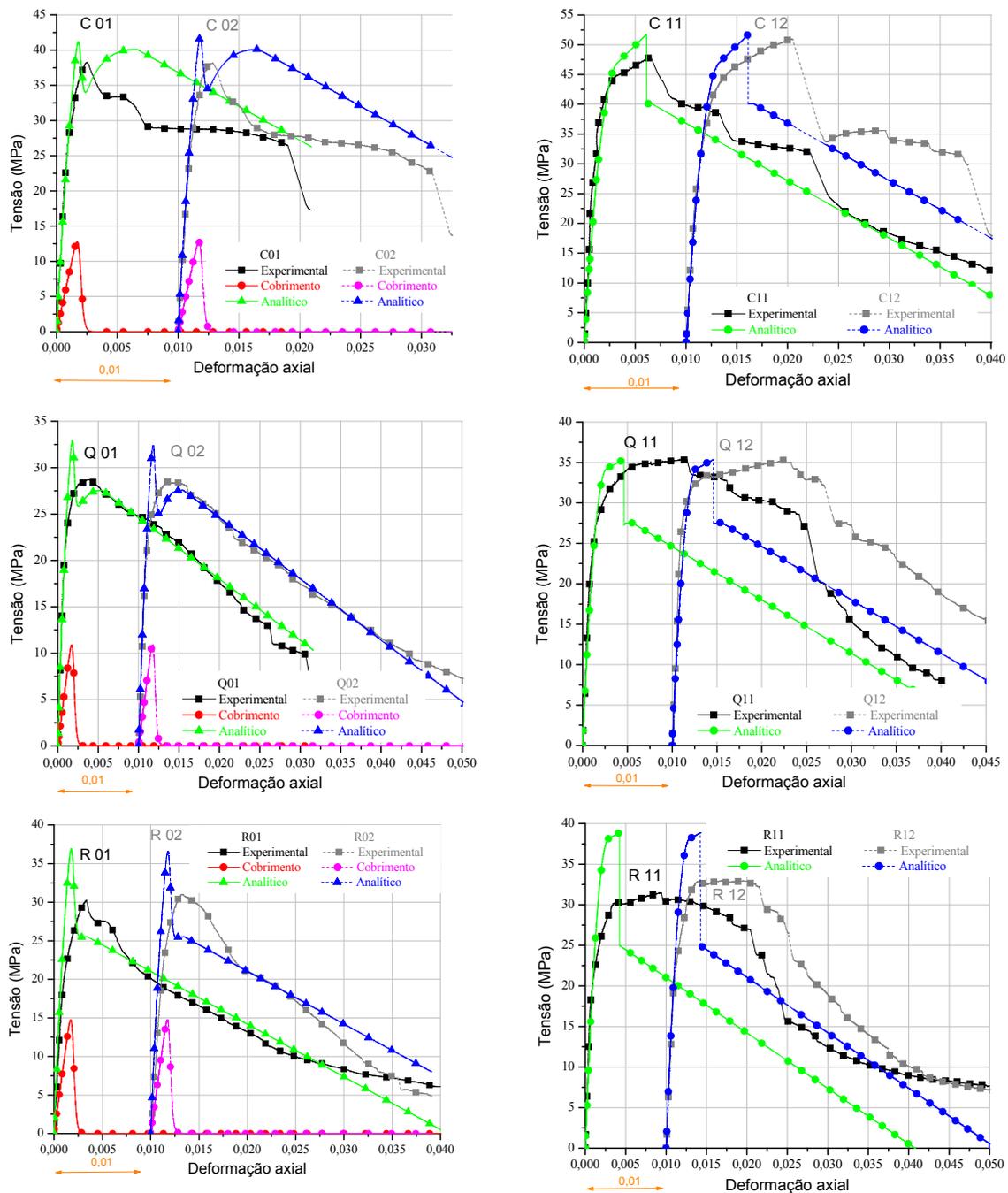


Figura 2 – Comportamento experimental e teórico do diagrama tensão deformação para os pilares reforçados de seção transversal circular, quadrada e retangular, respectivamente.

5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Com base nos resultados e comparações apresentadas, o cobrimento de concreto tem uma colaboração limitada na capacidade resistente dos pilares reforçados. No caso dos pilares de seção transversal circular, quando se considera o encamisamento adicional com PRFC, o cobrimento passa a ter uma colaboração mais próxima da plena, uma vez que a camisa de PRFC o confina, possibilitando assim a consideração da sua resistência, o que já não acontece com os pilares de seção transversal quadrada e principalmente retangular.



6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fapesp - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo apoio financeiro e ao Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo pelo apoio dado na realização deste trabalho.

7 REFERÊNCIAS

TAKEUTI, A. R. **Comportamento resistente imediato e ao longo do tempo de pilares reforçados por meio de encamisamento com concreto de alto desempenho**. São Carlos. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

RAZVI, S.; SAATCIOGLU, M. Confinement model for high-strength concrete. **Journal of Structural Engineering**, ASCE, v. 125, n. 3, 1999, p. 281-289. ISSN: 0733-9445/99/0003-0281-0289.

LAM, L.; TENG, J. G. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete. **Construction and Building Materials**. Elsevier Science Ltda, v. 17, 2003, p. 471-489. Doi: 10.1016/S0950-0618(03)00045-X.



CISALHAMENTO EM LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS

Bruna Catoia¹, Libânio Miranda Pinheiro² & Marcelo de Araujo Ferreira³

Resumo

Esta pesquisa tem como principal objetivo analisar o comportamento de lajes alveolares protendidas brasileiras quanto ao cisalhamento em região fissurada por ação de momento fletor, para diferentes situações: sem e com a presença de capa e sem e com o preenchimento de alvéolos. Desenvolve-se um estudo teórico, com o emprego de equacionamento analítico, sendo feitas comparações com resultados experimentais, obtidos a partir de inúmeros ensaios de lajes alveolares protendidas. A partir dos ensaios, pretende-se alcançar um maior entendimento do comportamento dessas lajes alveolares e verificar a adequabilidade de equações, recomendadas por normas internacionais, para o dimensionamento das lajes alveolares brasileiras.

Palavras-chave: Lajes alveolares protendidas. Cisalhamento. Desempenho mecânico.

SHEAR IN PRESTRESSED HOLLOW CORE SLABS

Abstract

This research has as main aim to analyze the behavior of Brazilian prestressed hollow core slabs with respect to the shear on region cracked by the action of bending moment for different situations: with and without the presence of concrete topping and with and without the filling of cores. A theoretical study is developed with the use of analytical equating, being made comparisons with experimental results obtained in many tests of prestressed hollow core slabs. From these tests, it is intended to achieve a greater understanding relative to the behavior of those slabs and to verify the suitability of the equations, recommended by international standards for dimensioning of Brazilian hollow core slabs.

Keywords: Prestressed hollow core slabs. Shear. Mechanical performance.

Linha de Pesquisa: Estruturas de Concreto e de Alvenaria

1 INTRODUÇÃO

Os elementos pré-moldados para pisos estão entre os produtos pré-moldados mais antigos. As lajes alveolares correspondem a um dos mais avançados tipos de unidades pré-moldadas, possuem uma concepção arrojada, podendo ser utilizadas nos mais variados sistemas estruturais. Milhões de metros quadrados de lajes são fabricados todo ano ao redor do mundo, com emprego predominante na América do Norte e na Europa Ocidental

As espessuras das lajes alveolares são diferentes nos vários países onde ela é empregada, sendo que no Brasil são comuns espessuras entre 150 mm e 300 mm, enquanto nos EUA e na Europa essas dimensões variam entre 265 mm e 500 mm.

Em virtude de se empregarem lajes de menor altura útil no Brasil, em geral se têm situações de projeto com maior quantidade de armadura de protensão, quando comparadas com lajes de

¹ Doutoranda em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, bcatoia@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, libanio@sc.usp.br

³ Professor do Departamento de Engenharia Civil da UFScar (co-orientador), marcelo-ufscar@uol.com.br



mesmos vãos e carregamentos nos EUA e na Europa, podendo levar a um comportamento diferenciado.

O objetivo desta pesquisa é analisar o comportamento de lajes alveolares protendidas brasileiras quanto ao cisalhamento em região fissurada à flexão, considerando diferentes situações de projeto, com e sem a presença de capa, com e sem alvéolos preenchidos, por meio da realização de ensaios experimentais e da análise dos mecanismos resistentes.

Assim, pretende-se identificar o equacionamento que melhor representa o comportamento das lajes alveolares brasileiras, através da comparação dos valores teóricos, calculados considerando diferentes equacionamentos, com valores experimentais obtidos em ensaios físicos.

2 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos propostos, é importante fazer um levantamento bibliográfico sobre os elementos de laje alveolar e um estudo experimental desses elementos, baseado em ensaios físicos realizados conforme recomendações da FIP (1992). Assim, com esses dados experimentais, é possível compará-los com os resultados teóricos obtidos.

Com isso, podem ser realizadas análises dos resultados, por meio de ábacos, dos mecanismos resistentes na ruína e de comparações, tanto entre os valores experimentais como os obtidos com equacionamentos analíticos, expressos na revisão bibliográfica.

3 DESENVOLVIMENTO

A seguir são apresentadas algumas etapas do desenvolvimento do trabalho, incluindo um estudo teórico de cálculo e alguns ensaios experimentais realizados.

3.1 Modelo teórico de cálculo

Não há uma teoria geral aceita para a capacidade ao cisalhamento de elementos de concreto armado, tornando problemática a previsão da capacidade ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas.

A técnica de produção para os elementos alveolares, especialmente pelo método da extrusão, não permite o emprego de armadura de cisalhamento.

O Manual de Projeto para Lajes Alveolares da FIB (2000) apresenta equações para a consideração da contribuição da capa de concreto e do preenchimento dos alvéolos para o aumento da resistência ao cisalhamento.

As resistências ao cisalhamento para diferentes situações de lajes, sem e com capa, sem e com preenchimento dos alvéolos, estão apresentadas nas Eqs. de 1 a 3.

a) Elemento de laje alveolar sem capa estrutural

$$V_{Rdf} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d \cdot k \cdot (1,2 + 40\rho_1) + 0,15 \cdot \sigma_{cpm} \cdot b_w \cdot d \leq V_{Rd2} \quad (1)$$

b) Elemento de laje alveolar com capa estrutural

$$\overline{V}_{Rdf} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d' \cdot k' \cdot (1,2 + 40\rho'_1) + 0,15 \cdot \sigma_{cpm} \cdot b_w \cdot d' \leq V'_{Rd2} \quad (2)$$

c) Elemento de laje alveolar sem capa e com preenchimento nos alvéolos

$$V'_{Rdf} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot b'_w \cdot d \cdot k \cdot (1,2 + 40\rho'_1) + 0,15 \cdot \sigma_{cpm} \cdot b_w \cdot d \leq V'_{Rd2} \quad (3)$$



3.2 Programa experimental

3.2.1 Ensaio para determinação da resistência ao cisalhamento

O ensaio para a capacidade do apoio da laje, além de avaliar a resistência ao cisalhamento, permite avaliar indiretamente a resistência do concreto à tração diagonal e a eficiência da ancoragem da armadura de protensão junto ao apoio. A fim de se obter um efeito desfavorável da flexão sobre o mecanismo de resistência ao cisalhamento, o ensaio padrão recomendado pela FIP (1992) estabelece que o carregamento seja aplicado a uma distância de 2,5 h do apoio (h é a altura da laje), sendo empregada laje com comprimento que corresponder ao maior valor entre 4 m ou 15 h.

Para verificar a viabilidade de aplicação no Brasil dos procedimentos recomendados pela FIB, foram ensaiadas cinco tipologias de unidades alveolares, sendo: laje sem capa; laje com capa e tela soldada; laje com capa e fibras metálicas; laje sem capa com dois alvéolos preenchidos e laje sem capa com quatro alvéolos preenchidos. Para cada tipologia foram realizados cinco ensaios, totalizando 25. Todas as unidades tinham 3 m de vão.

3.2.2 Geometria e materiais

As lajes estudadas foram produzidas pelo método de extrusão, sendo sua seção transversal e respectivas variações mostradas na Figura 1. A resistência do concreto à compressão foi de 35 MPa, na liberação dos cabos, e 40 MPa, aos 10 dias (na data de ensaio). A capa estrutural, com resistência de 33,2 MPa e 50 mm de altura, foi feita com tela e com fibras metálicas. Quando se empregava tela, esta tinha fios com diâmetro de 5 mm e espaçamento de 200 mm; quando se usava fibra, a capa era executada com 30 kg de fibra por metro cúbico de concreto.

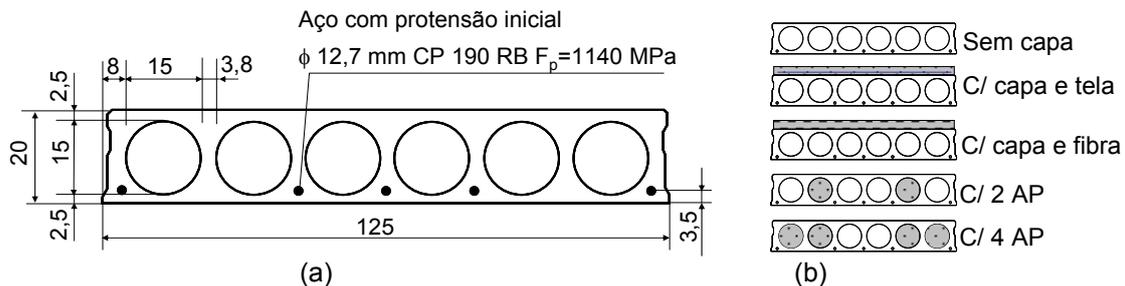


Figura 1 – (a) Geometria da laje estudada; (b) Seções transversais (dimensões em cm).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresenta-se na Figura 2a uma comparação dos valores experimentais de lajes sem e com capa. As lajes com capa resistiram melhor ao cisalhamento do que as sem capa. Comparando as lajes sem capa com as de alvéolos preenchidos, observou-se um aumento da resistência ao cisalhamento (Figura 2b).

Na Tabela 1, nota-se que os resultados experimentais encontrados com as equações da EN-1168:2005, no caso de lajes com e sem capa e dois alvéolos preenchidos, conseguiram-se bons resultados, o que não ocorreu com as lajes sem capa e quatro alvéolos preenchidos.



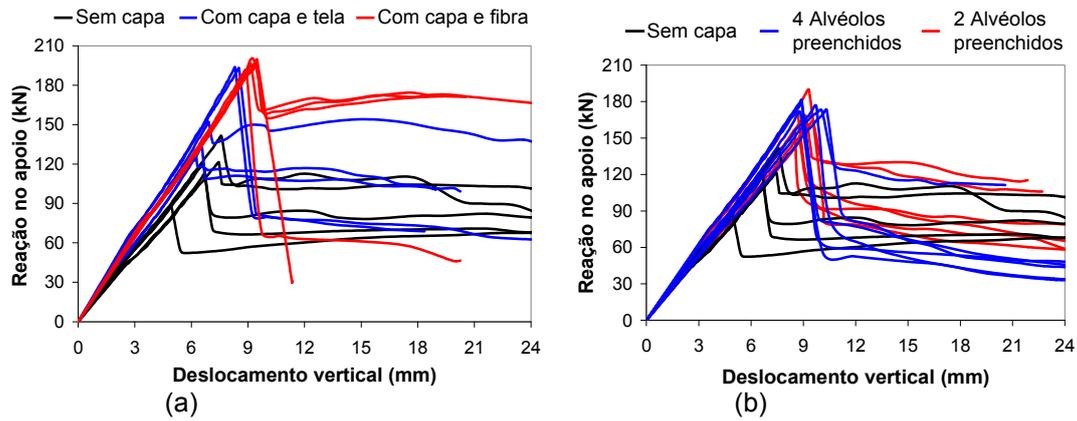


Figura 2 – Valores experimentais da reação no apoio versus deslocamento.

Tabela 1 – Comparação entre os valores obtidos nos ensaios de cisalhamento e os valores teóricos calculados a partir da FIB (2000)

| Descrição dos modelos | $V_{u,exp}$ (kN) | V_{Rk} (kN) | V_{Rd1} (kN) | $V_{S,Max}$ (kN) | λ |
|--------------------------------------|------------------|---------------|----------------|------------------|-----------|
| Laje sem capa | 119,98 | 102,66 | 81,68 | 58,34 | 2,06 |
| Laje com capa e tela soldada | 164,27 | 125,28 | 100,36 | 71,69 | 2,29 |
| Laje com capa e fibras metálicas | 200,98 | 125,28 | 100,36 | 71,69 | 2,80 |
| Laje com dois alvéolos preenchidos | 170,21 | 157,27 | 120,83 | 86,31 | 1,97 |
| Laje com quatro alvéolos preenchidos | 179,78 | 211,71 | 159,82 | 114,16 | 1,57 |

$V_{u,exp}$ – valor médio de ruptura por cisalhamento nos ensaios; V_{Rk} – valor característico de resistência ao cisalhamento; V_{Rd1} – valor de projeto da resistência ao cisalhamento; $V_{S,max}$ – cisalhamento máximo de serviço; $\lambda = V_{u,exp} / V_{S,max}$

A seguir, são mostradas algumas configurações de fissuração observadas durante o ensaio ao cisalhamento, das peças sem capa que sofreram interferência mais significativa de outros mecanismos, tais como flexão e torção (Figura 3a e b). Para lajes com capa e tela esses efeitos foram menos significativos (Figura 3c e d).



Figura 3 – Configuração de fissuração (a) e (b) unidades sem capa, (c) e (d) unidades com capa.

No caso das lajes sem capa, os resultados experimentais foram superiores à resistência última estimada, sendo que um modelo rompeu por mecanismo combinado de cisalhamento e torção. No caso das lajes com capa (com tela e com fibra metálica), observou-se que os resultados experimentais foram bem superiores aos estimados teoricamente. Acredita-se que este fato ocorreu devido à mudança de mecanismo de ruptura, em razão do aumento da altura da laje, ficando mais próximo ao mecanismo de ruptura por cisalhamento puro, em que a tensão principal de tração na nervura excedeu a resistência de tração do concreto. Entretanto, observa-se que, se por um lado a capacidade resistente ao cisalhamento aumentou, houve uma redução da ductilidade da peça.

Os resultados apresentaram uma boa aproximação para o caso do preenchimento com dois alvéolos. Porém, não se conseguiu o mesmo resultado para o caso com quatro alvéolos preenchidos,



uma vez que a resistência experimental pouco variou para as situações com dois ou com quatro alvéolos preenchidos. Esse efeito pode estar relacionado com a disposição desses alvéolos, uma vez que no caso do preenchimento de quatro alvéolos, a nervura central permaneceu como um ponto mais fraco, sendo esse no centro da laje.

Dessa forma, novos estudos são necessários para melhor compreender esses efeitos, e o que se pode dizer até o momento é que os resultados dos ensaios demonstraram que a resistência não aumentou proporcionalmente com o aumento da seção de concreto, através do preenchimento de alvéolos, no caso das lajes sem capa.

Para a finalização do trabalho, pretende-se aprofundar os estudos quanto ao entendimento dos mecanismos resistentes das lajes brasileiras ensaiadas. Pretende-se investigar os modelos teóricos que garantem maior confiabilidade para a aplicação nas lajes brasileiras. Ainda, pretende-se empregar uma metodologia para determinar valores de resistência do concreto à tração, por meio dos resultados obtidos experimentalmente em ensaios à flexão, a partir do momento de fissuração.

5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Com o estudo desenvolvido, verificou-se que o procedimento para ensaio de cisalhamento em lajes alveolares recomendado pela EN-1168:2005 pode ser reproduzido em fábricas de pré-fabricados no Brasil. É importante observar que o ensaio estudado procura simular a ruptura de cisalhamento em uma região onde as tensões decorrentes da flexão influenciam a resistência final (resistência ao cisalhamento em zona de flexão).

Além disso, através da análise dos resultados experimentais e de sua comparação com os valores obtidos teoricamente, pode-se concluir, de uma forma geral, que as equações recomendadas pela FIB (2000) fornecem resultados coerentes quanto à resistência ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas, considerando ou não a seção composta (presença de capa e alvéolos preenchidos).

Para o caso da laje com altura de 200 mm, para a carga aplicada a 2,5 h do apoio, os resultados experimentais e suas respectivas análises revelaram que o mecanismo de resistência ao cisalhamento pode ser afetado pela presença de fissuras de flexão, sendo que o mecanismo de ruptura na região do apoio passa a ser governado pela tensão de tração normal à armadura ativa (falha na ancoragem). Esta hipótese é considerada pelo equacionamento recomendado pela FIB (2000), que está de acordo com a norma europeia EN-1168:2005.

6 AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela Bolsa de Doutorado e à Associação Brasileira de Construção Industrializada de Concreto (ABCIC) pelo fornecimento das unidades ensaiadas.

7 REFERÊNCIAS

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION – CEN. **EN 1168** – Precast concrete products – Hollow core slabs. Brussels: CEN, 2005. (English version).

FEDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAİNTE. **FIP** – Guide to good practice: quality assurance of hollow core slab. London, England, 1992.

FEDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **FIB (CEB-FIB)** – Guide to good practice: Special design considerations for precast prestressed hollow core floors. Lausanne, 2000.



ESTUDO DE CONSOLOS E DENTES DE CONCRETO MOLDADOS EM ETAPAS DISTINTAS PARA LIGAÇÕES DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO

Christiane Mylena Tavares de Menezes¹ & Mounir Khalil El Debs²

Resumo

O objetivo desta pesquisa é investigar o comportamento de consolos de concreto de alto desempenho reforçados com fibras moldados em etapas distintas do pilar. Neste estudo o consolo é moldado em etapa anterior a do pilar apenas com a armadura do tirante e sem a armadura de costura, então, para resolver o problema de ductilidade da biela o concreto do consolo faz uso de fibras. A investigação será realizada com uma extensa análise experimental e posterior simulação numérica.

Palavras-chave: Consolo. Concreto pré-moldado. Fibras. Ligação. Dentes de concreto.

STUDY OF CONCRETE CORBELS AND DAPPED ENDS MOLDED IN DISTINCT STAGES OF CONNECTIONS TO PRECAST CONCRETE

Abstract

The objective of this research is to investigate the behavior of corbel concrete of high-performance fiber reinforced molded in different stages of the column. In this study, the corbel is shaped in the prior stage to the column only the reinforcement of main bars without secondary reinforcement, so to solve the problem of ductility of compressed diagonal the concrete of corbel makes use of fibers. The research will be conducted with an extensive analysis experimental analysis and subsequent numerical simulation.

Keywords: Corbels. Precast concrete. Fibers. Connections. Dapped ends.

Linha de Pesquisa: Estruturas de Concreto e de Alvenaria

1 INTRODUÇÃO

Os elementos pré-moldados se caracterizam por apresentar facilidades para sua execução. Por outro lado, a necessidade de realizar as ligações entre esses elementos, para formar as estruturas, constitui-se em um dos principais problemas a serem enfrentados no emprego da pré-moldagem. Em geral, as ligações são as partes mais importantes no projeto das estruturas de concreto pré-moldado. Elas são de fundamental importância tanto no que se refere à sua produção (execução de parte dos elementos adjacentes às ligações, montagem da estrutura e serviços complementares no local) como para o comportamento da estrutura montada.

A utilização de elementos pré-moldados é justificada por diversas vantagens que envolvem aspectos estruturais, construtivos e econômicos. Entretanto, contrapondo-se a estas vantagens, existe uma grande preocupação com relação às ligações pré-moldadas e ao comportamento dos elementos pré-moldados a ela conectados.

As ligações de vigas a pontos intermediários dos pilares geralmente são feitas com consolos. Os consolos são elementos estruturais que geralmente estão ligados a pilares, mas podem ser

¹ Doutoranda em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, chrismtm@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, mkdebs@sc.usp.br



também ligados a vigas, principalmente quando se tratam de estruturas pré-moldadas. Sua utilização principal é servir de apoio para outras partes da estrutura ou para cargas de utilização.

Dando continuidade à linha de pesquisa sobre ligações em estruturas pré-moldadas, desenvolvida no Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, em particular a dissertação de mestrado de Costa (2009), no presente trabalho se propõe realizar um estudo teórico e experimental do comportamento de consolos de concreto moldados em etapas distintas do pilar.

Além da armadura do tirante principal, normalmente se utilizam estribos verticais e horizontais. Entretanto, conforme indicam Leonhardt e Mönning (1978): “Estribos verticais são inúteis para a transmissão da força ao consolo; servem apenas para enrijecer a armadura. Já os estribos horizontais abaixo da armadura do banzo, distribuídos ao longo da altura têm sentido; em consolos com $a/h \approx 0,7$ a $0,5$ eles aumentam a capacidade resistente das bielas de compressão, quando dispostos com pequeno espaçamento”.

Os estribos horizontais combatem a fissuração na biela. Porém, este trabalho propôs retirar todos os estribos e aumentar a resistência ao fendilhamento da biela de concreto através da incorporação de fibras metálicas à matriz de concreto. Foram mantidas somente as barras do tirante principal. A proposta de moldagem dos consolos apresentou uma inovação produtiva, desenvolvendo uma técnica de produção de consolos em etapa anterior ao pilar, com a armadura e superfícies preparadas para a ligação com o pilar durante a moldagem do mesmo. Desta forma, as fibras metálicas só estarão presentes no concreto dos consolos, sendo o pilar moldado em concreto convencional. A “Figura 1” ilustra o esquema representativo da montagem de dois consolos em um trecho de pilar. O consolo já desformado deve ser encaixado na fôrma do pilar a ser moldado.

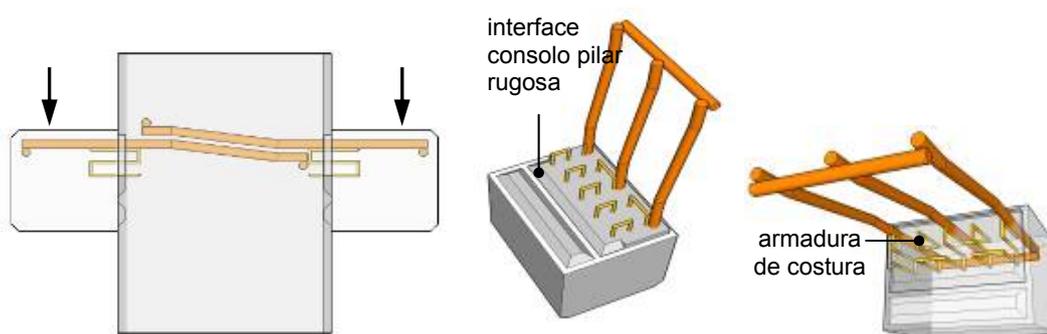


Figura 1 – Esquema de montagem do consolo.

A proposta é aumentar o número de ensaios, repetir alguns ensaios para confirmação de dados, incluir um dente Gerber, verificar a resistência ao momento fletor da ligação, estudar o problema da interface dos diferentes concretos utilizados e fazer uma modelagem numérica dos modelos para comparação de resultados experimentais e teóricos.

2 METODOLOGIA

A metodologia proposta neste projeto de pesquisa consiste de estudos teóricos e experimentais visando à obtenção de modelos de projeto. Os estudos teóricos compreendem a revisão bibliográfica e as modelagens numéricas enquanto os estudos experimentais compreendem os ensaios em laboratório.

Inicialmente serão consolidados os fundamentos teóricos através de uma revisão bibliográfica, na qual deverão ser apresentados sucintamente os principais modelos de ligações já existentes, um estudo dos materiais empregados, dos códigos internacionais e dos modelos numéricos.



Serão confeccionados os materiais e elementos a serem estudados. Em seguida serão comparados, testados e analisados alguns modelos de ligações. Concomitante a realização dos ensaios experimentais será realizado um estudo numérico do comportamento dos protótipos utilizando o software DIANA®, que utiliza o método dos elementos finitos, para calibrar o comportamento dos modelos.

Será estudada a efetividade e o arranjo da armadura de costura, a interface consolo-pilar, região considerada crítica em relação à abertura de fissuras. Além da quantificação dos limites de solitação da armadura e a extensão do estudo com a inclusão do Dente Gerber, devido ao seu comportamento estrutural semelhante.

Finalizada a análise experimental o estudo será continuado com a análise numérica buscando a comprovação dos resultados experimentais e comparação com os resultados encontrados na literatura.

Por fim, a fase de conclusão do trabalho será composta pela discussão dos resultados.

3 DESENVOLVIMENTO

A pesquisa ainda está em fase inicial, onde está sendo realizada a revisão bibliográfica, a simulação numérica do comportamento dos modelos, estudado por Costa (2009), submetidos a carregamento estático por meio do software DIANA, além do detalhamento para a confecção dos modelos físicos a serem ensaiados para estudar o problema da interface consolo-pilar, região considerada crítica em relação à abertura de fissuras. Inicialmente está previsto corpos de prova cilíndricos e prismáticos com o uso de adesivos a base de epóxi e pastas de cimento de alta resistência como material de ligação entre o concreto velho e o concreto novo.

4 RESULTADOS OBTIDOS OU ESPERADOS

É esperado aperfeiçoar os modelos ensaiados anteriormente por Costa (2009) e ratificar os resultados para cada tipo de modelo através de um maior número de ensaios. A incorporação de outras fibras, como a fibra polimérica, que podem ser incorporadas ao concreto consiga a diminuição da abertura de fissuras e maior ductilidade do concreto. Com um maior número de modelos experimentais com e sem armadura de costura, será verificado o seu benefício e a eficiência no combate à abertura de fissuras. Espera-se que o uso de uma cola estrutural seja eficiente no combate à abertura de fissuras na interface consolo-pilar. Por fim, que a análise numérica final comprove os resultados experimentais realizados em laboratório.

5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Como conclusão espera-se comprovar que a moldagem do consolo em etapa anterior à do pilar proporciona uma maior rapidez e simplicidade a produção.

6 AGRADECIMENTOS

A CAPES pela concessão da bolsa de doutorado, à FAPESP pelo auxílio à pesquisa.



7 REFERÊNCIAS

COSTA, J. B. A. **Estudo experimental de consolos de concreto com fibras moldados em etapas distintas dos pilares**. 2009. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. São Carlos: EESC-USP, 2000. 456 p.

LEONHARDT, F.; MÖNNING, E. **Construções de concreto: princípios básicos sobre a armação de estruturas de concreto armado**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, v. 3, 1978.



COMPORTAMENTO DE LIGAÇÕES VIGA-PILAR PARCIALMENTE RESISTENTES A MOMENTO FLETOR MEDIANTE CHUMBADORES GRAUTEADOS

Eduardo Aurélio Barros Aguiar¹ & Mounir Khalil El Debs²

Resumo

Nesta pesquisa pretende-se estudar o comportamento da ligação viga-pilar, mediante chumbadores grauteados, parcialmente resistente a momento fletor, em estruturas de concreto pré-moldado. O foco da pesquisa será a análise teórica e experimental do mecanismo resistente do chumbador e sua influência no comportamento global da ligação. Será analisada principalmente a influência da inclinação do chumbador na determinação da resistência da ligação, além da influência do seu diâmetro e da resistência à compressão do concreto.

Palavras-chave: Estruturas de concreto. Concreto pré-moldado. Ligação viga-pilar. Ligação semi-rígida. Ligação viga-pilar parcialmente resistente a momento fletor.

BEHAVIOR OF PARTIAL MOMENT RESISTANT BEAM-TO-COLUMN CONNECTIONS THROUGH GROUTED DOWELS

Abstract

In this research the behavior of partial moment resistant beam-to-column connections through grouted dowels in precast concrete will be studied. The focus of the research will be the theoretical and experimental analysis of the resistant mechanism of the dowels and its influence in the global behavior of the connection. The influence of the inclination of the dowels on the resistance of the connection will be analyzed, and the influence of its diameter and the concrete compressive strength.

Keywords: Concrete structures. Precast concrete. Beam-to-column connection. Semi-rigid connection. Partial moment resistance beam-to-column connection.

Linha de Pesquisa: Estruturas de Concreto e de Alvenaria

1 INTRODUÇÃO

As ligações são regiões de comportamento complexo e ainda pouco conhecido, onde ocorrem concentrações de tensões consideráveis, e portanto, necessitam de grande atenção ao serem concebidas. Segundo ORDONEZ et al. (1974), a influência das ligações no concreto pré-moldado é tão grande que alguns especialistas afirmam que a dificuldade de projetá-las e de executá-las é que têm impedido a substituição dos métodos construtivos convencionais pelo sistema pré-moldado.

A necessidade de se entender o comportamento das ligações, em especial as ligações semi-rígidas, passa a ser de fundamental importância para o desenvolvimento de um projeto estrutural econômico e que garanta a estabilidade global do sistema.

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, eduardoaguiar@arquitetura.uema.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, mkdebs@sc.usp.br



Uma das maneiras de se entender esse comportamento é o conhecimento dos componentes ativos das ligações. A avaliação das características de deformação e de resistência de cada componente individualmente e a associação desses componentes para analisar o comportamento da ligação como um todo, possibilitam a determinação do comportamento de uma grande variação de ligações.

É oportuno lembrar que o conhecimento dos componentes ativos das ligações é de fundamental importância quando se deseja propor modelos analíticos simplificados que representem o comportamento da ligação semi-rígida.

Dando continuidade à linha de pesquisa sobre ligações semi-rígidas, desenvolvida no Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, em particular a tese de doutorado de MIOTTO (2002) e a dissertação de mestrado BALDISSERA (2006), no presente trabalho se propõe realizar um estudo teórico e experimental do comportamento de um componente fundamental da ligação viga-pilar que é o chumbador.

O chumbador pode ser entendido como um componente da ligação, inserido no concreto, capaz de transmitir esforços de cisalhamento entre elementos. Essa transferência de esforços gera um estado de tensões não-uniformes no concreto, submetendo o chumbador a um esforço de flexão máximo junto à interface.

Em função do estado de tensões apresentado e dependendo das dimensões, posicionamento e da resistência do chumbador, além também da resistência e aderência do concreto que o envolve, alguns modos de ruptura podem ser previstos. Dentre esses modos de ruptura, pode-se citar a formação de rótulas plásticas na seção de máximo esforço de flexão do chumbador.

O modelo teórico para a determinação da capacidade máxima do chumbador à flexão foi desenvolvido por HϕJLUND-RASMUSSEN (1963) apud FIB (2003), com base na teoria da plasticidade, para chumbadores retilíneos. A formulação foi apresentada tendo como variáveis alguns parâmetros obtidos experimentalmente, e desta forma, a obtenção desses parâmetros ainda é objeto pertinente de pesquisas.

O estudo teórico-experimental proposto visa um aprofundamento na influência da inclinação dos chumbadores na determinação da resistência e da rigidez das ligações semi-rígidas de elementos pré-moldados, tendo como motivação a grande diferença de resultados obtidos nos estudos experimentais realizados por MIOTTO (2002) e BALDISSERA (2006).

2 METODOLOGIA

Para a realização da pesquisa, foi necessária a idealização de um modelo físico, composto de três prismas de concreto, sendo que dois destes possuem as mesmas dimensões e estão ligados a um prisma maior por meio de dois chumbadores solidarizados por chapas de aço, porcas e arruelas, conforme ilustrado na “Figura 1”.

Na análise experimental serão avaliadas previamente três inclinações para os chumbadores, além de três diâmetros comerciais diferentes. As inclinações a serem analisadas serão de 0°, que representa o chumbador normal à interface entre o consolo e o pilar, 45° e 60°. Os diâmetros estudados serão de 16mm, 20mm e 25mm, e, para verificar a influência da resistência do concreto no comportamento do chumbador, os espécimes serão confeccionados com pelo menos dois valores diferentes de resistência à compressão.

Na ligação viga-pilar existe também a influência da reação de apoio da viga, responsável pela mobilização de forças de atrito horizontais, que também será simulada com a aplicação de cargas horizontais em alguns modelos. Na pesquisa deverão ser confeccionados 15 modelos físicos distintos.



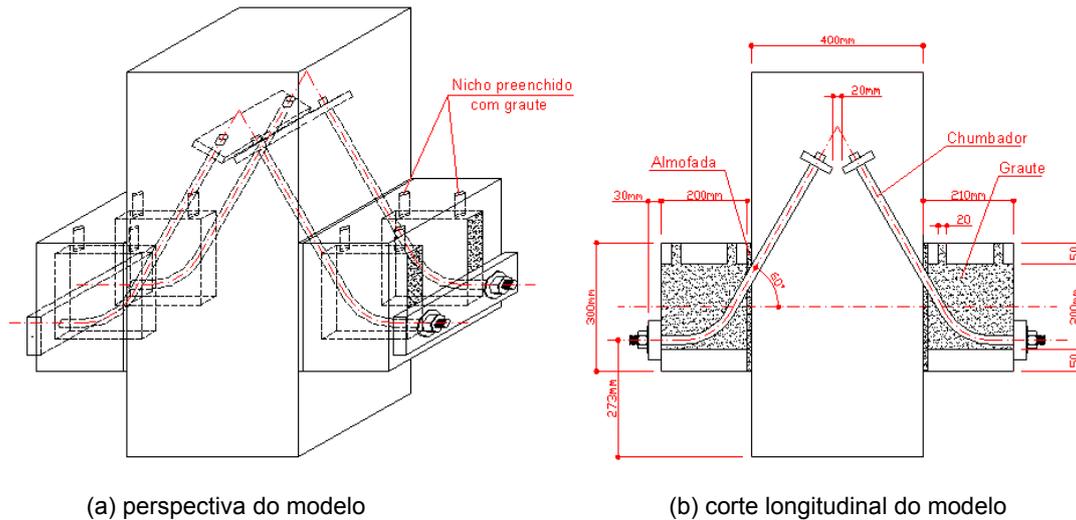


Figura 1 – Modelo físico idealizado.

Os modelos serão construídos em escala real 1:1 e deverão ser submetido a carregamentos unidirecionais e também a carregamentos cíclicos, sendo que neste ultimo caso a carga máxima aplicada não chegará próximo ao valor previsto para a ruptura. Os modelos serão instrumentados, sendo colocados extensômetros elétricos para medição das deformações dos chumbadores, além de transdutores e relógios comparadores.

Além da análise experimental descrita, serão realizadas também modelagens numéricas dos espécimes via Método dos Elementos Finitos (MEF), onde serão avaliadas as influências de diversos parâmetros no comportamento da ligação.

Na etapa de modelagem numérica será utilizado o programa computacional DIANA release 9, que tem o Método dos Elementos Finitos como base para o seu sistema de análise. Posteriormente os modelos numéricos serão calibrados com base nos resultados obtidos no programa experimental.

3 DESENVOLVIMENTO

A pesquisa está em fase final, onde foi concluída a revisão bibliográfica, o programa experimental composto de 15 (quinze) modelos físicos, e a análise numérica via Método dos Elementos Finitos. Foi desenvolvida uma expressão analítica para representar o comportamento dos chumbadores grauteados, levando em consideração a inclinação, e resistência do concreto.

4 RESULTADOS OBTIDOS OU ESPERADOS

Como resultados parciais, verificou-se que a capacidade de carga dos modelos confeccionados com chumbadores inclinados foi superior aos confeccionados com chumbadores retilíneos. Com relação à deformabilidade, verificou-se que os modelos confeccionados com chumbadores inclinados apresentaram valores de deslocamentos inferiores aos confeccionados com chumbadores retilíneos.



5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Como conclusões parciais, foram avaliados os mecanismos de resistência e de deformabilidade mobilizados com a alteração na inclinação dos chumbadores.

Uma vez conhecidos esses mecanismos, foram desenvolvidos modelos analíticos que conseguiram reproduzir a influência da inclinação dos chumbadores na determinação de sua capacidade portante e de sua rigidez. Verificou-se também que a capacidade de carga dos modelos confeccionados com chumbadores inclinados foi superior aos confeccionados com chumbadores retilíneos.

6 AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual do Maranhão UEMA, pela concessão de bolsa de estudos de Doutorado pelo programa PICDT/CAPES.

À CAPES pela bolsa de Doutorado Sanduíche realizado na Universidade do Minho, Guimarães – Portugal.

7 REFERÊNCIAS

BALDISSERA, A. **Estudo experimental de uma ligação viga-pilar de concreto pré-moldado parcialmente resistente a momento fletor**. 149p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON – FIB. **Structural connections for precast concrete buildings**. Lausanne, Suíça, 2003. (Texto provisório).

MIOTTO, A. M. **Ligações viga-pilar de estruturas de concreto pré-moldado: Análise com ênfase na deformabilidade ao momento fletor**. 234p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

ORDONEZ, J. A. F. *et al.* **Prefabricacion teoria y práctica**. Barcelona, 1974. v. 2.



ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DE TUBOS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDOS À COMPRESSÃO DIAMETRAL

Jefferson Lins da Silva¹ & Mounir Khalil El Debs²

Resumo

A principal alternativa para a construção de galerias de drenagem e esgotos urbanos refere-se a tubos circulares de concreto armado, os quais podem ser dos tipos ponta e bolsa ou macho e fêmea. No Brasil, os tubos circulares com geometria em ponta e bolsa são os mais empregados. Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento estrutural de 8 tubos de concreto armado tipo ponta e bolsa com a bolsa retirada, sendo 4 tubos com diâmetro nominal de 800 mm e o restante com 1200 mm. A comparação experimental e numérica do comportamento destes tubos submetidos à compressão diametral foi considerada compatível e confirma a hipótese de que o tubo analisado se comporta como um anel circular, podendo-se utilizar o estado plano de deformação nas análises numéricas.

Palavras-chave: Tubos de concreto armado. Compressão diametral.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF REINFORCED CONCRETE PIPES SUBJECTED TO DIAMETRICAL COMPRESSION

Abstract

The main alternative for construction of drainage galleries and municipal sewage is related to circular reinforced concrete pipes, which can be in spigot and socket or ogee joint types. In Brazil, circular pipes with geometry in spigot and socket are the most used. This paper has as objective to assess the structural behavior of 8 reinforced concrete pipes type spigot and socket with the socket removed. Thus, 4 pipes were 800 mm nominal diameter and the other 1200 mm nominal diameter. The comparison experimental and numerical of the pipes subjected to diametrical compression was considered compatible and confirms the hypothesis that the pipe behavior is like a circular ring. Therefore, the strain plane state can be used in numerical analysis.

Keywords: Reinforced concrete pipes. Diametrical compression.

Linha de Pesquisa: Estruturas de Concreto e de Alvenaria

1 INTRODUÇÃO

A principal alternativa para a construção de galerias de drenagem e esgotos urbanos refere-se a tubos circulares de concreto armado, os quais podem ser dos tipos ponta e bolsa ou macho e fêmea. No Brasil, os tubos circulares com geometria em ponta e bolsa são os mais empregados (El Debs, 1991).

O emprego destes tubos vem crescendo graças a sua durabilidade, boa resistência mecânica, facilidade de execução e manutenção, além de ser um produto com disponibilidade dentro das exigências de mercado.

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, jeffersonlins@gmail.com

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, mkdebs@sc.usp.br



Na prática usual do projeto estrutural de tubos enterrados de concreto armado, as resistências dos tubos são especificadas a partir de vários ensaios, dos quais o ensaio de compressão diametral é o mais utilizado, sendo inclusive adotado pela norma brasileira NBR 8890:2007 como ensaio padrão.

Este trabalho faz parte da tese de doutorado *Projeto de Tubos Circulares de Concreto Armado para o Ensaio de Compressão Diametral com base na Teoria de Confiabilidade*. A parte apresentada aqui tem como objetivo avaliar numérica e experimentalmente o comportamento estrutural de 8 tubos de concreto armado tipo ponta e bolsa, com a bolsa retirada.

2 METODOLOGIA

O trabalho é composto por uma parte experimental e outra numérica. A parte experimental foi realizada como forma de validação e calibração do modelo mecânico. Para tanto, foram ensaiados tubos circulares de concreto armado submetidos à compressão diametral (segundo procedimentos da NBR 8890:2007) com diferentes diâmetros nominais de 800 mm e 1200 mm.

Na parte numérica da pesquisa, os tubos circulares de concreto armado foram analisados segundo um modelo mecânico baseado no método dos elementos finitos para pórticos planos (Pinto, 2002). Para a consideração da não-linearidade física dos materiais foram utilizados modelos baseados em tensões e deformações, uma vez que estes tendem a ser mais realísticos na descrição do comportamento físico do elemento estrutural. A não-linearidade geométrica teve como base a teoria de grandes deslocamentos e deformações, onde a matriz de rigidez do elemento é encontrada num sistema de coordenadas corrotacionais solidário ao elemento.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Experimental

O programa experimental consistiu de ensaios de compressão diametral em 8 tubos tipo PSB (ponta e bolsa, com a bolsa retirada). A metade destes apresentava diâmetro nominal de 800 mm, e a metade restante apresentava 1200 mm de diâmetro nominal.

Os tubos de concreto foram armados com telas soldadas. A utilização desse tipo de armadura é comum nas fábricas de tubos de concreto armado, especialmente pela redução do tempo de mão-de-obra com corte, arqueamento e amarração; e pela melhor aderência com o concreto, devido à presença da armadura transversal.

As características dos modelos experimentais estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características dos tubos ensaiados

| DN (mm) | Espessura (cm) | Armadura em Tela Soldada | Comprimento Útil do Tubo (m) |
|---------|----------------|--|------------------------------|
| 800 | 7,2 | PB 396 – $A_S = 3,96 \text{ cm}^2/\text{m}$ | 1,2 |
| 1200 | 11 | PB 396 – $A_S = 3,96 \text{ cm}^2/\text{m}$ | 1,2 |
| | | PB 196 – $A_S' = 1,96 \text{ cm}^2/\text{m}$ | |

De acordo com o procedimento de ensaio descrito na NBR 8890:2007 apenas as forças aplicadas no ensaio são medidas. Entretanto, de modo a obter o maior número de informações possível nos ensaios, também foram medidos deslocamentos. Para isto, foram instalados em todos os modelos transdutores de deslocamentos nas posições indicadas na Figura 1.



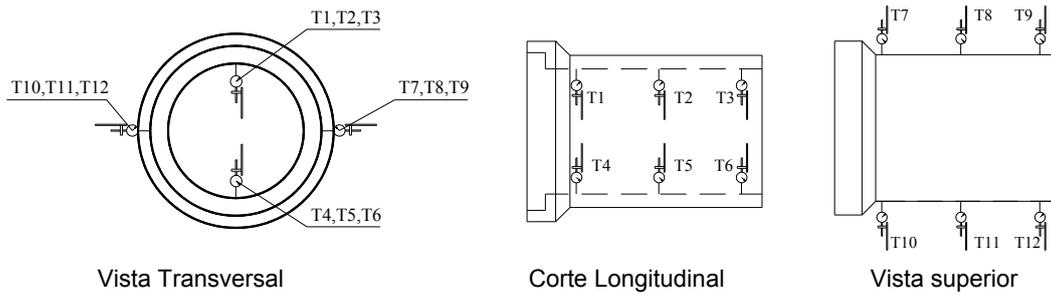


Figura 1 – Posicionamento dos transdutores de deslocamento.

Dos resultados de compressão diametral foram obtidas curvas força *versus* deslocamento, nas quais foi possível verificar as medidas de força e deslocamento nas situações de início da fissuração e de ruptura (força máxima).

Para analisar as medidas de deslocamentos obtive-se a variação vertical e horizontal do diâmetro, estas medidas foram obtidas pela soma das medidas de deslocamentos na coroa e na base, e nos flancos, respectivamente. No caso da variação vertical do diâmetro têm-se as medidas dadas por $T1+T4$, $T2+T5$ e $T3+T6$, para a variação horizontal do diâmetro tem-se: $T7+T10$, $T8+T11$ e $T9+T12$, sendo T a indicação da posição do transdutor de deslocamentos no tubo durante o ensaio, conforme mostra a Figura 1.

3.2 Numérica

No modelo mecânico algumas idealizações foram realizadas, com base na avaliação experimental do comportamento estrutural dos tubos de concreto armado submetidos à compressão diametral.

a) Foi utilizada simetria conforme mostrado na Figura 2, de modo que a estrutura foi discretizada em 50 elementos finitos de barra, com cada nó apresentando 3 graus de liberdade.



Figura 2 – Esquema estrutural utilizado nas análises de tubos circulares.

b) Nas análises não-lineares realizadas foi considerado o modelo constitutivo para o concreto segundo a NBR 6118:2003.

c) Admitiu-se que o aço apresenta diagrama tensão-deformação bilinear, com comportamento elastoplástico perfeito.



4 RESULTADOS OBTIDOS

Nas Figuras 3 e 4 estão apresentados os resultados numéricos e experimentais para as relações Força *versus* Deslocamento nas seções do coroamento (variação vertical) e flanco (variação horizontal), para tubos com DN de 800 mm e 1200 mm, respectivamente.

Observando o comportamento destes diagramas, pode-se concluir que a relação entre os resultados numéricos e experimentais pode ser considerada compatível. No caso da forças máximas, o valor para o modelo mecânico foi de 8 % e 12% maior que o valor médio dos resultados experimentais para DN de 800 mm e 1200 mm, respectivamente.

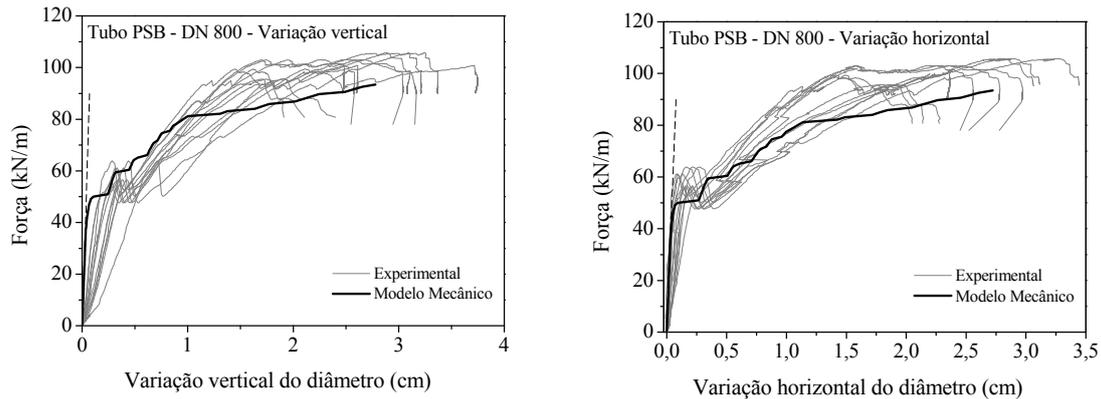


Figura 3 – Diagrama Força *versus* Deslocamento nos tubos com DN800.

Entretanto, para a situação de fissuração houve uma discrepância na comparação entre os deslocamentos nos resultados numéricos e experimentais. Esta discrepância deve estar relacionada com uma “acomodação” na instrumentação utilizada (fixação dos transdutores de deslocamentos). Para verificar esta hipótese, observe que a linha tracejada nas Figuras 3 e 4 está muito mais próxima aos resultados numéricos. Esta linha foi plotada considerando a teoria clássica de flexão aplicada a anel. É possível fazer esta comparação porque o comportamento elástico continua linear até a fissuração.

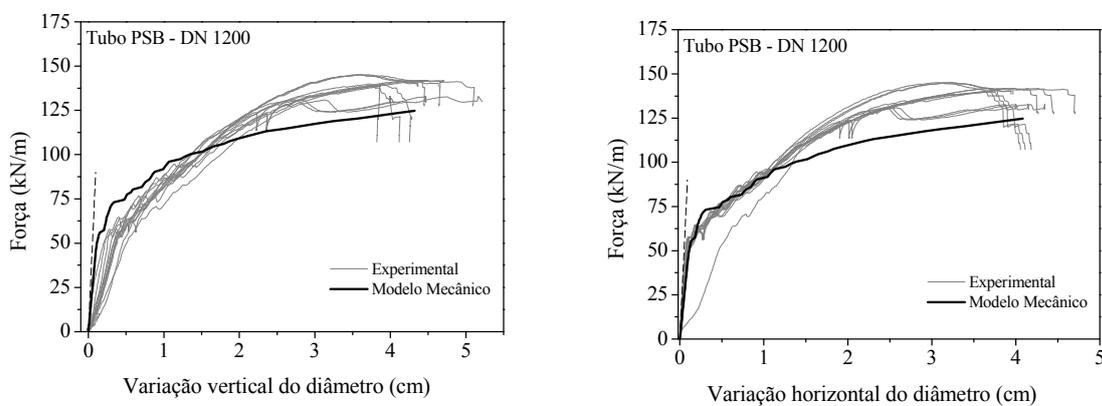


Figura 4 – Diagrama Força *versus* Deslocamento nos tubos com DN1200.



5 CONCLUSÕES PARCIAIS

A comparação experimental e numérica do comportamento dos tubos de concreto armado submetidos à compressão diametral foi considerada compatível, confirmando a hipótese de que para tubos ponta e bolsa, com a bolsa retirada, o tubo se comporta como um anel circular, podendo-se utilizar o estado plano de deformação nas análises numéricas.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo apoio financeiro a este projeto de pesquisa e à empresa *FERMIX Indústria e Comércio Ltda.* pela doação dos tubos e apoio na realização dos ensaios.

7 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8890**: Tubo de concreto, de seção circular, para águas pluviais e esgotos sanitários – Requisitos e Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2007.

EL DEBS, M. K. **Contribuição ao emprego de pré-moldados de concreto em infra-estrutura urbana e em estradas**. 1991. 257 p. Tese (Livre Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

PINTO, R. S. **Análise não-linear das estruturas de contraventamento de edifícios em concreto armado**. 2002. 204p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.



ESTUDO DA LIGAÇÃO ENTRE PILARES MISTOS PREENCHIDOS E VIGAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO POR MEIO DE CONSOLO METÁLICO

Leonardo Melo Bezerra¹ & Ana Lúcia Homce de Cresce El Debs²

Resumo

A associação de concreto com elementos de aço (sistemas estruturais mistos) é interessante, pois pode tirar proveito do que os dois materiais têm de melhor a oferecer. Neste trabalho é proposta uma ligação entre viga pré-moldada de concreto com pilar misto preenchido, buscando transferir os esforços cortantes e momento de flexão da viga para o pilar misto, mobilizando o núcleo de concreto. No estudo, após o projeto, a ligação foi executada em oficina e ensaiada no laboratório. A transferência das solicitações para o tubo metálico foi garantida, com o consolo se comportando de maneira previsível e suportando elevadas solicitações, mesmo tendo sido confeccionado com chapas de pequena espessura.

Palavras-chave: Ligação. Pilar misto preenchido. Viga pré-moldada. Concreto.

STUDY OF PRECAST CONCRETE BEAM TO CONCRETE-FILLED STEEL TUBE COLUMN CONNECTION BY STEEL CONSOLE.

Abstract

The association of concrete with steel structural elements (composite structural systems) can improve the efficiency of such materials, counting on the best advantages of each one. In this work, a connection of precast concrete beam to concrete-filled steel tube column is proposed, in the attempt to transfer bending moment and shear forces from the beam to the composite column, mobilizing its concrete core. In the study, after the project, the connection was made at workshop and tested in laboratory. The loads transfer to the steel tube was guaranteed; the console behaved in a predictable way and supported high loads levels, even having been made with steel plates of small thickness.

Keywords: Connections. Concrete-filled steel tube column. Precast beam. Concrete.

Linha de Pesquisa: Estruturas de Concreto e de Alvenaria

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que cada sistema estrutural, com suas particularidades inerentes, possui vantagens e desvantagens em sua utilização. Cabe aos envolvidos no processo construtivo decidir qual sistema é mais adequado para uma aplicação específica. Entretanto há também a possibilidade de combinar os diversos sistemas existentes, criando uma solução estrutural híbrida de forma que o resultado final apresente uma estrutura mais eficiente para satisfação das necessidades do cliente. De acordo com o exemplo citado por FIB (2002): a construção em concreto moldado no local é a solução mais barata na grande maioria das obras convencionais, enquanto que o concreto pré-moldado apresenta a vantagem da execução rápida e com elementos de maior qualidade; então com a combinação das

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas – EESCC-USP, bezerra1@sc.usp.br

² Professora do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, analucia@sc.usp.br



duas soluções pode resultar em uma estrutura com mais qualidade, executada com maior rapidez e economia.

O sistema construtivo em concreto pré-moldado, constituído de vigas e pilares de seção retangular com pavimentos de lajes alveolares traz consigo todos os benefícios da construção industrializada, é barato se comparado com aço e bastante difundido no Brasil e no mundo. Para melhorar a eficiência deste sistema propõe-se a substituição do pilar pré-moldado por um de seção mista preenchida. As vantagens desta substituição são: redução da seção transversal do elemento, tendo assim um aumento da área útil da edificação e redução dos custos na montagem e transporte; uso do elemento metálico como fôrma; aumento da ductilidade do pilar, tornado mais seguro o uso de concreto de alta resistência; eliminação da necessidade de armadura; facilidade na execução de ligação entre pilares, já que o sistema permite a concretagem desta região, usando o aço como fôrma, criando um elemento monolítico.

Com base no que foi descrito, é proposta uma ligação viga pré-moldada x pilar misto preenchido, buscando transferir os esforços cortantes e momento de flexão da viga para o pilar misto, mobilizando o núcleo de concreto.

2 METODOLOGIA

Os objetivos desta pesquisa concordam com os do Projeto Temático ao qual este trabalho está vinculado, e para atingi-los, ela foi dividida em quatro etapas:

2.1 Estudar e desenvolver dispositivos de ligação entre vigas pré-moldadas de concreto e pilares mistos preenchidos

O trabalho é pioneiro no Brasil, uma vez que não se tem dados de pesquisas sobre o assunto no país. Nesse contexto, os estudos iniciais estarão voltados para o desenvolvimento de formas de ligação – viga pré-moldada de concreto com o pilar preenchido – que permitam a exploração do potencial dos pilares misto preenchidos.

2.2 Analisar experimentalmente o comportamento estrutural de ligações entre vigas de concreto armado e pilares mistos preenchidos, submetidas a ações monotônicas, utilizando os dispositivos de ligação previamente estudados

A viabilidade e a eficiência dos dispositivos de ligação na transferência de esforços da viga para o pilar serão validadas por ensaios em laboratório. Além disso, os resultados experimentais também têm como objetivo: Avaliar o comportamento do detalhe de ligação frente a ações usuais monotônicas; Avaliar a influência dos dispositivos de ligação e de parâmetros associados ao seu detalhamento sobre o comportamento da ligação e dos elementos estruturais que a constituem; Identificar vantagens e deficiências de comportamento estrutural dos detalhes de ligação estudados.

2.3 Confrontar os resultados experimentais com os resultados obtidos via análise numérica

As simulações numéricas permitirão a melhor compreensão do comportamento da ligação.



2.4 Desenvolver modelos analíticos (formulações) simplificados, que agrupem as variáveis essenciais ao comportamento do detalhe de ligação em estudo, a fim de viabilizar a sua aplicação

Para a divulgação da nova tecnologia de ligação proposta, existe a necessidade de criar modelos simples para o projeto. Tais modelos devem prever, com razoável precisão e segurança, o comportamento real da ligação.

3 DESENVOLVIMENTO

No início da pesquisa foram estudadas ligações semelhantes, de forma que fossem reconhecidas características que pudessem ser aplicadas na ligação de viga pré-moldada com pilar misto preenchido. O passo seguinte foi projetar uma ligação capaz transferir esforço cortante e momento de flexão. Nesta fase foi dada prioridade aos aspectos construtivos, de forma que a execução fosse o menos laboriosa possível, e com a maior parte dos trabalhos realizados em fábrica. Em seguida, o detalhe proposto foi dimensionado – inicialmente transferindo apenas o esforço cortante – para suportar uma carga pré-estabelecida.

Após o projeto e dimensionamento da ligação, foram construídos dois protótipos para serem testados em laboratório. Junto com o estudo experimental, foi realizada a modelagem numérica da ligação utilizando o método dos elementos finitos através do programa DIANA.

O consolo metálico projetado pode ser visto na figura 1, sendo constituído de duas chapas laterais, uma horizontal e dois enrijecedores. Deve-se observar que as chapas laterais do consolo são coincidentes com as paredes laterais do tubo que compõe o pilar misto preenchido, evitando a introdução de elevadas cargas na parte frontal do tubo, que por possuir baixa rigidez na direção perpendicular, supôs-se não ser eficiente na transferência dos esforços para os outros componentes estruturais.

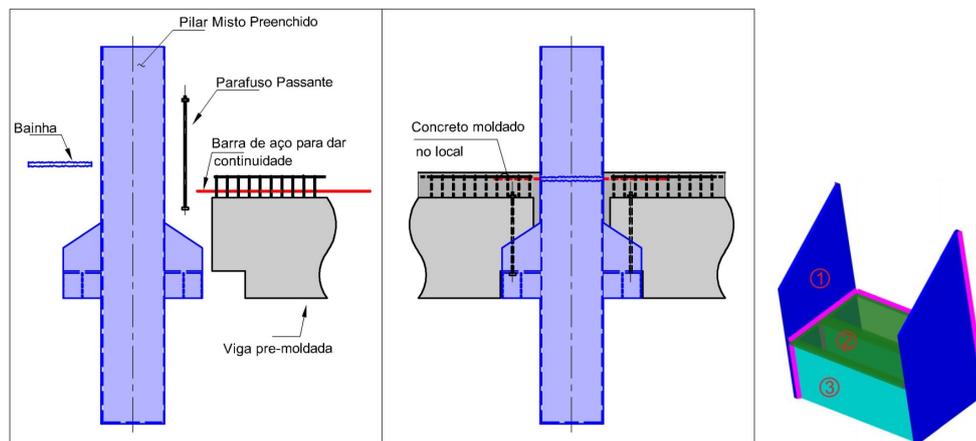


Figura 1 – Detalhe da ligação e do consolo metálico.

A transferência do momento negativo será garantida pela armadura transpassada no pilar e ancorada na viga pré-moldada. Quanto à transferência do momento positivo preferiu-se pelo uso de parafusos passantes, mesmo sabendo que este tipo de solução não é muito eficiente para esse fim. Também foi previsto o uso de conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça ou tipo cantoneira, soldados na face interna do perfil metálico do pilar, a fim de mobilizar o núcleo de concreto na região de transmissão de esforços.

No estágio em que se encontra a pesquisa foi realizado um dos ensaios preliminares, no qual foi examinado o comportamento do consolo metálico na transferência do esforço cortante para o pilar,



sendo a ligação solicitada de acordo com o esquema mostrado na Figura 2. Este ensaio serviu também para avaliar a exeqüibilidade dos detalhes propostos.

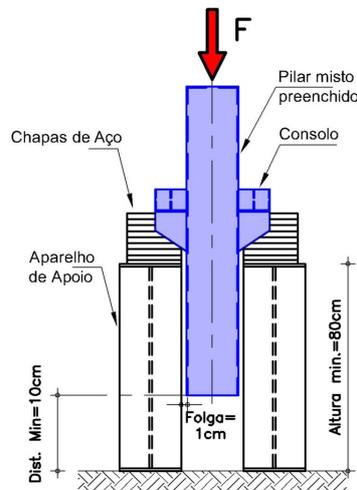


Figura 2 – Ensaio inicial em laboratório: estudo da viabilidade de dispositivos para a transferência do cisalhamento.

4 RESULTADOS OBTIDOS OU ESPERADOS

Os resultados do ensaio permitiram identificar quais os elementos mais solicitados e a ordem de colapso destes. Foi possível também verificar se houve algum elemento subutilizado, rupturas localizadas, instabilidades locais, colapso da solda, deslizamento do núcleo de concreto, capacidade de carga da ligação, entre outros.

Na fase elástica os elementos em que foram verificadas as maiores deformações foram os enrijecedores internos sendo grande a diferença dos valores entre estes e os demais elementos. Nota-se, desde o princípio, que os enrijecedores internos desempenham papel de grande importância no consolo, sendo os primeiros que demonstraram sinais de colapso (a 270 kN), seguidos pelos enrijecedores externos (a 650 kN), e da chapa lateral do consolo, na parte inferior (a 900 kN e 1010 kN).

5 CONCLUSÕES PARCIAIS

A fabricação do modelo ocorreu sem problemas, sendo garantida a viabilidade da ligação proposta sob o aspecto construtivo e econômico. A possibilidade de produzir o elemento estrutural (pilar com consolo) em uma linha de produção foi confirmada com a execução de seus componentes em etapas distintas e posterior solidarização, evitando assim o trabalho com elementos de pesos muito diferentes, o que provocaria inúmeras dificuldades ao processo.

A transferência das solicitações para o tubo metálico foi garantida, pois o consolo se comportou de maneira previsível e suportou elevadas solicitações, mesmo tendo sido confeccionado com chapas de pequena espessura. Apesar de não apresentar grandes deslocamentos, o consolo dá sinais que está entrando em colapso através das visíveis deformações do enrijecedor interno, o que é extremamente desejável em ligações desse tipo.

O comportamento da ligação completa (com a viga pré-moldada, parafuso de fixação e armadura passante) ainda é uma incógnita. Os pontos que trazem maiores incertezas são: fixação da viga ao



consolo por meio de parafuso passante e o uso de armadura traspassando o pilar para transferir o momento positivo.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e ao laboratório do departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP.

7 REFERÊNCIAS

FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON - FIB. **Precast concrete in mixed construction**. State-of-art Review, 2002.



LIGAÇÃO VIGA-PILAR EM ELEMENTOS PRÉ-MOLDADOS DE CONCRETO SOLIDARIZADOS POR CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO: ANÁLISES ESTÁTICA E DINÂMICA

Luiz Álvaro de Oliveira Júnior¹, Mounir Khalil El Debs² & Daniel de Lima Araújo³

Resumo

Este trabalho estuda o comportamento de uma ligação viga-pilar em elementos pré-moldados de concreto, realizadas com traspasse de armadura e concreto reforçado com fibras de aço para proporcionar à ligação comportamento semelhante ao de uma ligação monolítica. Nesse estudo serão realizados ensaios para análise dos mecanismos de transferência de esforços de tração e de cisalhamento, ensaios com protótipos submetidos a carregamento estático e dinâmico, e modelagens computacionais para determinar o comportamento dos protótipos e propor um modelo simplificado para o projeto dessas ligações.

Palavras-chave: Ligação viga-pilar. Pré-moldados. Concreto reforçado com fibras.

BEAM-COLUMN CONNECTION IN PRECAST CONCRETE ELEMENTS CONNECTED BY STEEL FIBER-REINFORCED CONCRETE: STATIC AND DYNAMICAL ANALYSIS

Abstract

This work studies the behavior of a beam-column connection in precast concrete elements which will be done by splicing of bars and steel fiber-reinforced concrete to provide to the connection a behavior similar to the monolithic connection. In this study tests for analyzing the mechanisms of transferring of shear and tension, tests on prototypes subjected to static and dynamical loading and computational modeling will be done to determine the behavior of prototypes and propose a simplified model for design of these connections.

Keywords: Beam-column connection. Precast structures. Fiber-reinforced concrete.

Linha de Pesquisa: Estruturas de Concreto e de Alvenaria

1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho estuda-se o comportamento das ligações viga-pilar solicitadas por ações estáticas (monotônica e cíclica reversível) e dinâmicas. A aplicação de carregamentos cíclicos e dinâmicos impõe a necessidade de ligações mais dúcteis e capazes de dissipar maiores quantidades de energia para resistir às solicitações sem ruir. Levando em conta estes aspectos, podem-se utilizar fibras de aço para melhorar o desempenho da ligação por meio de uma melhoria geral das propriedades mecânicas do concreto empregado na mesma. A Figura 1 apresenta um esboço da ligação proposta.

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, lualvaro@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, mkdebs@sc.usp.br

³ Professor da Escola de Engenharia Civil da UFG, dlaraujo@eec.ufg.br



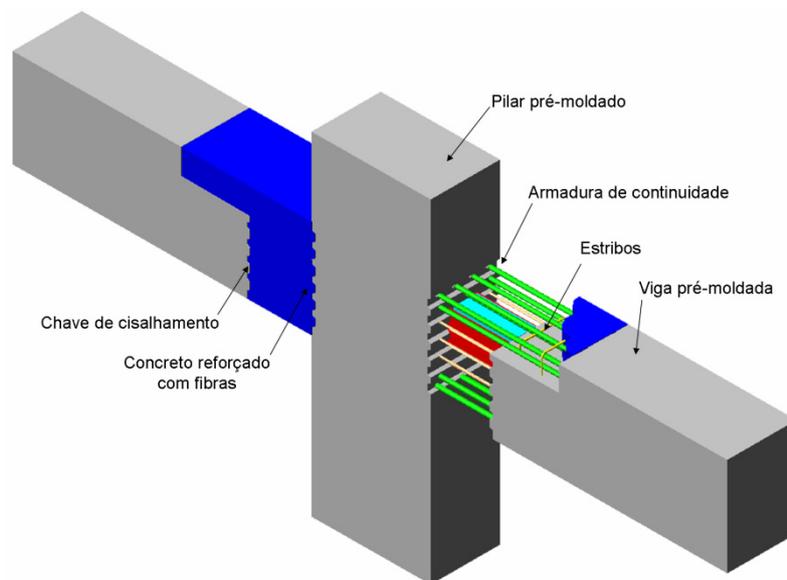


Figura 1 – Esboço da ligação proposta.

Outros aspectos importantes que se propõe estudar são os mecanismos de transferência de esforços solicitantes na ligação, particularmente cisalhamento e aderência, relevantes para o conhecimento dos fenômenos que se desenvolvem na interface entre o concreto simples e o concreto com fibras (cisalhamento) e nas regiões de emendas de barras (tração).

2 METODOLOGIA

A metodologia proposta consiste revisão bibliográfica, modelagens numéricas e ensaios em laboratório que fornecerão os subsídios para a realização das modelagens numéricas e proposição do modelo mecânico simplificado para o projeto das ligações viga-pilar. Serão realizados ensaios de cisalhamento direto para análise dos mecanismos de transferência de esforços de cisalhamento na interface entre concretos reforçados com fibras de aço, ensaios de tração direta em tirantes com barras emendadas por traspasse e ensaios com protótipos submetidos a carregamento estático (monotônico e cíclico reversível) e dinâmico.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Ensaios de mecanismos

A geometria e as dimensões dos corpos-de-prova usados nos ensaios de cisalhamento direto foram adaptadas de Kaneko (1992) e são indicadas na Figura 2a, enquanto a Figura 2d apresenta a geometria e as dimensões do corpo-de-prova utilizado nos ensaios de tração direta (tirantes). Para os ensaios mencionados foram definidas as variáveis indicadas na Tabela 1.



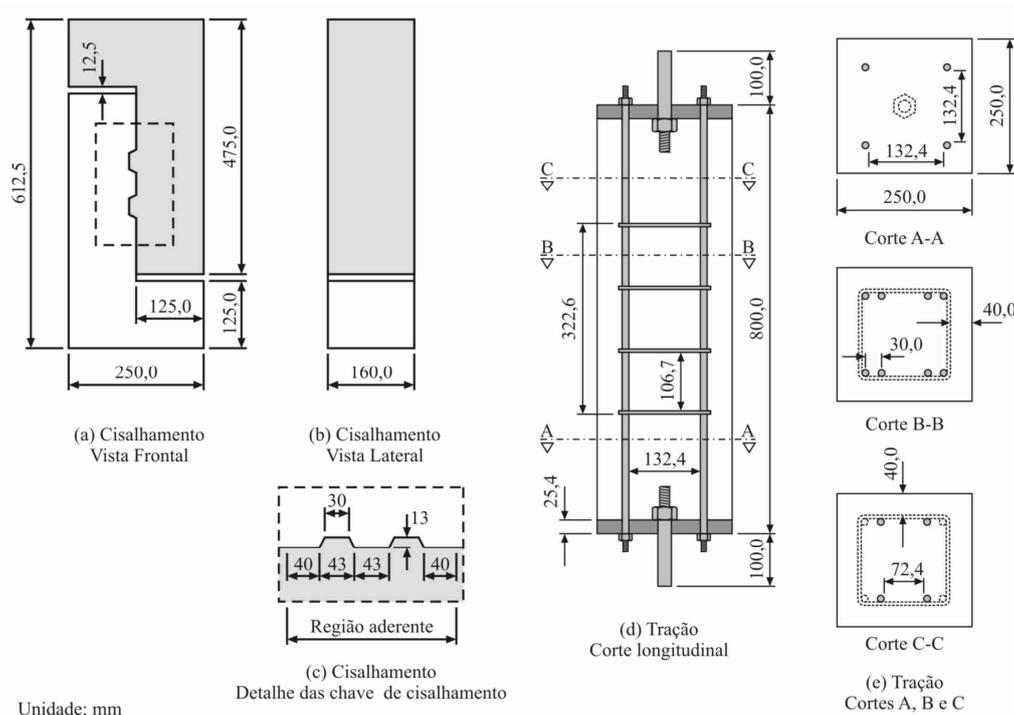


Figura 2 – Geometria e dimensões dos corpos-de-prova usados nos ensaios de mecanismos.

Tabela 1 – Ensaios de mecanismos de transferência de esforços de tração e cisalhamento

| V_f (%) | Ensaio de tração direta | Ensaio de cisalhamento direto | |
|-----------|--|-------------------------------|---|
| | Comprimento da emenda (cm) ($\varnothing = 12,5$ mm) | Tipo | Tensão de compressão normal à interface (MPa) |
| 0,00 | Sem emenda | Monolítico | - |
| 0,00 | 25,00 (20 \varnothing) | Com chaves | 0,5 |
| | 37,50 (30 \varnothing) | | 1,5 |
| | | | 2,5 |
| 1,00 | - | Monolítico | - |
| | | Com chaves | 0,5 |
| | | | 1,5 |
| | | 2,5 | |
| 2,00 | Sem emenda | Monolítico | - |
| 2,00 | 6,25 (5 \varnothing) | Com chaves | 0,5 |
| | 12,50 (10 \varnothing) | | 1,5 |
| | 25,00 (20 \varnothing) | | 2,5 |

3.2 Ensaios em protótipos

Para avaliar o desempenho da ligação, serão produzidos dois protótipos, um monolítico e outro com ligação. Em ambos, a ligação será executada com concreto reforçado com fibras e os elementos pré-moldados serão moldados em concreto simples. A Figura 3 apresenta a geometria e dimensões do protótipo com ligação. O protótipo monolítico tem as mesmas dimensões, mas não apresenta a ligação.



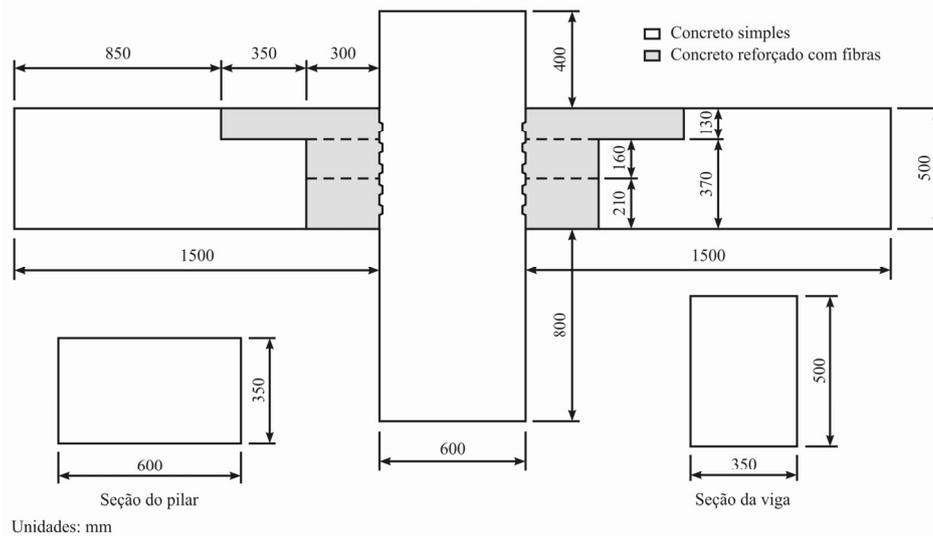


Figura 3 – Geometria e dimensões do protótipo com ligação.

4 RESULTADOS OBTIDOS OU ESPERADOS

Já foram realizados três ensaios de mecanismos: dois de cisalhamento e um de tração. No entanto, são apresentadas aqui apenas as curvas força *versus* deslocamento obtidas nos ensaios de cisalhamento direto, pois no ensaio de tração ocorreram problemas durante o ensaio que implicaram na modificação da geometria e novos corpos-de-prova ainda não foram produzidos.

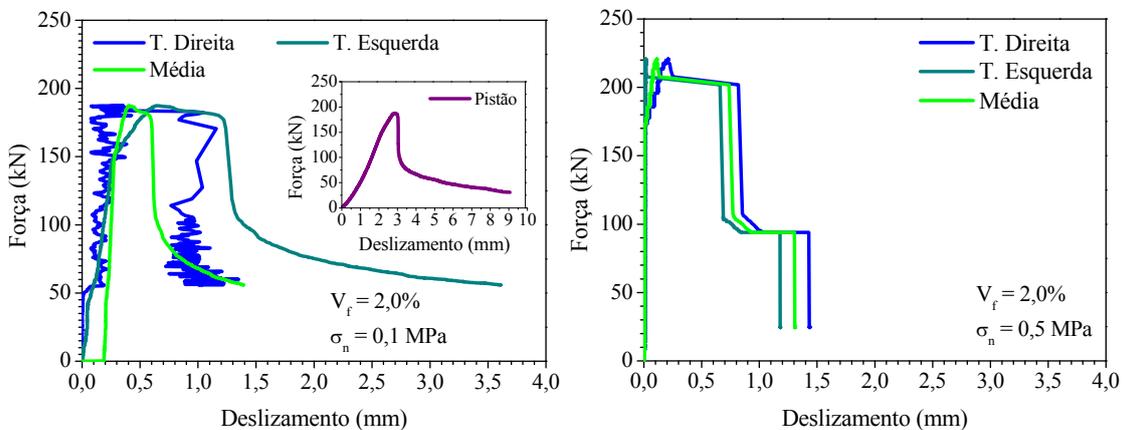


Figura 4 – Curva força *versus* deslocamento na interface.

Dos ensaios que ainda não foram realizados, espera-se que as fibras permitam reduzir o comprimento de traspasse das barras da armadura de tração a valores inferiores a 30ϕ e aumentar a resistência da interface ao cisalhamento proporcionalmente ao volume de fibras e à tensão normal à interface. Além disso, também se espera que as fibras, proporcionem à ligação rigidez suficientemente alta para ser possível considerar a ligação como rígida.

Também foi realizada uma modelagem computacional para avaliação do comportamento de uma ligação viga-pilar na fase de montagem. Nesta modelagem, uma ligação viga-pilar monolítica da estrutura da casa de força da UHE de Foz do Chapecó foi substituída por uma ligação com consolo e



dente metálicos. Os resultados dessa modelagem são apresentados em Oliveira Júnior, Araújo e El Debs (2009).

5 CONCLUSÕES PARCIAIS

A partir dos resultados que já foram obtidos, pode-se concluir que as curvas apresentam deslizamentos máximos semelhantes, embora as forças máximas suportadas pelos dois modelos tenham sido diferentes (218 kN para o modelo com tensão normal à interface igual a 0,5 MPa e 187 kN para o modelo com tensão normal igual a 0,1 MPa). Obviamente, a principal explicação para esta diferença é a tensão normal à interface, já que esta permite aumentar a contribuição das chaves de cisalhamento na resistência da interface.

Dos ensaios em protótipos, espera-se com a utilização das fibras de aço e da forma com que será estabelecida a continuidade aos momentos fletores positivo e negativo, obter uma ligação com comportamento semelhante ao de uma ligação monolítica.

Da modelagem computacional, verificou-se a segurança da ligação, o conservadorismo do procedimento do PCI (2004) para ligações com elementos metálicos e a necessidade de uma armadura envolvendo o dente metálico para combater a fissuração, que foi excessiva na modelagem.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos ao CNPq, pela bolsa de doutorado, à FAPESP e à ANEEL, em cujos projetos este trabalho está inserido, e à Furnas Centrais Elétricas por disponibilizar seus laboratórios e técnicos para a realização de parte do programa experimental.

7 REFERÊNCIAS

PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. **PCI Design Handbook**. 6. ed., 2004. 736 p.

OLIVEIRA JÚNIOR, L. A.; ARAÚJO, D. L.; EL DEBS, M. K. Análise numérica de uma ligação viga-pilar em estrutura pré-moldada de concreto na fase de montagem. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA-PROJETO-PRODUÇÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO, 2., São Carlos, 2009. **Anais...** São Carlos: EESC/USP, 2009.



ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE BLOCOS DE CONCRETO ARMADO SOBRE DUAS ESTACAS COM CÁLICE EXTERNO, EMBUTIDO E PARCIALMENTE EMBUTIDO

Rodrigo Barros¹ & José Samuel Giongo²

Resumo

Um dos principais problemas no uso de concreto pré-moldados está na execução da ligação entre a infraestrutura e a superestrutura. Esta pesquisa tem como objetivo analisar e discutir o comportamento da ligação pilar-fundação por meio de cálice externo, embutido e parcialmente embutido em blocos sobre duas estacas submetidos às ações de força vertical, horizontal e momento. Será desenvolvida análise numérica tridimensional não-linear utilizando programa baseado no método dos elementos finitos, na qual será considerado o efeito da fissuração do concreto e o atrito existente entre as paredes do pilar e as paredes do cálice. Com a análise experimental, pretende-se investigar se há formação de bielas de compressão que possibilitem a utilização dos modelos usuais de bielas e tirantes usualmente empregados em blocos sobre estacas.

Palavras-chave: Blocos sobre estacas. Cálice de fundação. Modelo de bielas e tirantes.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF TWO PILE CAPS REINFORCED CONCRETE WITH EXTERNAL, EMBEDDED AND PARTIALLY EMBEDDED SOCKET

Abstract

One of the main problems in the use of precast concrete is the execution of connections. The present research studies the behavior of connections of two pile caps reinforced concrete with external, embedded and partially embedded socket, in the presence of normal load with eccentricity, as well horizontal load. Three-dimensional analysis will be developed using software based on finite element method (FEM), considering the nonlinear physical behavior of the materials, and the friction effect between the socket walls. From the experimental analysis, it will be proposed an investigation about the strut conformation that allow the use of strut and tie model on pile caps.

Keywords: Pile caps. Socket foundation. Strut-and-tie model.

Linha de Pesquisa: Estruturas de Concreto e de Alvenaria

1 INTRODUÇÃO

O surgimento de novas tecnologias e o avanço na indústria da construção civil atingem diretamente os processos construtivos no que diz respeito ao tempo de construção, aumento da produtividade e redução de desperdício. Nesse cenário, o uso do concreto pré-moldado se torna cada vez mais disseminado no meio técnico, por atender a essas novas exigências.

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, barrosrn@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, jsgiongo@sc.usp.br



Os blocos sobre estacas são peças importantes quando da ligação do pilar pré-moldado com a fundação, cuja função é transferir as ações da superestrutura para as estacas ou tubulões, que por suas vezes se apóiam nas camadas inferiores do terreno. Esse elemento estrutural, de fundamental importância para a segurança da estrutura, geralmente não permite a inspeção visual quando em serviço, sendo, portanto, importante o conhecimento do seu comportamento.

Dentre as possíveis formas de ligação do pilar pré-moldado com a fundação, destaca-se o uso de blocos de fundação com cálice por apresentarem relativa facilidade de construção, possibilidade de ajustes e de transmissão de momentos dos pilares para as estacas.

O cálice é a parte do bloco que recebe o pilar pré-moldado, funcionando como um encaixe entre esses elementos, podendo ter as paredes lisas ou rugosas. O pilar fica em contato com o cálice num trecho denominado comprimento de embutimento, l_{emb} . Nesse tipo de ligação, três situações de cálices são admitidas conforme Figura 1: totalmente externo ao bloco, ou seja, com colarinho totalmente saliente; parcialmente embutido, onde o comprimento de embutimento é dividido na parte referente ao colarinho externo e na parte embutida no bloco; ou embutido no bloco, onde não se constata a presença do colarinho.

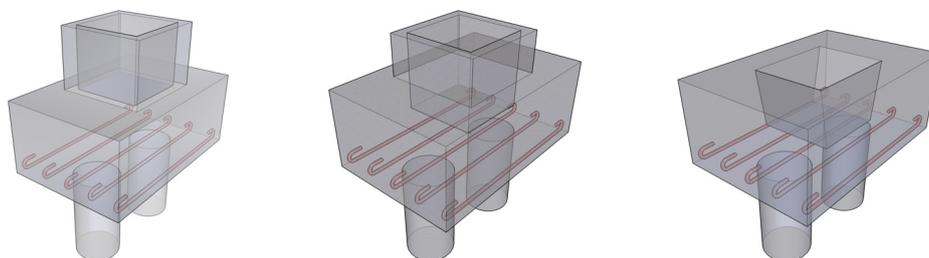


Figura 1 – Bloco de fundações com cálice externo, parcialmente embutido e embutido.

Na literatura técnica não são encontradas recomendações para o dimensionamento e detalhamento do bloco com cálice embutido e parcialmente embutido, sendo que os métodos de projeto restringem-se aos cálices construídos sobre os elementos de fundação, isto é, com colarinho totalmente saliente. Em virtude da escassez de informações e da ausência de recomendações para projeto deste tipo de elemento, pretende-se desenvolver pesquisa que possibilite melhor entendimento do comportamento estrutural dos blocos de fundação com cálice.

Dentre os possíveis métodos para o dimensionamento de blocos rígidos, destaca-se o modelo de bielas e tirantes. Este modelo baseia-se na analogia de treliça clássica introduzida no início do século XX por Mörsch, na qual a viga de concreto armado fissurada é comparada a uma treliça de banzos paralelos. O modelo evoluiu obtendo-se então à treliça generalizada de Mörsch, na qual os banzos superior e inferior não são paralelos, nem a inclinação das bielas é constante e igual a 45° ao longo de toda a viga. Porém, a idéia básica da treliça clássica de que a viga se comporta como uma treliça continua válida.

O modelo de bielas e tirantes é uma representação discreta do fluxo de tensões num determinado elemento estrutural. A estrutura inicial é representada por uma estrutura equivalente composta por barras comprimidas e tracionadas interligadas por meio de nós. As barras comprimidas recebem o nome de biela e devem absorver o fluxo de tensões de compressão, sendo normalmente representadas por linhas tracejadas. As barras tracionadas recebem o nome de tirante, e devem absorver o fluxo de tensões de tração existentes no elemento, sendo representadas por linhas contínuas.

Em elementos de concreto armado, as bielas representam as regiões de concreto que estão submetidas à compressão, enquanto que os tirantes representam as barras das armaduras



submetidas à tração. Eventualmente, podem ser previstos tirantes de concreto em alguns elementos estruturais desde que a tensão máxima não ultrapasse a resistência a tração do material.

2 BREVE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Blévoit & Frémy (1967), realizaram ensaios em blocos sobre duas, três e quatro estacas com a finalidade de estudar o comportamento do bloco mediante diferentes arranjos de armadura.

As observações experimentais relatadas serviram de base para a maioria das formulações para projeto de blocos sobre estacas existentes na literatura técnica, e fundamentais para o surgimento dos modelos de bielas e tirantes. O modelo de bielas e tirantes é caracterizado pela verificação das tensões nas regiões nodais, sendo que existem divergências entre códigos normativos no que se refere aos valores limites dessas tensões. Schlaich *et al.* (1987) sugeriram que as tensões de compressão no concreto são consideradas seguras se o valor máximo das tensões em zonas nodais for limitada a $0,6f_{ck}$.

Rausch *et al.* (1997) ensaiaram blocos de concreto armado sobre duas estacas em escala reduzida (1:2). Para o dimensionamento do bloco utilizou-se o modelo de bielas e tirantes. Os autores obtiveram algumas conclusões interessantes, dentre as quais destaca-se o fato de que o método das bielas supõe que os tirantes se deformem livremente, porém, em virtude das estacas limitarem essa deformação, parte da componente horizontal da biela de compressão é absorvida pelas estacas.

Miguel (2000) realizou análise experimental e numérica em blocos sobre três estacas, observando a ocorrência de escorregamento das barras da armadura principal de tração. Entretanto, tal escorregamento só ocorreu após a ruptura da biela de compressão. A pesquisadora concluiu que o método das bielas sugerido por Blévoit & Frémy (1967) mostrou-se conservador em relação à força de ruína. Em todos os modelos, a ruína ocorreu por fendilhamento da diagonal comprimida, acompanhada do escoamento das barras da armadura longitudinal.

Munhoz (2004) realizou um estudo comparativo por meio de modelos analíticos e numéricos baseados no método dos elementos finitos. Nesse estudo, foi considerada a ação de força centrada em blocos sobre uma, duas, três, quatro e cinco estacas, no qual variou-se as dimensões do diâmetro das estacas, bem como as da seção transversal do pilar. Munhoz (2004) constatou diferenças entre os modelos analíticos e numéricos, bem como no fluxo de tensões, quando da formação dos campos e trajetórias das mesmas. Analisando as direções das tensões principais, a pesquisadora propôs um modelo refinado de biela e tirante.

Delalibera (2006) estudou numérica e experimentalmente blocos sobre duas estacas submetidos à ação de força centrada e excêntrica. O pesquisador constatou que a geometria da biela de compressão diverge dos modelos usualmente sugeridos por outros autores, e verificou que a distribuição de tensões nas estacas é uniforme.

Campos & Marcellino (2008) analisaram o comportamento de blocos de fundação sobre duas estacas para estruturas pré-moldadas, utilizando cálice externo. Foi realizado ensaio em três protótipos de blocos na escala 1:2 variando a altura do colarinho, nos quais o objetivo principal era avaliar a influência que o comprimento de embutimento l_{emb} provoca na base do bloco, bem como na formação da biela comprimida. Os resultados indicaram que o modelo proposto por Melo (2004) é conservador em relação às forças últimas obtidas experimentalmente.

Barros (2009) avaliou a influência que a viga de travamento provoca no comportamento estrutural do bloco de fundações sobre duas estacas com cálice embutido, utilizado na ligação pilar-fundação. O pesquisador concluiu que a presença da viga de travamento na direção perpendicular ao alinhamento das estacas não provoca alteração no comportamento estrutural do bloco, e que as paredes do cálice são capazes de transferir de modo eficaz a força proveniente da viga de travamento em direção as estacas.



3 METODOLOGIA

Após extensa revisão bibliográfica, o método a empregar é o relativo a trabalhos com ênfase em análise numérica e experimental. Definidos os modelos que serão estudados, uma primeira análise numérica será desenvolvida a fim de criar subsídios para a análise experimental. Os blocos de concreto armado sobre estacas serão analisados numericamente por meio de programa de computador DIANA, baseado no método dos elementos finitos. Após os ensaios experimentais, poderão ser feitas novas análises numéricas para complemento dos resultados experimentais.

Para a calibração dos modelos de blocos sobre estacas serão utilizados resultados experimentais e numéricos obtidos em pesquisas como as de Delalibera (2006) e Barros (2009). Em relação à análise experimental, pretendem-se ensaiar, a princípio, seis modelos em escala reduzida (1:2 ou 1:3, a ser definida durante a pesquisa) de blocos sobre duas estacas com cálice externo, parcialmente embutido e embutido, sendo construídos com conformação das paredes do pilar e do cálice lisas e rugosas.

4 RESULTADOS ESPERADOS

Com os resultados obtidos por meio das análises numéricas e experimentais, espera-se poder definir a forma geométrica e o ponto de início da formação da biela nos blocos com cálice, propondo-se, portanto, modelo refinado de bielas e tirantes para esse tipo de bloco. Em virtude de a pesquisa encontrar-se em fase inicial, não existem conclusões parciais até o presente momento.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pelo apoio financeiro, à UFRN pela formação acadêmica e ao Departamento de Engenharia de Estruturas da USP - São Carlos, por garantir as condições de realização desse trabalho.

6 REFERÊNCIAS

BARROS, R. **Análise de blocos de concreto armado sobre duas estacas com cálice totalmente embutido mediante presença de viga de travamento**. 2009. 195 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

BLÉVOT, J.; FRÉMY, R. Semelles sur pieux. **Annales d'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics**, Paris, v. 20, n. 230, p. 223-295, fev., 1967.

CAMPOS, L. A.; MARCELLINO, N. A. **Análise experimental de blocos de fundação sobre duas estacas para estruturas pré-fabricadas submetido à ação de força centrada**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 50., **Anais...** Setembro, Salvador, 2008.

DELALIBERA, R. G. **Análise teórica e experimental de blocos de concreto armado sobre duas estacas submetidos a ação de força centrada e excêntrica**. 2006. 308 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.



MIGUEL, G. M. **Análise experimental e numérica de blocos sobre três estacas**. 2000. 211 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

MUNHOZ, F. S. **Análise do comportamento de blocos de concreto armado sobre estacas submetidos à ação de força centrada**. 2004. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

RAUSH, A.; D'ASCENSO, N.; GOLDSCHMIDT, P.; NATALINI, M. Analisis experimental sobre cabezales de pilotes sometidos a cargas verticales. In: **JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL**, 28., v. 1, p. 309-318, São Carlos.

SCHLAICH, J.; SCHAFER, K.; JENNEWEIN, M. Toward a consistent design of reinforced structural concrete. **Journal of Prestressed Concrete Institute**, v. 32, n. 3, p. 74-150, May/June, 1987.



ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE JUNTA DA ALVENARIA

Rodrigo Carvalho da Mata¹ & Marcio Antonio Ramalho²

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo de influência da junta de argamassa no comportamento estrutural de painéis de alvenaria quando submetidos a esforços horizontais. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é obter parâmetros experimentais do comportamento da ligação bloco/argamassa e dos componentes de alvenaria para prever numericamente o comportamento estrutural da alvenaria. Espera-se também validar os procedimentos numéricos para descrever o comportamento de painéis de alvenaria pré-comprimida submetida a esforços horizontais. Assim, com os resultados experimentais e as simulações numéricas espera-se contribuir para a fundamentação e atualização de normas de projeto em alvenaria estrutural.

Palavras-chave: Alvenaria estrutural. Junta de argamassa. Elemento de interface. Comportamento mecânico.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF MASONRY JOINT BEHAVIOR

Abstract

This paper presents a study of the influence of mortar joint in the behavior of masonry structures under horizontal forces. The main objective of this study is to obtain experimental data on the behavior of the bounding between mortar joint and blocks and to obtain the parameters necessary for the numerical modeling of this behavior. The study also expects to validate numerical procedures to simulate the behavior of pre-compressed masonry under horizontal forces. With this study, we expect to contribute to the understanding and to the development of design codes of practice in structural masonry.

Keywords: Masonry structure. Mortar joint. Joint element. Mechanical behaviors

Linha de Pesquisa: Estruturas de Concreto e de Alvenaria

1 INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica mundial, associada ao conhecimento das propriedades mecânicas da alvenaria, proporciona condições para que haja construções seguras e ao mesmo tempo econômicas. No entanto, este potencial não tem sido utilizado em toda a sua extensão em prédios de alvenaria estrutural pelo ainda incompleto conhecimento das propriedades das unidades e argamassas, incluindo o comportamento da ligação entre esses dois materiais. Um dos principais motivos desse desconhecimento generalizado do meio técnico deve-se ao fato de que, no Brasil, a construção dessas obras antecedeu às pesquisas na área, invertendo completamente o processo desejável (CAMACHO, 1995). Dessa forma, é notória a necessidade de investigações científicas para fundamentação e atualização de normas e códigos de controle e projeto em alvenaria estrutural.

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, rcmata@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, ramalho@sc.usp.br



Ademais, nota-se a relevância do estudo das características mecânica de um material compósito (alvenaria) baseando-se no comportamento de seus componentes. Assim, neste estudo os componentes e os painéis de alvenarias serão analisados com o objetivo principal de determinar a resistência da alvenaria sob combinações de esforços baseada no comportamento mecânico das partes componentes. No mais, espera-se que com os resultados do comportamento mecânico das partes componentes da alvenaria e as simulações numéricas propostas possam contribuir para a simplificação e economia dos ensaios, evitando procedimentos que utilizam equipamentos sofisticados, mão-de-obra altamente especializada e alta demanda de tempo.

2 METODOLOGIA

Este trabalho apresenta a influência da junta de argamassa no comportamento estrutural de painéis de alvenaria quando submetido a esforços horizontais. Assim, o objetivo principal deste trabalho é determinar dados experimentais do comportamento da ligação bloco/argamassa com intuito de obter os parâmetros necessários para prever numericamente o comportamento estrutural da alvenaria. Para atingir o objetivo descrito anteriormente apresentam a metodologia do programa experimental e da análise numérica a ser estudada.

O programa experimental é fundamentado por ensaios de caracterização dos componentes da alvenaria e ensaios de painéis de alvenaria. Os componentes são blocos de concreto e dois tipos de argamassa de assentamento. Ensaios de caracterização de bloco (compressão axial e tração direta), argamassa (compressão axial) e junta de argamassa (tração direta de prisma, e ensaio de cisalhamento) serão realizados com o intuito de obter o comportamento elasto-plástico dos componentes. Para isso, os ensaios serão realizados com controle de deslocamento sendo assim possível a obtenção dos parâmetros necessários para a representação numérica do comportamento da alvenaria.

A análise numérica, previamente iniciada faz-se o uso do programa comercial de Elementos Finitos DIANA[®] em que se utilizam rotinas implementadas para elemento de interface conforme a estratégia de modelagem definida neste trabalho. Assim, espera-se que com os dados obtidos com a caracterização dos componentes possam servir de subsídio para análise numérica dos painéis pré-comprimidos submetido a esforço horizontal. Dessa forma, de posse das curvas *força x deslocamento* dos modelos numéricos serão posteriormente comparadas com os resultados experimentais dos painéis. Por fim, a discussão dos resultados obtidos no intuito de prever numericamente o comportamento de painéis de alvenaria pré-comprimida submetida a esforço horizontal.

3 DESENVOLVIMENTO

Os trabalhos desenvolvidos e a serem desenvolvidos podem ser descritos pelo o programa experimental a seguir.

3.1 Programa experimental

O programa experimental proposto tem o objetivo de caracterizar o comportamento mecânico das juntas de argamassa, bem como caracterizar as partes componentes da alvenaria. Outra etapa é a experimentação de painéis de alvenaria pré-comprimida submetidas a esforços horizontais. A seguir, apresenta uma breve descrição dos procedimentos adotados para caracterização dos materiais constituintes e a aquisição de dados necessários para posterior análise numérica dos modelos de alvenaria.

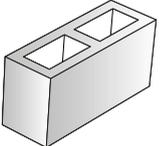


Caracterização dos componentes

Blocos

Para execução dos prismas para ensaio de caracterização das juntas e dos painéis submetidos a força horizontal, será adotada uma geometria de bloco vazado de concreto atual do mercado. A resistência característica do bloco de concreto (f_{bk}) será de 8,0 MPa (ver Tabela 1).

Tabela 1 – Características do bloco

|  | Material | Classe de Resistência NBR 6136 (2007) | | Dimensões (cm) (largura x altura x comprimento) | |
|---|----------|--|--------------|--|------------|
| | | | | Bloco inteiro | Meio bloco |
| Concreto | 8,0 MPa | A | 14 x 19 x 39 | 14 x 19 x 19 | |

Em resumo serão determinados:

- ✓ Tolerâncias dimensionais, área líquida e absorção de água;
- ✓ Resistência característica à compressão, módulo de elasticidade (NBR 8522, 2008) e coeficiente de Poisson;
- ✓ Comportamento da amostra de bloco de concreto à tração. Os ensaios de resistência à tração direta serão realizados utilizando amostras cortadas dos blocos. Devido ao formato tronco-cônico dos blocos, as amostras serão retificadas até atingir uma espessura uniforme. Serão ainda introduzidos entalhes na amostra por onde o plano de ruptura deverá ocorrer, de forma que nessa região permita realizar o controle de deslocamento do ensaio.

Argamassa e ensaios das juntas

As argamassas têm como função principal transmitir as tensões atuantes aos blocos, solidarizar as paredes e acomodar as eventuais deformações. Em resumo, serão determinados:

- ✓ Especificação granulométrica da areia a ser utilizada na argamassa de assentamento (NBR 7211, 2004);
- ✓ Determinação da massa unitária da areia, cal e cimento;
- ✓ Resistência característica à compressão, módulo de elasticidade (NBR 8522, 2008) e coeficiente de Poisson;
- ✓ Tração direta da Junta (Figura 1a);
- ✓ Ensaio de cisalhamento das juntas (Figura 1b).

A argamassa de assentamento será do tipo mista (cimento, cal e areia). Serão utilizados dois traços de argamassa recomendadas pela Norma Britânica BS 5628-1 (1992). Abaixo, na Tabela 2 apresentam a classificação e os traços (em volume), segundo a BS 5628-1 (1992).

Tabela 2 – Classificação e traço em volume da argamassa de assentamento a ser utilizada

| CLASSIFICAÇÃO (BS-5628) | TRAÇO (volume) |
|-------------------------|----------------------|
| Classe (ii) | 1 : 0,5 : 4,5 |
| Classe (iii) | 1 : 1 : 6 |



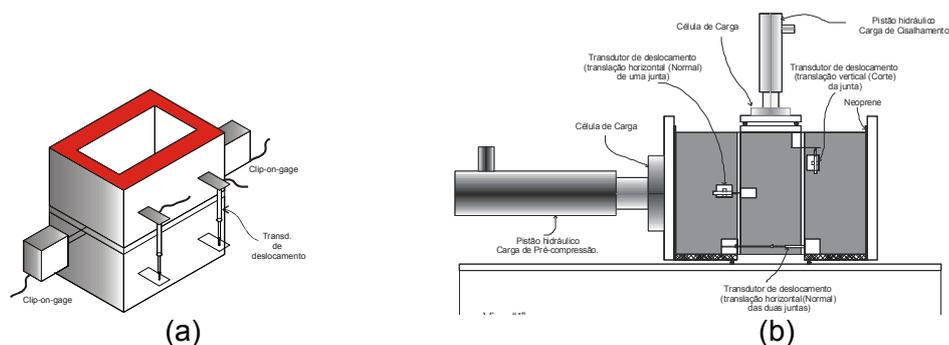


Figura 1 – (a) Instrumentação do prisma – Ensaio de tração direta; (b) Instrumentação do prisma submetido ao cisalhamento com pré-compressão axial.

Ensaio de painéis

Neste item apresenta a geometria e o esquema de ensaio de painéis que serão realizados. No entanto, para melhor entendimento do comportamento do painel de alvenaria submetido à força horizontal com pré-compressão foram realizadas análises numéricas pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) de possíveis geometrias a serem ensaiadas. Dessa forma, foi possível obter dados preliminares do comportamento dos painéis e posterior definição da geometria que apresenta maior tendência de ruptura por cisalhamento.

O objetivo deste ensaio é de observar o comportamento do painel submetido a força horizontal. Focando nesse objetivo, definiu-se a geometria apresentada na Figura 2, na qual apresentou a melhor configuração de ruptura por cisalhamento (Tomaževic, 1999).

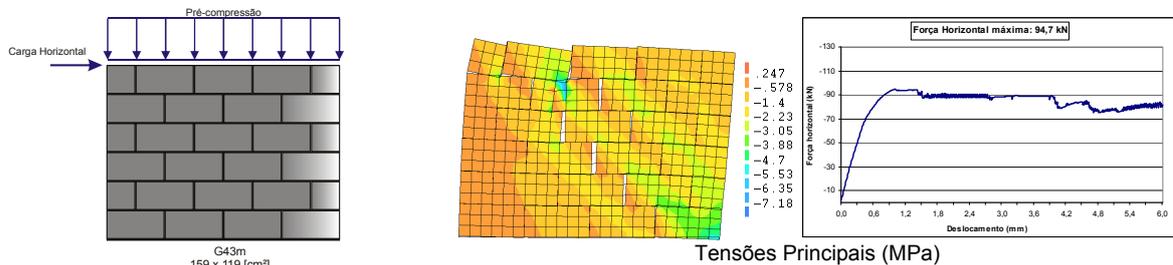


Figura 2 – Geometria escolhida para o ensaio e análise numérica preliminar.

Dessa forma, serão ensaiados quatro painéis pré-comprimidos submetidos a força horizontal para cada tipo de argamassa de assentamento.

4 RESULTADOS ESPERADOS

Com o programa experimental em andamento, ainda são incipientes os resultados obtidos. No entanto, espera-se que com os resultados de caracterização mecânica das partes componentes da alvenaria sirva de subsídio de dados de entrada dos modelos matemáticos. Sendo assim, validar o procedimento numérico para descrever o comportamento da alvenaria pré-comprimida submetida a esforços horizontais.



5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Com as análises numéricas preliminares e os resultados apresentados por diversos autores observam-se que a ligação bloco/argamassa detém propriedades mecânicas que podem esclarecer o comportamento estrutural de painéis de alvenaria submetido a esforço horizontal. Assim, é necessária uma investigação do comportamento mecânico da interface bloco/argamassa a fim de subsidiar dados experimentais e numéricos para fundamentação e possíveis atualização de normas técnicas e códigos.

6 AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa de estudo e financiamento deste trabalho. A CAPES pela bolsa PDEE (doutorado sanduíche na Universidade do Minho). À Tatu Pré-Moldados pelo fornecimento dos blocos utilizados nos ensaios.

7 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria: Requisitos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregado para concreto. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto – Determinação do Módulo de Deformação Estática e Diagrama Tensão x Deformação – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2008.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS 5628**: Part 1: Structural use of unreinforced masonry, London, 1992.

CAMACHO, J. S. **Contribuição ao estudo de modelos físicos reduzidos de alvenaria estrutural cerâmica**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1995.

TOMAŽEVIC, M. **Earthquake-resistant design of masonry buildings**. London: Imperial College Press, 1999.



PRÉ-MOLDADOS ESBELTOS EM CAD

Rodrigo Vieira da Conceição¹ & Jefferson Benedicto Libardi Liborio²

Resumo

Até pouco tempo atrás, observou-se que havia uma grande dificuldade no preparo, transporte e lançamento de concretos de alta resistência e alto desempenho. Na maioria das vezes essa situação seria razoável considerar, pois havia dificuldade em manipular os materiais, num tempo que fosse compatível com o preparo, transporte e lançamento do concreto. O somatório de conhecimentos existente hoje, torna fácil compreender como esses materiais devem ser compostos. Assim, o presente trabalho pretende aplicar todo o avanço tecnológico, obtido na tecnologia dos materiais, na elaboração de concretos estruturais para produção de pré-moldados leves, de alto desempenho e alta resistência, como: pilares, vigas, lajes e elementos de fachada. Os conhecimentos obtidos por este centro de pesquisa permitiram disponibilizar no mercado, num espaço bem curto de tempo, as estruturas pré-moldadas leves de alta resistência e alto desempenho propostas.

Palavras-chave: CAD. Pré-moldado. Estruturas leves. Concreto. Durabilidade.

SLENDER PRECAST IN HPC

Abstract

Until recently, it was observed that there was great difficulty in the preparation, transport and molding of concrete high-strength and high performance. In most cases this will be considered reasonable, because there was difficulty in manipulating the materials, a time that was compatible with the preparation, transportation and launching of concrete. The sum of knowledge available today, makes it easy to understand how these materials should be composed. Thus, this paper intends to apply the technological advances, as obtained in materials technology for the concrete preparation to structures produce precast lightweight, high performance and high resistance, such as pillars, beams, slabs and facade elements. The knowledge obtained by this research center make it possible market in a very short space of time, the structures precast lightweight, high strength and high-performance proposals.

Keywords: HPC. Precast. Lightweight structures. Concrete. Durability.

Linha de Pesquisa: Estruturas de Concreto e de Alvenaria

1 INTRODUÇÃO

Os pré-moldados existentes no mercado atendem, na maioria dos casos, os vários setores industriais e os estabelecimentos comerciais, restando pouco para as habitações. No caso das habitações, só se observa a utilização de pré-moldados como auxiliar na confecção de lajes, e alguns outros elementos. Outras aplicações nunca levam em conta a qualidade do material concreto, com a pretensão de se tornarem elementos finais expostos na composição da habitação.

Os profissionais que atuam na liderança de pequenas fábricas pouco têm se importado em atualizar seus conhecimentos com respeito aos recentes desenvolvimentos técnico e científico e,

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, rvieira@sc.usp.br

² Professor e Coordenador do Laboratório de Materiais Avançados à Base de Cimento da EESC-USP, liborioj@sc.usp.br



como decorrência disso, não existe no mercado a possibilidade de se projetar a construção com elementos verdadeiramente pré-fabricados com todos os controles de qualidade e visual.

A justificativa dessa pesquisa deve-se ao fato da falta de produtos de alta qualidade, de baixo custo, que possam ser utilizados em construções de pequeno porte, que também poderão ser utilizados em construções de maior porte.

A manutenção dos custos dos cimentos industrializados, associados à disponibilização de equipamentos sofisticados, antes destinados a outros setores, o desenvolvimento da física e da química, aplicados à construção civil, foi o fato que propiciou os avanços, surgindo os aditivos superplastificantes de alta performance. Então, a concepção de concretos que possam ser mais duráveis, mais resistentes e que ultrapassem todos os concretos conseguidos numa obra convencional, é uma realidade, tornando-o muito fácil obtê-los.

Hoje, pode-se dizer que se têm materiais que poderão constituir produtos, que além da alta resistência e alto desempenho, poderão também estabelecer a beleza final das edificações, conforme análises junto ao LMABC, ilustrado na Figura 1.



Figura 1 – Qualidade de produto acabado que pode ser atingido com concretos especiais.

A possibilidade de se disponibilizar pré-moldados de alta resistência, alto desempenho, e com excelente acabamento é, portanto uma novidade jamais vista, e que, por conseguinte trará enorme economia ao pretendente de uma boa e barata construção.

2 METODOLOGIA

Os recentes aprendizados com a técnica de empacotamento de partículas e sinergia entre materiais têm permitido que sejam executados concretos com resistências mecânicas altíssimas e ainda, que se transformem em material de alto desempenho.

As análises de durabilidade do concreto de alto desempenho serão baseados na ação de cloretos, ensaios de carbonatação acelerada e aspectos relacionados com a reologia do concreto no estado fresco, bastante estudados em Silva (2006), Silva (2007) e Castro (2007), respectivamente. A implementação de todos esses parâmetros científicos numa construção, permite estabelecer que essa construção deverá durar mais de 100 anos, com pouquíssima manutenção, a não ser aquela estética, estabelecida pelo passar dos anos.

Outro ponto importante para a presente pesquisa é o processo de produção sob cura acelerada (vapor) sobre pressão atmosférica, que está bem desenvolvido no trabalho de Melo (2000).

3 DESENVOLVIMENTO

A seleção e caracterização dos materiais é uma etapa muito importante para a produção do concreto de alto desempenho, pois essas fases têm influência significativa no resultado final e na durabilidade do concreto dos pré-moldados.



O aglomerante hidráulico que será utilizado é o CP V ARI RS, por ser um cimento que proporciona elevadas resistências iniciais, facilitando a desmoldagem e o transporte da peça, e por oferecer um bom desempenho frente aos meios agressivos sulfatados, que são ótimas vantagens para o processo produtivo da pré-moldagem.

Na escolha da adição levou-se em conta a disponibilidade do produto no mercado para a produção de um concreto mais resistente e durável, visando o efeito microfíler e a reação pozolânica. A adição selecionada foi à sílica ativa de ferro-silício (SFS), também conhecida como microsilica. Nos estudos experimentais desenvolvidos por Silva (2002) e por Melo (2000), mostram resultados que sugere um teor mínimo de 10% de SFS em substituição volumétrica ao cimento, que é capaz de contribuir, de modo eficiente, para a produção de C-S-H.

O uso do aditivo SP, superplastificante, é justificado pela necessidade da redução da água de amassamento, refinamento da porosidade e aumento da resistência. Entre os aditivos SP disponíveis no mercado, dois foram pré-selecionados para verificar a compatibilidade com o aglomerante, CP V ARI RS + 10% de SFS em substituição volumétrica. O aditivo escolhido foi determinado através de análises realizadas pelo ensaio de Kantro ou miniabatimento.

É de fundamental importância escolher adequadamente os agregados a serem usados, pois eles influenciam na resistência, durabilidade e trabalhabilidade do concreto. A seleção dos agregados, grão e miúdo, foi devido a sua granulometria, morfologia das partículas e disponibilidade deles na região da cidade de São Carlos. Os agregados grãos são basálticos e têm diâmetro máximo de 9,5 mm e 6,3 mm. Já os agregados miúdos, são areias quartzosas, e possuem diâmetro máximo de 2,4 mm, 1,2 mm e 500 μm , e suas proporções foram estabelecidas pelo estudo do empacotamento de partículas, visando diminuir os vazios da mistura.

A próxima etapa do desenvolvimento do concreto com características autoadensáveis será definir o teor "ideal" de argamassa, que ofereça um excelente acabamento ao pré-moldado preenchendo os vazios existentes entre os agregados grãos, e determinar traços (rico, médio e pobre) a fim de traçar um ábaco de resistências com várias dosagens, incorporando fibras de polipropileno e metálicas.

Para o desenvolvimento dos elementos pré-moldados será construída uma planilha de situações, para os elementos de laje, vigas, pilares e de fachadas, determinando-se as solicitações durante a fabricação, transporte, montagem e utilização, assim como as características geométricas dos elementos, e ligações necessárias. Alguns elementos pré-moldados dimensionados serão colocados e analisados sob cura térmica acelerada (vapor).

4 RESULTADOS OBTIDOS OU ESPERADOS

A eficiência dos aditivos selecionados sobre o aglomerante foi determinada adotando-se uma relação a/agl de 0,35, e teores dos aditivos variando em 0,3%. Para uma análise mais criteriosa, o espalhamento foi medido após 10, 20, 30 e 40 minutos do início da mistura dos materiais (Figura 2).

Analisando o gráfico anterior, pode-se observar que ambos aditivos não tiveram perda de fluidez significativa da pasta para teores elevados. Essa constância na fluidez da pasta é um ótimo sinal para evitar constrangimentos numa concretagem devido à rápida perda de trabalhabilidade. Observando o comportamento entre os aditivos, pode-se concluir que o ADVA Cast apresentou melhor desempenho, sendo que seu teor será definido pela trabalhabilidade e resistência desejada em cada traço.

O método de empacotamento adotado na presente pesquisa, proporcionou o maior preenchimento dos vazios existentes entre as areias, representado pela maior massa unitária no estado compactado seco de $1,79 \text{ kg/dm}^3$, com a proporção final entre os agregados miúdos de 63%, 27% e 10%, respectivamente.



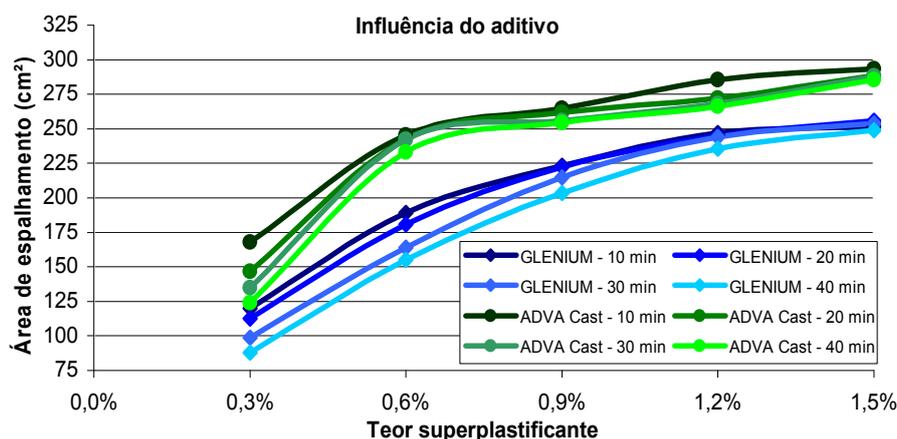


Figura 2 – Curva “área de espalhamento versus teor de SP” para pastas com o aglomerante.

As propriedades dos concretos, ainda não elaborados, serão analisadas no estado fresco, verificando características autoadensáveis de maneira que garanta a durabilidade do elemento, e no estado endurecido, verificando principalmente as resistências, o módulo de elasticidade e o acabamento superficial. Essas análises serão realizadas com a maioria dos procedimentos baseados em normas e outros baseados em pesquisadores renomados.

A avaliação dos elementos pré-moldados será a última etapa do projeto de doutorado. Eles deverão ser avaliados de acordo com as características finais de cada elemento estrutural, verificando padrões de aceitação quanto ao acabamento, textura, resistência, etc. Também deverão ser descritas todas as etapas envolvidas como: pontos de pega para transporte, estocagem, lançamento e utilização, resistências mínimas (tração e compressão), módulo de elasticidade, entre outros.

5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Apesar de muito difundido o concreto pré-moldado no Brasil, nota-se a necessidade do uso de elementos pré-moldados leves em concreto de alto desempenho nas construções devido sua rapidez e facilidade de montagem.

A seleção e caracterização dos materiais que serão utilizados para a produção dos elementos de concreto, foram realizadas de acordo com o objetivo de se produzir elementos pré-moldados de alta resistência e alta durabilidade.

Com base nos estudos iniciais e observações constatadas durante alguns procedimentos de dosagem e controle do concreto, destaca-se a importância da associação do empacotamento de partículas (com a incorporação de finos), com o uso de adição e de aditivo superplastificante, o que tornará o concreto bastante coeso, contribuindo para um bom acabamento superficial. Também propiciará altas resistências mecânicas nas primeiras idades, comprovada pelo refinamento da porosidade, que é um bom sinal para aplicação da cura térmica em elementos pré-moldados, beneficiando ainda mais o processo produtivo.

6 AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa concedida e apoio financeiro nos gastos do projeto.



7 REFERÊNCIAS

CASTRO, A. L. **Reologia do concreto de alto desempenho**. 302 p. Tese (Doutorado em Interunidades em Ciência e Engenharia dos Materiais) – EESC/IFSC/IQSC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

MELO, A. B. **Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland**. 2000. 271 p. Tese (Doutorado em Interunidades em Ciência e Engenharia dos Materiais) – EESC/IFSC/IQSC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

SILVA, F. G. **Estudo de concretos de alto desempenhos frente à ação de cloretos**. 2006. 220 p. Tese (Doutorado em Interunidades em Ciência e Engenharia dos Materiais) – EESC/IFSC/IQSC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SILVA, I. J. **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura**. 2002. 279 p. Tese (Doutorado em Interunidades em Ciência e Engenharia dos Materiais) – EESC/IFSC/IQSC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

SILVA, V. M. **Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida**. 2007. 281 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.



ANÁLISE DINÂMICA EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ DE LIGAÇÕES VIGA-PILAR

Sandra Freire de Almeida¹ & João Bento de Hanai²

Resumo

Este trabalho apresenta parte do estudo experimental que visa desenvolver um método de análise da deformabilidade de estruturas de concreto e suas ligações, em função da danificação, focalizando a semi-rigidez das ligações de elementos pré-moldados. O objeto específico de estudo é a ligação viga-pilar com capacidade de transmissão de esforços. Realizou-se um estudo comparativo dos resultados obtidos em ensaios experimentais estáticos e dinâmicos em modelos reduzidos de pórticos de concreto pré-moldado, utilizando procedimentos que empregam métodos diretos na obtenção da rigidez da ligação entre os elementos. A metodologia experimental envolveu ensaios dinâmicos de vibração forçada e sinais medidos por acelerômetros e ensaios estáticos usuais que utilizam transdutores de deslocamento e clinômetros. Os resultados preliminares já demonstram a validade da utilização da metodologia experimental dinâmica para a determinação direta da rigidez de ligações de estruturas pré-moldadas.

Palavras-chave: Concreto pré-moldado. Ligação semi-rigidez. Análise dinâmica experimental.

DYNAMIC EXPERIMENTAL ANALYSIS TO ASSESS BEAM-TO-COLUMN CONNECTION STIFFNESS

Abstract

This paper presents an experimental study that aims to develop techniques to evaluate connection stiffness of precast concrete structures during damaging process. The main connection type analyzed in this study is the moment resistant semi-rigid beam-to-column connection. Static and dynamic experimental tests were carried out with reduced scale precast concrete frames and a comparative analysis between these results is presented. The experimental procedure to evaluate beam-to-column connection stiffness dealt with direct techniques, such as forced vibration tests and accelerometer measured data, as well as static tests with displacement transducers. The results showed that experimental dynamic tests are acceptable to obtain precast concrete connection stiffness directly.

Keywords: Precast concret. Semi-rigid connection. Experimental dynamic analysis.

Linha de Pesquisa: Estruturas de Concreto e de Alvenaria

1 INTRODUÇÃO

Na análise experimental de estruturas, os ensaios usuais de investigação física e os procedimentos da análise estática podem ser complementados com ensaios dinâmicos para a caracterização da estrutura. Os ensaios dinâmicos apresentam a vantagem de serem não-destrutivos e utilizados para a verificação das condições reais de vínculo ou para a avaliação da necessidade de intervenção em estruturas deterioradas. Particularmente, em estruturas de concreto pré-moldado, os

¹ Doutoranda em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, salmeida@sc.usp.br

² Professor Titular do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, jbhanai@sc.usp.br



ensaios de vibração podem representar uma vantagem na obtenção dos valores de deformabilidade, pois podem ser realizados em situações de serviço, e como o comportamento dinâmico do sistema é direcionado pelas propriedades dos elementos que o compõe, os resultados refletem as alterações das condições de vínculo.

As ligações entre os elementos pré-moldados usualmente apresentam comportamento semi-rígido (ligações deformáveis e que permitem transmissão de esforços), porém o valor real da rigidez é de difícil avaliação experimental. Portanto, métodos para a determinação da rigidez de ligações em situações de serviço podem se tornar uma alternativa para a análise do comportamento real da estrutura e para a comparação com hipóteses e modelos de cálculo utilizados no projeto, inclusive com monitoramento ao longo do tempo, ou até para a previsão do comportamento futuro da estrutura a partir do estado de danificação atual.

Neste trabalho são apresentadas sucintamente as séries de ensaios estudadas. Em todos os casos, buscou-se a consolidação de uma metodologia experimental dinâmica para obter a rigidez da ligação, diretamente com os sinais medidos por acelerômetros piezoelétricos.

2 METODOLOGIA

A primeira etapa da investigação experimental consistiu na realização de ensaios piloto para avaliar os procedimentos experimentais em modelos de estruturas, incluindo a verificação das condições de contorno adequadas e dos equipamentos existentes no Laboratório de Estruturas (LE-SET-EESC). Os ensaios-piloto foram desenvolvidos em parceria com outras pesquisas:

- 1) Ensaios dinâmicos em 2 modelos em escala real, juntamente com Baldissera (2006): um com pilar intermediário e outro com pilar de extremidade (Figura 1a). Os ensaios e resultados obtidos foram descritos em Almeida et al (2006).
- 2) Ensaios dinâmicos em seis modelos reduzidos, juntamente com Fonseca (2007), que avaliou o incremento de rigidez e resistência a momento fletor obtido pelo reforço com PRFC da ligação viga-pilar pré-moldada (Figura 1b). Os ensaios e os resultados obtidos foram descritos em Almeida et al (2008).
- 3) Ensaios dinâmicos em modelos de estrutura metálica, juntamente com o Eng^o William Bessa numa pesquisa em andamento no LE-EESC-USP. Foram ensaiadas ligações viga-pilar soldadas e parafusadas (Figura 2).

A segunda etapa da investigação experimental, que está em andamento, consiste na realização de ensaios em modelos reduzidos de pórticos em concreto pré-moldado, compostos por dois pilares e uma viga, cuja ligação básica é composta por encaixe de dente e consolo, com uso de chumbador, almofada de apoio e graute. Há variação de alguns dispositivos de um modelo para outro (inserção de laminado de PRFC ou insertos soldados) e também ensaio de um pórtico monolítico para referência. As dimensões dos elementos foram reduzidas por um fator de escala 1:3. No item 3, são apresentados os dados do primeiro modelo ensaiado (Figura 4).

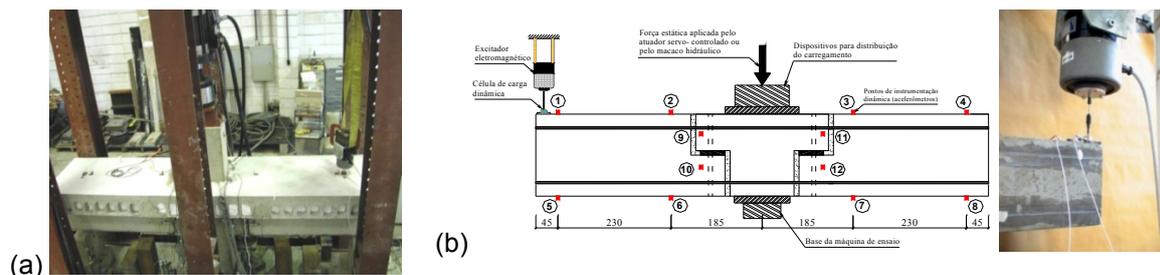


Figura 1 – Ensaios-piloto: (a) Modelo em escala real; (b) Modelo em escala reduzida.



Figura 2 – Ensaios-piloto: modelo de estrutura metálica.

Em todos os ensaios realizados, foi utilizado o método direto, elaborado por Nóbrega (2004) para a determinação da rigidez da ligação por meio dos valores de aceleração medidos. A ideia básica do método consiste em usar um par de acelerômetros uniaxiais, excitar a estrutura na sua frequência natural, registrar a força aplicada, e com isso, calcular os deslocamentos, as rotações e a rigidez da ligação.

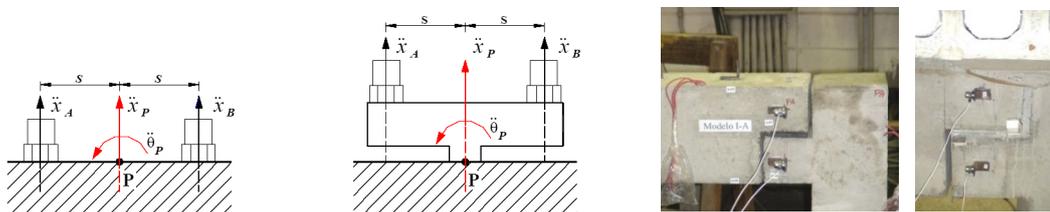


Figura 3 – Arranjo para medição da resposta rotacional. Fonte: Nóbrega (2004).

3 DESENVOLVIMENTO – ENSAIOS DOS PÓRTICOS

Todos os modelos desta etapa da pesquisa são pórticos de concreto armado de tamanho reduzido, compostos por dois pilares (15cm x 15cm) e uma viga (15cm x 20cm), com diferentes tipos de vinculação entre a viga e o pilar. Os ensaios do Modelo I-A foram divididos em duas etapas: 1) modelo sem reforço, com execução de ensaio estático até um estágio moderado de danificação do concreto; 2) modelo reforçado com laminados de PRFC inseridos no concreto, na região da ligação, com realização de ensaio estático até a ruptura. Os ensaios dinâmicos foram realizados antes, durante e após a aplicação de carregamento estático e intercalados nas fases de montagem do pórtico. A finalidade dos ensaios estáticos foi determinar a rigidez da ligação da forma convencional, provocar a danificação e obter o valor da carga de ruptura.

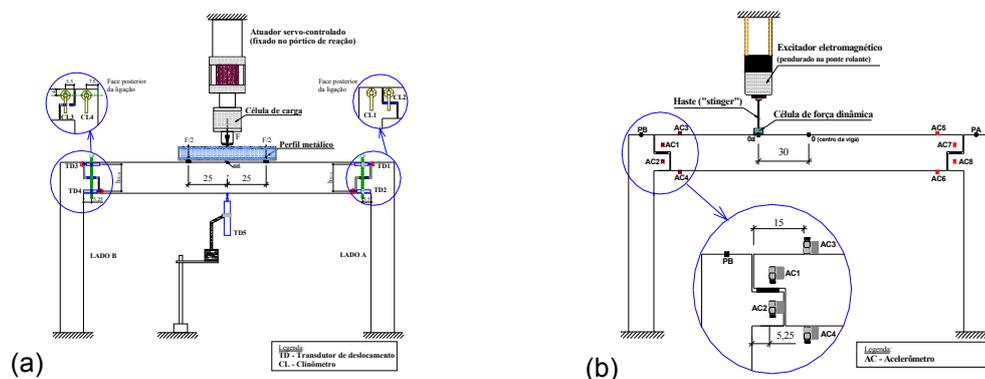


Figura 4 – Ensaio do pórtico: (a) Esquema do ensaio estático; (b) Esquema do ensaio dinâmico.



A instrumentação utilizada nos ensaios estáticos do modelo I-A consistiu de: extensômetros elétricos, transdutores de deslocamento e clinômetros. Nos ensaios dinâmicos, as amplitudes da vibração foram medidas com acelerômetros em dois pontos da ligação, com a estrutura sendo excitada na sua frequência natural, de forma a obter a rotação provocada pelo momento fletor dinâmico entre as seções descontínuas – consolo e dente.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Alguns gráficos usuais obtidos nos ensaios do pórtico de concreto pré-moldado são apresentados na Figura 5. No gráfico da aceleração ao longo do tempo, é possível notar a diferença entre os sinais medidos pelos dois acelerômetros posicionados na ligação.

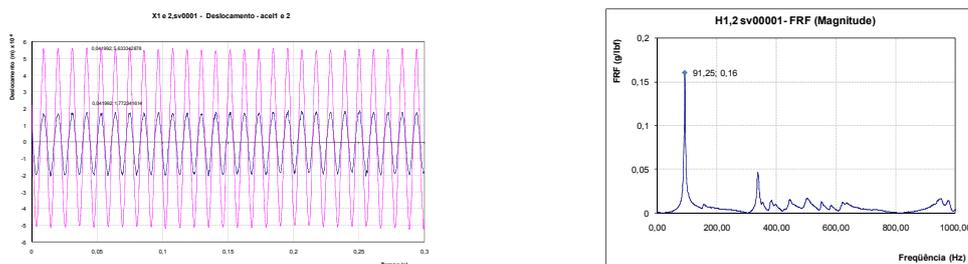


Figura 5 – Resultados preliminares – pórtico Modelo I-A: (a) Deslocamentos obtidos com os acelerômetros; (b) FRF resultante com indicação da frequência natural.

Os ensaios pilotos realizados forneceram valiosas informações a respeito da metodologia experimental proposta. Foram avaliadas as vantagens da utilização de modelos reduzidos nos ensaios dinâmicos, entre elas a redução do ruído nos sinais medidos. Outro aspecto cuidadosamente analisado, nesta fase, foi a condição de contorno dos modelos e sua influência nos resultados. Os ensaios dinâmicos nos modelos de ligação de estrutura metálica apresentaram resultados mais próximos aos obtidos nos ensaios estáticos dos modelos em concreto.

5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Os valores de rigidez da ligação obtidos para a maioria dos modelos foram próximos aos valores obtidos nos ensaios estáticos. Uma vantagem observada com a utilização do modelo em escala reduzida foi a redução significativa da influência do ruído provocado pela vibração da estrutura de reação.

Constata-se que a análise da rigidez de ligações entre elementos pré-moldados, especialmente a ligação viga-pilar, pode ser feita com base em medidas diretas obtidas em ensaios dinâmicos. Os resultados alcançados com os modelos estudados foram bastante satisfatórios, pois forneceram valores de rigidez da mesma ordem de grandeza que os ensaios estáticos usuais, com aplicação de uma metodologia direta e simples para cálculo da rotação entre os elementos.

6 AGRADECIMENTOS

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pela concessão da bolsa de doutorado e pelo Projeto Temático, intitulado “*Nucleação e incremento da pesquisa, inovação e difusão em concreto pré-moldado e estruturas mistas para a Modernização da Construção Civil*”, que financia esta pesquisa.



Aos pesquisadores e orientadores das pesquisas com os quais se estabeleceu parcerias para a realização dos ensaios dinâmicos: Eng^a Alice Baldissera, Eng^a Tatiana de Cássia Coutinho Silva da Fonseca, Eng^o William Oliveira Bessa, Prof. Mounir Khalil El Debs e Prof. Roberto Martins Gonçalves.

7 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, S. F.; HANAI, J. B. Análise experimental estática e dinâmica da rigidez de ligações de elementos pré-moldados de concreto sujeitas a danificação progressiva. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 8, n. 32, p. 45-48, 2006.

ALMEIDA, S. F.; FONSECA, T. C. C. S.; HANAI, J. B. Determinação da rigidez de ligações viga-pilar por meio de ensaios estáticos e dinâmicos. In: ENCONTRO NACIONAL DE BETÃO ESTRUTURAL, 2008, Guimarães, Portugal. **Anais...** v. 2, p. 407-416, 2008.

BALDISSERA, A. **Estudo experimental de uma ligação viga-pilar de concreto pré-moldado parcialmente resistente a momento fletor**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

FONSECA, T. C. C. S. **Reforço e incremento da rigidez à flexão de ligações viga-pilar de estruturas de concreto pré-moldado com polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC)**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

NÓBREGA, P. G. B. **Análise dinâmica de estruturas de concreto: Estudo experimental e numérico das condições de contorno de estruturas pré-moldadas**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.



INSERÇÃO DE LAMINADOS DE PRFC EM LIGAÇÕES VIGA-PILAR DE UM DE PÓRTICO DE CONCRETO

Tatiana de Cássia Coutinho Silva da Fonseca¹ & João Bento de Hanai²

Resumo

Apresentam-se resultados de ensaios experimentais em pórtico, com ênfase na avaliação da eficiência do reforço de suas ligações. O pórtico em escala reduzida, formado por elementos de viga e pilar pré-moldados com ligações viga-pilar inicialmente articuladas e pilares engastados na base, foi submetido a carregamento monotônico aplicado nos terços da viga. Realizaram-se duas etapas de carregamento e descarregamento até que se observou a fissuração da viga. Reforçaram-se as ligações pela colagem de laminados de PRFC. Aplicou-se carregamento em duas etapas, a primeira até a força de 51 kN e a segunda até a ruptura de uma das ligações. Observou-se que a ligação reforçada foi capaz de suportar cerca de 50% do momento de engastamento perfeito além de promover significativa redução nas flechas.

Palavras-chave: Ligação viga-pilar. Reforço. PRFC. Concreto pré-moldado

NEAR-SURFACE MOUNTED CFRP STRIPS IN BEAM-TO-COLUMN CONNECTIONS OF A CONCRETE FRAME

Abstract

Results of experimental tests in a concrete frame are presented, with emphasis in the evaluation of the connections strengthening. The small scale frame composed by precast columns and beam with initially pinned beam-to-column connections was loaded in the thirds of the beam. There were two loading and unloading stages until the beam cracking. The connections were strengthened by embedding CFRP strips in the lateral concrete cover. The loading was applied in two stages, the first until the force of 51 kN and second until the connection failure. It was observed that the strengthened connection exhibit semi-rigid behavior and promoted significant reduction in the beam deflection.

Keywords: Beam-to-column connection. Strengthening. CFRP. Precast concrete.

Linha de Pesquisa: Estruturas de Concreto e de Alvenaria

1 INTRODUÇÃO

Como qualquer estrutura civil, as estruturas de concreto pré-moldado podem apresentar comportamento global insatisfatório evidenciado por sintomas patológicos tais como: flechas e deslocamentos laterais excessivos ou vibração excessiva. Em estruturas deficientes, monolíticas ou pré-moldadas, a reabilitação é geralmente empregada nos elementos de viga e pilar que a compõem. Certamente, para a maioria dos casos é o procedimento mais prático a adotar. Entretanto, se a questão a ser corrigida está relacionada ao comportamento global da estrutura, o reforço das ligações

¹ Doutoranda em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, tfonseca@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, jbhanai@sc.usp.br



entre vigas e pilares deve ser considerado. Sobretudo, para estrutura de concreto pré-moldado em que o desempenho das ligações tem extrema importância.

O ensaio aqui relatado faz parte de uma pesquisa iniciada por Fonseca (2007) que visa avaliar o uso da técnica de reforço por colagem de laminados de PRF em entalhes no concreto como alternativa para reabilitação de ligações que apresentem desempenho insatisfatório em relação à rigidez e resistência a flexão. A técnica já teve a eficiência comprovada por pesquisas que avaliaram o reforço à flexão de vigas, pilares e consolos e reforço ao cisalhamento de vigas.

2 METODOLOGIA

Realizou-se o ensaio experimental de um pórtico em escala reduzida 1:3 para duas condições de vínculo entre a viga e os pilares: articulação e semi-rígida. A semi-rigidez foi alcançada pelo reforço das ligações com laminados colados em entalhes no concreto de cobertura.

3 ENSAIO EXPERIMENTAL

3.1 Características do modelo

Utilizou-se como modelo de ensaio um pórtico em escala reduzida 1:3 composto por dois pilares e uma viga pré-moldados, idealizado pela doutoranda Sandra Freire de Almeida. A viga foi conectada aos pilares por meio de ligações usualmente aceitas como articulações, muito usadas em estruturas pré-moldadas de galpões. A ligação é composta por encaixe de dente Gerber e consolo, com uso de chumbador, almofada de apoio e graute. Os pilares foram engastados na base por meio de um dispositivo metálico. As características geométricas do modelo estão apresentadas na Figura 1.

3.2 Materiais

Para confecção das vigas e pilares foram utilizados concretos com resistências à compressão de 57,3 MPa e 57,5 MPa, resistência à tração de 3,2 MPa e 3,5 MPa e módulo de elasticidade de 31 MPa. Utilizou-se almofada de apoio em borracha natural “NR 1087” da marca “ORION”, dureza Shore 70 A. O laminado usado no reforço é comercializado pela Rogertec sobre a denominação “Fita de Fibra de Carbono” ou “FITA MFC”, tem módulo de elasticidade 131GPa, resistência à tração 2068MPa e deformação última na tração de 17%. Para colagem do laminado, utilizou-se a resina Sikadur® 330 com resistência à tração de 30 MPa e módulo de elasticidade à tração de 4500 MPa.

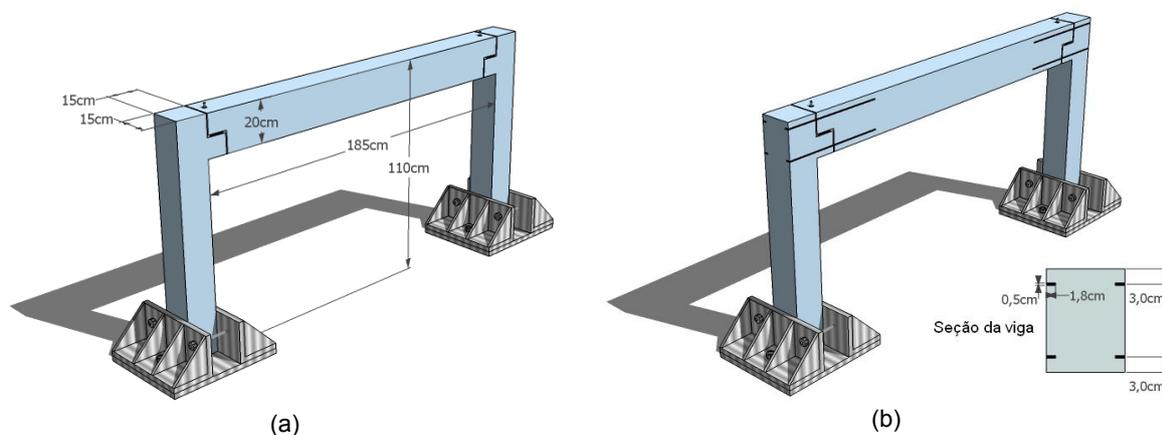


Figura 1 – Características geométricas do modelo: (a) Não reforçado; (b) Reforçado.



3.3 Confeção dos modelos

Os pilares e vigas foram concretados em formas de madeira compensada resinada. Na base da armadura dos pilares, foi soldada uma chapa metálica, parte integrante do dispositivo de fixação do modelo a base de reação do laboratório para obtenção da condição de engaste. Após a desforma, os pilares foram fixados a base de reação do laboratório. Colocaram-se as almofadas de apoio com um furo para introdução do chumbador e em seguida apoiou-se a vigas nos consolos dos pilares. Por fim, grauteou-se o espaço entre pilar e viga e a folga do chumbador em relação ao furo na viga. Desta forma o modelo ficou pronto para as duas primeiras etapas de carregamento.

Após a fissuração da viga, realizaram-se entalhes, com uso de ferramenta elétrica com dois discos de corte, nas laterais do modelo. Os entalhes foram preenchidos com resina. Aplicou-se resina no laminado limpo e introduziu-se o laminado no entalhe. Deu-se acabamento com espátula.

3.4 Instrumentação, configuração e execução do ensaio

Para a instrumentação externa, utilizaram-se clinômetros e transdutores de deslocamento, usados na determinação das rotações, e um transdutor para a obtenção da flecha. Extensômetros foram colado ao concreto aproximadamente a meio vão no bordo comprimido da viga. Para a instrumentação interna, utilizaram-se extensômetros colados nas armaduras e também nos laminados nas seções em que se julgava que haveriam as maiores solicitações.

O carregamento foi aplicado nos terços médios da viga (Figura 2) sob controle de deslocamento do pistão. No pórtico com ligações articuladas, foram empregados dois ciclos de carregamento e descarregamento. No primeiro, atingiu-se uma força aplicada de 41 kN e no segundo 56 kN. Neste ponto, verificava-se claramente a fissuração na região central do bordo tracionado da viga e a separação na interface entre graute e concreto nas ligações. Com o modelo descarregado, promoveu-se o reforço da ligação pela colagem de laminados. Após o endurecimento da resina, o modelo foi submetido a carregamento sob a mesma configuração do anterior. Realizou-se um ciclo de carregamento e descarregamento em que se atingiu a força de 56 kN. No carregamento subsequente, o modelo foi levado à ruptura.



(a)



(b)

Figura 2 – Modelo durante o ensaio: (a) Esquema de ensaio e posicionamento dos transdutores; (b) Posicionamento dos clinômetros e arrancamento de concreto na ruptura.

4 RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES

A ruptura do modelo se deu na região da ligação por arrancamento do laminado, que apresentava a deformação de 5,3%, com uma porção de concreto aderida. Este tipo de arrancamento é descrito em De Lorenzis e Teng (2006) e pode estar relacionado a uma pequena distância entre o reforço e a borda de concreto. Quanto a essa questão seguiu-se a orientação de Blaschko (2003) que aconselha 3cm. Contudo Kang et al. (2005) afirmam que essa distância deve ser de 4 cm. Contribuiu



para o arrancamento prematuro do laminado o limitado comprimento disponível para colagem sua colagem.

Para a avaliação da rigidez traçou-se a curva momento x rotação apresentada na Figura 3 (a). A rotação foi obtida por meio dos transdutores. Para o cálculo dos momentos atuantes na ligação, utilizou-se a metodologia proposta em Catoia (2007). Esta se baseia na equivalência entre a relação momento curvatura na viga tanto para a condição bi-apoiada quanto com ligações semi-rígidas. Apresenta-se, também, na Figura 3 (a), uma aproximação bi-linear para o comportamento da ligação.

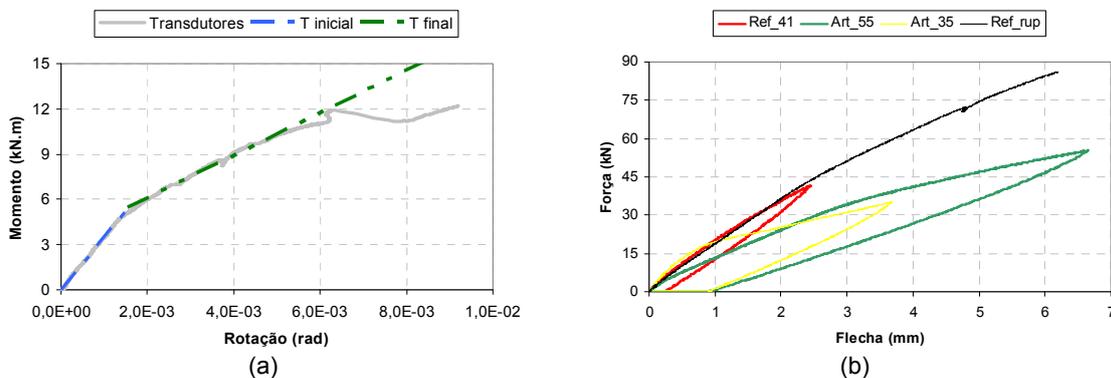


Figura 3 – (a) Curva Momento rotação para o ultimo ciclo de carregamento e aproximação bi-linear; (b) Curvas força flecha para todos os ciclos de carregamento aplicados.

O momento suportado na ligação, considerando-se o trecho inicial da curva, foi de 60% do momento de engastamento perfeito. A rigidez da ligação de 3500 kN.m/rad permite que ela seja classificada segundo a proposta de Ferreira, El Debs e Elliot (2002) como semi-rígida com resistência média à flexão.

Outra consequência interessante do reforço é a redução da flecha que está ilustrada na Figura 3 (b). Observa-se que a redução é de 50% para a força de 55 kN considerando a curva para o ultimo ciclo e a curva do modelo com ligações articuladas.

5 CONCLUSÕES

O reforço foi eficiente no aumento de rigidez da ligação que passou a ser classificada como semi-rígida com média resistência à flexão. Isso determinou uma redução significativa nas flechas da viga.

A ruptura observada no ensaio, com arrancamento brusco do laminado quando este apresentava somente 30 % da sua deformação ultima, é indesejável estruturalmente. Contudo, pontua-se que isso certamente esta relacionado ao comprimento colado do laminado e a sua distância a borda da viga. Em uma estrutura em escala real, esse problema poderia não ocorrer. No modelo reduzido, não havia o que ser feito. Em relação ao comprimento colado, foi utilizado o máximo possível e um aumento na distância entre o laminado e borda de concreto reduziria o braço de alavanca o que diminuiria a eficiência do reforço. O arrancamento prematuro também afetou negativamente a avaliação da ductilidade da estrutura.

Embora se devam reconhecer os problemas em relação ao descolamento prematuro, conclui-se que o modelo de ensaio foi satisfatório para avaliação do reforço no tocante à rigidez a flexão. Outros ensaios em modelos reduzidos estão previstos para que se possa fazer uma análise comparativa sempre focando esta questão. Para avaliação de ductilidade e capacidade ultima da ligação deverão ser projetados modelos com um maior fator de escala, ou mesmo, em escala real.



6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento ao projeto temático “Nucleação e incremento da pesquisa, inovação e difusão em concreto pré-moldado e estruturas mistas para a modernização da Construção Civil” e pela bolsa de doutorado.

7 REFERÊNCIAS

CATOIA, B. **Comportamento de vigas protendidas pré-moldadas com ligações semi-rígidas**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

DE LORENZIS, L.; TENG, J. G. Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures. **Composites: Part B**, n. 38, Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/locate/compositesb>>. Acesso em: 18 nov. 2006.

FERREIRA, M. A; EL DEBS, M. K.; ELLIOTT, K. S. Modelo teórico para projeto de ligações semi-rígidas em estruturas de concreto pré-moldado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., 2002, Belo Horizonte. **Anais...** 1 CD ROM.

FONSECA, T. C. C. S. **Reforço e incremento da rigidez à flexão de ligações viga-pilar de estruturas de concreto pré-moldado com polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC)**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

KANG, J. Y. *et al.* Analytical Evaluation of RC Beams Strengthened with Near Surface Mounted CFRP Laminates. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM – FIBER-REINFORCED POLYMER REINFORCEMENT FOR CONCRETE STRUCTURES, 7., p. 779-794, Kansas City, 2005. **Proceedings...** 1 CD ROM.



ANÁLISE DO SISTEMA MISTO DE LIGAÇÃO MADEIRA-CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Julio Cesar Molina¹ & Carlito Calil Junior²

Resumo

Este trabalho tem a finalidade de estudar o comportamento de ligações metálicas de sistemas mistos de madeira e concreto em situação de incêndio. Inicialmente, será efetuado um levantamento teórico sobre o tema com base na literatura disponível. Na seqüência, os ensaios experimentais serão efetuados em corpos-de-prova mistos e em vigas mistas, de seção transversal "T", com conectores verticais formados por de barras de aço comum, igualmente espaçadas. Os corpos-de-prova e vigas serão ensaiados em temperatura ambiente e em situação de incêndio. Será também efetuada a análise numérica do sistema de ligação com base no método dos elementos finitos. Com a realização deste estudo pretende-se contribuir no dimensionamento de sistemas estruturais mistos de madeira-concreto, em especial, em situação de incêndio.

Palavras-chave: Conectores de cisalhamento. Vigas mistas madeira-concreto. Incêndio.

ANALYSIS OF THE COMPOSITE SYSTEM OF CONNECTION WOOD-CONCRETE IN FIRE SITUATION

Abstract

The aim of this work is the study of the behavior of connection system wood-concrete in fire situation. Initially will be made a theoretical study with base in the available literature. In the sequence, the experimental tests will be made in composite specimens and in composite beams, of section "T", with vertical connectors formed for steel bars, equally spaced. It specimens and beams will be tested in ambient temperature and in fire situation. It will be also made the numeric analysis of the connection system with base in the method of the finite elements. However, it is intends to contribute in the calculation of composite structural systems of wood-concrete, especially, in fire situation.

Keywords: Shear connectors. Wood-concrete composite beams. Fire.

Linha de Pesquisa: Estruturas de Madeira

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material que apresenta boa resistência ao fogo e a utilização do concreto, em conjunto com a madeira, proporciona, para a madeira, maior proteção frente ao desgaste e às ações oriundas do ambiente, prolongando, a sua vida útil em até 3 vezes. A eficiência do elemento estrutural misto está relacionada ao trabalho em conjunto de ambos os materiais, ou seja, do tipo de interação entre a madeira e o concreto, sendo esta interação garantida por elementos metálicos, denominados "conectores de cisalhamento", utilizados na interface dos dois materiais. No caso das vigas mistas de madeira e concreto, na flexão, os conectores de cisalhamento são responsáveis por transmitir os

¹ Pós-Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, juliocm@sc.usp.br.

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, calil@sc.usp.br.



esforços longitudinais de cisalhamento e impedir a separação vertical entre a laje de concreto e a viga de madeira.

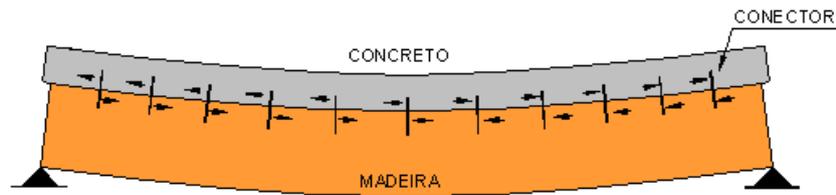
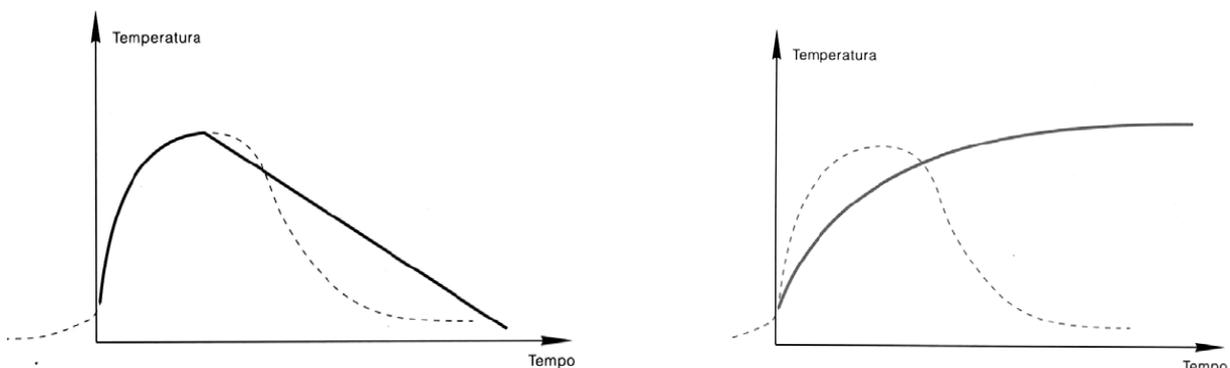


Figura 1 – Cisalhamento dos conectores na interface dos materiais madeira e concreto na flexão. (Modificado de Hellmeister, 1978).

Porém, não existe no Brasil uma norma específica para o dimensionamento de estruturas mistas de madeira e concreto. Além disso, a área de segurança estrutural contra incêndio vem se expandindo no Brasil nos últimos anos, mas o número de trabalhos e de pesquisadores brasileiros nessa área ainda é relativamente pequeno. Até o momento, os trabalhos publicados envolvendo estruturas em situação de incêndio, são, em sua grande maioria, relativos a sistemas estruturais de aço, de concreto, e mistos de aço e concreto. Aguiar (1986) e Pinto (2005) iniciaram no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeiras (LaMEM), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), alguns estudos numéricos e experimentais envolvendo o material madeira em situação de incêndio, com o objetivo de fornecer subsídios para a norma de madeiras ABNT NBR7190:1997 com relação ao tema investigado. No Departamento de Engenharia de Estruturas, também da EESC/USP, estudos envolvendo o sistema misto aço e concreto foram desenvolvidos por Kirchhof (2004). Na EPUSP alguns estudos envolvendo estruturas de concreto, e de aço, em situação de incêndio, foram desenvolvidos, respectivamente, por Costa e Silva (2007) e Silva, Correia e Rodrigues (2008).

1.1 Avaliação das estruturas em situação de incêndio

Um incêndio real pode ser modelado de modo a se obter uma curva “Temperatura versus Tempo”, aproximada, através de um método chamado “modelo de incêndio natural”. Para isso, é necessário o conhecimento da quantidade de material combustível do ambiente (chamada carga de incêndio), do grau de ventilação do compartimento em chamas, e das características térmicas do material de vedação.



(a) Curva Temperatura x Tempo de um incêndio natural

(b) Curva Temperatura x Tempo de um incêndio padrão

Figura 2 – Curvas utilizadas para a análise da estrutura em situação de incêndio. (Silva, 2001).



Entretanto, a aplicação do modelo de incêndio natural, em análises experimentais, é bastante trabalhosa e requer um estudo de cada caso, tornando-se praticamente inviável. Assim, devido à dificuldade de se estabelecer a curva “Temperatura versus Tempo” de um incêndio natural, a norma brasileira ABNT NBR 14323:1999, por simplificação, disponibiliza ao usuário equações para o dimensionamento a partir de um método simplificado, juntamente com uma curva padronizada, denominada de “incêndio padrão”, descrita por meio da equação logarítmica descrita na forma: $\theta_g = 20 + 345 \cdot \log(8t + 1)$, em que θ_g é a temperatura do ambiente em chamas (em oC) e t é o tempo (em minutos).

2 METODOLOGIA

Para a condução dos ensaios de cisalhamento e de flexão, em temperatura ambiente, será utilizado um pórtico de reação, com cilindro hidráulico acionado por um atuador de controle manual e sistema de aquisição de dados externo. Durante a realização dos ensaios em situação de incêndio, as temperaturas dos corpos-de-prova e das vigas serão medidas a partir de termopares distribuídos simetricamente nestes elementos. Esses termopares estarão ligados a um sistema de aquisição de dados que fará a verificação e o acompanhamento variação de temperatura durante o ensaio.

3 DESENVOLVIMENTO

Será efetuada, inicialmente, uma investigação teórica sobre o tema proposto através da coleta bibliográfica de informações disponíveis na literatura nacional e internacional. Na seqüência, especial atenção será dada à construção de um forno horizontal fazendo-se as devidas adequações às condições nacionais. Será efetuada elaboração do projeto, acompanhamento técnico da construção, instrumentação, calibração e o efetivo funcionamento do forno horizontal de ensaios a ser instalado no Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos-USP. Serão então realizados os ensaios experimentais nos corpos-de-prova mistos e vigas mistas e estes ensaios obedecerão às imposições normativas da ISO 834 em termos de dimensões das amostras e condições de ensaio.

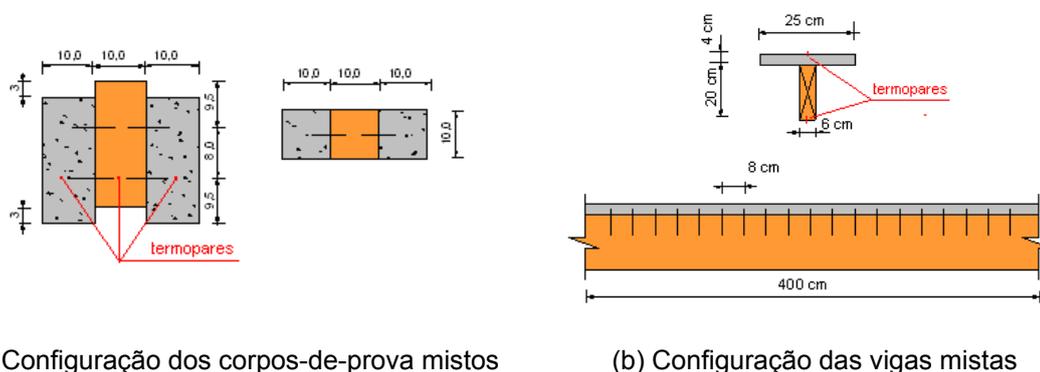


Figura 3 – Sistemas estruturais mistos de madeira e concreto a serem submetidos aos ensaios em altas temperaturas.

Serão efetuadas, também verificações adicionais por meio da utilização do método dos elementos finitos, a partir da utilização de software um específico (ANSYS, SUPERTEMPCALC, ABAQUS, SAFIR, TASEF, etc.), que será definido em conjunto com o grupo de pesquisa em análise



numérica do projeto temático em questão, cujos resultados obtidos serão comparados com os resultados obtidos experimentalmente.

4 RESULTADOS ESPERADOS

Com a realização deste estudo, pretende-se contribuir no dimensionamento de sistemas estruturais mistos, de madeira e concreto, em especial, em situação de incêndio, bem como propor recomendações para a normalização sobre o assunto.

5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Pela carência de informações técnicas sobre o tema que, no âmbito da literatura nacional, encontra-se em fase de desenvolvimento espera-se definir os métodos de ensaio e recomendações para os mesmos.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP pelo financiamento da pesquisa.

7 REFERÊNCIAS

AGUILAR FILHO, D. **Combustibilidade e tratamento ignífugo da madeira**. 1986. 99p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432**: exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – procedimento. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. Análise Termestrutural de Lajes Nervuradas de Concreto em Incêndio. In: CILAMCE, 28, Porto, Portugal, jun. 2007. **Anais...** Porto: FEUP. p. 1-20, 2007.

HELLMEISTER, J. C. **Pontes de eucalipto citriodora**. 1978. 85p. Tese (Livre-docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1978.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 834**: fire resistance tests – elements of building construction, Part 1. General requirements. Geneva, 1999.

PINTO, E. M. **Proteção contra incêndio para habitações em madeira**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.



SILVA, V. P. **Estruturas de aço em situação de incêndio**. São Paulo: Ziguarte, 2001.

SILVA, V. P.; CORREIA, A. M.; RODRIGUES, J. P. C. Simulação do comportamento ao fogo de pilares de aço em contato com alvenaria. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 33., Santiago, Chile, 2008. **Anais...** Santiago: UC, 2008. CD ROM.



AVALIAÇÃO DA RIGIDEZ À FLEXÃO DE TORAS DE MADEIRA POR MEIO DE VIBRAÇÃO TRANSVERSAL

Marcelo Rodrigo Carreira¹ & Antônio Alves Dias²

Resumo

Para a utilização das toras de madeira como elementos estruturais é importante avaliar suas propriedades mecânicas tanto por inspeção visual quanto por ensaios mecânicos. A técnica de vibração transversal tem se destacado dos demais métodos de Avaliação Não-Destrutiva para madeira serrada por obter estimativas acuradas do módulo de elasticidade à flexão. Entretanto, testes prévios com essa técnica evidenciaram dificuldades de empregá-la na avaliação a rigidez à flexão de toras de Eucalyptus sp. Visando a resolução desse problema, este trabalho busca a identificação dos fatores que interferem no ensaio de vibração transversal e a definição de critérios de ensaio para a avaliação da rigidez à flexão de toras de madeira utilizando a técnica de vibração transversal.

Palavras-chave: Avaliação não-destrutiva. Vibração transversal. Toras de madeira. Rigidez à flexão.

BENDING STIFFNESS EVALUATION OF WOOD LOGS BY TRANSVERSE VIBRATION

Abstract

For the use of wood logs as structural members is important to evaluate their mechanical properties by visual inspection and mechanical tests. The transverse vibration technique has stood out from other Non-Destructive Evaluation methods for lumber to obtain accurate estimates of the bending modulus of elasticity. However, previous tests with this technique showed difficulties to use it to evaluate the bending stiffness of Eucalyptus sp logs. Aiming to solve this problem, this paper seeks to identify the factors that influence the transverse vibration test and the definition of test criteria for evaluating the bending stiffness of logs using the transverse vibration technique.

Keywords: Non-destructive evaluation. Transverse vibration. Wood log. Bending stiffness.

Linha de Pesquisa: Estruturas de Madeira

1 INTRODUÇÃO

As toras de madeira exibem certas vantagens em relação à madeira serrada, como continuidade das fibras longitudinais e confinamento dos nós, que lhe propiciam maior resistência e menor variabilidade nas propriedades mecânicas. Essas características tornam a madeira em tora um material interessante para aplicações estruturais e, para seu melhor aproveitamento, é necessário avaliar a qualidade estrutural desse material tanto por inspeção visual quanto por meio de ensaio mecânico.

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, carreira@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, dias@sc.usp.br



Devido à boa correlação entre a resistência mecânica e a rigidez à flexão, esta tem sido usada como critério para a classificação estrutural das toras de madeira.

O módulo de elasticidade na flexão pode ser medido diretamente por meio do ensaio de flexão estática de acordo com a norma NBR 6231 (ABNT, 1980) ou estimado por meio de ensaios dinâmicos como a vibração transversal. Essa técnica tem demonstrado boa exatidão na estimativa da rigidez à flexão de peças estruturais de madeira serrada. Por outro lado, em uma investigação anterior conduzida pelo autor, foram encontradas dificuldades na avaliação do módulo de elasticidade de toras jovens de *Eucalyptus sp* empregando a técnica de vibração transversal. Nessa pesquisa observou-se que não foi possível estabelecer correlação significativa entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico empregando os mesmos equipamento e metodologia usados na AND de peças de madeira serrada.

Tal constatação leva a crer que o emprego da técnica de vibração transversal para a avaliação da rigidez à flexão de toras de madeira requer a consideração das particularidades desse material.

Assim sendo, este trabalho tem como objetivo a identificação dos fatores que interferem no ensaio de vibração transversal e a definição de critérios de ensaio para a avaliação da rigidez à flexão de toras de madeira utilizando a técnica de vibração transversal.

2 METODOLOGIA

Inicialmente foram desenvolvidos um condicionador de sinais e um programa de computador em LabVIEW 8.6 para em conjunto com a placa de baixo custo modelo USB 6009 da National Instruments formarem o sistema de análise modal experimental usado no decorrer deste trabalho.

Atualmente o trabalho encontra-se na fase de coleta de dados dos experimentos.

Uma amostra preliminar composta por 10 toras de *Eucalyptus citriodora* com idade de 20 anos, diâmetro médio de 16 cm e comprimento da ordem de 4,2 m está sendo submetida ao ensaio de vibração livre com excitação proveniente de impacto com martelo de impulso. A aceleração é medida na coordenada 0,95L a partir da base da tora e os impactos são desferidos em pontos localizados a cada 1/10 do comprimento como mostra a Figura 1.

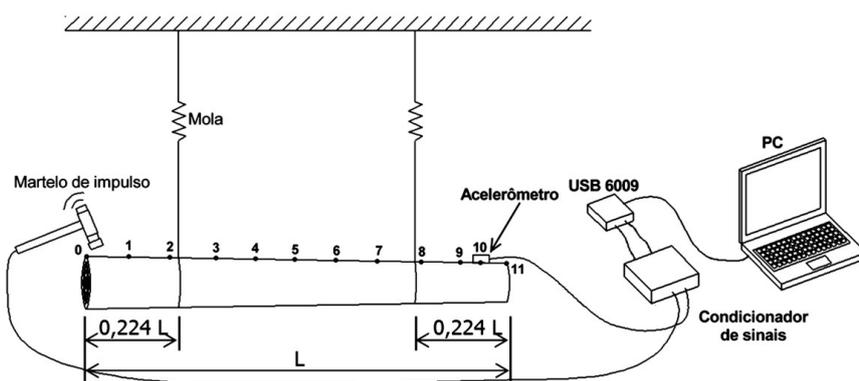


Figura 1 – Arranjo do ensaio dinâmico.

Com o sistema desenvolvido esta sendo possível medir as Funções de Resposta em Freqüência (FRF's), bem como determinar os parâmetros modais (amortecimentos, freqüências naturais e modos normais) das toras.

Estão sendo feitas duas baterias de ensaio sendo a primeira com o impacto desferido na direção paralela ao sistema de suspensão (como mostra a Figura 1) e a segunda com o impacto



sendo aplicado na direção horizontal, perpendicularmente ao sistema de suspensão. Essa metodologia está sendo empregada para avaliar a influência do sistema de suspensão nas frequências naturais.

A rigidez à flexão estática das toras é medida conforme procedimentos da norma ASTM D198 (2008) com o esquema de ensaio mostrado na Figura 2. Essa norma fornece expressões para determinar o módulo de elasticidade aparente ($E_{M,ap}$) e o módulo de elasticidade verdadeiro ($E_{M,v}$) no qual as deformações provocadas pelo esforço cortante são levadas em consideração.

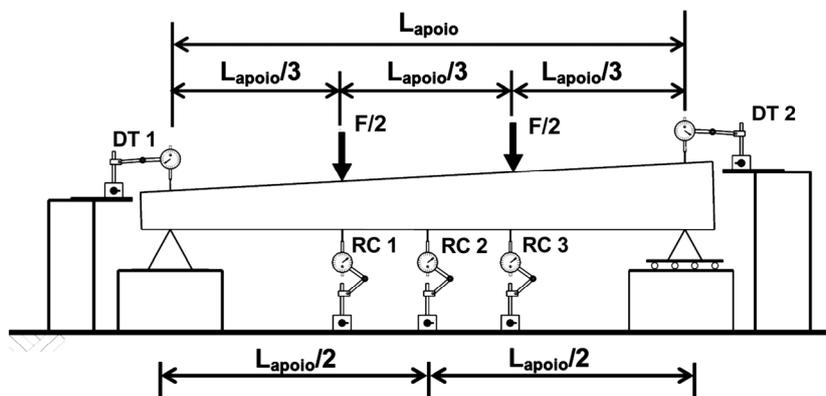


Figura 2 – Esquema do ensaio de flexão estática segundo a ASTM D 198 (2008).

O ensaio dinâmico e estático foi repetido girando-se as toras em 45° em relação a seu eixo longitudinal até a mesma completar uma volta.

Com a conclusão do ensaio estático é retirada uma seção com 20 cm de comprimento da região central da tora com a finalidade de determinar o gradiente de umidade e densidade ao longo do diâmetro e o teor de umidade médio nessa seção.

Como as duas partes de cada tora têm comprimento inferior a 20 vezes o seu diâmetro médio, o efeito do cisalhamento passa a ser significativo e então as toras cortadas são novamente submetidas aos ensaios de flexão estática e vibração transversal para avaliar a influência do esforço cortante na previsão da rigidez à flexão.

3 DESENVOLVIMENTO

Após a coleta dos dados dos ensaios dinâmico e estático serão desenvolvidas nos próximos dois anos as seguintes atividades:

- A partir das FRF's medidas no ensaio e simuladas por meio do modelo de Bernoulli para uma viga prismática será verificada a correlação entre os dados experimentais e analíticos tanto no domínio da frequência quanto no domínio modal. Essa correlação será realizada para verificar o quanto o comportamento dinâmico das toras se distancia do modelo de Bernoulli;
- Havendo diferença significativa nas frequências naturais do primeiro modos de flexão entre o modelo teórico idealizado e as toras será feita a calibração do modelo de Bernoulli sendo que as influências do esforço cortante e da inércia à rotação serão levadas em conta por meio da expressão de Goens (1931)³. Após a calibração do modelo espera-se obter uma expressão que permita estimar a rigidez à flexão das toras com boa exatidão;

³ GOENS, E. Über die Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Stäben mit Hilfe von Biegungsschwingungen. Ann D Phys Ser 7 11:649-678. 1931.



- Para incluir os efeitos do esforço cortante e da inércia à rotação é preciso conhecer a relação E/G para toras de madeira. Assim sendo, essa relação será estimada para as toras de madeira com $L/D < 20$ ajustando o modelo de Timoshenko aos dados das toras e às frequências naturais dos dois primeiros modos de flexão. Para a obtenção de E/G será utilizado o método dos algoritmos genéticos;
- Para avaliar até que teor de umidade o ensaio pode ser realizado com boa exatidão, será mensurada a variação do módulo de elasticidade estático e das frequências naturais de vibração, em função do teor de umidade das toras. Os ensaios serão desenvolvidos com toras de pequeno diâmetro e com corpos-de-prova de flexão com dimensões de acordo com a norma NBR 7190 (ABNT, 1997);
- A metodologia utilizada no ensaio dinâmico com toras, bem como a exatidão das estimativas da rigidez à flexão serão avaliadas para a definição de uma proposta de um método de ensaio para estimar a rigidez à flexão de toras de madeira por meio de vibração transversal;
- Para a validação da metodologia proposta será testada uma segunda amostra composta por toras de *Pinus sp* e *Eucalyptus sp*. Será feita uma verificação quantitativa para medir a eficácia do método.

4 RESULTADOS PARCIAIS

O sistema de análise modal experimental foi construído e está sendo testado na amostra preliminar. É possível obter as FRF's e extrair os parâmetros modais das toras. A partir das frequências naturais e, considerando que as toras de 4,2 m se comportem de acordo com o modelo de Bernoulli foram feitas estimativas do módulo de elasticidade dinâmico de quatro toras e observou-se que os valores encontrados são coerentes com o módulo de elasticidade estático.

Observou-se boa concordância entre as FRF's teóricas e experimentais até o 2º modo de vibração.

As toras com eixo não-linear são excitadas em mais de uma direção e, como resultado, observa-se a ocorrência de picos duplicados nas FRF's dificultando a identificação das frequências naturais.

5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Os resultados obtidos indicam que a técnica de vibração transversal tem potencial para ser aplicada na estimativa da rigidez à flexão de toras de madeira. Contudo, para uma avaliação completa da técnica, é preciso conhecer os efeitos do esforço cortante e da umidade nas frequências naturais das toras.

Com o desenvolvimento deste trabalho pretende-se elaborar uma proposta de um método de ensaio para avaliar com boa exatidão a rigidez à flexão de toras de madeira por meio de vibração transversal.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.



7 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIAL. **ASTM D 198** - Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes. Philadelphia, PA. 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6231** - Postes de madeira – resistência à flexão. Rio de Janeiro. 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7190** - Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro. 1997.



VIBRAÇÕES EM PASSARELAS DE MADEIRA

Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho¹ & Antonio Alves Dias²

Resumo

A norma brasileira de madeira necessita de diretrizes que sejam capazes de avaliar o conforto humano em passarelas de madeira. Tal necessidade se faz necessário devido ao aumento de problemas relacionados às vibrações excessivas ocorridas nas passarelas nos últimos anos. As passarelas de madeira estudadas nesse trabalho apresentavam vãos de 5 a 35 m, larguras de 150 e 200 cm, classes de resistência da madeira C40 e C60. As avaliações teóricas foram feitas tomando várias formulações de códigos normativos e sugestões de pesquisadores. Os resultados mostraram que as passarelas de madeira calculadas por meio da norma brasileira de madeira apresentaram vibrações excessivas com vãos a partir de 10 m. A norma européia de madeiras é abrangente em termos de hipóteses de cálculos para as acelerações. A inserção desse critério daria maior segurança às passarelas de madeira no Brasil.

Palavras-chave: Passarelas de madeira. Vibrações. Frequências. Acelerações.

VIBRATIONS IN TIMBER FOOTBRIDGES

Abstract

The Brazilian wood code needs guidelines that are capable of assessing human comfort timber footbridges. This need is made necessary due to the increased problems related to excessive vibration occurring on the footbridges in recent years. In this work were studied timber footbridges with spans between 5 and 35 m, widths of 150 and 200 cm, wood strength classes of C40 and C60. The theoretical evaluations were made by taking several guidelines of codes and researchers' suggestions. The results showed that the timber footbridges calculated through the Brazilian standard presented excessive vibrations with spans from 10 m. The European wood code is the including in terms of hypotheses of calculations for the acceleration. The inclusion of this criterion would improve human comfort to the timber footbridges in Brazil.

Keywords: Timber footbridges. Vibrations. Frequencies. Accelerations.

Linha de Pesquisa: Estruturas de Madeira

1 INTRODUÇÃO

A estimativa das frequências naturais e das acelerações permite antever a natureza das vibrações excessivas e, conseqüentemente, avaliar o nível de conforto humano. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) na norma de madeiras e estruturas de madeira ABNT NBR7190:1997 não apresenta critérios relacionados aos limites de frequência e aceleração para as passarelas de madeira.

A norma européia Eurocode 5 – Parte 2 (2004) possui desde as suas versões anteriores recomendações que permitem a análise do conforto humano em passarelas de madeira. Esta

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, psegund@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, dias@sc.usp.br



dispensa das verificações de acelerações as passarelas de madeira que apresentam frequências naturais nas direções vertical e lateral acima dos limites de 5,0 Hz e 2,5 Hz, respectivamente, e recomenda que as acelerações limites sejam nas direções vertical $a_{lim,vert}$ menor ou igual a $0,7 \text{ m/s}^2$ (7%g) e lateral $a_{lim,lat}$ menor ou igual a $0,2 \text{ m/s}^2$ (2%g). Atualmente a norma europeia propõe apenas diretrizes para projetos de passarelas de madeira biapoiadas de um único vão, sem levar em conta os casos de passarelas de madeira contínuas de dois e três vãos, assim como aquelas que utilizam outros sistemas estruturais.

2 METODOLOGIA

Na análise teórica foi investigado o comportamento dinâmico das passarelas de madeira biapoiadas sujeitas às ações dinâmicas induzidas por pedestres. Inicialmente, foi realizado o dimensionamento estático das passarelas de madeira biapoiadas com duas e quatro vigas, para vãos L variando entre 5 e 35 m, a cada 1,0 m, larguras b das passarelas de madeira de 150 e 200 cm e classe de resistência da madeira C40 e C60. Na seqüência foram obtidas teoricamente as frequências naturais por meio da formulação de viga de Euler-Bernoulli.

Os resultados dinâmicos das passarelas de madeira em termos de acelerações foram obtidos teoricamente por meio dos códigos internacionais BS 5400 (1978), OHBDC (1991), Eurocode 5 (1995), Eurocode 5 (2004), ISO 10137 (2005), Bro (2004), AASHTO (1997), SIA 160 (1989) e CEB (1993), e pelas formulações sugeridas por Rainer et al. (1988), Grundmann et al. (1993), Pimentel e Fernandes (2002).

3 DESENVOLVIMENTO

O modelo estrutural adotado consiste em passarelas de madeira biapoiadas, cuja seção transversal e tabuleiro são mostrados na Figura 1 e Figura 2. É preciso deixar claro que, antes de realizar as avaliações dinâmicas por meio de uma análise paramétrica foram realizados os cálculos estáticos para o dimensionamento das passarelas de madeira biapoiada de acordo com as normas brasileiras de dimensionamento e ações, NBR 7190 (1997) e NBR 7188 (1984), respectivamente. Nos cálculos dinâmicos realizados teoricamente para obtenção das frequências e acelerações foi levada em conta somente a rigidez das vigas das passarelas de madeira obtida a partir da altura H destas vigas.

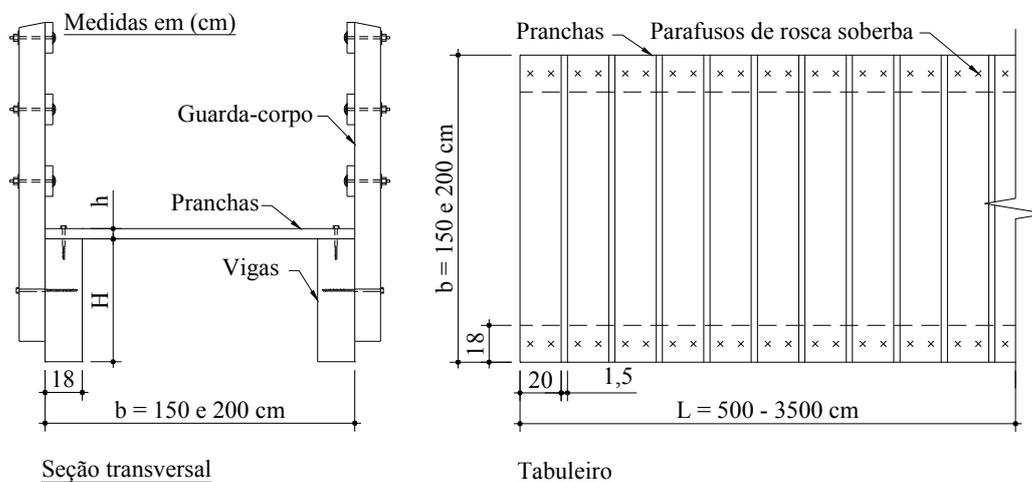


Figura 1 – Seção transversal e tabuleiro das passarelas de madeira com duas vigas.



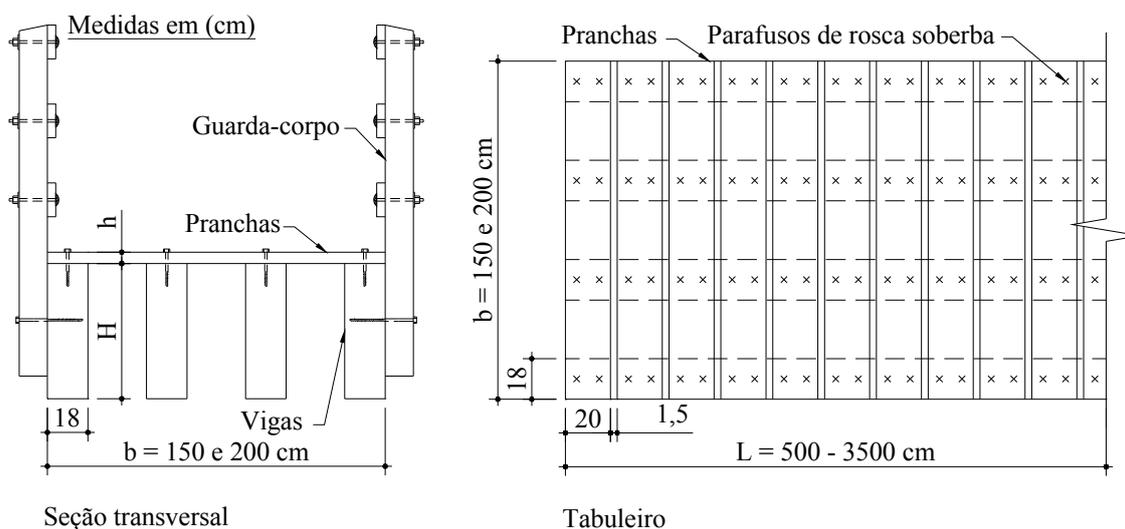


Figura 2 – Seção transversal e tabuleiro das passarelas de madeira com quatro vigas.

Após a definição das dimensões dos elementos estruturais das passarelas de madeira, a partir do dimensionamento para forças estáticas, fez-se a avaliação dinâmica das mesmas. Em um primeiro momento foi tomado o módulo de elasticidade efetivo $E_{c0,ef}$ para o cálculo da primeira frequência natural e acelerações nas direções vertical e lateral das passarelas de madeira com duas e quatro vigas. Em um segundo momento foi tomado o módulo de elasticidade médio $E_{c0,m}$ para o cálculo da primeira frequência natural e acelerações nas direções vertical e lateral das passarelas de madeira com duas e quatro vigas.

4 RESULTADOS

Os resultados obtidos teoricamente permitiram comprovar que as passarelas de madeira com vãos superiores a 10 m começaram a apresentar problemas de vibrações excessivas devido as frequências naturais serem abaixo dos limites estabelecidos em normas.

Os cálculos teóricos realizados em passarelas de madeira biapoiadas de duas e quatro vigas comprovaram que as acelerações que foram calculadas por meio da norma européia atual são próximas ou em alguns casos até maiores do que as acelerações calculadas pelos demais códigos normativos e sugestões dadas pelos pesquisadores.

A partir dos resultados das análises teóricas observou-se que existe grande probabilidade de ocorrência de desconforto para os usuários devido as acelerações obtidas acima dos limites estabelecidos em normas, e isso ocorreu tanto nos cálculos que utilizaram os valores de módulos de elasticidade efetivo $E_{c0,ef}$, quanto nos cálculos que utilizaram o módulo de elasticidade médio $E_{c0,m}$.

5 CONCLUSÕES

Nos estudos realizados até o momento foi possível identificar que o Eurocode 5 – Parte 2 (2004) apresenta uma formulação simplificada em relação ao Eurocode 5 – Parte 2 (1995), pois toma apenas o caso das passarelas de madeira biapoiadas não levando em consideração o caso de passarelas com vãos contínuos.

Eurocode 5 – Parte 2 (2004) não apresenta uma formulação que possibilite a obtenção do valor das acelerações nas direções vertical e lateral para outros tipos de sistema estrutural como



apresentava o código anterior por meio da introdução de uma força com variação no tempo ao longo da estrutura. No entanto, apresenta sugestões para o cálculo de acelerações tomando um grupo distinto de 13 pedestres e outra para o caso de acelerações devido a uma multidão que pode ser calculada em função da área da passarela.

Os critérios referentes às acelerações limites para as direções vertical e lateral foram mantidos conforme o Eurocode 5 – Parte 2 (1995) e foi possível identificar que esses foram ultrapassados durante a análise teórica. O código normativo atual apresenta uma maior evolução em relação aos demais, pois apresenta uma formulação referente ao cálculo do valor da aceleração na direção vertical que leva em conta o caso de pessoas correndo sobre as passarelas de madeira.

Como sugestão acredita-se que a formulação do Eurocode 5 – Parte 2 (2004) pode ser inserida na norma de madeiras e estruturas de madeira NBR 7190 (1997), tendo em vista que a sua formulação pode ser qualificada de fácil aplicação e porque tender a ser mais abrangente nos movimentos, e restritiva do que as demais normas e sugestões de pesquisadores.

6 AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil, pelo apoio financeiro concedido na forma de bolsa (Doutorado) e taxa de bancada.

7 REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO**: Guide specifications for design of pedestrian bridges. USA, aug., 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. São Paulo, 107 p., 1997.

BRITISH STANDARDS. **BS5400**: Steel, Concrete and Composite Bridges: Specification for Loads, Part 2, Appendix C, 1978.

BRO 2004. Publikation 2004:56: Vägverkets allmänna tekniska beskrivning för nybyggande och förbättring av broar, Svensk Byggtjänst, Stockholm, Sverige, 2004.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP**: Bulletin d'information, n. 209, England, London, aug. 1993.

EUROPEAN COMMITTEE OF STANDARDIZATION. **EUROCODE 5**: Design of timber structures, Part 2, Bridges. UK, London, 45 p, 1993.

EUROPEAN COMMITTEE OF STANDARDIZATION. **EUROCODE 5**: Design of timber structures, Part 2, Bridges. Brussels, 29 p, 2004.

GRUNDMANN, H.; KREUNZINGER, H.; SCHNEIDER, M. Dynamic calculations of footbridges. **Bauingenieur**, v. 68, n. 5, p. 215-225, 1993.



INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10137**: Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibration. Geneve, 32 p, 1992.

ONTARIO HIGHWAY BRIDGE DESIGN CODE. **OHBDC**: Ministry of transportation and communications – Highway engineering division, 3. ed., Ontario, Canada, 1991.

PIMENTEL, R. L.; FERNANDES, H. M. B. A simplified formulation for vibration serviceability of footbridges. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE DESIGN AND DYNAMIC BEHAVIOUR OF FOOTBRIDGES. **Proceedings...** Paris, France, p. 20-22, nov. 2002.

RAINER, J. H.; PERNICA, G.; ALLEN, D. E. Dynamic loading and response of footbridges. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 15, n. 1, p. 66-71, 1988.

SWISS NORM. **SIA 160**: Effects of loads on structures, 1989.



ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE LIGAÇÕES VIGA-PILAR PREENCHIDO SUBMETIDAS A AÇÕES CÍCLICAS

Marcela Novischi Kataoka¹ & Ana Lúcia Homce de Cresce El Debs²

Resumo

A presente pesquisa aborda o comportamento de ligações mistas e será desenvolvida com o auxílio de simulação numérica e experimentação. Os modelos serão compostos por ligações com parafusos passantes entre pilares metálicos preenchidos com concreto e vigas metálicas com laje com fôrma de aço incorporada. As ligações serão submetidas a força cíclica reversível. Além do efeito da força cíclica, este trabalho avaliará também a influência, na rigidez da ligação, da taxa de armadura da laje e do detalhe de ancoragem da armadura de continuidade ao pilar. Serão obtidos dados numéricos e experimentais que permitirão a construção de curvas momento versus rotação e força versus deslocamento para a quantificação da rigidez e determinação da ductilidade da ligação.

Palavras-chave: Estruturas mistas. Ligações mistas. Análise numérica.

STUDY ON BEHAVIOR OF STEEL BEAM TO CFT COLUMN CONNECTION SUBJECTED TO CYCLIC LOADING

Abstract

The present research deals with the behavior of steel-concrete composite connections and it will be developed through numerical simulation and experimental tests. The structural connections have end plates and bolts passing through the concrete filled tube (CFT) column and steel beams with a deck. The connections will be subjected to reversible cyclic loading. Beyond the effect of the cyclic loading, this research will also evaluate the influence of the reinforcement ratio of the slab and the anchorage detail of the continuity bars to the column on the connection stiffness. The obtained numerical and experimental values will allow the construction of moment versus rotation and force versus displacement curves for the quantification of the stiffness and determination of the connection ductility.

Keywords: Mixed structures. Steel-concrete composite connections. Numerical analysis.

Linha de Pesquisa: Estruturas Metálicas

1 INTRODUÇÃO

Devido à grande importância da ligação em estruturas pré-fabricadas, este trabalho abordará o estudo do comportamento de ligações mistas submetidas à carregamento cíclico.

As ligações mistas a serem analisadas nesta pesquisa são parafusadas, com chapa de topo, realizadas entre viga metálica de seção "I" e pilar misto preenchido com concreto. Haverá laje, do tipo com fôrma de aço incorporada, onde os parâmetros a serem analisados são a influência da presença dessa laje na resistência da ligação, da taxa de armadura e do método de fixação das barras de

¹ Doutoranda em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, kataoka@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, analucia@sc.usp.br



continuidade ao pilar misto. Os protótipos simularão ligações com pilares intermediários, sendo composto, cada um dos modelos, por um pilar misto e duas vigas em balanço.

Os métodos de fixação das barras de continuidade que serão utilizados nos protótipos são a soldagem e ancoragem mecânica por meio de luvas rosqueadas. A comparação das taxas de armadura das lajes será realizada para 1% e 1,5% e para ser utilizado como referência, também será ensaiado um protótipo sem a presença da laje, tido neste trabalho como o modelo piloto.

Para que todos esses parâmetros sejam analisados será estudado um total de quatro protótipos: um piloto, dois protótipos com laje armada com 1%, sendo que um possuirá a armadura de continuidade ancorada ao pilar por meio de luvas e outro por meio de solda. Já para a comparação entre as taxas de armadura, será produzido um protótipo com laje armada com 1,5% e barras de continuidade ancoradas ao pilar por meio de luvas.

2 METODOLOGIA

A metodologia de desenvolvimento dessa pesquisa é dividida em duas partes principais: parte teórica e parte experimental.

A parte teórica compreende as etapas de revisão bibliográfica e análise numérica. A revisão bibliográfica permite a discussão de vários aspectos referentes aos estudos já realizados em diversas instituições do mundo sobre o assunto ligações mistas, contribuindo para a obtenção de subsídios para a análise e entendimento do comportamento das ligações em estudo no presente trabalho. A análise numérica compõe uma parte importante, pois a partir dela é possível prever o comportamento dos modelos.

A parte experimental engloba o desenvolvimento de um esquema de ensaio que satisfaça as necessidades da pesquisa de acordo com os recursos disponíveis, bem como o dimensionamento, produção e montagem dos protótipos antes dos ensaios propriamente ditos.

Os protótipos serão submetidos a forças cíclicas reversíveis, causando na ligação momentos positivos e negativos.

3 DESENVOLVIMENTO

No momento o trabalho se encontra na fase experimental, aguardando a liberação do laboratório para a realização dos ensaios. Já foram realizadas análises numéricas preliminares para a previsão do comportamento dos protótipos, assim como, também foi realizada a previsão do momento resistente das ligações por meio de método analítico para comparação e validação dos resultados.

3.1 Programa experimental

Para a definição da ligação a ser estudada neste trabalho foram levados em consideração muitos aspectos que influenciam na viabilidade do projeto e no andamento da pesquisa. De acordo com a revisão bibliográfica realizada, muitos estudos mostraram que a melhor e mais resistente seção transversal para ser utilizada em pilares mistos preenchidos é a circular, mas também se verificou que a o processo construtivo da ligação com este tipo de pilar é muito mais complicado, devido a sua geometria.

Pensando nisso e também na continuidade das pesquisas realizadas pelo Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, optou-se por utilizar pilares se seção transversal quadrada e ligações com chapa de topo e parafusos passantes como em DE NARDIN (2003). Este tipo de ligação é muito utilizado em todo mundo e tido como adequado para a



utilização em áreas sísmicas, devido a seu bom comportamento na transmissão de momentos fletores (ver figura 1).

A presença da laje é, para muitos pesquisadores, essencial para o aumento da absorção de momento fletor pela ligação. Tendo isso em vista, adotou-se para os modelos a laje com fôrma de aço incorporada e conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça.

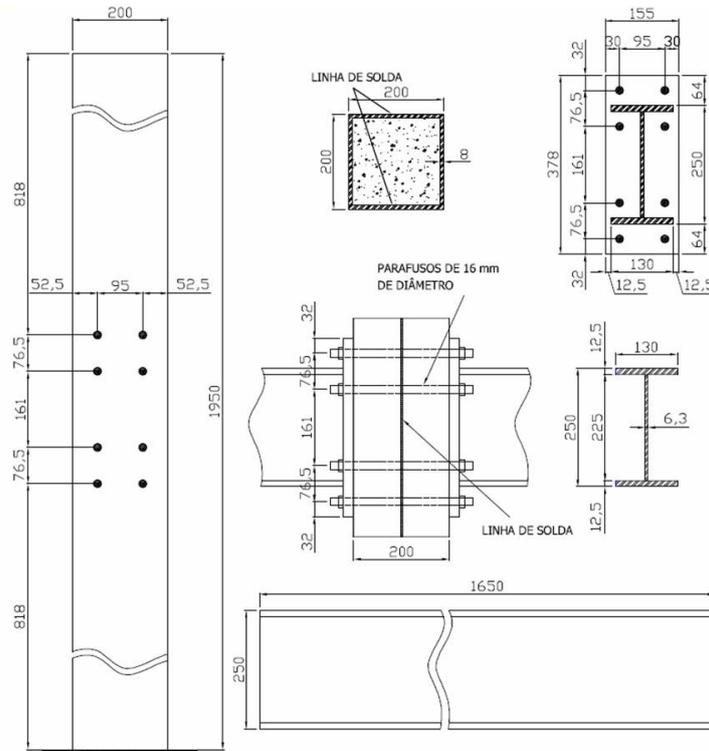


Figura 1 – Projeto dos elementos que compõem as ligações.

Tabela 1 – Resumo das características dos modelos

| Modelo | Presença da laje | Taxa de armadura | Fixação da barras |
|--------|------------------|------------------|-------------------|
| Piloto | Não | - | - |
| 1 | Sim | 1% | Luvras rosqueadas |
| 2 | Sim | 1,5% | Luvras rosqueadas |
| 3 | Sim | 1% | Solda |

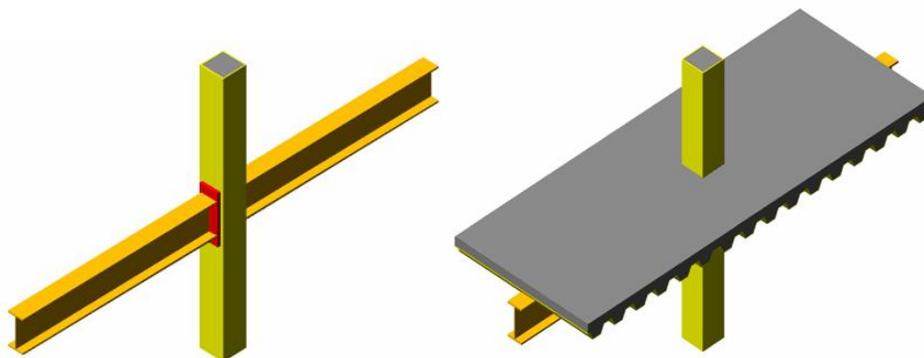


Figura 2 – Configuração final dos modelos.



Para o estudo de todos os parâmetros almejados nessa pesquisa serão ensaiados quatro protótipos, de acordo com a tabela 1. A figura 2 ilustra qual será a configuração final dos modelos.

3.2 Análise numérica

Os modelos numéricos foram concebidos inicialmente planos e com aplicação de força monotônica para se ter uma estimativa dos valores de força e deslocamentos que seriam encontrados nos ensaios. Em Kulkarni *et al.* (2008) foi estudado o comportamento de ligações em estruturas pré-moldadas de concreto realizadas com chapas de aço e, de acordo com esses autores, a modelagem bidimensional forneceu bons resultados. Para agilizar o processamento, os modelos numéricos foram feitos detalhando apenas metade do modelo real (ver figura 3).

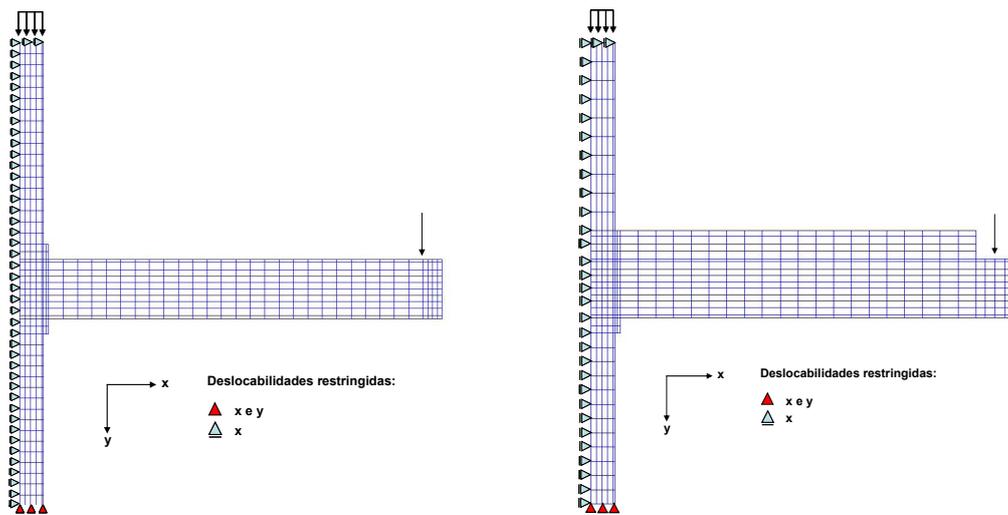


Figura 3 – Indicação da malha e condições de contorno.

Os resultados das três modelagens realizadas estão representados na figura 4 com curvas força *versus* deslocamento.

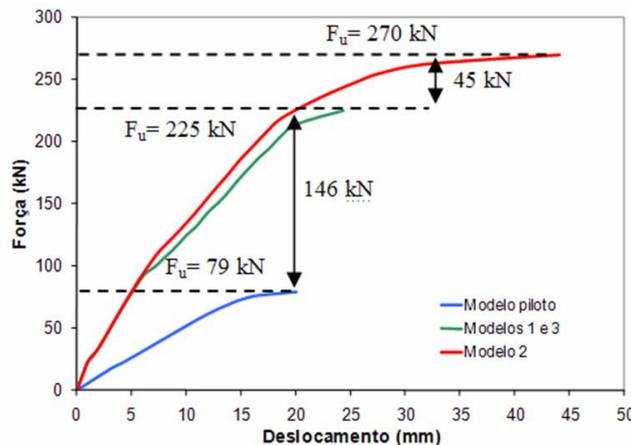


Figura 4 – Curvas força *versus* deslocamento obtidas numericamente.



3.3 Análise analítica

A previsão do momento resistente foi realizada de acordo com o modelo analítico proposto por SIMÕES (2000) *apud* SILVA *et al.* (2001). Por esse método deve-se primeiramente estabelecer as forças e, supondo que a linha neutra se encontra na alma da viga, o momento fletor resistente (M_u) da ligação mista é obtido a partir dos respectivos momentos fletores gerados com relação ao ponto médio da espessura da mesa inferior da viga. A equação 1, de acordo com os conceitos estabelecidos anteriormente, fornece o momento resistente de ligações mistas.

$$M_u = F_{tr} L_r + \sum_{i=0}^m (F_{bi} L_i) - h_w t_{wb} f_{ywb} \left(\frac{h_w}{2} + \frac{t_{fb}}{2} \right) \quad (1)$$

A partir do momento fletor obtido, sabendo-se que a distância do ponto de aplicação da força até a ligação é de 1,6 m, é possível determinar o valor da força última para cada modelo, como mostra a tabela 2.

Tabela 2 – Resumo das características dos modelos

| Modelo | $M_{u, \text{analítico}}$ (kN.m) | Força última (kN) |
|--------|-------------------------------------|----------------------|
| Piloto | 81,9 | 51,20 |
| 1 | 332,0 | 207,50 |
| 2 | 462,0 | 288,75 |
| 3 | 332,0 | 207,50 |

4 RESULTADOS OBTIDOS

Até o presente momento não há resultados experimentais para apresentação, mas com os resultados fornecidos pelas análises numérica e analítica tem-se uma estimativa do comportamento dos modelos.

Comparando os resultados obtidos nas modelagens numéricas e nos cálculos analíticos, para os modelos com ligações mistas, ou seja, com a presença da laje, os valores de momentos fletores últimos ficaram muito próximos, mas para o modelo piloto a diferença foi superior, como indicado na tabela 3.

Tabela 3 – Tabela comparativa entre resultados numéricos e analíticos

| Modelo | $M_{u, \text{numérico}}$ (kN.m) | $M_{u, \text{analítico}}$ (kN.m) | $M_{u, \text{ensaio}} / M_{u, \text{analítico}}$ |
|--------|------------------------------------|-------------------------------------|--|
| Piloto | 126,40 | 81,90 | 1,54 |
| 1 | 360,00 | 332,00 | 1,08 |
| 2 | 432,00 | 462,00 | 0,93 |
| 3 | 360,00 | 332,00 | 1,08 |

5 CONCLUSÕES PARCIAIS

A partir dos resultados obtidos, algumas conclusões parciais podem ser feitas. De acordo com os resultados numéricos, a presença da laje aumenta a resistência da ligação e quanto mais armada for essa laje, maior será o momento fletor resistido.



A comparação entre os resultados numérico e analítico validaram ambos os métodos, pois de acordo com a tabela 3, eles se apresentaram próximos, com exceção do modelo piloto, que a grande diferença entre os momentos pode ser justificada por não se tratar de uma ligação mista, para qual a equação utilizada é especificamente indicada.

Com relação ao método de ancoragem da armadura de continuidade, ainda não foi possível prever o comportamento das ligações, apenas os ensaios fornecerão informações a respeito desse parâmetro.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ pela bolsa de doutorado concedida, à FAPESP pelo projeto temático ao qual essa pesquisa faz parte e ao Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia de Estruturas que realizará os ensaios.

7 REFERÊNCIAS

DE NARDIN, S. **Pilares mistos preenchidos: estudo da flexo-compressão e de ligações viga-pilar**. 2003. 323 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

KULKARNI, S. A.; LI, B.; YIP, W. K. Finite element analysis of precast hybrid-steel concrete connections under cyclic loading. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 64, p. 190-201, 2008.

SILVA, L. S.; SIMÕES, R. D.; CRUZ, P. J. S. Experimental behaviour of end-plate beam-to-column composite joints under monotonical loading. **Engineering Structures**, v. 23, p.1383-1409, 2001.



DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE CÓDIGO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE ESTRUTURAS DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Ronaldo Rigobello¹ & Jorge Munaiar Neto² & Humberto Breves Coda³

Resumo

Este trabalho consiste de desenvolvimento de um código computacional, com base no método dos elementos finitos, cujo objetivo é a análises termomecânica de estruturas aporricadas quando expostas às ações térmicas típicas de situações de incêndio. Uma primeira etapa, já concluída, possibilitou a elaboração de código para análise térmica bidimensional da seção transversal de elementos estruturais. Uma segunda etapa consistirá na elaboração de código para transferência do campo de temperaturas para análises acopladas com códigos computacionais de análise estrutural, que tem por base a formulação posicional do método dos elementos finitos. Além disso, esta mesma etapa prevê a adaptação dos modelos constitutivos de tais códigos para lidar com as curvas tensão-deformação típicas das análises de estruturas em situação de incêndio. Uma terceira etapa tratará da validação dos códigos e da aplicação destes em análises típicas de estruturas aporricadas em situação de incêndio.

Palavras-chave: Incêndio. Código computacional. Análise termoestrutural.

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF COMPUTATIONAL CODE FOR ANALYSIS OF STEEL STRUCTURES IN FIRE SITUATION

Abstract

This work consists of the development of a computational code, with basis in the finite element method, for thermo-mechanical analyses of steel frame structures when exposed to typical thermal actions of fire situations. A first stage, already concluded, consists of the elaboration of code for two-dimensional thermal analysis of structural elements cross-sections. One second stage will consist of the elaboration of code for transference of the temperature field for coupled analysis with computational codes of structural analysis, developed with basis in the positional formulation of the finite element method. One third stage will deal with the validation of such codes and the application to typical analyses case of steel frame structures in fire situation.

Keywords: Fire. Computacional code. Thermomechanical analysis. Numerical analysis

Linha de Pesquisa: Estruturas Metálicas

1 INTRODUÇÃO

Dentro do contexto experimental, a análise de estruturas submetidas a ações térmicas típicas de incêndio tem como notável característica um elevado tempo de execução e, conseqüentemente, um custo considerável. Por essa razão, há atualmente um grande interesse na adoção e aplicação de ferramentas alternativas, como por exemplo, códigos computacionais com base em métodos

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, ronbello@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, jmunaiar@sc.usp.br

³ Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, hbcoda@sc.usp.br



numéricos (como o método dos elementos finitos – MEF, por exemplo), que possibilitem simular adequadamente o comportamento de estruturas em situação de incêndio.

Apesar da existência de pacotes computacionais elaborados como base no MEF, como o ANSYS, o ABAQUS, o ADINA, o DIANA, entre outros similares, estes têm como desvantagem a necessidade de alto investimento inicial, tanto quando de sua aquisição, como para treinamento de um analista especializado em razão da complexidade de tais pacotes. Além disso, existem os custos de manutenção das licenças e os salários do especialista, o que torna esta opção ainda mais onerosa.

Existem código dedicados a análise de estruturas em situação de incêndio entre os quais podem ser citados o ADAPTIC, o FEAST, o SAFIR, o VULCAN, entre outros similares. Tais códigos apresentam uma melhor relação custo-benefício quando o assunto em questão é a análise estrutural em situação de incêndio. Porém, geralmente possuem limitações em relação aos tipos e quantidade de elementos finitos disponíveis para análise, bem como são poucas as opções para se lidar com não linearidades dos tipos geométrica e de material, necessárias dentro do contexto das análises em elevadas temperaturas.

Diante dos aspectos mencionados, buscando melhorar a relação benefício-custo, este trabalho propõe o desenvolvimento de um código computacional, com base no método dos elementos finitos, cujo objetivo é permitir realizar análises termo-mecânica de estruturas de aço aporticadas quando expostas às ações térmicas típicas de situações de incêndio na prática da construção civil.

2 METODOLOGIA

Análises térmicas em sólidos, realizadas por meio de código computacional, têm por base a equação diferencial do balanço de energia (num volume de controle), equação (1.1), tal como apresentada em LIENHARD IV e LIENHARD V (2005). Maiores detalhes quanto a aplicação equação (1.1) com solução pelo Método dos Elementos Finitos pode ser identificada em bibliografia especializada, tais como LEWIS, NITHIARASU e SEETHARAMU (2004) e REDDY (2004).

$$\underbrace{\rho c \frac{\partial T}{\partial t}}_{\text{energia armazenada}} = \underbrace{k \nabla^2 T}_{\text{condução}} + \underbrace{\dot{q}}_{\text{geração de calor}} \quad (1)$$

O código computacional para análises térmicas, com base na equação (1), foi desenvolvido por meio da linguagem DELPHI e programação orientada a objetos (POO). Depois de elaborado e validado o código de cálculo para análises térmicas, parte-se para a segunda etapa do trabalho, que trata do acoplamento termoestrutural com códigos desenvolvidos ou em desenvolvimento.

Nas análises termoestruturais serão utilizados códigos de cálculo de elemento finitos de pórtico laminado 3D, que tem por base a formulação posicional apresentada em CODA (2008). O método dos elementos finitos posicional tem por base o princípio da mínima energia potencial e a posição dos nós dos elementos finitos, ao invés de deslocamentos, empregada usualmente formulação tradicional de elementos finitos. Tal formulação tem como característica principal ser de natureza não-linear geometricamente exata sendo, portanto, bastante adequada à resolução de problemas que envolvam tal não-linearidade, como é o caso da análise de estruturas em situação de incêndio.

Análise de estruturas em situação de incêndio com o emprego de código com base na formulação posicional é inovadora. Além disso, emprego de elementos de pórtico laminados 3-D possibilitará a análise de estruturas aporticadas com esforço computacional reduzido quando comparado com a modelagem do mesmo sistema estrutural com elementos do tipo sólido.



3 DESENVOLVIMENTO

Uma primeira etapa, já concluída, consistiu na elaboração de código para análise térmica bidimensional da seção transversal de elementos estruturais, que poderá ser empregado em problemas além daqueles voltados à engenharia de segurança contra incêndio, por meio da definição de ações térmicas genéricas de geração de calor interno, fluxo de calor, convecção e radiação. Tal código é denominado genericamente por CAT.

Uma segunda etapa consistirá na elaboração de código para transferência do campo de temperaturas para análises acopladas com códigos computacionais de análise estrutural, desenvolvidos ou em desenvolvimento pelo GMEC (Grupo de Mecânica Computacional do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC/USP). Além disso, esta mesma etapa prevê a adaptação dos modelos constitutivos de tais códigos computacionais para lidar com as curvas tensão-deformação típicas das análises de estruturas em situação de incêndio.

Uma terceira etapa tratará da validação dos códigos e da aplicação destes em análises de estruturas em situação de incêndio, considerando, quando possível, sua aplicação em estudos de casos de edificações reais já construídas ou em construção, para fins de verificação do mesmo em casos voltados à prática das construções.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Neste item apresentam-se os resultados obtidos com o código para análises térmicas (CAT) em um exemplo de validação. O exemplo de validação trata da análise térmica de uma viga aço, constituída por perfis formados a frio de aço com seção transversal tipo “caixão”, sob laje de concreto e sobre parede de alvenaria em situação de incêndio-padrão, analisada em REGOBELLO, MUNAIAR NETO e SILVA (2007). A análise térmica apresentada no referido trabalho foi efetuada com os programas ANSYS e TCD v5.5 (ANDERBERG, 1997), cujos resultados serão confrontados com aqueles obtidos com o CAT. A geometria da seção transversal da viga em questão, juntamente com a alvenaria, é apresentada nas figuras 1a e 1b.

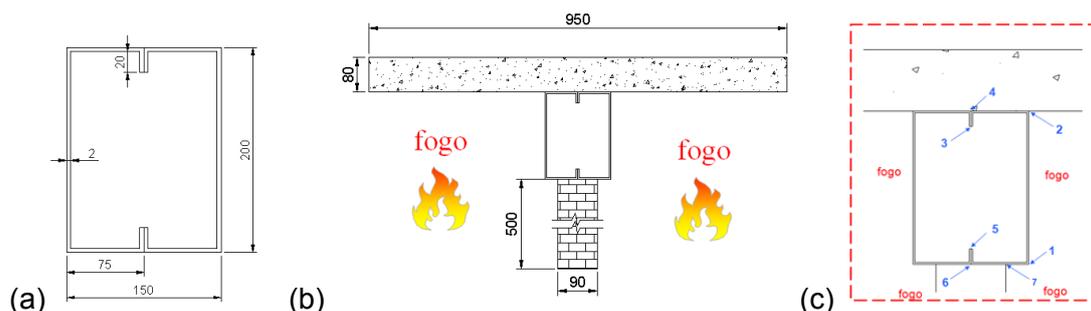


Figura 1 – Viga mista de aço e concreto: (a) Dimensões da seção transversal das vigas e (b) Esquema geral e dimensão da laje e alvenaria.

A ação térmica na viga é determinada de acordo com a curva de incêndio-padrão ISO 834, cuja exposição ao fogo é dada de acordo com a ilustração da figura 1b. As propriedades dos materiais e condições de contorno aplicáveis podem ser vistas em REGOBELLO, MUNAIAR NETO e SILVA (2007). A localização de alguns pontos de interesse para obtenção dos resultados de elevação de temperatura na análise é apresentada na figura 1c e os resultados são apresentados nas figuras 2 e 3.



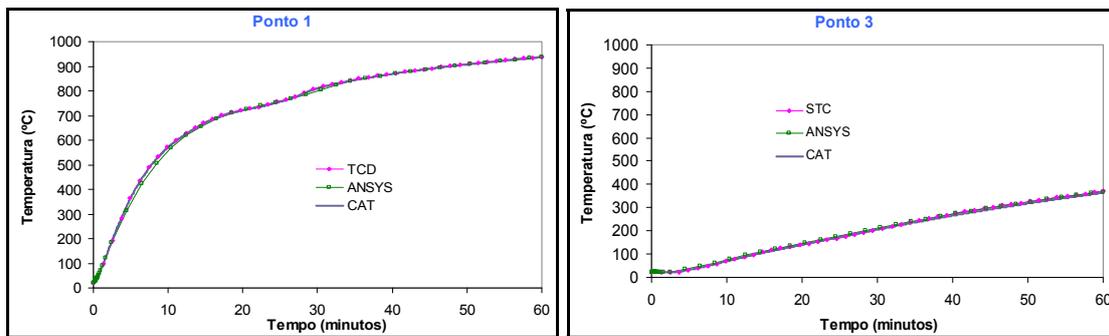


Figura 2 – Variação da temperatura com o tempo nos ponto 1 e 3.

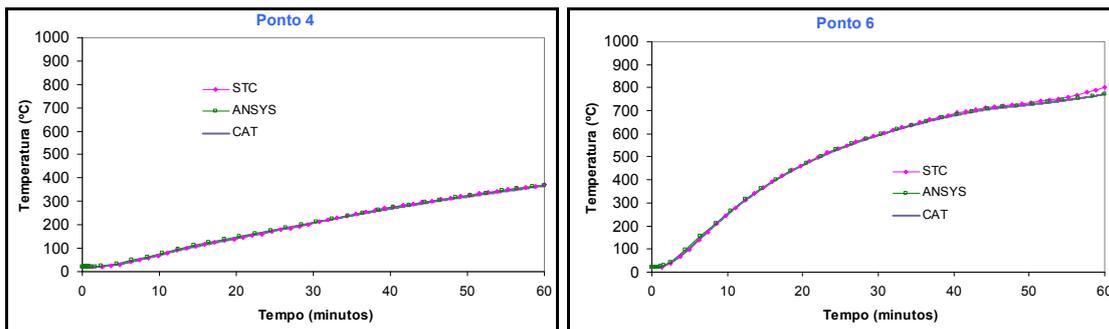


Figura 3 – Variação da temperatura com o tempo nos ponto 4 e 6.

Os resultados obtidos da análise térmica com os três programas, ANSYS, TCD v5.5 e CAT podem ser analisados por meio das figuras 2 e 3. Com a análise dos resultados pode-se concluir, por comparação, a eficiência do código CAT na análise deste tipo de modelo.

5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Os resultados obtidos com o código de análise térmica, aqui preliminarmente denominado CAT, se mostraram bastante satisfatórios. Este código fornecerá o campo de temperaturas para futuras análises acopladas do tipo termomecânicas, utilizando código de análise estrutural que tem por base a formulação apresentada em CODA (2008).

Isso possibilitará a realização de análises de estruturas apertadas em situação de incêndio, ao contrário da análise de elementos isolados como usualmente feito. Tal tipo de análise permitirá levar em conta, de maneira adequada, as solicitações que porventura venham a surgir em resposta à elevação de temperatura nos elementos, ocasionadas pelo impedimento às dilatações e rotações em consequência da interação entre os elementos do sistema estrutural.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio e suporte à pesquisa.

7 REFERÊNCIAS

ANDERBERG, Y. **TCD 5.0 edition**: user's manual. Lund: Fire Safety Design, 1997.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14323**: Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1999.

CODA, H. B. An Enhanced Positional Finite Element Formulation for Geometrical Non-Linear Analysis of Three-Dimensional Laminate Frames. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL STRUCTURES TECHNOLOGY, 2008, Atenas. Edinburgo: Civil Comp Press, 2008.

CODA, H. B. **Análise não linear geométrica de sólidos e estruturas: uma formulação posicional baseada no MEF**. Tese (Texto complementar para concurso de professor titular). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003

LEWIS, R. W.; NITHIARASU, P.; SEETHARAMU, K. N. **Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2004.

LIENHARD IV, J. H.; LIENHARD V, J. H. **A heat transfer Textbook**. Massachusetts: Phlogiston Press, 2005.

REDDY, J. W. **An Introduction to nonlinear finite element analysis**. Oxford: Oxford University Press, 2004.

REGOBELLO, R.; MUNAIAR NETO, J.; SILVA, V. P. Análise termestrutural de vigas biengastadas constituídas por perfis formados a frio em situação de incêndio. In: CMNE/CILAMCE 2007. Porto: APMTAC/FEUP, 2007.



ANÁLISES NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO COMPRIMIDOS SUBMETIDOS À TEMPERATURAS ELEVADAS

Saulo José de Castro Almeida¹ & Jorge Munaiar Neto²

Resumo

A crescente utilização dos perfis de aço formados a frio na construção civil brasileira motivou a elaboração de procedimentos normativos que subsidiassem o dimensionamento desses perfis em temperatura ambiente e, mais recentemente, em situação de incêndio. Porém, embora haja o entendimento da necessidade de estudar o comportamento de elementos e estruturas em aço formado a frio em temperaturas elevadas, tal conhecimento ainda está sendo construído, o que pode ser evidenciado pelo pequeno número de pesquisas desenvolvidas até o momento. Esse trabalho busca ampliar o entendimento do comportamento de perfis de aço formados a frio em temperaturas elevadas via análises, experimental e numérica.

Palavras chave: Análise estrutural. Perfis de aço formados a frio. Análise experimental. Análise numérica. Temperaturas elevadas.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF COMPRESSED COLD FORMED STEEL MEMBERS SUBMITTED TO HIGH TEMPERATURES

Abstract

The increasing use of cold formed in Brazil led to the development of design codes that supports the design of these members at room temperature. On the other hand, although the necessity of studying the behavior of elements and structures in cold-formed steel at elevated temperatures is known, such knowledge is still being built, which is evidenced by the small number of researches carried out until now. This work seeks to increase the understanding of the behavior of cold-formed steel members at elevated temperatures via analyses, experimental and numerical.

Keywords: Structural analysis. Cold formed steel columns. Experimental analysis. Numerical analysis. Fire situation.

Linha de Pesquisa: Estruturas Metálicas

1 INTRODUÇÃO

Os Perfis de aço formados a frio consistem de tema de grande importância no contexto da construção metálica brasileira, devido à crescente aplicação desses mesmos elementos nas estruturas e em demais componentes estruturais secundários, bem como em razão da necessidade e importância de publicações e pesquisas no país, compatíveis com o material e os perfis aqui empregados.

Como consequência da diversidade da utilização dos perfis formados a frio na construção civil, algumas estruturas metálicas construídas com estes perfis necessitam preencher requisitos mínimos

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, saulojca@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, jmunaiar@sc.usp.br



quando da análise de seu desempenho (resistência, deformabilidade, capacidade portante, etc.) quando submetidos a temperaturas elevadas. Em outras palavras, tais elementos, ou mesmo sistemas estruturais constituídos por esses, evidenciam a necessidade de investigação estrutural mais aprofundada nesta condição.

Alguns aspectos de grande relevância para os perfis formados a frio, como por exemplo, os fenômenos referentes às instabilidades, local ou por distorção, são razoavelmente conhecidos em temperatura ambiente, muito embora mais pesquisas ainda estejam sendo desenvolvidas com o objetivo de aprimorar este conhecimento. Por outro lado, pesquisas realizadas sobre os perfis formados a frio em temperaturas elevadas são bastante recentes no contexto nacional, e o comportamento dos elementos estruturais em situação de incêndio é ainda pouco conhecido. Os atuais métodos de cálculo muitas vezes requerem o uso de materiais de proteção ao fogo de custo elevado para proteger a estrutura da excessiva elevação do calor durante o incêndio, conduzindo a projetos antieconômicos, conforme menciona Kaitila (2000).

No Brasil, a publicação das normas ABNT NBR 6355:2003 – Perfis estruturais de aço formados a frio e a ABNT NBR 14762:2001 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio, são exemplos dos avanços alcançados na busca pela regulamentação adequada quanto à fabricação e emprego dos perfis formados a frio. Todavia as especificações concernentes ao dimensionamento relacionadas às normas brasileiras mencionadas são para temperatura ambiente.

No âmbito das temperaturas elevadas, a norma brasileira ABNT NBR 14323:1999 pode ser considerada como o avanço mais expressivo quanto ao dimensionamento de estruturas metálicas e mistas de aço concreto em situação de incêndio. Contudo, seus procedimentos simplificados de dimensionamento são voltados especificamente para os perfis pesados (laminados e soldados) e, dentro de certas restrições, podem ser utilizados para os perfis formados a frio. Portanto, trata-se de um documento normativo para o qual os perfis formados a frio deverão se adequar enquanto procedimento simplificado, elaborado para contemplar as peculiaridades dos perfis formados a frio apenas em contexto de análises avançadas (experimental e numérica).

A proposta do presente trabalho é desenvolver análises em campo experimental e em contexto numérico, buscando abordar satisfatoriamente o comportamento estrutural de perfis de aço formados a frio submetidos à compressão axial, com seção do tipo U simples (e eventualmente U enrijecida), em concordância com Almeida (2007), investigando a resposta estrutural e mecanismos de colapso em temperaturas elevadas, com vista a uma possível adequação de procedimentos simplificados de dimensionamento propostos pela norma brasileira ABNT NBR 14323:1999.

2 METODOLOGIA

A fim de alcançar os objetivos do presente trabalho, serão realizadas investigações numéricas e experimentais, compreendidas em três etapas conforme seqüência descrita na Figura 1. Em síntese, representa uma investigação do tipo “Numérica → Experimental → Numérica” com vistas à calibração de modelos numéricos (propostos e de interesse) a partir de resultados experimentais de barras isoladas totalmente envoltas pelo fogo, com posterior extrapolação destes resultados por meio de análises numéricas paramétricas.

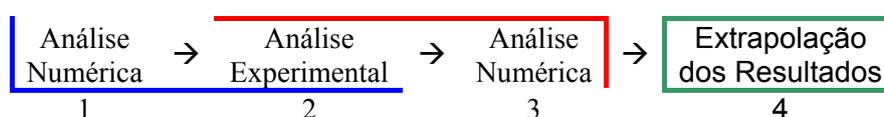


Figura 1 – Esquema geral do delineamento das análises.



Primeiramente, serão realizadas investigações numéricas de caráter exploratório, etapa 1, cujo objetivo é estudar o comportamento de barras de aço formadas a frio submetidas à compressão em temperaturas elevadas, identificando possíveis modos de falhas característicos deste elemento estrutural, bem como sinalizar aspectos de interesse a serem observados nas investigações experimentais.

Em seguida realizar-se-ão investigações experimentais, etapa 2, em que serão ensaiados perfis de aço formados a frio com seção U simples e, eventualmente U enrijecido, com dimensões das seções e comprimentos efetivos previamente estabelecidos, comprimentos estes que representem de maneira geral a gama de comprimentos plausíveis de serem encontrados na prática da construção. Os resultados experimentais obtidos servirão de referencial para calibração dos modelos numéricos construídos.

Na seqüência, etapa 3, os resultados da investigação experimental serão confrontados com aqueles obtidos numericamente na fase exploratória, etapa 1, avaliando a capacidade do modelo numérico em reproduzir o comportamento do elemento estrutural de forma satisfatória.

De posse dos modelos numéricos aferidos mediante resultados experimentais, parte-se para a última etapa de análises, etapa 4, que será realizada em caráter estritamente numérico e analítico. Esta etapa compreende: (i) análises paramétricas, com objetivo de avaliar a redução da força última das barras quando submetidas a elevadas temperaturas para alguns valores de comprimento efetivo e esbeltez local; (ii) análises de sensibilidade às imperfeições geométricas, para avaliar a influência das imperfeições geométricas na resposta estrutural de barras comprimidas submetidas a temperaturas elevadas; e (iii) Avaliação dos procedimentos de cálculo da NBR 14762:2001, cuja finalidade é examinar se o procedimento de cálculo para perfis formados a frio submetidos à compressão em temperatura ambiente apresentados na ABNT NBR 14762:2001 pode ser utilizado para dimensionar barra comprimidas em temperaturas elevadas, mediante alterações na resistência ao escoamento e módulo de elasticidade por fatores de redução de resistência.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Análise experimental

O desenvolvimento do programa experimental está inicialmente previsto para ser realizado no laboratório de Estruturas da UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas, no qual está instalado um forno para altas temperaturas (até aproximadamente 1200 °C) acoplado a uma prensa com capacidade de carga de até 500 toneladas, conforme ilustra a Figura 2. Todavia, é possível que tal programa seja desenvolvido no próprio laboratório de estruturas da EESC - Escola de engenharia de São Carlos, tendo em vista que o projeto temático FAPESP: 2006/06742-5 intitulado: **SEGURANÇA DAS ESTRUTURAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO** contempla a construção de um forno nas instalações da EESC.

A condição de vinculação a ser adotada será birotulada e a força de compressão será admitida concentrada e centrada. Serão contempladas as seguintes etapas no programa experimental:

- I) Primeiramente realizar-se-ão ensaios preliminares em temperatura ambiente, para fins de determinar a força última resistente das barras comprimidas, que será usado como valor referencial para os ensaios em temperatura elevadas.
- II) Posteriormente, serão realizados ensaios para determinar a redução da resistência sofrida pelas barras comprimidas quando submetidas a temperaturas elevadas.



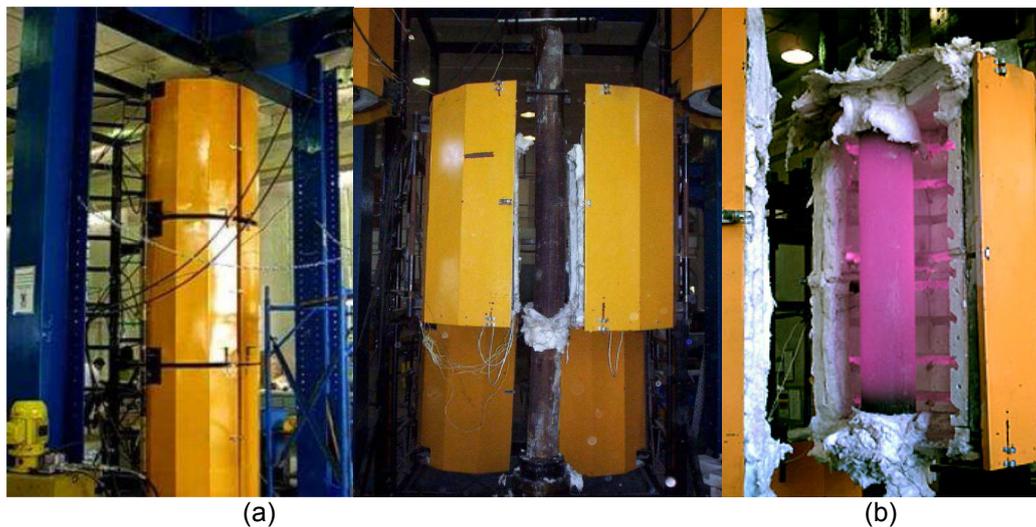


Figura 2 – Fornos Existentes na UNICAMP: (a) Forno principal com pórtico de reação e (b) Forno para corpos de prova.

3.2 Análise numérica

A modelagem numérica será viabilizada pela utilização do programa ANSYS ou similares. No sentido de avaliar a eficiência dos modelos numéricos elaborados, os resultados numéricos a serem obtidos, serão confrontados com resultados obtidos por meio de análises experimentais a serem desenvolvidas, bem como com os resultados apresentados na literatura.

4 RESULTADOS ESPERADOS

Como resultado do presente trabalho, espera-se obter uma estratégia de análise numérica não linear para perfis formados a frio em temperaturas elevadas, considerando as imperfeições geométricas global de flexão e localizadas, de modo a subsidiar a obtenção satisfatória da força normal resistente de compressão. Além disso, pretende-se contribuir com o desenvolvimento do conhecimento experimental dos perfis de aço formados a frio em temperaturas elevadas no Brasil, e se possível, fornecer subsídios para normalização frente à ABNT NBR 14323:1999 – Dimensionamento de Estruturas de Aço – Procedimento, no que diz respeito aos perfis de aço formados a frio submetidos à compressão.

5 AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela bolsa de Doutorado concedida, e ao Departamento de Estruturas da EESC pelo apoio fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa.

6 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, S. J. C. **Análise numérica de perfis de aço formados a frio comprimidos considerando imperfeições geométricas iniciais**. 2007. 206 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6355**: Perfis estruturais de aço formados a frio. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14323**: Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio – Procedimento. Rio de Janeiro, 1999.

KAITILA, O. Imperfection Sensitivity Analysis of Lipped Channel Columns at High Temperatures. **Journal of Structural Steel Research**, v. 58, n. 3, p. 333-351, 2002.



ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE BARRAS EM DUPLA CANTONEIRA DE AÇO FORMADAS A FRIO SUBMETIDAS À COMPRESSÃO

Wanderson Fernando Maia¹ & Maximiliano Malite²

Resumo

Apresenta-se no trabalho uma análise numérica sobre o comportamento de barras em dupla cantoneira com travejamento em quadro (battened system), submetidas à compressão centrada e excêntrica. Os resultados da análise numérica obtidos até o momento mostraram que para as barras submetidas à compressão centrada a adição de chapas separadoras pouco aumentou a força resistente das barras, pelo contrário, em alguns casos reduziu, principalmente para barras com grandes imperfeições geométricas. Para as barras submetidas à compressão excêntrica, fato que ocorre na prática, a presença das chapas separadoras aumentou de forma significativa a força resistente das barras, porém para grandes imperfeições geométricas o aumento do número de chapas separadoras também foi prejudicial.

Palavras-chave: Estruturas de aço. Perfis de aço formados a frio. Dupla cantoneira.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF COLD-FORMED STEEL DOUBLE ANGLE MEMBERS UNDER COMPRESSION

Abstract

In this work it is presented a numerical analysis on the behavior of double-angle members in battened system, subjected to centered and eccentric compression. The results obtained from the numerical analysis so far have shown that for members under centered compression adding batten plates the nominal axial strength of the members increased little, on the contrary, in some cases it was reduced, especially for members with large geometrical imperfections. For the members under eccentric compression, event that happens in the practice, the presence of the batten plates increased significantly the nominal axial strength of the members, but for large geometric imperfections the increase of the number of batten plates was also harmful.

Keywords: Steel structures. Cold-formed steel members. Double-angle.

Linha de Pesquisa: Estruturas Metálicas

1 INTRODUÇÃO

Barras compostas em dupla cantoneira são constituídas por duas seções idênticas dispostas paralelamente, ligeiramente separadas e ligadas uma a outra apenas em alguns pontos ao longo do comprimento, por meio de chapas separadoras (Figura 1a). O sistema aqui apresentado é bastante utilizado em barras de treliças, no entanto, não existem estudos específicos sobre o seu comportamento. Além disso, cantoneiras simples submetidas à compressão apresentam comportamento estrutural bastante interessante se comparado com o comportamento dos demais perfis. Ao se fazer uma análise de estabilidade elástica observa-se dois modos críticos: (i) modo global

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, wfmaia@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, mamalite@sc.usp.br



de flexão, no caso de barras longas e (ii) um modo coincidente local-chapa/global de flexo-torção, que é crítico para barras de menor comprimento (Maia (2008)). Com isso, torna-se interessante estudar o comportamento de barras em dupla cantoneira, já que neste caso, além dos modos de instabilidade nas barras isoladas, pode ocorrer instabilidade da barra composta em função da presença de chapas separadoras, que tendem a melhorar o comportamento do sistema.

O objetivo do trabalho é investigar o comportamento de barras compostas em dupla cantoneira com travejamento em quadro (battened system), por meio de análises numérica e experimental. Inicialmente foi realizada uma análise numérica, via Ansys (1997), de modo a identificar os possíveis modos de instabilidade que podem ocorrer. Nessa análise variou-se o número de chapas separadoras buscando estudar a eficiência das mesmas na força resistente à compressão das barras. Os resultados obtidos mostraram a necessidade de se aprofundar os estudos para uma melhor compreensão dos fenômenos associados a essas barras, principalmente para compressão excêntrica.

2 ANÁLISE NUMÉRICA

As simulações numéricas via método dos elementos finitos foram realizadas utilizando o programa Ansys (1997). Foi utilizado o elemento Shell 181 para modelagem do perfil, das chapas separadoras e dos dispositivos de extremidade. Os dispositivos de apoio permitiram rotação em torno do eixo x, porém restringindo rotação em torno do y e do eixo longitudinal. Para aplicação da força foi criada uma linha passando pelo CG da seção. Todos os nós da linha tiveram o deslocamento acoplado na direção longitudinal. Para inserção das imperfeições geométricas iniciais foi realizada uma análise de autovalor/autovetor, buscando identificar os modos críticos isolados. A partir da configuração deformada referente a cada um dos modos críticos escolhidos para cada caso, foi adotado um critério a fim de se aumentar ou reduzir esta amplitude, obtendo assim uma nova geometria dos nós da malha de elementos finitos da barra. Vale frisar que houve uma sobreposição das imperfeições geométricas, procurando sempre a combinação mais desfavorável.

Para as imperfeições geométricas associadas ao modo local foram utilizados os resultados da análise probabilística CDF (função de distribuição cumulativa estimada) apresentados por Schafer & Peköz (1998), referentes às imperfeições em elementos com bordas apoiadas e elementos com borda livre. Para a imperfeição geométrica associada ao modo de flexão foi adotado o valor de $L_b/1500$. Porém, para as barras submetidas à compressão excêntrica em que não se adotou imperfeição local, também não se adotou imperfeição de flexão.

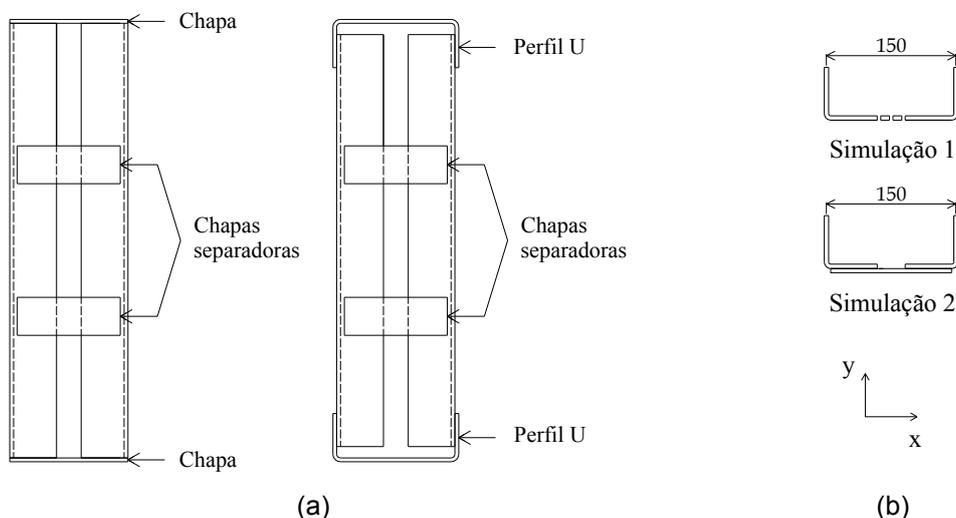


Figura 1 – (a) Visão geral da seção composta em dupla cantoneira e (b) simulações realizadas (dimensões em mm).



Foram analisadas três seções: 2L 60x1,50; 2L 60x3,00 e 2L 60x6,00. Para barras submetidas à compressão centrada foram realizadas duas simulações: na simulação 1 prolongou-se a aba na posição das chapas separadoras, enquanto na simulação 2 foram inseridas chapas separadoras na parte externa dos perfis (Figura 1b). Para o modelo com força aplicada na aba por meio do perfil U foi realizada apenas a simulação 1 até o momento. Para a simulação 1 também foi modelado o perfil U equivalente, para fins de comparação dos resultados.

3 RESULTADOS OBTIDOS

Na Figura 2 são apresentados alguns dos resultados obtidos na análise de sensibilidade às imperfeições geométricas do perfil 2L 60x3,00.

Os resultados mostraram que para as barras submetidas à compressão centrada, as duas simulações apresentaram valores muito próximos. Além disso, observou-se que as barras isoladas, sem chapas separadoras, foram pouco sensíveis à amplitude das imperfeições, fato observado por Maia (2008). Ao aumentar o número de chapas separadoras observou-se uma redução na força normal resistente das barras, principalmente para maiores imperfeições geométricas. Essa redução pode estar ligada ao fato de que ao aumentar o número de chapas separadoras, há um deslocamento do centróide da seção e ao se adicionar as imperfeições geométricas há uma sobreposição dos efeitos.

Para as barras submetidas à compressão excêntrica observou-se que para as barras isoladas ao se inserir imperfeições geométricas não há convergência dos modelos, fato observado em todas as análises realizadas. Neste caso, já existe uma imperfeição inicial em função da excentricidade da força, que é aplicada na aba das cantoneiras. Ao se introduzir as chapas separadoras observou-se um significativo aumento na força normal resistente, porém, ao se aumentar o número de chapas separadoras houve redução na força normal resistente, assim como nos modelos submetidos à compressão centrada.

Na Figura 3 é ilustrado um dos resultados da análise numérica de barra com imperfeições geométricas para o perfil 2L 60x3,00. Na mesma figura é apresentada a distribuição de tensões de Von Mises (kN/cm^2) no instante em que a barra atinge a força máxima.



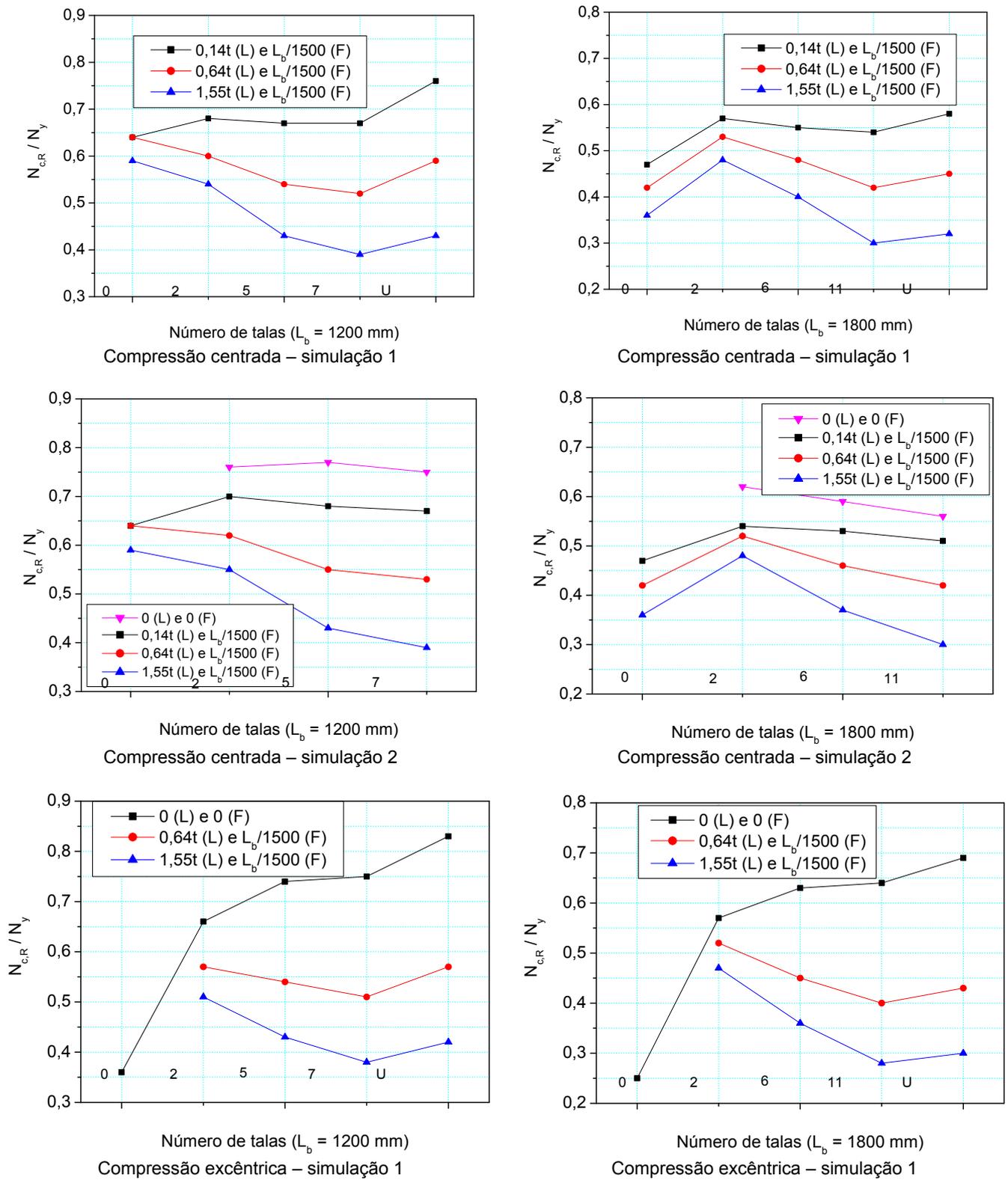


Figura 2 – Análise de sensibilidade às imperfeições geométricas: perfil 2L 60x3,00



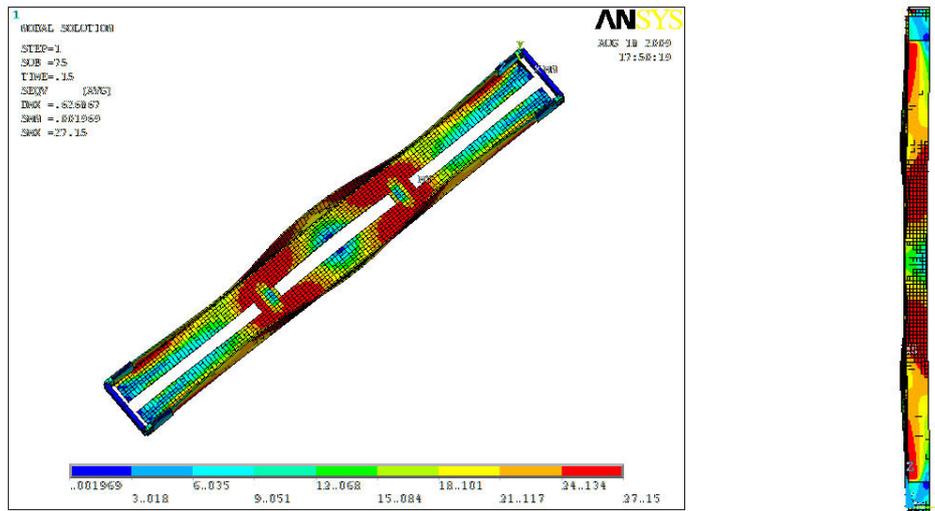


Figura 3 – Análise numérica de barra com imperfeições geométricas e distribuição de tensões de Von Mises: perfil 2L 60x3,00 ($L_b = 1200$ mm – Compressão excêntrica – Simulação 1)

4 CONCLUSÕES PARCIAIS

Os resultados obtidos até o momento mostraram que a presença das chapas separadoras não melhorou o comportamento das barras submetidas à compressão centrada, pelo contrário, em alguns casos foram prejudiciais. Observou-se que as chapas separadoras foram pouco solicitadas em função dos modos de instabilidade observados. Porém, na prática as barras resultam submetidas à compressão excêntrica e neste caso as chapas separadoras melhoraram de forma significativa o comportamento das barras, como mostrado na análise numérica.

Com isso, entende-se que seja necessário um aprofundamento na análise numérica e a realização de uma análise experimental para uma melhor compreensão dos fenômenos associados a essas barras, principalmente para compressão excêntrica.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelos recursos financeiros concedidos.

6 REFERÊNCIAS

ANSYS. **Structural nonlinearities: user's guide for revision 5.5**. Houston, 1997. v.1.

MAIA, W. F. **Sobre a estabilidade de cantoneiras de aço formadas a frio submetidas à compressão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SCHAFFER, B. W.; PEKÖZ, T. Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 47, p. 193-210, 1998.



ESTUDO DA TÉCNICA DE DOPAGEM DE AGREGADOS EM CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO

Ana Paula Moreno Trigo¹ & Jefferson Benedicto Libardi Liborio²

Resumo

No Brasil há grandes regiões onde não se encontram agregados ideais para aplicação em concretos estruturais, tornando as obras onerosas devido à busca de materiais. Uma solução para essa problemática é a técnica de dopagem dos agregados, que consiste em sua impregnação inicial com materiais que reajam com outros aglomerantes, modificando sua textura ou estabelecendo uma ponte de ligação entre ele e os aglomerantes ou criando uma carapaça como proteção e reforço. Este trabalho tem por objetivo demonstrar que se houver a dopagem de agregados, eles poderão vir a ser utilizados em grandes obras com pleno êxito. A técnica permite também que se faça um bom prognóstico para o uso de agregados em nova conformação superficial, alterando-se seu comportamento a ponto de torná-lo quase ideal para uso em concreto.

Palavras-chave: Agregados. Dopagem. Concreto. Alto desempenho. Durabilidade.

STUDY OF DOPING TECHNIQUE IN AGGREGATES FOR HIGH PERFORMANCE CONCRETES

Abstract

In Brazil there are large areas where aggregates are not ideal for use in structural concrete, resulting in expensive works by the search for materials. One solution to this problem is to apply the doping technique, which involves the initial impregnation of aggregate with materials that may react with other binders, changing the aggregate texture or establishing a bridge between him and the binders or creating a shell as protection and reinforcement. This study aims to demonstrate that if have the aggregates doping, they could be used in large projects with great success. The technique also allows making a good prognosis for the use of aggregates with new surface, changing their behavior as to render it an almost ideal for use in concrete.

Keywords: Aggregates. Doping. Concrete. High performance. Durability.

Linha de Pesquisa: Materiais e Mecânica dos Materiais

1 INTRODUÇÃO

No Brasil há grandes regiões em que não se encontram os agregados ideais para aplicação na execução de concretos estruturais, tornando-se muito onerosas as obras, pelas distâncias envolvidas na busca de materiais. Há registros de áreas de empréstimo para execução de obras com mais de 300 km de distância, aumentando-se em muito o custo das estruturas, mormente aquelas de grandes volumes de concreto, por outro lado, em algumas situações, inviabilizando a execução de outras, com a utilização desse material.

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, apmtrigo@sc.usp.br

² Professor e Coordenador do Laboratório de Materiais Avançados à Base de Cimento da EESC-USP, liborioj@sc.usp.br



Também se tem observado em obras de diversas tipologias que, mesmo havendo disponibilidade de agregados, não são contempladas todas as hipóteses de projeto, pela própria deficiência. Noutras regiões não se dispõem de agregados britados, havendo unicamente a existência de seixos rolados, que perdem muito em aderência à pasta de cimento Portland. Há as jazidas de outros materiais sem qualquer expectativa de uso em obras, quer pela qualidade ou pela carência de informações mais científicas que comprovem a real possibilidade de uso desses materiais em obras de responsabilidade, como, as concreções lateríticas.

Neste contexto, a aplicação da técnica de dopagem de agregados, que consiste em estabelecer sua impregnação inicial com materiais que venham reagir com outros aglomerantes, passa a ser uma solução para as para regiões citadas anteriormente, já que esta técnica permite a modificação da textura do material ou o estabelecimento de uma ponte de ligação entre ele e os aglomerantes que venham a ser utilizados ou, até mesmo, o estabelecimento de uma carapaça como proteção e reforço.

Outra hipótese que a técnica de dopagem permite é a do reforço do próprio agregado, através de sua dopagem interna, dos poros abertos. A experiência já obtida pelo Grupo de Pesquisadores do LMABC-SET-EESC-USP tem demonstrado que é possível “armar” os agregados a ponto de constituírem concretos com mais de 50MPa, reforçando-se a matriz e melhorando a zona de interface.

Assim, de posse desse conhecimento e da aplicação da técnica de dopagem com aglomerantes de alto desempenho pretende-se, neste trabalho, utilizar agregados graúdos de origem natural, com deficiências mineralógicas ou físicas, principalmente como substitutos da brita de rocha granítica, na produção de concretos estruturais de elevado desempenho.

2 METODOLOGIA

A avaliação da técnica de dopagem de agregados graúdos em concretos estruturais será feita por meio de caracterização mecânica e análise microscópica destes concretos, ou seja, estudo da resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, todos prescritos por norma, e estudo de microestrutura, através de microscopia eletrônica de varredura com Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS).

Serão estudados concretos constituídos de cimento e sílica ativa disponíveis comercialmente e agregados potencialmente utilizáveis, valorizando a escolha e sinergia destes materiais.

De posse dos resultados de caracterização dos concretos convencionais (executados com agregados graúdos não dopados) e dos concretos executados com agregados dopados, será feita a avaliação da influência da técnica de dopagem no comportamento dos concretos estruturais de elevado desempenho.

3 DESENVOLVIMENTO

Para o desenvolvimento deste trabalho, inicialmente foram avaliados os locais com necessidade de grandes obras e a disponibilidade de agregados que possam ser utilizados com a técnica de dopagem, como os seixos rolados, as concreções lateríticas e os agregados graníticos. Em seguida, foram selecionados os materiais.

Foi escolhido o cimento CPIII 40 RS, com massa específica de $2,96\text{g/cm}^3$, pelo seu desempenho frente a meios agressivos e disponibilidade no mercado brasileiro. A escória além de atribuir resistência a sulfatos, diminui o calor de hidratação e sua maior finura pode contribuir para um aumento na fluidez, o que é de extrema importância para a dopagem dos agregados.



O uso de sílica ativa refina a microestrutura do concreto e a zona de interface entre o agregado e a pasta de cimento com sílica é drasticamente reduzida, levando a um alto desempenho do concreto. Baseado no estudo de Melo (2000), o consumo de sílica ativa foi fixado em 10% em substituição à massa de cimento.

Objetivando redução de água de amassamento em misturas cimentíceas, visando a redução de sua porosidade, foram avaliados dois aditivos superplastificantes, sendo posteriormente escolhido e utilizado o aditivo à base de polímeros policarboxilatos, com densidade de $1,05 \text{ kg/dm}^3$.

Como agregado miúdo, a ser utilizado na confecção dos concretos, foi escolhida uma areia quartzosa de cava proveniente da mineradora Itaporanga, com $D_{\text{máx}}$ igual a 2,4mm, levando-se em conta sua granulometria, disponibilidade comercial na região da cidade de São Carlos e a morfologia das partículas que os compõem.

Os agregados graúdos foram escolhidos após um estudo de pesquisa na internet e outros centros de pesquisas. Como perspectivas de uso, inicialmente foram escolhidos os seixos rolados, as concreções lateríticas e os agregados graníticos.

Após a escolha dos materiais, foi realizada a caracterização dos mesmos, sendo que a do agregado graúdo baseou-se em granulometria, absorção de água e massa específica, massa unitária e volume de vazios e teor de materiais pulverulentos, todos os ensaios prescritos por norma.

A compatibilidade entre o cimento e os aditivos e adição foi feita através do ensaio de Kantro, que consiste na realização de um ensaio de abatimento com uma pequena quantidade de pasta em um minitronco de cone. Foram preparadas seqüências de misturas gerando diferentes composições de pastas, onde se fixaram as quantidades de cimento e relação água/aglomerante, variando-se o teor de aditivo (teores relativos à massa de cimento) de forma a estudar a eficiência da mistura.

O passo seguinte, ainda a ser desenvolvido neste trabalho, é o estudo das soluções com sílica ativa e sua capacidade de impregnação aos agregados selecionados. Pretende-se avaliar três procedimentos de dopagem, a mencionar:

- 1) O agregado será impregnado em solução de água, cimento, aditivo superplastificante retardador e sílica ativa – **calda de alto desempenho**. A homogeneização da mistura em misturadores será realizada em três instantes de tempo, a serem caracterizados em ensaios acessórios e em seguida, serão aplicados os procedimentos normais de fabricação do concreto.
- 2) O agregado será impregnado em solução de água, cimento e aditivo superplastificante retardador – **calda** – e em seguida serão aplicados os procedimentos normais de fabricação do concreto.
- 3) O agregado será impregnado em solução de água e sílica ativa. A matriz cimentante poderá ser uma ou outra conforme itens 1) ou 2).

Para a dosagem dos concretos, será feito o empacotamento dos agregados miúdos e graúdos (NBR NM 45:2006), o estudo dos traços 1:3,5, 1:5,0 e 1:6,5 e a determinação do teor ideal de argamassa pelo método de Helene e Terzian (1992) em “Manual de Dosagem e Controle do Concreto”. O teor de aditivo será fixado para uma consistência do concreto fresco de $130 \pm 20 \text{ mm}$.

Após a caracterização dos concretos nos estados fresco e endurecido, serão confeccionados blocos de concreto, não armado, com espessuras de 40 cm, dos quais serão retirados corpos de prova para comparação de resultados. Dos corpos de prova moldados e daqueles extraídos serão retiradas amostras para avaliações da microestrutura, através da técnica da microscopia eletrônica de varredura com EDS.

4 RESULTADOS OBTIDOS OU ESPERADOS

De posse dos resultados de espalhamento da pasta, “Figura 1”, obtidos do ensaio de Kantro, observou-se que o Aditivo A teve maior compatibilidade com o cimento. Considerando uma área de



espalhamento de 250 cm², com base no estudo de Fagury (2002), e seguindo recomendação do fabricante de utilizar menos de 1,0%, considerou-se o teor de 0,8% do Aditivo A, a ser usado nas pastas de dopagem dos agregados, embora o ponto de saturação tenha ocorrido para o teor de 1,6%.

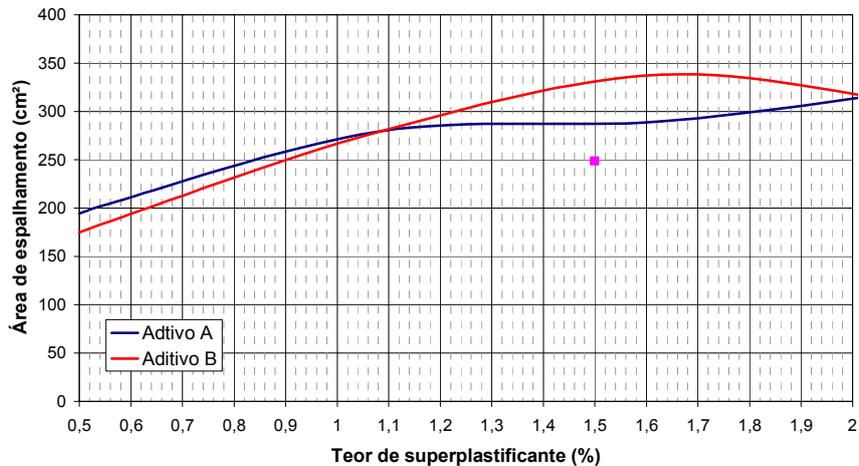


Figura 1 – Representação gráfica dos resultados do ensaio de Kantro.

A capacidade de impregnação da sílica ativa aos agregados será avaliada com auxílio de lupas de até 250 x de aumento e micrografias. A análise dos agregados impregnados a partir dos três procedimentos de dopagem permitirá escolher qual procedimento apresentou o melhor desempenho frente à impregnação.

As características dos concretos confeccionados com agregados dopados, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, serão comparadas com as do concreto convencional com os mesmos materiais sem tratamento.

A avaliação das características da zona de interface aglomerantes-agregados e das condições da dopagem será feita com base na microanálise dos compostos observados naquela região. Ao remover uma quantidade predefinida de agregados da respectiva matriz, poderão ser avaliadas as carapaças que envolvem tais agregados, usando a microanálise dos compostos observados nessa região.

5 CONCLUSÕES PARCIAIS

A técnica de dopagem de materiais, tratada cientificamente, é emergente e deverá solucionar diversos mitos referentes ao uso de outros tipos de agregados, nunca relacionados como adequados aos concretos estruturais, pelo fato da abundância de agregados outrora disponibilizados em grande quantidade em diversos pontos onde emergiram grandes centros urbanos ou onde se fizeram necessárias obras de grande porte.

O presente trabalho dará suporte técnico e científico aos projetistas e àqueles que processam materiais, com a responsabilidade de entregá-los dentro das características almejadas e previstas nos projetos.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela bolsa concedida durante a pesquisa.



7 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

FAGURY, S. C. **Concretos e pastas de elevado desempenho: Contribuição aos estudos de reparos estruturais e ligações entre concretos novo e velho, com tratamento da zona de interface**. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – EESC/IFSC/IQSC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. Editora Pini, Brasília, DF, 1992.

MELO, A. B. **Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland**. 2000. Tese (Doutorado) – EESC/IFSC/IQSC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.



ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE UM SÓLIDO ELÁSTICO-LINEAR TRANSVERSALMENTE ISOTRÓPICO VIA MHA E VIA MEF

Edmar Borges Theóphilo Prado¹ & Adair Roberto Aguiar²

Resumo

Neste trabalho utiliza-se o Método de Homogeneização Assintótica (MHA) no estudo de sólidos contendo múltiplas lâminas planas de materiais elástico-lineares periodicamente distribuídas. Os resultados obtidos deste estudo são comparados com resultados obtidos de simulações numéricas utilizando o Método de Elementos Finitos (MEF). Verificou-se que os resultados obtidos via MEF tendem aos resultados obtidos via MHA quando o número de lâminas no sólido tende ao infinito. Este trabalho representa os primeiros esforços no entendimento do comportamento de laminados não-lineares.

Palavras chaves: Laminados. Elasticidade linear. Método de homogeneização assintótica. Método dos Elementos Finitos.

STUDY OF THE BEHAVIOR OF A TRANSVERSELY ISOTROPIC LINEAR ELASTIC SOLID USING AHM AND FEM

Abstract

In this work the Asymptotic Homogenization Method (AHM) is used in the study of solids containing periodically distributed layers of linearly elastic materials. The results of this study are compared with results of numerical simulations using the Finite Element Method (FEM). The results obtained via FEM tend to results obtained via MHA when the number of layers in the solid tend to infinity. This work represents the first effort in the understanding of the behavior of non-linear laminates.

Keywords: Laminates. Linear elasticity. Asymptotic homogenization method. Finite Element Method.

Linha de Pesquisa: Materiais e Mecânica dos Materiais

1 INTRODUÇÃO

O problema fundamental do Método de Homogeneização Assintótica (MHA) consiste em determinar as propriedades efetivas de um meio heterogêneo a partir das soluções de problemas locais sobre um volume representativo elementar (VRE). Veja, por exemplo, Cioranescu e Donato (1999). Estes problemas locais consistem de sistemas de equações diferenciais parciais com condições de fronteira periódicas e condições de continuidade sobre as interfaces das regiões ocupadas pelos diferentes materiais.

Neste trabalho utiliza-se o MHA para homogeneizar um laminado bifásico contendo uma distribuição periódica de lâminas elásticas, lineares e isotrópicas. Em particular, utiliza-se procedimento descrito em Pobodrya (1984) para calcular parâmetros materiais efetivos do sólido homogeneizado resultante. As etapas principais deste procedimento estão descritas na Seção 2.1.

Na Seção 2.2 emprega-se o Método dos Elementos Finitos (MEF) para discretizar o laminado mencionado acima e na Seção 3 comparam-se resultados obtidos com o MHA, os quais estão

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, edmarbt@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, aguiarar@sc.usp.br



relacionados ao comportamento do sólido homogeneizado, com resultados obtidos com o MEF, os quais estão relacionados ao comportamento do laminado contendo um número elevado de lâminas.

2 RESOLUÇÃO DO PROBLEMA VIA MHA E VIA MEF

2.1 Formulação do problema via MHA

Considere um cilindro reto ocupando a região $\Omega = (0,5) \times (0,5) \times (1,0) \subset \mathbb{R}^3$. Um ponto $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3$ é dado pelas coordenadas cartesianas retangulares (x_1, x_2, x_3) . O cilindro é um laminado bifásico contendo uma distribuição periódica de n lâminas elásticas, lineares e isotrópicas e está submetido a um ensaio de tração uniaxial. Na ausência de forças de corpo, o problema correspondente consiste em achar o deslocamento $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)$ que satisfaça as equações de equilíbrio

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \operatorname{div} \mathbf{u} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) = 0 \quad \text{em } \Omega, \quad i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

onde $\operatorname{div} \mathbf{u} = \partial u_i / \partial x_i$ e as constantes de Lamé λ e μ são dadas por

$$\begin{aligned} \lambda &= \lambda^{(1)}, \quad \mu = \mu^{(1)}, & \text{fase 1,} \\ \lambda &= \lambda^{(2)}, \quad \mu = \mu^{(2)}, & \text{fase 2.} \end{aligned} \quad (2)$$

O deslocamento \mathbf{u} satisfaz as condições de contorno

$$\begin{cases} u_i = 0, \quad \sigma_{ij} = 0, \quad j \neq i, & \text{sobre } x_i = 0, \quad i, j = 1, 2, 3, \\ \sigma_{ij} = 0 & \text{sobre } x_i = 0,5, \quad i = 1, 2; \quad j = 1, 2, 3, \\ \sigma_{3j} = 0, \quad j = 1, 2, \quad \sigma_{33} = \sigma & \text{sobre } x_3 = 1, \end{cases} \quad (3)$$

onde σ é um valor conhecido.

O MHA consiste em expressar a solução $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ das equações (1) a (3) como uma expansão assintótica da forma

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \mathbf{u}^\varepsilon(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \mathbf{u}_0(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \varepsilon \mathbf{u}_1(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \varepsilon^2 \mathbf{u}_2(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \dots, \quad (4)$$

onde $\mathbf{y} = \mathbf{x}/\varepsilon$ é uma variável local. Mostra-se que $\mathbf{u}_0(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \mathbf{u}_0(\mathbf{x})$, (Pobedrya, 1984).

Substituindo a Eq. (4) nas equações de equilíbrio (1), agrupando termos que multiplicam a mesma potência de ε e igualando os coeficientes resultantes a zero, obtém-se um sistema de equações para a determinação de \mathbf{u}_i , $i=1, 2, \dots$. Para eliminar o comportamento rapidamente oscilante das variáveis que aparecem nestas equações, introduz-se o operador do valor médio, o qual é definido por

$$\langle f \rangle \equiv \frac{1}{|Y|} \int_Y f \, d\mathbf{y}, \quad (5)$$

onde Y é o VRE, $|Y|$ é o volume de Y e $f: Y \rightarrow \mathbb{R}$.

Aplicando-se o operador definido pela Eq. (5) nas equações obtidas ao se igualar a zero os coeficientes que multiplicam ε^{-1} , obtém-se



$$C_{ijkl}^H \frac{\partial^2 u_{0k}}{\partial x_j \partial x_i} = 0 \quad \text{em } \Omega, \quad i = 1, 2, 3, \quad (6)$$

onde $\mathbf{u}_0 = (u_{0,1}, u_{0,2}, u_{0,3})$ e C_{ijkl}^H são obtidos das soluções de problemas locais definidos sobre o VRE. Pode-se mostrar que estes coeficientes são as constantes elásticas de um sólido transversalmente isotrópico ocupando a região Ω . Os valores não nulos destas constantes são dados por (Pobedrya, 1984)

$$\begin{aligned} C_{1111}^H &= C_{2222}^H = \langle \lambda + 2\mu \rangle + \langle 1/(\lambda + 2\mu) \rangle^{-1} \langle \lambda/(\lambda + 2\mu) \rangle^2 - \langle \lambda^2/(\lambda + 2\mu) \rangle, \\ C_{3333}^H &= 1/\langle 1/(\lambda + 2\mu) \rangle, \quad C_{1133}^H = C_{2233}^H = \langle \lambda/(\lambda + 2\mu) \rangle / \langle 1/(\lambda + 2\mu) \rangle, \\ C_{1212}^H &= 1/2(C_{1111}^H - C_{1122}^H) = \langle \mu \rangle, \quad C_{1313}^H = C_{2323}^H = 1/\langle \mu \rangle. \end{aligned} \quad (7)$$

Deseja-se encontrar o deslocamento $\mathbf{u}_0 = (u_{0,1}, u_{0,2}, u_{0,3})$ que satisfaça as equações de equilíbrio (6) juntamente com as condições de contorno

$$\begin{cases} u_{0i} = 0, \quad \sigma_{0ij}^H = 0, \quad j \neq i, & \text{sobre } x_i = 0, \quad i, j = 1, 2, 3, \\ \sigma_{0ij}^H = 0 & \text{sobre } x_i = 0,5, \quad i = 1, 2; \quad j = 1, 2, 3, \\ \sigma_{03j}^H = 0, \quad j = 1, 2, \quad \sigma_{033}^H = \sigma & \text{sobre } x_3 = 1, \end{cases} \quad (8)$$

onde $\sigma_{0ij}^H = C_{ijkl}^H \frac{\partial u_{0k}}{\partial x_l}$.

A solução do problema homogeneizado (6) e (8) tem a forma

$$u_{0i} = \varepsilon_{ij} x_j, \quad (\text{sem soma sobre } i) \quad (9) \quad \text{onde } \varepsilon_i \text{ é facilmente}$$

determinado das condições de contorno e dado por

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \frac{C_{1133}^H \sigma}{2(C_{1133}^H)^2 - (C_{1122}^H + C_{2222}^H)C_{3333}^H}, \quad \varepsilon_3 = \frac{(C_{1122}^H + C_{2222}^H)\sigma}{-2(C_{1133}^H)^2 - (C_{1122}^H + C_{2222}^H)C_{3333}^H}. \quad (10) \quad \text{Os}$$

resultados obtidos para as tensões e deformações médias em $x_3 = 1$ são apresentados na Figura 2 juntamente com resultados obtidos da solução numérica do problema (1) a (3) utilizando o MEF para um número crescente de lâminas. A obtenção desta solução é descrita a seguir.

2.2 Resolução do problema via MEF

O problema do laminado bifásico contendo n lâminas e correspondendo às equações (1) a (3) foi resolvido via MEF utilizando o pacote computacional Ansys³. Neste trabalho, utilizou-se o elemento finito SOLID187 do Ansys. O SOLID187 é um elemento finito tetraédrico que permite interpolação quadrática dos deslocamentos, sendo adequado para utilização em malhas não uniformes. Este elemento finito é composto por 10 nós e cada nó possui 3 graus de liberdade, correspondendo aos deslocamentos nas direções x_1 , x_2 e x_3 .

Ilustram-se na Figura 1 cilindros de seções transversais retangulares, (Figura 1.a) e circulares (Figura 1.b) contendo diferentes números de lâminas e discretizações utilizando o elemento finito SOLID187. Os números de lâminas e os dados de discretização da Figura 1.a são apresentados na Tabela 1. Os cilindros da Figura 1.b são utilizados para verificar a dependência dos resultados de tensões e deformações com a geometria do sólido.

³ Ansys 5.5 é um software de propriedade da Ansys Inc., PA, USA.



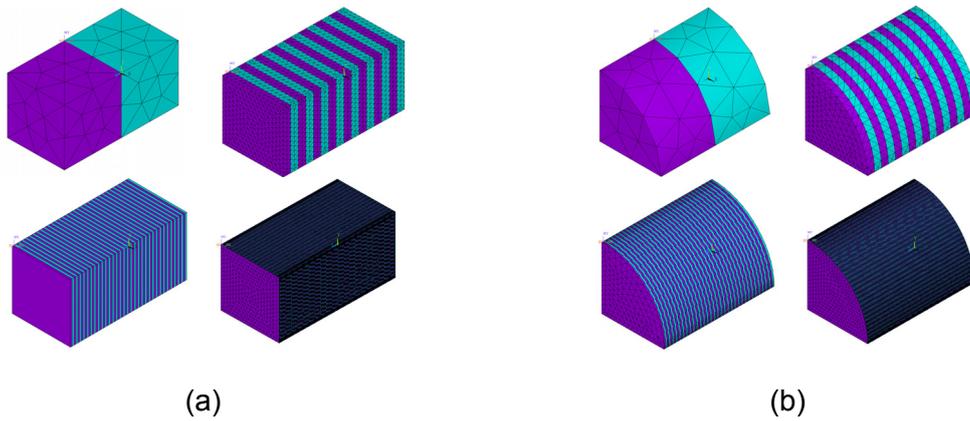


Figura 1 – Cilindros de secção transversal retangular e circular compostos por 2, 16, 64 e 256 lâminas isotrópicas.

Tabela 1 – Malhas empregadas no cilindro de secção transversal retangular

| Malha | Número de Lâminas (n) | Número de Elementos | Número de Nós | Número de Graus de Liberdade |
|-------|-----------------------|---------------------|---------------|------------------------------|
| 1 | 2 | 200 | 425 | 1275 |
| 2 | 16 | 40551 | 59464 | 178392 |
| 3 | 64 | 98239 | 141699 | 425097 |
| 4 | 256 | 500733 | 708492 | 2125476 |

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores utilizados para as constantes de Lamé são $\lambda^{(1)} = 31,034 \text{ MPa}$, $\mu^{(1)} = 3,448 \text{ MPa}$ para a fase 1 (elastômero) e $\lambda^{(2)} = 79,007 \text{ GPa}$, $\mu^{(2)} = 152,007 \text{ GPa}$ para a fase 2 (aço). O empilhamento das lâminas na direção x_3 inicia-se com a lâmina da fase 1.

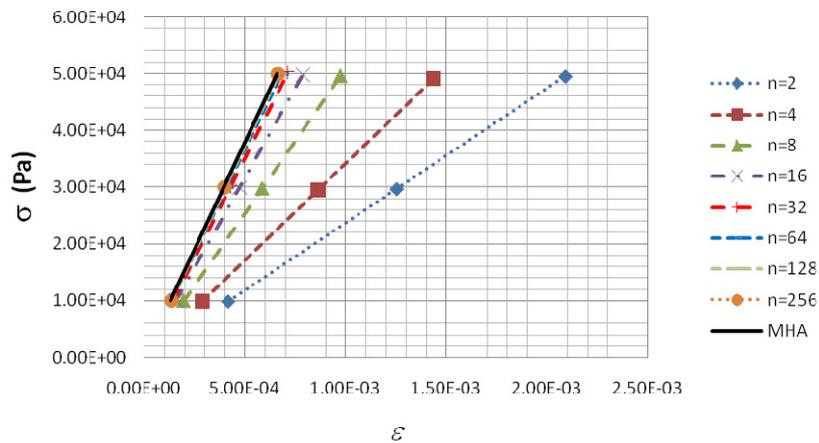


Figura 2 – Curvas tensão (σ) versus deformação (ϵ) em $x_3 = 1$ obtidas via MEF e via MHA para os cilindros de secção transversal retangular.



A Figura 2 apresenta os valores médios de tensão versus deformação obtidos via MEF e via MHA na face $x_3 = 1$. A curva sólida refere-se ao MHA e foi obtida da Eq. (10.b) utilizando $\varepsilon = \varepsilon_3$. As demais curvas referem-se ao MEF. Pode-se observar desta figura que, à medida que o número de lâminas n tende ao infinito, os valores obtidos com o MEF tendem aos valores obtidos com o MHA.

Curvas tensão versus deformação também foram obtidas para o caso dos cilindros com secções transversais circulares mostrados na Figura 1.b. Conforme esperado da teoria, estas curvas são idênticas às curvas mostradas na Figura 2. Isto demonstra que o comportamento global não depende da geometria do sólido elástico linear.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho indica que os valores obtidos para um laminado bifásico via MEF tendem aos valores obtidos para um laminado bifásico homogeneizado via MHA. Este resultado é evidenciado à medida que o número de lâminas no laminado tende ao infinito. Verificou-se também que a geometria do sólido não influencia na determinação das curvas de tensão versus deformação quando o laminado é submetido às mesmas condições de contorno e simetria.

5 AGRADECIMENTOS

Agradecemos à CAPES pelo apoio financeiro, sem o qual esta pesquisa não teria sido possível.

6 REFERÊNCIAS

CIORANESCU, D.; DONATO, P. **An introduction to homogenization**. Oxford University Press, 1999. 224 p. ISBN: 0-19-856553-4. (Oxford Lectures Series in Mathematics and its Applications).

POBEDRYA, B. E. **Mecânica dos Materiais Compostos**. Moscou: Universidade Estatal de Moscou, 1984. 336 p. (Em russo).



MODELAGEM DE MEIOS POROSOS SATURADOS CONSIDERANDO DANIFICAÇÃO VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS DE CONTORNO

Eduardo Toledo de Lima Junior¹ & Wilson Sergio Venturini²

Resumo

Este trabalho apresenta, de forma resumida, parte dos avanços até aqui obtidos no programa de doutoramento do aluno, no qual se propõe um modelo para análise numérica do comportamento mecânico de meios porosos saturados, cuja matriz sólida pode estar sujeita a processos de danificação. Uma formulação implícita do Método dos elementos de contorno (MEC) é utilizada, com soluções fundamentais independentes do tempo. O meio poroso é admitido em regime poroelástico, descrito com base na teoria de Biot. A degradação do material é regida por um modelo de dano isotrópico.

Palavras-chave: Poroelasticidade. Dano isotrópico. Método dose Elementos de Contorno

DAMAGE IN SATURATED POROUS MEDIA USING THE BOUNDARY ELEMENT METHOD

Abstract

This work presents, in a brief way, some advances reached until now in the student's Ph.D. Thesis, in which one proposes the numerical analysis of saturated porous media, taking account the damage phenomena on the solid skeleton. An implicit boundary element formulation is applied, based on time-independent fundamental solutions. The porous media is taken in poro-elastic framework, in the light of Biot's theory. A scalar isotropic damage model is assumed.

Keywords: Poroelasticity. Isotropic damage. Boundary Element Method

Linha de Pesquisa: Materiais e Mecânica dos Materiais

1 INTRODUÇÃO

O estudo de materiais porosos é extremamente relevante em diversas áreas do conhecimento, como mecânica dos solos e das rochas, difusão de contaminantes, biomecânica e engenharia do petróleo. A mecânica dos meios porosos trata dos materiais cujo comportamento mecânico é significativamente influenciado pela presença das fases fluidas. A resposta do material se dá através de suas deformações quando submetido a ações externas e a variações de pressão nos fluidos que permeiam os poros. No campo da mecânica estrutural, destaca-se ainda a modelagem não-linear física, no tocante aos processos de danificação e fraturamento. Processos de dissipação de energia e consequente perda de rigidez têm sido exaustivamente estudados, de forma que se pode contar com um vasto leque de modelos já desenvolvidos.

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, edut@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, venturin@sc.usp.br



Considerando-se a crescente complexidade dos modelos desenvolvidos para os problemas de engenharia, é de vital importância a busca constante por modelos numéricos robustos, capazes de fornecer resultados precisos, com o menor esforço computacional possível. Neste cenário, o método dos elementos de contorno surge como uma interessante alternativa para a obtenção de soluções numéricas em diversas aplicações de engenharia.

2 METODOLOGIA

O método dos elementos de contorno é empregado em sua forma direta com soluções fundamentais independentes do tempo, para os problemas de elasticidade bidimensional e difusão do fluido. Da não-linearidade do problema proposto decorre o surgimento de integrais sobre o domínio, as quais são tratadas aproximando-se as variáveis em células triangulares. A integração sobre elementos de contorno e contornos de células internas é feita numericamente, pela quadratura de Gauss.

A presença de fase líquida é considerada seguindo-se a formulação generalizada para materiais poroelásticos dada em Coussy (2004), a qual é baseada na teoria de consolidação proposta por Biot (1941). Um modelo simples da mecânica do dano contínuo – (Marigo, 1981) e (Lemaitre; Chaboche 1985) – é aplicado na avaliação da perda de rigidez da matriz sólida do meio poroso.

Utiliza-se uma estratégia do tipo Newton-Raphson na resolução do sistema de equações não-lineares. Ainda, faz-se necessária a dedução de uma matriz tangente consistente com o algoritmo incremental-iterativo de evolução do dano.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Equações governantes

Admita-se a energia potencial total de um meio poroso saturado sujeito à danificação, escrita da forma:

$$\begin{aligned} \rho\psi(\varepsilon_{jk}, D, \phi - \phi_0) = & \frac{1}{2}(1-D)\varepsilon_{jk}E_{jklm}^d\varepsilon_{lm} + \frac{1}{2}b^2M \left[\text{Tr}(\varepsilon_{jk}) \right]^2 \\ & + \frac{1}{2}M(\phi - \phi_0)^2 - bM(\phi - \phi_0)\text{Tr}(\varepsilon_{jk}) \end{aligned} \quad (1)$$

na qual as constantes M e b representam o módulo de Biot e o coeficiente de Biot da tensão efetiva, respectivamente. O caso particular de um meio poroso completamente saturado, permeado por um fluido incompressível, leva a um coeficiente de Biot com valor unitário ($b=1$). A porosidade Lagrangeana ϕ mede a variação da quantidade de fluido, ou seja, a variação de volume de fluido por unidade de volume do meio poroso. O peso específico do meio poroso é descrito por ρ . E_{jklm}^d representa o tensor elástico do material em condição drenada. O tensor ε_{jk} contém as deformações do meio sólido. A variável interna de dano é representada por D . Aplicando-se um modelo de dano isotrópico, esta variável é escalar. Entenda-se que esta avalia o estado de deterioração do material, assumindo valores entre zero e um. A variável D nula indica material intacto, enquanto o valor unitário está associado à degradação completa.

As derivadas da energia potencial (1) em relação às variáveis internas do sistema, ε_{jk} , ϕ e D originam a definição das variáveis associadas, que são as tensões totais σ_{jk} , a poropressão p e a força termodinâmica associada Y :



$$\sigma_{jk} = \rho \frac{\partial \Psi}{\partial \varepsilon_{jk}} = (1-D) E_{jklm}^d \varepsilon_{lm} + bM \left[b \text{Tr}(\varepsilon_{jk}) - (\phi - \phi_0) \right] \delta_{jk} \quad (2)$$

$$(p - p_0) = \rho \frac{\partial \Psi}{\partial (\phi - \phi_0)} = M \left[(\phi - \phi_0) - b \text{Tr}(\varepsilon_{jk}) \right] \quad (3)$$

$$Y = -\rho \frac{\partial \Psi}{\partial D} = \frac{1}{2} \varepsilon_{jk} E_{jklm}^d \varepsilon_{lm} \quad (4)$$

O transporte de um fluido em um espaço intersticial (poroso) qualquer é descrito por uma lei de fluxo, derivada da equação de dissipação do fluido. Admitindo-se um escoamento laminar do fluido através do espaço poroso do meio, pode-se considerar uma relação linear entre o gradiente da propressão e a velocidade relativa do fluido em relação ao esqueleto. A Lei de Darcy, em sua versão clássica linear, utiliza o coeficiente de permeabilidade do meio $k = \frac{k}{\mu}$, definido em função da permeabilidade intrínseca do material k e da viscosidade do fluido μ . Tome-se k escalar, em virtude da isotropia admitida:

$$v_k = k \left[-p_{,k} + f_k \right] \quad (5)$$

O segundo termo entre colchetes representa a força de volume total sobre o fluido.

A equação de conservação de massa líquida é escrita como

$$\frac{d(\rho_f \phi)}{dt} + (\rho_f v_k)_{,k} = 0 \quad (6)$$

3.2 Equações Integrais temporais e formulação do MEC

O teorema da reciprocidade de Betti é a base para a obtenção da formulação integral, composto pelas equações de deslocamentos sobre um ponto S do contorno, e de tensões totais e propressões sobre um ponto s do interior do domínio. Considerando a natureza transiente do problema em questão, o qual é regido pela evolução das diversas variáveis ao longo do tempo, é necessário escrever as equações em taxas, através de um processo de integração temporal, em passo finito:

$$\begin{aligned} C_{ik} \Delta u_k(S) &= \int_{\Gamma} u_{ik}^*(S, Q) \Delta T_k(Q) d\Gamma - \int_{\Gamma} T_{ik}^*(S, Q) \Delta u_k(Q) d\Gamma \\ &+ \int_{\Omega} b \delta_{jk} \varepsilon_{ijk}^*(S, q) \Delta p(q) d\Omega + \int_{\Omega} \varepsilon_{ijk}^*(S, q) \Delta \sigma_{jk}^d(q) d\Omega \\ \Delta \sigma_{ij}(s) &= - \int_{\Gamma} S_{ijk}(s, Q) \Delta u_k(Q) d\Gamma + \int_{\Gamma} D_{ijk}(s, Q) \Delta T_k(Q) d\Gamma + \int_{\Omega} R_{ijkl}(s, q) \Delta \sigma_{kl}^d(q) d\Omega \\ &+ TL_{ij} \left[\Delta \sigma_{kl}^d(s) \right] + \int_{\Omega} b \delta_{kl} R_{ijkl}(s, q) \Delta p(q) d\Omega + TL_{ij} \left[b \delta_{kl} \Delta p(s) \right] \\ c(s) p(s) &= - \int_{\Gamma} v_{\eta}^*(s, Q) p(Q) d\Gamma + \int_{\Gamma} p^*(s, Q) v_{\eta}(Q) d\Gamma \\ &+ \frac{1}{\Delta t} \int_{\Omega} \frac{1}{M} p^*(s, q) \Delta p(q) d\Omega + \frac{1}{\Delta t} \int_{\Omega} b p^*(s, q) \text{Tr}(\Delta \varepsilon(q)) d\Omega \end{aligned} \quad (7)$$



Nas quais $\Delta\sigma_{jk}^d$ representa a parcela do tensor de tensões associada ao dano. Os núcleos das integrais são as soluções fundamentais X^* do problema, ou as derivadas destas soluções. A variável T representa as forças de superfície. Os termos livres TL_{ij} resultam da diferenciação dos núcleos $\varepsilon_{ijk}^*(S, q)$ na primeira das equações (7). As soluções fundamentais utilizadas, bem como o desenvolvimento matemático dessa formulação são aqui omitidos, em virtude do formato compacto desta publicação.

Deve-se representar o sistema de equações de forma discreta, sobre os elementos de contorno e sobre as células triangulares de domínio, a fim de se obter os valores aproximados das variáveis em questão. Define-se N_n como o número de nós do contorno e N_i o número de nós internos. A discretização do sistema (7), seguida de algumas manipulações algébricas características do MEC, conduz à seguinte equação condensada

$$\begin{bmatrix} \bar{E} \end{bmatrix}_{3N_i, 3N_i} \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \end{bmatrix}_{3N_i, 1} = \begin{bmatrix} \Delta Ns \end{bmatrix}_{3N_i, 1} + \begin{bmatrix} \bar{Np} \end{bmatrix}_{3N_i, 1} + \begin{bmatrix} \bar{QS} \end{bmatrix}_{3N_i, 3N_i} \left\{ \Delta\sigma^d \right\}_{3N_i, 1} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{Np} \end{bmatrix}_{3N_i, 1} = b \begin{bmatrix} \bar{QS} \end{bmatrix}_{3N_i, 3N_i} \begin{bmatrix} \bar{IK} \end{bmatrix}_{3N_i, N_i} \left[\begin{bmatrix} I \end{bmatrix} - \frac{1}{M\Delta t} \begin{bmatrix} \bar{QP}^{(i)} \end{bmatrix}_{N_i, N_i} \right]^{-1} \begin{bmatrix} \bar{Np} \end{bmatrix}_{N_i, 1}$$

sendo

$$\begin{bmatrix} \bar{E} \end{bmatrix}_{3N_i, 3N_i} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} E \end{bmatrix}_{3N_i, 3N_i} - \frac{b^2}{\Delta t} \begin{bmatrix} \bar{QS} \end{bmatrix}_{3N_i, 3N_i} \begin{bmatrix} \bar{IK} \end{bmatrix}_{3N_i, N_i} \left[\begin{bmatrix} I \end{bmatrix} - \frac{1}{M\Delta t} \begin{bmatrix} \bar{QP}^{(i)} \end{bmatrix}_{N_i, N_i} \right]^{-1} \begin{bmatrix} \bar{QP}^{(i)} \end{bmatrix}_{N_i, N_i} \begin{bmatrix} Tr \end{bmatrix}_{N_i, 3N_i} \end{bmatrix}$$

Devido à presença dos termos de correção associados ao dano, a equação (8) se mostra não-linear a cada incremento Δt . O procedimento de resolução segue uma metodologia do tipo Newton-Raphson. Define-se, para uma iteração $i+1$, o incremento de deformação da forma $\{\Delta\varepsilon_n^{i+1}\} = \{\Delta\varepsilon_n^i\} + \{\delta\Delta\varepsilon_n^i\}$, sendo a determinação do corretor $\{\delta\Delta\varepsilon_n^i\}$ feita através de uma expansão em série de Taylor, truncada na primeira variação, em torno de $\{Y(\{\Delta\varepsilon_n^i\})\}$, resíduo da equação de equilíbrio na iteração i , como segue

$$\{Y(\{\Delta\varepsilon_n^i\})\} + \frac{\partial \{Y(\{\Delta\varepsilon_n^i\})\}}{\partial \{\Delta\varepsilon_n^i\}} \{\delta\Delta\varepsilon_n^i\} = 0 \quad (10)$$

4 RESULTADOS OBTIDOS OU ESPERADOS

A formulação apresentada encontra-se em fase de implementação computacional. Os modelos isolados para análise de danificação em sólidos e de escoamento de fluidos em meios poroelásticos já foram implementados, apresentando bom desempenho e precisão nos resultados obtidos em alguns exemplos simulados. Espera-se em breve viabilizar a modelagem de problemas acoplados, com ênfase na aplicação à mecânica dos solos e difusão de contaminantes.



5 CONCLUSÕES PARCIAIS

No que diz respeito ao modelo de dano isotrópico utilizado, ressalta-se a forte dependência em relação à malha de células utilizada, especialmente em problemas de peças com defeito inicial, onde manifesta-se o fenômeno de localização de deformações.

6 AGRADECIMENTOS

Agradecemos à FAPESP e a CAPES pelo financiamento das bolsas de doutorado no Brasil e no exterior, respectivamente. Ainda, ao departamento de engenharia de estruturas da EESC-USP e ao *Laboratoire de Mécanique et Technologie* da ENS-Cachan.

7 REFERÊNCIAS

BIOT, M. A. General theory of three-dimensional consolidation. **Journal of Applied Physics**, v. 12, p. 155-164, 1941.

COUSSY, O. **Poromechanics**. Chichester: John Wiley & Sons, 2004. 298 p.

LEMAITRE, J.; CHABOCHE, J. L. **Mécanique des Matériaux Solides**. Paris: Dunod, 1985. 344 p.

MARIGO, J. J. Formulation d'une loi d'endommagement d'un matériau élastique, **Comptes rendus de l'académie des sciences**, v. 292, série II, p. 1309–1312, 1981.



SUBSÍDIOS PARA PRODUÇÃO DE LADRILHOS E REVESTIMENTOS HIDRÁULICOS DE ALTO DESEMPENHO

Thiago Catoia¹ & Jefferson Benedicto Libardi Liborio²

Resumo

A presente pesquisa pretende disponibilizar subsídios tecnológicos para produção de ladrilhos e revestimentos hidráulicos de alto desempenho. No estudo de dosagem foram elaboradas duas argamassas autoadensáveis, uma composta por aglomerantes claros e outra por aglomerantes convencionais, para serem empregadas com diferentes tonalidades de pigmentos. Foram moldados corpos de prova cilíndricos para caracterização das argamassas, submetidas à cura úmida, através dos ensaios de compressão simples, tração na compressão simples diametral e determinação do módulo de elasticidade. Foram produzidos revestimentos hidráulicos, submetidos à cura convencional, e avaliados através da análise visual e dos ensaios de flexão, absorção de água, retração por secagem e resistência ao ataque químico.

Palavras-chave: Ladrilho hidráulico. Revestimento. Argamassa. CAD. CAR.

SUBSIDIES FOR PRODUCTION OF HIGH PERFORMANCE HYDRAULIC TILES AND COVERINGS

Abstract

The present research pretends to provide technological subsidies for production of high performance hydraulic tiles and coverings. In the dosage study two self compacting mortars were elaborated, one composed of clear binders and other of conventional binders, to be used with different pigment shades. Were molded cylindrical samples for characterization of mortars, subjected to wet cure, by simple axial compression test, cylinder splitting test and elastic modulus determination. Were produced hydraulic coverings, subjected to conventional cure, and evaluated by visual analysis, flexion test, water absorption test, drying shrinkage test, and chemical action test.

Keywords: Hydraulic tile. Covering. Mortar. HPC. HSC.

Linha de Pesquisa: Materiais e Mecânica dos Materiais

1 INTRODUÇÃO

A NBR 9457:1986 define ladrilho hidráulico como placa de concreto de alta resistência ao desgaste para acabamento de paredes e pisos internos e externos, contendo uma superfície com textura lisa ou em relevo, colorido ou não, de formato quadrado, retangular ou outra forma geométrica definida.

Os tipos de ladrilhos hidráulicos se diferem pelo número de camadas que são constituídos, por suas características decorativas e pelo tipo de superfície aparente. Estes revestimentos podem ser monocamada ou possuir até três camadas, podem apresentar ou não figuras, e ainda podem possuir textura lisa ou em relevo.

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, tcatoia@sc.usp.br

² Professor e Coordenador do Laboratório de Materiais Avançados à Base de Cimento da EESC-USP, liborioj@sc.usp.br



Os ladrilhos hidráulicos foram introduzidos no Brasil pelos italianos e, embora no passado fosse uma alternativa na produção de revestimentos, essencialmente com caráter decorativo, pelas disponibilidades existentes, seu uso foi abandonado com o advento da indústria cerâmica.

Embora nos anos 80 arquitetos e decoradores comecem a valorizar novamente os revestimentos hidráulicos, como forma de personalizar projetos e até pela possibilidade de utilização em mosaicos, a inserção no mercado de produtos com bom aspecto visual ainda passa por uma produção artesanal que está embasada no empirismo, com pouco cientificismo.

Assim, esse material não apresenta competitividade com outros revestimentos como os porcelanatos, e qualquer outro revestimento cerâmico, que podem inclusive imitar os mosaicos bizantinos. Daí a importância do trabalho, que visa contribuir com a melhora do produto e da produção, podendo levar os ladrilhos hidráulicos a uma maior diversidade de aplicação e a uma melhor competitividade no mercado.

O presente trabalho tem como objetivo utilizar a tecnologia dos concretos e argamassas de alto desempenho para promover subsídios para produção de ladrilhos e revestimentos hidráulicos de elevado desempenho em escala industrial. Mais especificamente pretende-se:

elaborar dosagens reodinâmicas, para produção de revestimentos hidráulicos a partir da moldagem de argamassas autoadensáveis, com o intuito facilitar o processo produtivo;

caracterizar as argamassas desenvolvidas nos estados fresco e endurecido;

avaliar os revestimentos produzidos com as argamassas autoadensáveis;

analisar o comportamento das argamassas e dos ladrilhos hidráulicos submetidos à cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica;

verificar a possibilidade de produção contínua de revestimentos em escala industrial;

analisar e discutir as especificações desses materiais de acordo com suas características e potencialidades.

2 METODOLOGIA

Os ensaios de caracterização dos materiais foram realizados de acordo com as referentes normas técnicas. A determinação da melhor ordem de mistura dos materiais e a medida de desempenho dos aditivos superplastificantes foi realizada utilizando a medida de fluidez em cone de Marsh.

A massa específica da argamassa no estado fresco foi determinada de acordo com a NBR 9833:1987. Os ensaios mecânicos de corpos de prova cilíndricos de compressão axial simples, tração por compressão diametral e determinação do módulo de elasticidade, foram realizados de acordo com a NBR 5739:1994, NBR 7222:1994 e NBR 8522:1984, respectivamente. A avaliação dos revestimentos foi realizada seguindo recomendações da NBR 13818:1997.

3 DESENVOLVIMENTO

Inicialmente os materiais foram caracterizados e selecionados levando em conta a qualidade e as características desejadas para produção dos ladrilhos hidráulicos. Utilizou-se técnica de empacotamento de partículas para a composição dos agregados miúdos buscando a minimização dos vazios entre as partículas.

No estudo de dosagem foram elaboradas duas argamassas autoadensáveis, buscando facilidade de moldagem, uma composta por aglomerantes claros para realçar a utilização de



pigmentos mais claros, e outra composta por aglomerantes convencionais para ser utilizada com pigmentos escuros.

A escolha da fôrma plástica para produção dos revestimentos hidráulicos foi realizada levando em conta o acabamento superficial proporcionado pelo material, a viabilidade econômica, a disponibilidade comercial, a resistência mecânica, a estanqueidade e a praticidade de desmoldagem.

A Tabela 1 apresenta os materiais, as características de dosagem, o consumo de materiais por metro cúbico, e as características no estado fresco de cada argamassa elaborada.

Tabela 1 – Características das argamassas desenvolvidas

| Argamassas | | Clara | Escura | |
|--|----------------------------|---------------------|--------------|--------|
| Materiais | Cimento | CPB 40 Estrutural | CP V ARI RS | |
| | Adição | Metacaulinita | Sílica Ativa | |
| | Aditivo Superplastificante | ADVA Cast | ADVA Cast | |
| Traço | 1:m | 1:2 (1:2,03) | 1:2 (1:2,07) | |
| | Teor de adição (%) | 10 | 10 | |
| | Relação a/agl | 0,40 | 0,40 | |
| | Teor de aditivo (%) | 2,5 | 1,75 | |
| Consistência em cone Marsh (seg) | | 60 ± 10 | 60 ± 10 | |
| Massa específica (kg/m ³) | | 2278 | 2264 | |
| Consumo de materiais por m ³ (kg) | Cimento | 612,73 | 622,12 | |
| | Adição | 43,81 | 29,87 | |
| | Água | 262,61 | 260,80 | |
| | Aditivo | 16,41 | 11,41 | |
| | Areia | Itaporanga (67,5 %) | 900,85 | 909,11 |
| | | Descalvado (22,5 %) | 300,28 | 303,04 |
| | | Jundu (10 %) | 133,46 | 134,68 |

A Figura 1 ilustra o bom acabamento superficial do ladrilho hidráulico produzido, sem qualquer tratamento da superfície após desfôrma.



Figura 1 – Qualidade e acabamento superficial dos ladrilhos hidráulicos.

4 RESULTADOS OBTIDOS

A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização das argamassas submetidas à cura úmida.



Tabela 2 – Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas em cura úmida

| Argamassas | | Clara | Escura |
|---|---------|--------------|---------------|
| Resistência à compressão axial simples (MPa) | 3 dias | 57,5 | 59,4 |
| | 7 dias | 71,1 | 76,8 |
| | 28 dias | 80,8 | 100,9 |
| | 63 dias | 88,2 | 107,7 |
| | 91 dias | 92,9 | 109,2 |
| Resistência à tração por compressão diametral (MPa) | 3 dias | 4,0 | 4,3 |
| | 7 dias | 4,1 | 4,5 |
| | 28 dias | 4,4 | 4,8 |
| | 63 dias | 4,5 | 5,0 |
| | 91 dias | 4,5 | 5,0 |
| Módulo de elasticidade (GPa) | 3 dias | 36,4 | 39,8 |
| | 7 dias | 38,9 | 41,5 |
| | 28 dias | 39,8 | 42,6 |
| | 63 dias | 40,5 | 43,4 |
| | 91 dias | 41,0 | 44,1 |

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de avaliação dos revestimentos hidráulicos, produzidos pela moldagem das argamassas autoadensáveis elaboradas e submetidos à cura convencional.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de caracterização dos revestimentos em cura úmida

| Revestimento Hidráulico | | Clara | Escura | |
|---|---|--------------|---------------|------|
| Análise visual | 3 dias | inalterada | inalterada | |
| | 28 dias | inalterada | inalterada | |
| Carga de ruptura à flexão e = 15 mm (N) | 3 dias | 1043 | 1061 | |
| | 28 dias | 1121 | 1246 | |
| Módulo de resistência à flexão (MPa) | 3 dias | 6,95 | 7,07 | |
| | 28 dias | 7,47 | 8,31 | |
| Absorção de água (%) | 3 dias | 2,56 | 3,40 | |
| | 28 dias | 1,57 | 1,96 | |
| Retração por secagem (%) | 3 dias | 0,054 | 0,084 | |
| | 28 dias | 0,026 | 0,056 | |
| Resistência ao ataque químico | Produtos químicos domésticos | 3 dias | alta | alta |
| | | 28 dias | alta | alta |
| | Produtos para tratamento de água de piscina | 3 dias | alta | alta |
| | | 28 dias | alta | alta |

5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Parte dos objetivos já foram alcançados, pois com base no desenvolvimento experimental e nos resultados dos ensaios realizados pode-se afirmar que foram produzidas argamassas autoadensáveis de alta resistência e alto desempenho, a partir da tecnologia utilizada no desenvolvimento dos concreto de última geração, para produção de revestimentos hidráulicos de alto desempenho e com excelente acabamento superficial.

A utilização da argamassa autoadensável já facilita muito o processo produtivo desse tipo de revestimento, promovendo subsídios para produção em escala industrial. A caracterização das



argamassas e dos revestimentos submetidos à cura úmida convencional e térmica acelerada permitirá discutir as especificações desses materiais de acordo com suas características e potencialidades.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelos apoios concedidos.

7 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. São Paulo, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação. São Paulo, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9457**: Ladrilhos hidráulicos – Especificação. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13818**: Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 1997.



ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DE FISSURAS EM FADIGA USANDO MÉTODO DOS ELEMENTOS DE CONTORNO

Edson Denner Leonel¹ & Wilson Sergio Venturini²

Resumo

Este trabalho trata da análise da propagação de fissuras em regime de fadiga usando o Método dos Elementos de Contorno (MEC). O MEC é conhecido por ser robusto e preciso nesse tipo de problema, necessitando de pequeno esforço computacional durante o processo de remeshing. A formulação desenvolvida é baseada no Dual BEM, onde equações integrais de diferentes tipos são empregadas na discretização. Equações integrais em deslocamentos são escritas para pontos fontes localizados ao longo de uma das faces da fissura, enquanto equações integrais em traction são usadas nos pontos fontes situados na face oposta. A técnica de correlação de deslocamentos é aplicada para avaliar os fatores de intensidade de tensão, enquanto a Lei de Paris foi adotada no cálculo do número de ciclos de carregamento aplicado. Estruturas simples e multi-fissuradas são analisadas ilustrando a aplicabilidade do modelo proposto.

Palavras-chave: Método dos Elementos de Contorno. Propagação de fissuras. Fadiga.

ANALYSIS OF CRACK PROPAGATION UNDER FATIGUE USING BOUNDARY ELEMENT METHOD

Abstract

This work deals with analysis of crack growth process under fatigue using Boundary Element Method (BEM). BEM is known as robust and accurate technique for this type of problem, which in addition requires relatively small computational effort to the remeshing procedure. This formulation is based on the dual BEM, in which integral equations of different types are employed into the discretization. Displacement integral equations are written for collocation points along one side, while traction integral equations are used for collocation points along the opposite side of crack. The displacement correlation technique is applied to evaluate stress intensity factor while the Paris law was adopted to calculate the number of load cycles. Examples of simple and multi-fractured bodies are shown to illustrate the applicability of the proposed scheme.

Keywords: Boundary Element Method. Crack propagation. Fatigue.

Linha de Pesquisa: Mecânica das Estruturas

1 INTRODUCTION

In the last decade, the crack growth process under fatigue has received large interest by the scientific community, as it is the origin of most structural collapses. To deal with complex engineering structures and quantify the structural behavior, numerical methods are an important tool to provide useful solutions. Particularly the boundary element method (BEM) has already been recognized as an accurate and efficient numerical technique to deal appropriately with many problems in engineering, in particular with crack growth problems. Compared to finite elements, the BEM is recommended to

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, edleoneel@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, venturin@sc.usp.br



analyze crack problems because of the efficiency of dimensionality reduction for this kind of problems, as only the boundary is discretized. The BEM is even more efficient for mixed mode propagation, as the remeshing problems are avoided, whatever the structural complexity. For these reasons, the BEM has been widely applied to deal with fatigue problems as show Cisilino & Aliabadi (1999) and Jivkov (2004).

BEM is applied to analyze crack growth process under fatigue in 2D domains in this paper. The crack model is constructed using the Dual version of BEM in which integral equations of different types are employed along the opposite sides of the crack surface. Displacement integral equations are written for collocation points along one side, while traction integral equations are used for collocation points along the opposite side. This technique precludes singularities of the resulting algebraic system of equations, in spite of the fact that the material points coincide for the two opposite crack faces. The displacement correlation technique is applied to evaluate stress intensity factor while the Paris law was adopted to predict the structural life in terms of number of load cycles. Examples of simple and multi-fractured bodies are shown to illustrate the applicability of the proposed scheme.

2 METHODOLOGY

2.1 Fatigue life prediction

Life prediction under fatigue and crack propagation is a challenging problem in engineering design, inspection and maintenance. The crack propagation law of Paris, Paris and Erdogan (1963), is widely applied and has been verified for various materials:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^n \quad (1)$$

where a is the crack length, N is the number of loading cycles, C and n are material parameters and ΔK is the stress intensity factor range. This equation relates the crack growth for one cycle, da , to the stress intensity range, ΔK . This equation is only valid for stress intensity ranges greater than the threshold stress intensity range, ΔK_{th} , and smaller than the fracture toughness, ΔK_C .

The stress state at the crack tip is defined by stress intensity factors, which depend on crack and structure geometries, as well as on the loading. Analytical expressions relating stress intensity factors to geometry and loading are available only for geometrically simple structures. For complex structures, numerical methods have to be employed. In the present paper, the displacement correlation technique is adopted to evaluate stress intensity factors, using BEM. This technique is based on correlating displacements at the crack lips and in the crack tip vicinity to the stress intensity factors. For plane structures, stress intensity factors for modes I (opening) and II (sliding) are given by the following expressions:

$$K_I = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi}{r}} \cdot \frac{\mu}{(\kappa + 1)} \cdot COD \quad (2)$$

$$K_{II} = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi}{r}} \cdot \frac{\mu}{(\kappa + 1)} \cdot CSD \quad (3)$$

where K_I and K_{II} are the stress intensity factors for modes I and II, respectively; COD is the Crack Opening Displacement, CSD is the Crack Sliding Displacement, r is the distance between the crack tip and the computation point (i.e. mesh node) and μ and κ are material properties.

In mixed mode propagation, it is necessary to compute the equivalent stress intensity factor, K , and the crack propagation (or bifurcation) angle, θ_p . For this purpose, the maximum circumferential stress theory is adopted, which yields:



$$K = K_I \cos^3\left(\frac{\theta_p}{2}\right) - 3 \cdot K_{II} \cdot \cos^2\left(\frac{\theta_p}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\theta_p}{2}\right) \quad (4)$$

$$\tan\left(\frac{\theta_p}{2}\right) = \frac{1}{4} \left[\frac{K_I}{K_{II}} \pm \sqrt{\left(\frac{K_I}{K_{II}}\right)^2 + 8} \right] \quad (5)$$

Under cyclic loading, the equivalent stress intensity factor is calculated for each stress cycle, and the corresponding increment ΔK is directly used in Paris law. If the crack growth rate, da/dN , is larger than 0.1 mm/cycle, it is assumed that instantaneous fracture takes place, following Pimenta et al. (2001), and the analysis is stopped. On the other hand, if the stress intensity range is less than ΔK_{th} , no crack growth is computed.

2.2 Boundary element formulation

The boundary element method is widely applied in various engineering fields, such as contact problems, fatigue and fracture mechanics, due to the method's precision and robustness in modeling strong stress concentration (i.e. singular stress and displacement fields). Consider a 2D homogeneous elastic domain Ω , with boundary Γ . The equilibrium equation, written in terms of displacements, is given by:

$$u_{i,jj} + \frac{1}{1-2\nu} u_{j,ji} + \frac{b_i}{\mu} = 0 \quad (6)$$

where μ is the shear modulus, ν is the Poisson's ratio, u_i are components of the displacement field and b_i are body forces. Using Betti's theorem, one obtains a singular integral for displacements, with no body forces, as:

$$c_{il}(f, c)u_l(f) + \oint_{\Gamma} P_{il}^*(f, c)u_l(c) d\Gamma = \int_{\Gamma} P_l(c)u_{il}^*(f, c) d\Gamma \quad (7)$$

where P_l and u_l are the tractions and displacements on the boundary, respectively; \int is the principal value integral of Cauchy and the term c_{il} is equal to $\delta_{il}/2$ for smooth contours. In Eq. (7), P_{il}^* and u_{il}^* are the fundamental solutions, for tractions and displacements, which ones are shown in Portela et al. (1992).

Linear elastic 2D domains can be analyzed by evaluating Eq. (7) on the elements located on the body's boundary. However, for solids with cracks, use of this equation for discretization of all boundaries leads to singularities, because both crack faces are located on the same geometrical position. Different formulations have been proposed in the literature to properly deal with crack problems in BEM (Portela et al., 1992 and Jiang and Venturini, 2000). The dual boundary element formulation stands out, as it applies to analysis of arbitrary crack growth. In this formulation, four algebraic relationships are required at each node along the crack path. To avoid redundant relationships, the four relationships are obtained from two different integral equations, which are written in terms of displacements and tractions. For simplicity, displacement representations can be used to define the collocation points along one of the crack faces, while traction representations can be written for the collocation points along the opposite crack face. For the external boundaries, the displacement representation is sufficient for a complete discretization.

In terms of tractions, the hyper-singular integral representation at the boundary can be obtained from Eq. (7). This equation must be differentiated to obtain the integral representation in terms of



strains and then one use the Hooke's law to obtain the integral representation in terms of stress. Finally, multiplication by the director cosines of the normal to crack surfaces at the collocation point leads to the traction representation, as follow:

$$\frac{1}{2}P_j(f) + \eta_k \int_{\Gamma} S_{kj}(f, c) u_k(c) d\Gamma = \eta_k \int_{\Gamma} D_{kj}(f, c) P_k(c) d\Gamma \quad (8)$$

where \int_{Γ} is the principal value integral of Hadamard, terms S_{kj} and D_{kj} contain the derivatives of P_{ij}^* and u_{ij}^* , respectively, following Portela et al. (1992). In the present investigation, only linear boundary elements are used. The singular integrals are evaluated in numerical form, using the sub-element procedure, while the hyper-singular integrals are calculated by analytical expressions. This procedure is efficient and sufficiently accurate in the solution of arbitrary crack growth problems.

3 DEVELOPMENT

This paper shows results of a model developed to analyze crack propagation under fatigue. The proposed model is able to simulate crack growth process with a simple crack or multiple cracks inside a 2D domain using the theories already described.

4 RESULTS

The model proposed is able to simulate the crack growth process in 2D domains. Fig. (1) shows this process in a perforated plate with multiple cracks. In each hole one have two cracks which ones grow according the fatigue cycle loads. The model gives accurate results to crack growth trajectory and to structural life prediction.

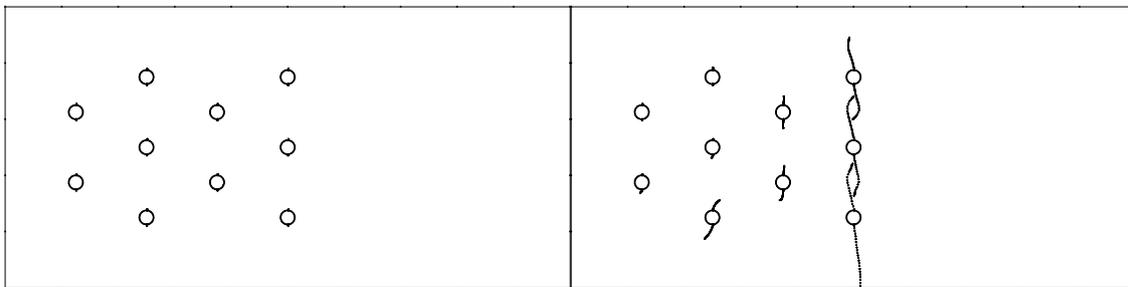


Figure 1 – Crack growth process with multiple cracks.

5 CONCLUSIONS

The BEM formulation to deal with crack propagation under fatigue has been studied. The model proposed has shown good agreement with analytical and experimental results in terms of structural life prediction and crack growth trajectory. The BEM model is also able to simulate coalescence and then is possible to considerer localization problems.



6 ACKNOWLEDGEMENTS

To FAPESP – São Paulo State Research Foundation for the support given to this work.

7 REFERENCES

CISILINO, A. P; ALIABADI, M. H. Three-dimensional boundary element analysis of fatigue crack growth in linear and non-linear fracture problems, **Engineering Fracture Mechanics**, v. 63, p. 713-733, 1999.

JIANG, Y. S; VENTURINI, W. S. Limit analysis of slope stability with boundary element methods. In: WORLD CONGRESS ON COMP. MECHANICS, 4., June/July, 1998, Buenos Aires, Argentina.

JIVKOV, A. P. Fatigue corrosion crack extension across the interface of an elastic bi-material, **Engineering Fracture Mechanics**, v. 71, p. 1119-1113, 2004.

PARIS, P. C.; ERDOGAN, F. A critical analysis of crack propagation laws. **Journal of Basic Engineering**, v. 85, p. 528-534.

PIMENTA, P. M; RICARDO, L. C. H; CAMARAO, A. F. Modern trends on fatigue. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FATIGUE, São Paulo, 2001.

PORTELA, A; ALIABADI, M. H; ROOKE, D. P. Dual boundary element method: Efficient implementation for cracked problems. **Int. J. Num. Meth. Engn.**, v. 33, p. 1269-1287, 1992.



ANÁLISE DA INTERAÇÃO EDIFÍCIO-SOLO COM UMA COMBINAÇÃO MEC/MEF

Ana Paula Ferreira Ramos¹ & João Batista de Paiva²

Resumo

Este trabalho de doutoramento objetiva analisar a interação estaca - solo - superestrutura através de uma combinação MEC / MEF. A contribuição deste trabalho será a capacidade de análise da interação edifício-solo, atendendo à disponibilidade de tempo de um escritório de engenharia estrutural. Outra contribuição é a possibilidade de comparação dos resultados obtidos neste trabalho, com outro que representa este problema de forma mais real, mas que por outro lado é inviável em situações práticas devido à grande dimensão dos sistemas de equações. O solo será representado de acordo com a solução fundamental de Mindlin e será modelado pelo MEC. As estacas poderão ser submetidas a esforços horizontais, verticais e momentos fletores; e serão modeladas pelo MEF. O bloco será modelado por uma placa de grande rigidez. A superestrutura será modelada pelo MEF.

Palavras-chave: Interação solo-estrutura. Acoplamento MEC/MEF. Edifício.

ANALYSES OF SOIL-STRUCTURE INTERACTION USING BEM-FEM COUPLING

Abstract

The objective of the present work is the soil structure analyses using BEM-FEM coupling. The contribution of this work will be the possibility of the soil structure interaction analysis in the structure engineering office. The comparison between this work and another work fewer simplified will be possible. The soil will be modeled by Mindlin's fundamental solution and by BEM (Boundary Elements Method). In addition, the piles will receive horizontal and vertical forces and moments. The piles will be simulate by FEM (Finite Elements Method). Blocks will be modeled by plates with big rigidity. The building's structure will be modeled by FEM.

Keywords: Soil-structure interaction. FEM/BEM coupling. Building.

Linha de Pesquisa: Métodos Numéricos

1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho de doutoramento pretende-se desenvolver um programa para a análise da interação estaca – solo – superestrutura como uma combinação do método dos elementos de contorno com o método dos elementos finitos. O solo será representado como um meio contínuo semi-infinito e modelado pelo método dos elementos de contorno, as estacas serão modeladas pelo método dos elementos finitos, e poderão estar submetidas a esforços horizontais e verticais, a ligação entre o bloco e as estacas se fará através da compatibilização de deslocamentos e rotações nos pontos de ligação. O bloco será representado por uma placa de grande rigidez e a superestrutura será modelada pelo método dos elementos finitos. Os resultados obtidos com este programa deverão ser

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, anafer@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, paiva@sc.usp.br



comparados com outros disponíveis na literatura e com os obtidos através de uma formulação que considera o solo como um sólido tridimensional de dimensões finitas.

2 METODOLOGIA

A maior parte dos programas computacionais, de cada elemento estrutural, necessários para o desenvolvimento deste trabalho, já se encontra desenvolvida por outros autores. Estes elementos estruturais encontram-se, em sua maioria, programados separadamente. No Presente Trabalho acoplam-se esses elementos estruturais, já programados, bem como o solo, de forma a ser possível uma análise conjunta de toda a estrutura de um edifício, juntamente com a sua fundação, composta por estacas, e a reação do solo, decorrente de toda esta sobrecarga estrutural.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Edifício

O edifício será modelado em teoria de primeira ordem, via método dos elementos finitos, com elementos de barras para os pilares e as vigas e, com elementos de cascas para as lajes. O elemento de casca utilizado é o elemento plano de casca desenvolvido em MESQUITA (1998), onde se acopla o elemento de placa DKT, que pode ser visto em BATOZ *et al* (1980), com o elemento de membrana, que neste caso será utilizado o elemento advindo da formulação livre, proposto em BERGAN & FELIPPA (1985) e BERGAN & FELIPPA (1986).

3.2 Placa/solo

O solo será representado via equações integrais e considerando um meio contínuo semi-infinito utilizando a solução fundamental de Mindlin. No caso de solos estratificados e com camadas rígidas será utilizada a formulação de STEINBRENNER (POULOS (1967)).

A interação do edifício com o solo poderá ser feita mediante a utilização de uma placa de fundação estaqueada ou através de blocos de estacas.

Para o solo serão escritas então as equações integrais para os deslocamentos u , v e w dos pontos nodais dos elementos de contorno do meio contínuo, resultando em um sistema de equações lineares em função da reação do solo nos pontos das células da interface placa-solo.

A placa será modelada via método dos elementos finitos resultando em um sistema de equações lineares também em função da reação nodal do solo. Será, então, eliminado nestes dois sistemas de equações a reação do solo, obtendo-se assim um sistema para análise do problema placa-solo. Após a resolução do sistema de equações, as tensões e os deslocamentos no solo e os momentos fletores na placa poderão ser obtidos.

3.3 Estacas/blocos de estacas

As estacas serão modeladas via método dos elementos finitos e sua influência no solo será suposta como uma linha de carga. As estacas poderão ser verticais ou inclinadas. As estacas poderão estar solicitadas por forças horizontais, verticais e momentos fletores aplicados em seu topo. Os blocos serão representados por uma placa de rigidez muito grande. Embora para o cálculo das tensões no bloco este modelo não seja adequado, ele é muito conveniente do ponto de vista de se elaborar um programa para esta análise. Caso se pretenda analisar as tensões e deformações internas no bloco, o mesmo poderá ser analisado com elementos finitos tridimensionais, usando as reações obtidas na análise simplificada como dados de entrada.



Cada estaca será considerada um único elemento finito definido por quatro pontos nodais. Os esforços de interação estaca-solo horizontais serão aproximadas por uma função polinomial do quarto grau e a vertical por um polinômio do terceiro grau. Os graus de liberdade para a estaca são os deslocamentos u , v e w e as rotações θ_x e θ_y para o topo da estaca e apenas os deslocamentos u , v e w para os demais.

O sistema de equações para o conjunto estaca-solo será obtido da mesma forma que explicado anteriormente e que neste caso, se incorpora à contribuição das tensões nodais nas estacas. A modelagem da estaca via elementos finitos resulta em um sistema de equações também em função destas tensões nodais e após serem eliminadas nos dois sistemas de equações anteriormente mencionados, resultam no sistema de equações global para a análise deste problema.

Para a análise da interação solo-estrutura através de blocos de estacas, sapatas rígidas ou flexíveis, a formulação é a mesma que a apresentada anteriormente, somente que agora a interface solo-estrutura será definida por várias sub-regiões.

3.4 Resultados esperados

Os resultados esperados são as tensões e deslocamentos do solo; os momentos fletores da placa; os esforços verticais, horizontais e momentos fletores atuantes nas estacas.

3.5 Conclusões parciais

O trabalho encontra-se no início do seu desenvolvimento e está de acordo com o cronograma planejado inicialmente, Figura 1. O cronograma iniciou-se em Abril/2008. Até o momento, fez-se o acoplamento entre o elemento de membrana e de placa. Os elementos estruturais de membrana e de placa já se encontravam programados computacionalmente.

| Semestre | 1° | 2° | 3° | 4° | 5° | 6° |
|----------|----|----|----|----|----|----|
| I | | | | | | |
| II | | | | | | |
| III | | | | | | |
| IV | | | | | | |
| V | | | | | | |
| VI | | | | | | |

- I – Cursar disciplinas necessárias para o doutorado;
- II – Revisão bibliográfica, estudo dos trabalhos já desenvolvidos pelo solicitante para a análise da interação placa-solo, estaca-solo e placa – estaca – solo;
- III – Desenvolvimento de um programa para o acoplamento placa – estaca – solo considerando a estaca submetida a carregamentos horizontais e verticais;
- IV - Desenvolvimento do acoplamento superestrutura – infra-estrutura – solo;
- V – Qualificação e preparação de relatórios;
- VI – Redação final da tese e defesa pública.

Figura 1 – Cronograma.



Como visto no cronograma, Figura 1, a etapa seguinte será o acoplamento desta estrutura com a estaca e o solo.

4 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento desta pesquisa. E ao Departamento de Engenharia de Estruturas, da Escola de Engenharia de São Carlos, USP por possibilitar o desenvolvimento desta Tese.

5 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, V. S.; PAIVA, J. B. A mixed BEM-FEM formulation for layered soil-superstructure interaction. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**. v. 9, n. 38, p. 63-82, 2007. ISSN: 1809-5860.

BANERJEE, P. K. Integral equation methods for analysis of piece-wise nonhomogeneous three-dimensional elastic solids of arbitrary shape. **Int. J. Mechanical Science**. v. 18, p. 293-303, 1976.

BATHE, K. J. **Finite element procedures in engineering analysis**. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1982. 735 p. ISBN: 0133173054.

CHOW, Y. K.; TEH, C. I. Pile-cap-pile-group interaction in nonhomogeneous soil. **Journal of Geotechnical Engineering**. v. 117, n. 11, p. 1655-1668, Nov., 1991.

CODA, H. B.; PAIVA, J. B. Tridimensional dynamic soil-structure interaction by the BEM/FEM coupling. In: CONGRESSO AIMETA DI MECCANICA TEORICA E APPLICATA, 15., Taormina, Italia, Set. 2001. **Memorie...** Taormina, AIMETA, 2001. 10p. ISSN: 1592-8950.

DAVIES, T. G.; BANERJEE, P. K. The displacement field due to a point load at the interface of a two layer elastic half-space. **Géotechnique**. v. 28, n.1, p. 43-56, 1978.

MENDONÇA, A. V.; PAIVA, J. B. A boundary element method for the static analysis of raft foundations on piles. **Engineering Analysis with Boundary Elements**, v. 24, p. 237-247, 2000. ISSN 0955-7997.

MINDLIN, R. D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid. **J. Physics**, v. 7, p. 195-202, 1936.

PAIVA, J. B.; BUTTERFIELD, R. Boundary element analysis of plate-soil interaction. **Computers & Structures**, v. 64, n. 1/4, p. 319-28, 1997.

POULOS H. G.; MATES, N. S. Settlement and load distributions analysis of pile groups. **Aust. Geomechs. Jnl.**, v. 1, g. 1, 1971.

POULOS, H. G. An approximate numerical analysis of pile raft interaction. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, v. 18, p. 73-92, 1994.

POULOS, H. G.; Davis, E. H. **Pile foundation Analysis and Design**. John Wiley&Sons, 1980. 397 p. ISBN: 0471020842.



UM MODELO PARA PROJETO ÓTIMO BASEADO EM CONFIABILIDADE APLICADO A VIGAS EM CONCRETO ARMADO

Caio Gorla Nogueira¹ & Wilson Sergio Venturini²

Resumo

Este trabalho apresenta um modelo de otimização baseada em confiabilidade com aplicação ao dimensionamento de vigas em concreto armado. A característica principal do modelo é aliar a economia esperada com a segurança necessária através de um processo de minimização do custo de construção da estrutura, sujeito à restrições mecânicas e de confiabilidade. Os resultados obtidos para uma viga isostática biapoiada mostraram que o modelo foi capaz de encontrar de fato uma configuração mais econômica que o dimensionamento padrão e, ainda, com a segurança garantida.

Palavras-chave: Elementos finitos. Confiabilidade. Otimização. Concreto armado.

A RELIABILITY-BASED DESIGN OPTIMIZATION MODEL APPLIED TO REINFORCED CONCRETE BEAMS

Abstract

This work shows a reliability-based optimization model applied to the design of reinforced concrete beams. The main feature of the model is to alie the economy with the necessary security through a construction cost minimization process of the structure, subject to mechanical and reliability constraints. The results for an isostatic supported beam showed that the model was able to find out a better configuration than the standard design and, with the guaranteed security.

Keywords: Finite elements. Reliability. Optimization. Reinforced concrete.

Linha de Pesquisa: Métodos Numéricos

1 INTRODUÇÃO

A segurança e economia são as principais metas de um projeto estrutural. Do ponto de vista da economia, a otimização matemática pode ser uma ferramenta interessante para a obtenção de soluções com menor custo. Já o cálculo de probabilidades de se atingir estados limites, realizado com o uso da teoria da confiabilidade, fornece uma medida mais consistente do grau de segurança da estrutura. Portanto, a combinação entre as teorias de otimização e confiabilidade representam uma ferramenta em potencial para o projeto de estruturas de engenharia. Esse acoplamento é conhecido na literatura como RBDO (Reliability-Based Design Optimization) e já possui diversos trabalhos publicados (SriVidya & Ranganathan, 1995; Royset et al, 2001; Frangopol & Maute, 2003; Barakat et al, 2003; Nogueira & Venturini, 2006).

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, gorlanog@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, venturin@sc.usp.br



É neste contexto que se insere este trabalho. Pretende-se, portanto, apresentar um modelo de otimização baseado em confiabilidade aplicado às vigas em concreto armado, no qual o projeto da viga é obtido minimizando o seu custo de construção, submetido a restrições de equilíbrio, de caráter construtivo e uma restrição em confiabilidade para garantir a segurança da estrutura. Para demonstrar a aplicabilidade do modelo, foi apresentado um exemplo de uma viga biapoiada isostática em concreto armado.

2 METODOLOGIA

A produção de um modelo de otimização baseada em confiabilidade requer o cumprimento de quatro etapas. A primeira delas consiste no desenvolvimento de um modelo mecânico para a análise das vigas, capaz de representar adequadamente o comportamento não-linear dos materiais aço e concreto. O concreto foi representado pelo modelo de dano de Mazars (1984) e o aço das armaduras foi tratado através dos conceitos da teoria da plasticidade, com o uso de um modelo elastoplástico com encruamento isótropo linear positivo.

A segunda etapa trata da implementação de métodos de confiabilidade para a obtenção dos índices de confiabilidade para os estados limites considerados. Neste trabalho utiliza-se o Método da Superfície de Resposta (RSM), no qual se determina, primeiramente, uma aproximação da equação de estado limite do problema e, em seguida, calcula-se o índice de confiabilidade.

Na terceira etapa do trabalho, desenvolveu-se um modelo de otimização da seção transversal de uma viga em concreto armado. A seção transversal é obtida a partir da minimização do seu custo total de construção, com restrições de equilíbrio para momento fletor, restrições construtivas e limites para as variáveis de projeto que estão sendo otimizadas.

E, finalmente, a quarta e última etapa consiste no acoplamento de todos esses modelos em uma única ferramenta computacional que visa obter a viga de menor custo com a segurança desejada (dada por uma restrição em confiabilidade).

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Formulação do problema de otimização de vigas

O modelo desenvolvido parte das seguintes hipóteses conforme Figura 1.

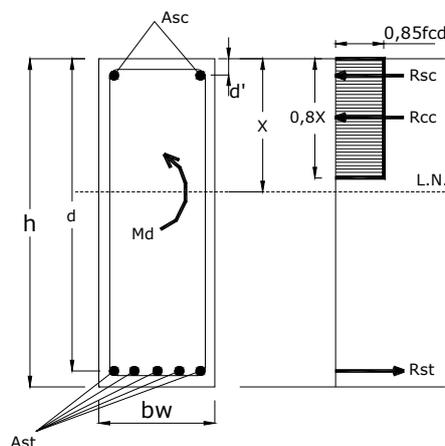


Figura 1 – Seção transversal da viga considerada.



Assim, a formulação final do problema pode ser apresentada da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar: } C(p_k) &= b_w(p_1 + d')C_c + (p_2 + p_3)\rho_s C_s + [b_w + 2(p_1 + d')]C_f \\ h_1(p_k) &= 0,68b_w p_1 f_{cd} \beta_x + p_3 f_{yd} - p_2 f_{yd} = 0 \\ h_2(p_k) &= 0,408b_w p_1^2 f_{cd} \beta_x^2 + p_3 f_{yd} (p_1 \beta_x - d') + p_2 f_{yd} (p_1 - p_1 \beta_x) - M_d = 0 \\ \text{Sujeito à: } g_3(p_k) &= \rho_{ac} p_1 - p_3 - p_2 \geq 0 \\ g_4(p_k) &= m p_2 - p_3 \geq 0 \\ g_5(p_k) &= a_0 + a_1 p_3 + a_2 p_3^2 + a_3 p_2 + a_4 p_2^2 + a_5 p_1 + a_6 p_1^2 - \beta_a \geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

onde $C(p_k)$ é a função custo por metro de viga, b_w é a largura da seção transversal, d' é a distância do centro da armadura comprimida até a face da seção, ρ_s é a massa específica do aço, C_c é o custo do concreto por unidade de volume, C_s é o custo da armadura por unidade de massa, C_f é o custo da fôrma por unidade de área, f_{cd} é a resistência de cálculo à compressão do concreto, f_{yd} é a resistência de cálculo à tração do aço, β_x é a posição adimensional da linha neutra, ρ_{ac} é a porcentagem máxima de armadura permitida na seção transversal adotada em 4%, $m = 0,5$ para limitar a quantidade de armadura comprimida em no máximo 50% da armadura tracionada e M_d é o momento solicitante de cálculo. As variáveis otimizadas são: p_1 = altura útil da seção, p_2 = área da armadura de tração, p_3 = área da armadura de compressão.

A restrição de confiabilidade dada por g_5 é obtida a partir do RSM. O ponto ótimo é posicionado como o centro do plano de experiência escolhido. São dadas pequenas variações nas variáveis de otimização, gerando um conjunto de pontos do plano. Para cada ponto gerado desse plano, realiza-se uma análise completa de confiabilidade, de modo que o vetor de respostas para a regressão por mínimos quadrados é o vetor formado pelos índices de confiabilidade obtidos para cada ponto do plano de experiência. Após isso, a regressão é realizada, obtendo-se uma função polinomial de segundo grau sem termos cruzados na forma de uma superfície de confiabilidade-alvo, onde β_a é o valor do índice de confiabilidade-alvo e os a_i são os coeficientes obtidos na regressão da superfície.

O problema de otimização definido na Eq. (1) foi resolvido aplicando-se a rotina DNCONF da biblioteca matemática IMSL do Compaq Visual Fortran 6.6. Essa rotina foi proposta por Schittkowski (1986) e usa um método de Programação Sequencial Quadrática (SQP).

4 RESULTADOS OBTIDOS OU ESPERADOS

O modelo foi testado em uma viga biapoiada isostática submetida a duas cargas concentradas nos terços do vão, conforme mostra a Figura 2. O objetivo da análise é dimensionar a viga considerando o modelo proposto de RBDO para os casos de comportamento elástico-linear e não-linear dos materiais, com índice de confiabilidade-alvo de 4,0.

A armadura de cisalhamento é dimensionada após a obtenção da configuração ótima da viga. A largura da viga foi mantida constante no valor de 12cm. As variáveis aleatórias utilizadas na análise de confiabilidade foram a resistência do concreto (média = 27MPa e coeficiente de variação = 15%) e a resistência do aço (média = 500MPa e coeficiente de variação = 8%), ambas com distribuição normal e independentes. Com relação à parte mecânica do modelo, a viga foi discretizada em 6 elementos finitos de mesmo comprimento, com 6 pontos de Gauss no comprimento de cada elemento e 20 na altura.



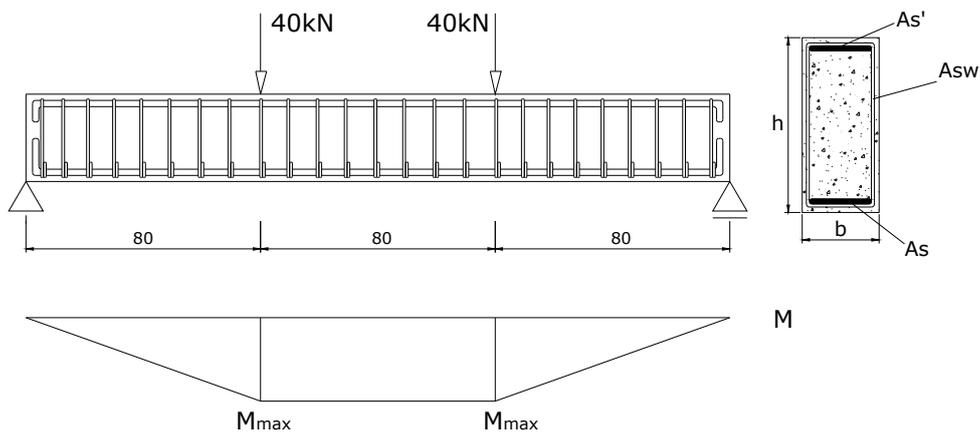


Figura 2 – Geometria (em cm) e carregamentos da viga analisada.

Tabela 1 – Resultados obtidos pelo dimensionamento clássico e pelo modelo RBDO

| Modelo | H (cm) | A_S (cm ²) | $A_{S'}$ (cm ²) | A_{SW} (cm ² /m) | β | Custo (R\$) |
|-----------------|--------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------------|---------|-------------|
| NBR 6118:2003 | 27,00 | 3,69 | 0,00 | 1,80 | 4,33 | 124,29 |
| RBDO linear | 28,04 | 4,07 | 0,00 | 1,60 | 4,00 | 129,52 |
| RBDO não-linear | 27,70 | 3,27 | 0,00 | 1,60 | 4,00 | 121,93 |

5 CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que o processo de otimização baseado em confiabilidade considerando comportamento não-linear dos materiais forneceu a melhor configuração para a viga e, conseqüentemente, o menor custo. A única desvantagem foi o tempo de processamento de 8 minutos contra pouco mais de 1 segundo quando considerado modelo linear. O modelo mostrou-se eficaz nesse tipo de problema revelando forte potencial para aplicações maiores na engenharia de estruturas.

6 AGRADECIMENTOS

À FAPESP pela bolsa de estudos concedida, à CAPES pelo apoio financeiro durante o estágio no exterior e ao Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP.

7 REFERÊNCIAS

BARAKAT, S.; KALLAS, N.; TAHA, M.Q. Single objective reliability-based optimization of prestressed concrete beams. **Computers & Structures**, v. 81, p. 2501-2512, Jul., 2003.

FRANGOPOL, D. M.; MAUTE, K. Life-cycle reliability-based optimization of civil and aerospace structures. **Computers & Structures**, v. 81, n. 7, p. 397-410, 2003.

MAZARS, J. **Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non lineaire et à la rupture du béton de structure**. 1984. Tese (Doutorado) – Université Paris 6, Paris, 1984.



NOGUEIRA, C. G.; VENTURINI, W. S. Dimensionamento ótimo de barras de concreto armado com restrições dadas em índices de confiabilidade. **Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural**, v. 3, n. 2, p. 69-83, 2006.

ROYSET, J. O.; DER KIUREGHIAN, A.; POLAK, E. Reliability-based optimal design of series structural systems. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 127, n. 6, p. 607-614, Jun., 2001.

SCHITTKOWSKI, K. NLPQL: A FORTRAN subroutine solving constrained nonlinear programming problems. **Annals of Operations Research**, v. 5, 1986.

SRIVIDYA, A.; RANGANATHAN, R. Reliability based optimal design of reinforced concrete frames. **Computers & Structures**, v. 57, n. 4, p. 651-661, Abr., 1995.



DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS PARALELO PARA ANÁLISE NÃO LINEAR DE ESTRUTURAS

Célia Leiko Ogawa Kawabata¹, Wilson Sergio Venturini² & Humberto Breves Coda³

Resumo

Este projeto de pesquisa se insere no contexto de desenvolvimento de formulações numéricas para problemas de engenharia de estruturas que os pesquisadores Wilson S. Venturini e Humberto B. Coda vêm desenvolvendo no Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC. Nesse projeto foi paralelizado um algoritmo que utiliza o método de elementos finitos. Utilizou-se MPI e os testes foram feitos em um cluster com 12 nós de processamento. Obteve-se bom desempenho nesse algoritmo e agora se pretende paralelizar o método de elementos de contorno e disseminar aos demais membros do grupo a utilização de computação paralela.

Palavras-chave: Sistemas distribuídos. Programação paralela. Método dos Elementos Finitos. Ambiente de passagem de mensagem.

DEVELOPMENT OF A PARALLEL SOFTWARE FOR A DYNAMICAL NON-LINEAR GEOMETRICAL ANALYSIS OF STRUCTURES

Abstract

This research project deals with the development and implementation of numerical formulations for structural engineering problems that the researches Wilson S. Venturini and Humberto B. Coda have been developing in the Structural Engineering Department of EESC. The parallelized algorithm uses the finite element method. The message passing interface adopted is MPI and tests were carried out in a 12 nodes cluster. We achieved good performance and then we intend to parallelize the boundary element method and spread the parallel computing to the others members of the group.

Keywords: Distributed systems. Parallel programming. Finite Elements Method. Message passing environment.

Linha de Pesquisa: Métodos Numéricos

1 INTRODUÇÃO

A utilização de programas paralelos é um caminho natural para aproveitar melhor o potencial dos computadores modernos que possuem múltiplos processadores. A adaptação de programas seqüenciais à metodologia paralela necessita de diversas etapas e sua dificuldade é afetada por diversos fatores.

A versatilidade na geração de dados e a facilidade da análise dos resultados, que permite o contínuo aprimoramento dos modelos mecânicos inseridos no sistema aliada ao esgotamento do ambiente seqüencial demonstra a necessidade de recorrer a técnicas computacionais mais eficientes.

¹ Pós-doutoranda em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, celiak@gmail.com

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, venturin@sc.usp.br

³ Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, hbcoda@sc.usp.br



O objetivo desse trabalho é a criação de um programa computacional em arquitetura paralela (ACADSOFT-P), para ser utilizado como plataforma para futuras pesquisas em métodos numéricos e mecânica estrutural. Pretende-se dar continuidade a elaboração de um sistema computacional decorrente do projeto de pesquisa de Rodrigo Ribeiro Paccola. Com o sistema em implementação criou-se no Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC uma estratégia simples e eficiente da transformação de códigos científicos, desenvolvidos no grupo, usando modelos seqüenciais (ACADSOFT-S) utilizáveis em pesquisas aplicadas e numéricas. Esta estratégia permite a utilização, em uma mesma plataforma, de um pré-processador de um software comercial, ANSYS® por exemplo, e um pós-processador. Os resultados alcançados com o projeto mencionado foram excelentes como verificados em diversos trabalhos que se utilizam dessa estratégia, Paccola (2004). Além desses trabalhos, deve-se ainda destacar os seguintes artigos sobre o assunto publicados em periódicos de grande circulação: Greco & Coda (2004); Greco et al. (2004), Coda & Greco (2006).

A opção pelo processamento paralelo está permitindo a evolução, em termos de aplicações mais complexas, da análise estrutural com a redução significativa dos tempos de processamento em comparação com os hoje observados quando se emprega o processamento seqüencial. Com o aumento de desempenho do sistema computacional está sendo possível abordar problemas diversos de engenharia estrutural tais como: impacto de veículos (automóveis, aeronaves, trens), impacto de projéteis em blindados, análise não-linear geométrica exata de edifícios altos, torres de transmissão, pontes pênsis e estaiadas etc. Deve-se mencionar que estas aplicações já estavam sendo feitas em modelos bidimensionais com bastante sucesso e tempo de processamento aceitáveis utilizando-se a plataforma do ACADSOFT seqüencial, Paccola (2004). A paralelização do método de elementos finitos em desenvolvimento está permitindo o aumento tanto do tamanho quanto do nível de detalhamento do modelo.

2 METODOLOGIA

O processamento paralelo de ser realizado tanto em *clusters* quanto em computadores de múltiplos núcleos. Há dois computadores com processadores Xeon de 8 núcleos de processamento e 16 GB de RAM. O *cluster* é composto por 14 computadores, onde existe um computador mestre, 12 computadores que fazem o papel de escravos e uma máquina que possui a mesma configuração dos computadores escravos para fazer a tomada de tempo do programa sendo executado na sua forma seqüencial para cálculo do *speedup* e da eficiência do programa paralelo.

O computador mestre possui um processador Xeon X5160 de dois núcleos de 3 GHz cada e tem 64 GB de memória RAM. Os computadores escravos possuem processador Xeon X5460 de 4 núcleos de 2,67 GHz cada e 12 GB de memória RAM. São 12 escravos com essa configuração. Os computadores que formam o *cluster* estão interligados com rede Gigabit Ethernet.

O sistema operacional utilizado é o Linux Ubuntu versão 8.04. Nos escravos utilizou-se a versão Ubuntu Server 8.04, e no computador mestre utilizou-se a versão workstation com interface gráfica que facilita o uso do *cluster*.

Em todos os nós foi instalado o ambiente de passagem de mensagem LAM versão 7.1.2 e o compilador Fortran Intel versão 10.

As etapas que estão sendo seguidas para a execução do projeto compreendem os itens:

- Estudos específicos sobre programação em paralelo utilizando linguagem FORTRAN e o ambiente de passagem de mensagem MPI.
- Identificação dos pontos críticos de processamento. Nessa fase, além do estudo pormenorizado do código seqüencial e da identificação dos laços mais importantes, foram processados exemplos com grande número de graus de liberdade (com processador seqüencial) identificando pontos de consumo excessivo de tempo e de memória.



- Paralelização do programa. A paralelização do programa foi desenvolvida em uma máquina do tipo PC utilizando o sistema operacional Linux. Primeiro paralelizou-se a integração de elementos, depois a montagem da matriz Hessiana e por último a solução do sistema.
- Processamento de modelos com grande número de graus de liberdade. Estão sendo processados exemplos reais que antes não eram passíveis de serem processados devido ao consumo de memória excessivo e ao tempo de processamento.

Os mesmos passos serão seguidos para a paralelização do algoritmo de elementos de contorno.

3 DESENVOLVIMENTO

A paralelização do código do método de elementos finitos está finalizada. Inicialmente paralelizou-se a integração dos elementos, depois a montagem da matriz e por fim a solução do sistema. A comunicação entre os nós foi implementada com o envio apenas dos dados necessários para a execução dos escravos.

Foi implementada uma fase de pré-processamento da montagem da matriz, definindo-se rotulação direta das posições relativas dos graus de liberdade para balancear o processamento da montagem da matriz. Assim, tanto a integração dos elementos quanto o tempo de montagem da matriz se tornaram balanceados. Essa modificação não apenas balanceou a carga entre os processadores escravos como também proporcionou um ganho de desempenho tanto no programa seqüencial quanto no paralelo.

Outra modificação efetuada no código foi a otimização do uso da memória nos escravos. Os escravos passaram a alocar apenas a memória necessária para o cálculo da parte que lhes cabe. Dessa forma, apenas o processador mestre precisa de mais memória para a montagem da matriz completa e da solução do sistema.

A solução do sistema foi paralelizada utilizando o software aberto MUMPS (*Multifrontal Massively Parallel Solver*) (Amestoy et al., 2006) versão 4.8.4. Ele foi escolhido por suportar tanto arquitetura seqüencial quanto paralela, estar totalmente adaptado para o formato da matriz comprimida utilizada pelo MA27 e utilizar o ambiente de passagem de mensagem MPI. Há um ganho de desempenho com a adoção do software MUMPS, tanto no caso seqüencial quanto no caso paralelo. Dependendo do modelo que está sendo utilizado alcança-se um desempenho (caso seqüencial) de até 5 vezes mais rápido que o MA27.

No atual estágio, a integração dos elementos e montagem da matriz são feitos nos escravos, que enviam os resultados para o mestre que então redistribui a matriz para que o sistema seja resolvido. Atualmente está em fase de implementação o cálculo da solução da matriz distribuída, sem a necessidade de comunicação com o mestre, diminuindo o tráfego e a necessidade de memória no mestre para o armazenamento da matriz completa.

O algoritmo do método de elementos de contorno está em fase de análise e preparação para a paralelização. Como os passos de tempo nesse tipo de método são calculados independentemente, a paralelização será feita dividindo-se o total de passos de tempo entre os processadores escravos.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Para uma análise global do programa paralelizado, utilizou-se um toróide com 201.600 graus de liberdade. A Figura 1 mostra os resultados, considerando-se o comportamento do *speedup* de acordo com o número de escravos e cada parte do programa.



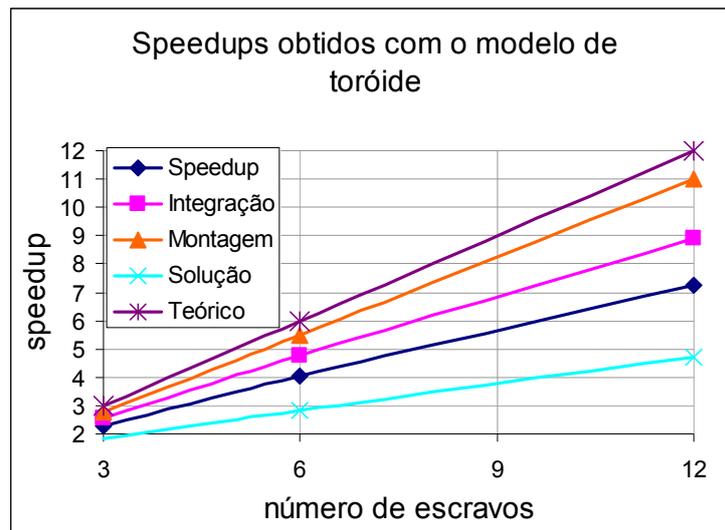


Figura 1 – Speedups obtidos com a simulação de um toróide.

Na Figura 1 é possível observar que a parte que obteve o melhor desempenho é a montagem da matriz seguida da integração dos elementos e por último a solução do sistema. A integração de elementos possui uma sobrecarga de processamento, pois os elementos de interface da divisão do modelo para o processamento paralelo ocasionam a necessidade do cálculo desses elementos em 2 processadores. A montagem da matriz não tem essa sobrecarga e por isso possui desempenho melhor. Observa-se que o *speedup* global também alcança bom desempenho.

5 CONCLUSÕES PARCIAIS

O objetivo de estudo e identificação dos gargalos de tempo iniciais para paralelização do AcadSoft foi plenamente atingido. Dessa forma, o objetivo de estudo teórico, proposta e implementação da paralelização da integração de elementos e montagem do sistema do programa *cascatridin.for* foi atingido, atingindo bons níveis de *speedup* e eficiência para o período que a pesquisa se desenvolveu.

A disseminação dos conhecimentos, criação de cultura de programação em paralelo, bem como a ajuda direta na paralelização de outros códigos já está sendo realizada.

Como continuidade do trabalho, um algoritmo do método de elementos de contorno está em fase de paralelização.

6 AGRADECIMENTOS

A autora agradece à FAPESP pelo apoio financeiro.

7 REFERÊNCIAS

AMESTOY, P. R. *et al.* Hybrid scheduling for the parallel solution of linear systems. **Parallel Computing**, Elsevier Science Publishers, v. 32, n. 2, p.136-156, 2006.



CODA, H. B.; GRECO, M. Positional FEM formulation for flexible multi-body dynamic analysis. **Journal of Sound and Vibration**, v. 290, n. 3/5, p. 1141-1174, 2006.

GRECO, M.; CODA, H. B. A simple and precise FEM formulation for large deflection 2D frame analysis based on position description. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, n. 193, p. 3541-3557, 2004.

GRECO, M.; CODA, H. B.; VENTURINI, W.S. An alternative contact/impact identification algorithm for 2D structural problems. **Computational Mechanics**, v. 34, n. 5, p. 410-422, 2004.

PACCOLA, R. R. **Análise não linear física de placas e cascas anisotrópicas acopladas ou não com meio contínuo tridimensional viscoelástico através da combinação entre o MEC e o MEF.** Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004.



DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DO MEC ACOPLADAS AO MEF NA ANÁLISE DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

Dimas Betioli Ribeiro¹ & João Batista de Paiva²

Resumo

O objetivo central deste trabalho, que se encontra na fase inicial de seu cronograma, é desenvolver um programa de computador para a análise de problemas de interação solo-estrutura. O programa permitirá considerar várias camadas de solo, cada qual com características físicas diferentes. Sobre este solo, o qual poderá conter estacas cruzando as diferentes camadas, poderão ser apoiados diversos tipos de estruturas complexas, incluindo até mesmo um edifício completo. Todos os materiais envolvidos serão modelados como isotrópicos, elásticos e lineares, e as análises poderão ser estáticas ou dinâmicas.

Palavras-chave: Método dos Elementos de Contorno. Método dos Elementos Finitos. Dinâmica. Interação solo-estrutura.

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF BEM TECHNIQUES COUPLED TO THE FEM IN SOIL STRUCTURE INTERACTION ANALYSIS

Abstract

This work is still in its initial phase, and its main objective is to develop a computer program for soil-structure interaction analysis. The program will consider several soil layers, which may present different physical characteristics and contain piles crossing the interfaces. Many types of complex structures will be considered interacting with this soil, including even an entire building. All the materials involved will be modeled as isotropic, elastic and linear, and the analysis will be static or dynamic.

Keywords: Boundary Element Method. Finite Element Method. Dynamics. Soil structure interaction.

Linha de Pesquisa: Métodos Numéricos

1 INTRODUÇÃO

A simulação numérica de problemas de interação do solo com a estrutura pode ser considerada um atual desafio da engenharia, dada a complexidade dos subsistemas e a variabilidade de materiais envolvidos. Focando mais especificamente o solo, é fato que sua modelagem representa um problema da mecânica dos sólidos complexo em virtude de que não houve controle tecnológico para a formação de seu material. Sua formação se deu em função de diversas condições de intemperismo sobre rochas, tornando o meio difícil de ser modelado numericamente. Neste contexto, podem ser encontrados na literatura diversos trabalhos dedicados ao estudo deste tema, os quais empregam diferentes técnicas em suas formulações.

Entre estas formulações, uma ferramenta numérica eficiente na simulação de domínios infinitos é o método dos elementos de contorno (MEC). Como somente o contorno do domínio do problema é dividido em elementos, a análise fica reduzida em uma dimensão. Isto diminui o custo

¹ Pós-Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, dimasbetioli@gmail.com

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, paiva@sc.usp.br



computacional envolvido na resolução de equações, além de simplificar o armazenamento de dados. Tendo em vista estas vantagens, diversos autores empregam o MEC nestas situações. Entre eles destaca-se Ribeiro (2009), em que é proposta uma formulação para a análise tridimensional da interação de um edifício, modelado pelo método dos elementos finitos (MEF), com um solo composto por uma ou mais camadas apoiadas em uma superfície de deslocamento nulo. O solo, que pode conter estacas, foi modelado com o MEC empregando elementos de contorno infinitos (ECI), e utilizando uma técnica alternativa para a consideração de camadas.

Neste trabalho, utiliza-se a formulação de Ribeiro (2009) como ponto de partida no desenvolvimento de uma ferramenta numérica ainda mais abrangente. Serão estudadas as seguintes opções: Estender a formulação das estacas para casos mais gerais; Estender a técnica alternativa empregada no solo para o cálculo de tensões; Introduzir não-linearidade geométrica no edifício; Permitir análises dinâmicas; Investigar e aplicar técnicas de processamento paralelo.

2 METODOLOGIA

O maciço de solos será modelado com o MEC empregando inicialmente as soluções fundamentais de Kelvin. Parte-se da expressão obtida em Ribeiro & Paiva (2009), válida para domínios não-homogêneos, isotrópicos e elástico-lineares:

$$\left\{ \sum_{k=1}^{nd} \left[\frac{E_k}{E_1} c_{ijk} \right] \right\} u_j + \sum_{l=1}^{nl} \left[\frac{E_l}{E_1} \int_{\bar{\Gamma}_l} p_{ij}^* u_j d\bar{\Gamma}_l \right] + \sum_{c=1}^{nc} \left[\frac{\Delta E_{mn}}{E_1} \int_{\Gamma_{mn}} p_{ij}^* u_j d\Gamma_{mn} \right] = \sum_{l=1}^{nl} \left[\frac{E_l}{E_1} \int_{\bar{\Gamma}_l} u_{ijl}^* p_j d\bar{\Gamma}_l \right] \quad (1)$$

Na Eq. (1), o número total de domínios é nd , o número de contornos de contato é nc e o número de contornos livres é nl . Para maiores detalhes, recomenda-se consultar Ribeiro & Paiva (2009).

Esta expressão será estendida para o cálculo de tensões no maciço de solos, partindo das equações integrais de contorno escritas para deslocamentos. Serão inicialmente obtidas as deformações a partir de (1), partindo-se em seguida para as tensões.

Com o intuito de reduzir o custo computacional sem prejudicar a precisão dos resultados, serão empregados ECIs nas bordas da malha de EC do maciço de solos, seguindo a mesma estratégia empregada em Ribeiro (2009).

No caso das estacas, modeladas pelo MEF, serão utilizadas duas formulações distintas. A primeira será o EF com quatorze parâmetros nodais apresentado em Filho et al. (2005), estendendo a formulação para o caso em que as estacas podem ser inclinadas. A segunda formulação envolve outro tipo EF unidimensional, o qual possuirá apenas três nós, havendo graus de liberdade de rotação tanto no topo como na base. Para os deslocamentos horizontais serão utilizadas funções de forma do quarto grau, e do segundo grau para forças horizontais, deslocamentos verticais e forças verticais.

Além disto, pretende-se adaptar a formulação das estacas para que possam estar em contato com mais de um material ao mesmo tempo, sendo necessário adaptar a Eq. (1). Será introduzido também escorregamento na interface estaca-solo, utilizando um procedimento iterativo no qual as tensões de contato são calculadas e comparadas com valores conhecidos de resistência.

Serão iniciados estudos de problemas dinâmicos, aplicando os conceitos inicialmente em uma estaca isolada imersa em um semi-espaco infinito. Entre os diversos autores que serão consultados na literatura destaca-se o trabalho de Sen et al. (1985), no qual foi obtida uma formulação eficiente para a simulação de grupos de estacas imersas em um semi-espaco infinito e homogêneo.

O edifício, que poderá incluir um radier blocos e estacas como estruturas de fundação, será modelado com o MEF inicialmente em teoria de primeira ordem. Desta forma, os EFs e o acoplamento MEC-MEF será feito, inicialmente, da mesma forma que em Ribeiro (2009). Para a consideração de



análise não-linear geométrica no conjunto solo-estrutura, serão empregados conceitos de teoria de segunda ordem semelhantes aos utilizados no trabalho de Martins (2001).

Ao final do projeto, serão estudadas e aplicadas técnicas de processamento paralelo com o intuito de reduzir o tempo de processamento necessário para as simulações. Será empregada uma abordagem explícita, isto é, dividindo-se as tarefas do problema em subproblemas os quais são distribuídos entre diferentes computadores. Esta técnica é empregada no trabalho de Topping & Khan (1996), o qual será utilizado como referência no início dos estudos.

3 DESENVOLVIMENTO

Como o trabalho se encontra em sua fase inicial, até o presente momento não há novas formulações a serem apresentadas. Os autores estão atualmente se dedicando à extensão da Eq. (1) para o caso do cálculo de tensões no interior do maciço de solos.

4 RESULTADOS OBTIDOS OU ESPERADOS

A principal vantagem da utilização da Eq. (1), desenvolvida para a obtenção dos deslocamentos, é a melhora da precisão dos resultados em deslocamento. Desta forma, espera-se que a extensão desta expressão para o cálculo das tensões promova uma melhoria também significativa na precisão dos resultados de tensão. Serão eliminadas aproximações nas interfaces, tornando possível mapear de forma detalhada a distribuição de tensão em todo o maciço, considerando a interação de diversos tipos de estrutura.

Espera-se que as alterações feitas na formulação das estacas permitam que sejam feitas análises mais detalhadas em sua vizinhança, investigando deslocamentos em trechos específicos do fuste e na base. Além disto, será possível analisar exemplos práticos mais abrangentes, como o de uma estaca com a ponta cravada na rocha e avaliar o escorregamento de estacas.

Como a consideração de base flexível tem grande importância exatamente no aumento dos deslocamentos totais, a análise não linear geométrica permitirá quantificar de forma precisa os erros introduzidos quando adotada a simplificação de base rígida.

Após a etapa inicial dos estudos de problemas dinâmicos, considerando apenas estacas isoladas, as aplicações serão estendidas a problemas gradualmente mais complexos, buscando por fim chegar à análise dinâmica de todo o sistema composto por um edifício com suas estruturas de fundação e apoiado em um maciço de solos não-homogêneo.

A precisão dos resultados obtidos será avaliada, em princípio, a partir da comparação com valores obtidos por outros autores. Em exemplos mais complexos, para os quais não existam resultados disponíveis na literatura, será feita uma análise de convergência dos valores obtidos. Desta forma, o mesmo exemplo será resolvido várias vezes e com um aumento gradativo do número de graus de liberdade empregados na simulação. A partir do momento em que um maior refinamento de malha não influir mais no resultado, fica estabelecida a convergência e o resultado final é determinado.

Será necessário que sejam feitos estudos para determinar quais trechos da malha devem ser refinados com mais intensidade de forma que a convergência seja conseguida com um número mais reduzido de graus de liberdade. Tais estudos serão dependentes da situação analisada, podendo ser distintos em diferentes casos.

5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Espera-se que seja obtida, futuramente, uma abrangente ferramenta numérica para a simulação de problemas de interação do solo com a estrutura. Entre os diversos resultados que serão obtidos, os que se espera que sejam mais relevantes são os de maior precisão no cálculo das



tensões, as análises com não linearidade geométrica e a investigação de fenômenos locais de interação estaca-solo.

Espera-se também que seja demonstrada a importância da consideração de uma base flexível no cálculo de edificações, quantificando os erros introduzidos quando o problema é calculado de forma mais simplificada, ou seja, considerando a base perfeitamente rígida.

6 AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC/USP, onde este trabalho foi desenvolvido, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

7 REFERÊNCIAS

BREBBIA, C. A.; DOMINGUEZ, J. **Boundary elements: an introductory course**. London: Computational Mechanics Publications, 1992.

FILHO, R. M.; MENDONÇA, A. V.; PAIVA, J. B. Static boundary element analysis of piles submitted to horizontal and vertical loads. **Engineering analysis with boundary elements**, v. 29, p. 195-203. 2005.

MARTINS, C. H. **Análise não linear de estruturas tridimensionais de edifícios de andares múltiplos com núcleos resistentes considerando a rigidez transversal à flexão das lajes**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

RIBEIRO, D. B. **Estudo e aplicação de um elemento de contorno infinito na análise da interação solo-estrutura via combinação MEC/MEF**. 2009. 214 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

RIBEIRO, D. B.; PAIVA, J. B. An alternative multi-region bem technique for three-dimensional elastic problems. **Engineering analysis with boundary elements**, v. 33, p. 499-507. 2009.

TOPPING, B. H. V.; KHAN, A. I. **Parallel finite element computations**. Edinburgh: Saxe-Coburg Publications, 1996.



ANÁLISE NÃO LINEAR GEOMÉTRICA DE SÓLIDOS ELÁSTICOS COM GRADAÇÃO FUNCIONAL VIA MEF-P

João Paulo Pascon¹ & Humberto Breves Coda²

Resumo

É apresentado, neste trabalho, o código computacional desenvolvido, que é capaz de simular casos com grandes deslocamentos e geometria complexa. Optou-se pela análise não linear geométrica para maior precisão, pelo elemento finito sólido tetraédrico com três parâmetros nodais e grau de aproximação polinomial qualquer, pela lei elástica isotrópica de Saint Venant-Kirchhoff e pela contínua variação das propriedades constitutivas - gradação funcional. Ademais, validou-se a metodologia proposta com exemplos numéricos.

Palavras-chave: Análise não linear geométrica. Método dos Elementos Finitos Posicional. Elementos sólidos tetraédricos. Materiais com gradação funcional. Lei Constitutiva de Saint Venant-Kirchhoff.

GEOMETRICALLY NONLINEAR ANALYSIS OF FUNCTIONALLY GRADED ELASTIC SOLIDS VIA P-FEM

Abstract

It is presented in this work the developed computational code, which is able to simulate large displacement cases and problems with complex geometry. It was decided to use: geometrically nonlinear analysis for greater accuracy; tetrahedral solid finite element with three nodal parameters and any degree of polynomial approximation; isotropic elastic law of Saint Venant-Kirchhoff; continuous variation of constitutive properties - functionally graded. Moreover, the proposed methodology was validated with numerical examples.

Keywords: Geometrically nonlinear analysis. Positional Finite Element Method. Tetrahedral solid elements. Functionally graded materials. Saint Venant-Kirchhoff Constitutive Law.

Linha de Pesquisa: Métodos Numéricos

1 INTRODUÇÃO

É cada vez mais intenso o uso de ferramentas computacionais para análise e previsão do comportamento mecânico de estruturas. Tem-se buscado maior precisão de resultados para dimensionamento em projetos e para pesquisa acadêmica com desenvolvimento e utilização de diversas metodologias numéricas. Pode-se destacar o Método dos Elementos Finitos (MEF), bastante empregado e estudado na análise estrutural. Optou-se, neste estudo, pelo MEF posicional, no qual os parâmetros nodais são as posições finais dos nós (Coda & Greco, 2004).

Com a evolução dos computadores, concernente à velocidade de processamento, à capacidade de memória e ao uso de multiprocessadores, é possível buscar códigos computacionais cada vez mais robustos e mais precisos, mesmo com a exigência de grande esforço computacional.

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, jppascon@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, hbcoda@sc.usp.br



Tal procedimento, que foi adotado neste estudo, é diferente da tendência existente em diversos centros de pesquisa de se aumentar a velocidade de processamento e se diminuir o gasto de memória com uso de elementos de baixa ordem e técnicas de integração reduzida.

Outro importante aspecto deste trabalho é a gradação funcional, que é a contínua variação das propriedades constitutivas ao longo do material. Tal tipo de material permite a continuidade dos campos de tensão, ao contrário dos modelos com materiais compósitos nos quais os referidos campos são descontínuos.

Por fim, para que se possa prever o comportamento mecânico de estruturas com grandes deslocamentos, foi usada a análise não linear geométrica, isto é, a descrição do equilíbrio de forças na posição final ou deformada da estrutura. Tal procedimento, embora matematicamente mais complexo, mostra-se mais realista do que a análise linear geométrica, na qual o equilíbrio é feito na configuração inicial.

2 METODOLOGIA

2.1 Cinemática e deformação

O elemento finito usado é o sólido tetraédrico com três graus de liberdade nodais e grau de aproximação polinomial qualquer. São aplicados as posições inicial e atual e o espaço adimensional auxiliar (Coda & Paccola, 2007). Como dito anteriormente, os graus de liberdade são as posições finais dos nós. As configurações inicial (\mathbf{x}) e final (\mathbf{y}) são aproximadas pelas funções de forma de Lagrange. Além disso, deve-se destacar que o número de nós ou de funções de forma depende do grau do polinômio aproximador escolhido.

A medida de deformação adotada neste trabalho é a de Green-Lagrange, muito usada em análises com grandes deslocamentos ou com elevadas mudanças de configuração (Pascon, 2008).

2.2 Lei constitutiva

Toda lei constitutiva - relação entre tensão e deformação - pode ser expressa com a energia específica de deformação, descrita por unidade de volume inicial (Holzapfel, 2000). Define-se, neste trabalho, a lei isotrópica elástica de Saint Venant-Kirchhoff (Ciarlet, 1993) com lei de potência para gradação funcional (Chi & Chung, 2006):

$$U_{ESP}(\vec{x}) = \frac{1}{2}(\mathbf{E} : \mathbf{C} : \mathbf{E}) = \frac{1}{2}(\mathbf{E}_{ij} \mathbf{C}_{ijkl} \mathbf{E}_{kl}) \quad (1.a)$$

$$\mathbf{E}(\vec{x}) = E_1 \left[\left(\frac{z}{L} \right) \right]^p + E_2 \left[1 - \left(\frac{z}{L} \right) \right]^p \quad (1.b)$$

onde U_{ESP} é a energia de deformação específica, \mathbf{C} é o tensor elástico de quarta ordem idêntico ao da lei de Hooke generalizada para o caso linear, $E(x)$ é o variável módulo de Young, E_1 e E_2 são os limites de $E(x)$ para $z = 0$ e $z = L$ e p é o coeficiente de potência.

A medida de tensão usada é aquela energeticamente conjugada à deformação de Green-Lagrange, isto é, a tensão de Piola-Kirchhoff de segunda espécie.



2.3 Equilíbrio

O equilíbrio é dado pelo Princípio da Mínima Energia Potencial Total tal como:

$$\vec{F}_{INT} = \vec{F}_{EXT} \quad \text{ou} \quad \int_{V_0} \frac{\partial U_{ESP}}{\partial \vec{y}} dV_0 = \int_{\xi} \frac{\partial U_{ESP}}{\partial \vec{y}} J_0 d\xi = \vec{F}_{EXT} \quad (2)$$

onde V_0 é o volume inicial e o jacobiano J_0 é o determinante de \mathbf{A}_0 (Pascon, 2008).

2.4 Estratégias numéricas

Foi usado, devido ao caráter não linear da Eq. (2), o método iterativo de Newton-Raphson, com cálculo do vetor resíduo de forças e da matriz Hessiana, para determinação do incremento posicional. Ademais, dividiu-se o carregamento em passos de carga para auxiliar na convergência da simulação e para encontrar possíveis pontos limites. Por fim, para cálculo das integrais envolvidas, usou-se integração numérica.

3 RESULTADOS

São apresentados, neste item, os principais resultados obtidos das simulações realizadas com oito processadores em paralelo.

3.1 Viga em balanço sob carga cisalhante na extremidade livre

Este exemplo, amplamente estudado na literatura científica e que envolve grandes deslocamentos, foi simulado com 6253 nós, 1152 elementos, 11 pontos de integração numérica, 50 passos de carga e aproximação cúbica para posições. As propriedades físicas e geométricas do problema são: $E_1 = 10^4$, $E_2 = 1.5 \cdot 10^4$, $\nu = 0.30$, L (comprimento) = 100 e I (momento de inércia) = 0.083333. A Figura 1 ilustra, à esquerda, a concordância do caso homogêneo ($p = 0$) com a solução analítica (Pai & Palazotto, 1996) e, à direita, a variação do deslocamento transversal da extremidade livre com o coeficiente de potência.

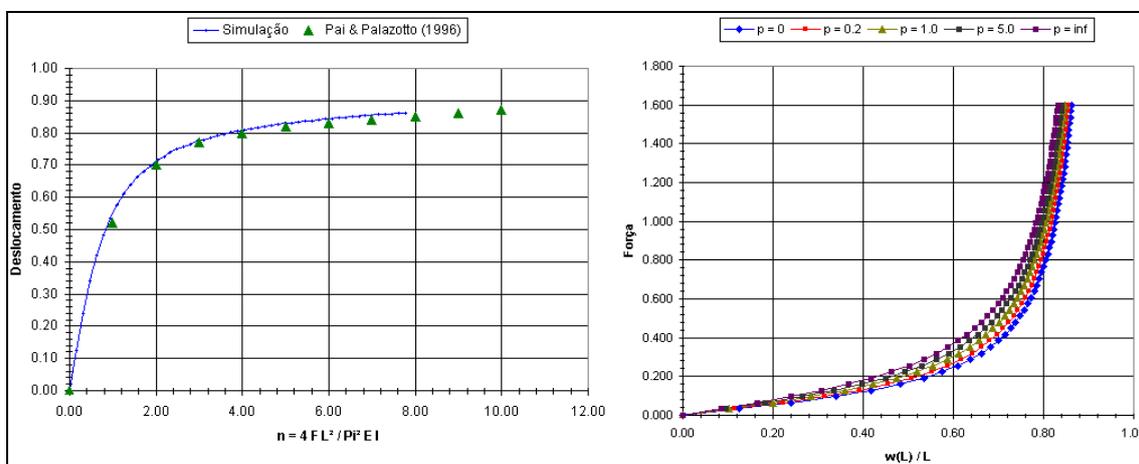


Figura 1 – Viga em balanço com carga cortante na extremidade livre.



3.2 Cilindro fino transversalmente tracionado com abas livres

O exemplo geometricamente mais complicado que foi analisado numericamente foi o cilindro transversalmente tracionado com abas livres. Foram usados os seguintes valores: 5445 nós, 384 elementos, 27 pontos de integração, aproximação do quarto grau, 150 passos de carga, $E_1 = 0.7 \cdot 10^9$, $E_2 = 1.51 \cdot 10^9$, $\nu = 0.30$, h (espessura) = 0.094, L (comprimento) = 10.35 e R (raio) = 4.953. A Figura 2 mostra, à esquerda, a comparação com o resultado de Arciniega & Reddy (2007) e, à direita, a variação do deslocamento do ponto de aplicação da carga com o coeficiente de potência. Observa-se que a solução aqui apresentada é mais flexível que a da referência, o que indica a ausência de travamento na formulação proposta.

4 CONCLUSÕES

É apresentado, neste trabalho, o código computacional de análise não linear geométrica de sólidos elásticos com gradação funcional. Tal programa é capaz de simular com precisão casos com grandes deslocamentos, como a viga em balanço, e problemas complexos, como o cilindro fino, conforme os resultados obtidos. Além disso, é grande o esforço computacional para simulação de malhas bastante refinadas, o que foi contornado com processamento paralelo.

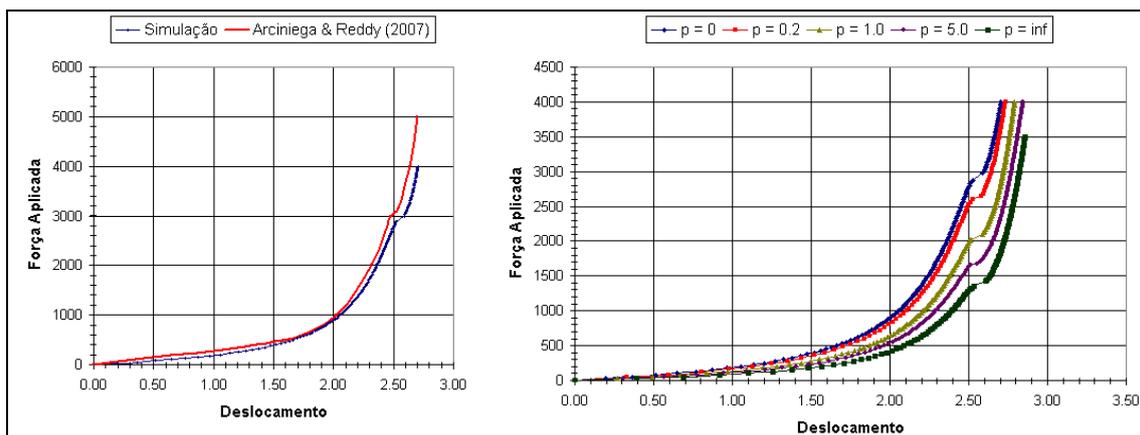


Figura 2 – Cilindro transversalmente tracionado com abas livres.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo financiamento dos equipamentos utilizados e à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pela bolsa concedida.

6 REFERÊNCIAS

CHI, S. H.; CHUNG, Y. L. Mechanical behavior of functionally graded material plates under transverse load - Part I: Analysis. **International Journal of Solids and Structures**, v. 43, p. 3657-3674, 2006.

CIARLET, P. G. **Mathematical elasticity**: three dimensional elasticity. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science Publishers, 1993. 451 p. v. 1.



CODA, H. B.; GRECO, M. A simple FEM formulation for large deflection 2D frame analysis based on position description. **Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.**, v. 193, p. 3541-3557, 2004.

CODA, H. B.; PACCOLA, R. R. An alternative positional FEM formulation for geometrically non-linear analysis of shells: curved triangular isoparametric elements. **Comput. Mech.**, v. 40, p. 185-200, 2007.

HOLZAPFEL, G. A. **Nonlinear solid mechanics: a continuum approach for engineering**. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd., 2000. 455 p.

PAI, P. F.; PALAZOTTO, A. N. Large-deformation analysis of flexible beams. **Int. J. Solids Structures**, v. 33, n. 9, p. 1335-1353, 1996.

PASCON, J. P. **Modelos constitutivos para materiais hiperelásticos: estudo e implementação computacional**. 2008. 230 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.



UTILIZAÇÃO DO ACOPLAMENTO MEC/MEF E DE TÉCNICAS DE CID EM PROBLEMAS INVERSOS

Manoel Dênis Costa Ferreira¹ & Wilson Sergio Venturini²

Resumo

Os problemas inversos constituem uma classe muito interessante e comum de problemas na ciência e na engenharia. A solução de um problema dessa natureza normalmente não satisfaz a critérios de estabilidade, sendo necessária a utilização de técnicas apropriadas de minimização, regularização e otimização. Além disso, a qualidade da solução encontrada depende da quantidade e qualidade dos dados experimentais que servirão de base de informação para o modelo numérico inverso. Sendo assim, o presente trabalho apresenta um resumo da teoria envolvida no tratamento de alguns problemas inversos da engenharia de estruturas utilizando o Método dos elementos de contorno (MEC), o Método dos elementos finitos (MEF) e o seu acoplamento, aliado a técnicas de correlação de imagens digitais (CID) como meio de obtenção dos dados experimentais necessários.

Palavras-chave: Problemas inversos. MEC. MEF. CID. Métodos de regularização.

UTILIZATION OF THE COUPLING BEM/FEM AND TECHNIQUES OF DIC IN INVERSE PROBLEMS

Abstract

The inverse problems are a class very interesting and common of problems in science and engineering. The solution of a problem of this nature usually does not meet the stability criteria, it is necessary the use of appropriate techniques of minimization, regularization and optimization. Moreover, the quality of the solution depends on the quantity and quality of experimental data that will serve of information basis for the inverse numerical model. Therefore, this paper presents a summary of the theory involved in dealing of some inverse problem of the structures engineering using the Boundary Element Method (BEM), the Finite Element Method (FEM) and its coupling, combined with digital images correlation (DIC) techniques as a means of obtaining experimental data needed.

Keywords: Inverse problems. BEM. FEM. DIC. Regularization methods.

Linha de Pesquisa: Métodos Numéricos

1 INTRODUÇÃO

Os problemas inversos constituem uma classe muito interessante e comum de problemas na ciência e na engenharia. De maneira simplificada, pode-se descrever os problemas inversos como aqueles problemas em que a resposta é sabida, mas não a pergunta. Ou ainda, quando as conseqüências ou os resultados são conhecidos, mas não as causas. A solução de um problema desta natureza normalmente não satisfaz a critérios de estabilidade, onde pequenas perturbações nos dados de entrada podem ser amplificadas gerando soluções com grandes oscilações. Portanto, para a

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, mdenis@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, venturin@sc.usp.br



obtenção da solução de um problema inverso é necessário reformulá-lo em termos de um problema bem-posto usando técnicas apropriadas de minimização, regularização (suavização) e otimização.

Além disto, o desenvolvimento de ferramentas de aquisição de dados experimentais mais eficientes e precisas; como por exemplo, os métodos de inspeção não destrutivos de estruturas através de técnicas de correlação de imagens digitais, ressonância magnética, tomografia computadorizada e ultra-som, tem facilitado o tratamento de tais problemas e implementado ainda mais a importância do desenvolvimento de pesquisas neste campo do conhecimento. Portanto, de forma geral, o emprego confiável da análise inversa implica na utilização de ferramentas eficientes de aquisição de dados experimentais aliada a técnicas numéricas de regularização e otimização que buscam a minimização da função objetivo gerada por algum método numérico, como por exemplo, o método dos elementos de contorno (MEC), o método dos elementos finitos (FEM) ou seu acoplamento MEC/MEF. Sendo assim, o presente trabalho apresenta um resumo da teoria envolvida no tratamento de alguns problemas inversos da engenharia de estruturas utilizando o Método dos elementos de contorno (MEC), o Método dos elementos finitos (MEF) e o seu acoplamento, aliado a técnicas de correlação de imagens digitais (CID) como meio de obtenção dos dados experimentais necessários.

2 METODOLOGIA

A realização deste trabalho se dará pelo estudo de vários temas de grande relevância para engenharia de estruturas, tais como: teoria da elasticidade, mecânica da fratura, problemas inversos, método dos elementos de contorno, método dos elementos finitos, métodos de minimização, métodos de regularização e para análises experimentais, o conhecimento das técnicas de correlação de imagens digitais. Tudo isto, visando à elaboração um modelo para resolução de uma série de problemas inversos importantes para mecânica do dano e da fratura, com uma posterior implementação computacional do modelo formulado e sua validação através de exemplos numéricos e experimentais.

3 DESENVOLVIMENTO

Até o presente estágio do desenvolvimento deste trabalho, reuniu-se a base teórica e iniciou-se a implementação computacional para o tratamento dos seguintes problemas inversos:

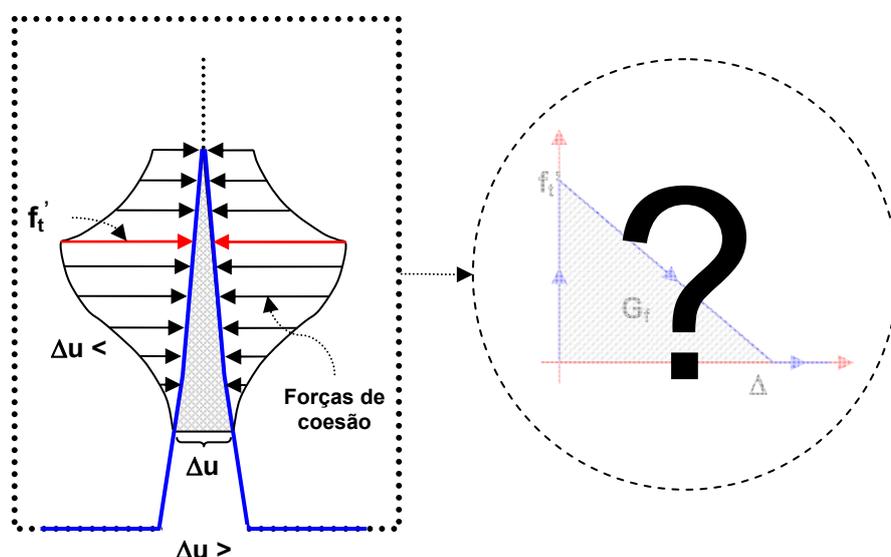


Figura 1 – Determinação de parâmetros do modelo coesivo de fraturamento.



a) Determinação de parâmetros de modelos de fraturamento: Nesse tipo de problema o objetivo é a identificação da lei que rege o comportamento da abertura da fissura através do campo de deslocamento obtido experimentalmente via correlação de imagens digitais (Figura 01).

O modelo numérico proposto para esta classe de problema é baseado em uma técnica simples para modelagem de fraturamento via MEC, nessa técnica a fratura é modelada como sendo a interface entre domínios. Assim, o problema inverso é resolvido através da minimização e regularização do sistema formado por equações geradas pelo método dos elementos de contorno para pontos fontes sobre o contorno, onde são prescritas as condições de contorno, e no interior do domínio, onde os deslocamentos são conhecidos (obtidos experimentalmente via CID), tendo-se como incógnitas os valores de forças de superfície e deslocamentos em cada lado da interface entre os domínios. Com o conhecimento destas variáveis, calcula-se a abertura e constrói-se a curva que rege o comportamento da abertura ao longo da interface, aqui interpretada como o modelo coesivo de fraturamento.

b) Determinação de parâmetros de modelos de escorregamento em domínios reforçados: Nessa classe de problema o objetivo é identificar o comportamento das forças e deslocamento na interface entre a matriz e o reforço (fibra, barras de aço, etc.), através do conhecimento do carregamento, vinculação e campo de deslocamento obtido experimentalmente via CID (Figura 02).

Para este tipo de problema inverso a proposta é gerar o sistema de equações via acoplamento MEC/MEF, onde o domínio seria modelado em elementos de contorno e o reforço (fibra, barra de aço, etc.) em elementos finitos de pórtico. Com isso, o modelo inverso é formado pelo sistema de equações geradas pelo acoplamento MEC/MEF para pontos fontes sobre o contorno, onde são prescritas as condições de contorno, e no interior do domínio, onde se conhece os deslocamentos (obtidos experimentalmente via CID), tendo-se como incógnitas os valores de forças de superfície e deslocamentos na interface entre o domínio e o reforço. A minimização, regularização e posterior resolução deste sistema, nos dão subsídios para obtenção do escorregamento entre a matriz e o reforço, e as correspondentes tensões envolvidas, necessárias para construção da curva do modelo de escorregamento.

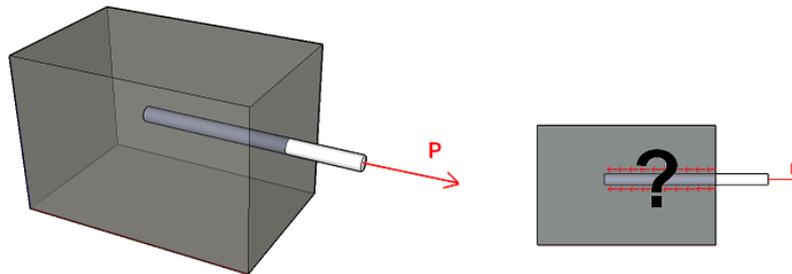


Figura 2 – Determinação do modelo de escorregamento em materiais reforçados.

4 RESULTADOS OBTIDOS OU ESPERADOS

Por encontra-se em fase inicial de implementação, os resultados obtidos ainda não são conclusivos. Porém, para a primeira classe de problema, (determinação de parâmetros de modelos de fraturamento), foram analisados problemas cuja fonte de dados foi o correspondente problema direto com a introdução de erros aleatórios (truncamento) ou não, e também campos de deslocamentos oriundos de ensaios com correlação de imagens digitais. O modelo proposto foi capaz de reconstruir bem o modelo de fraturamento, quando a fonte de dados foi obtida de uma análise direta, e para dados experimentais via correlação de imagens, os resultados, em fase de análise, têm se mostrado bastante promissores. O modelo para segunda classe de problema ainda não foi testado, mas acredita-se que o comportamento seja similar ao encontrado para o modelo proposto para primeira classe de problema.



5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Apesar do incipiente estágio do trabalho, os testes com o modelo numérico implementado até então, têm mostrado que a formulação composta pela utilização do MEC, aliado a métodos de regularização e minimização é simples e de grande eficiência, para obtenção dos parâmetros de modelos de fraturamento. Além disso, os resultados com dados experimentais utilizando técnicas de correlação de imagens, para obtenção dos campos de deslocamentos que alimentarão os modelos inversos propostos, mostram que estas técnicas fornecem a qualidade e a quantidade de informações necessárias para o correto tratamento deste tipo de análise.

6 AGRADECIMENTOS

Agradecemos à CNPQ pelo apoio financeiro, sem o qual esta pesquisa não poderia ser realizada.

7 REFERÊNCIAS

BEER, G. **Programming the boundary element method: an introduction for engineers**, Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2001.

ENGL, H. W.; HANKE, M.; NEUBAUER, A. **Regularization of Inverse Problems**, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.

FERREIRA, M. D. C., VENTURINI, W. S. Análise de Problemas Inversos de Valor de Contorno em Domínios Multi-Regiões Via MEC. In: CONGRESSO IBERO LATINO-AMERICANO SOBRE MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM ENGENHARIA, 28., 2007, Porto, Portugal. **Anais...** 2007.

ROUX, S.; RÉTHORÉ; HILD, F. Digital Image Correlation and Fracture: An Advanced Technique for Estimating Stress Intensity Factors of 2D and 3D Cracks. **Journal of Physics D: Applied Physics**, 2009.

RUS, G.; GALLEGO, R., Optimization algorithms for identification inverse problems with the boundary element method. **Engineering analysis with boundary elements**, v. 26, p. 315-327, 2002.

SCHNUR, D. S.; ZABARAS, N. Finite element solution of two-dimensional inverse elastic problems using spatial smoothing. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 30, p. 57-75, 1990.

SILVA NETO, A. J.; MOURA NETO, F. D. **Problemas inversos: conceitos fundamentais e aplicações**, Rio de Janeiro: EdUERJ, 2005.

SORIANO, H. L. **Método de elementos finitos em análise de estruturas**. Ed. PUBLIFOLHA, 2003. 608 p.

VENTURINI, W. S. **Um estudo sobre o método dos elementos de contorno e suas aplicações em problemas de engenharia**. São Carlos: Tese (Livre-Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1988.



MÉTODO DA PARTIÇÃO NA ANÁLISE DE MÚLTIPLAS FISSURAS

Michell Macedo Alves¹ & Sergio Persival Baroncinni Proença²

Resumo

A formulação do problema de múltiplas fissuras baseia-se numa abordagem de sobreposição proposta pelo Método da Partição. Segundo essa abordagem a solução do problema pode ser encontrada a partir da sobreposição de três subproblemas para a determinação dos fatores de intensidade de tensão finais. Sendo assim, aplica-se o Método dos Elementos Finitos Generalizados (MEFG) na análise de um dos subproblemas, dito local, para viabilizar a obtenção de resultados com boa aproximação com recurso a malhas pouco refinadas, reduzindo significativamente o custo computacional de toda a análise.

Palavras-chave: Método dos Elementos Finitos Generalizados. Método da partição. Mecânica da fratura. Fator de intensidade de tensão.

SPLITTING METHOD IN THE ANALYSIS OF MULTIPLE CRACKS

Abstract

The formulation of multiple crack problems is based on superposition proposed by Splitting Method. According to this approach the solution of the problem can be found from the superposition of three subproblems to determine the stress intensity factors. Thus, the Generalized Finite Element Method (GFEM) is applied in the analysis of one of the subproblems (said local) to obtain results with good approximation and mesh little refined, reducing significantly the computational cost of the entire analysis.

Keywords: Generalized Finite Elements Method. Splitting method. Fracture mechanics. Stress intensity factor.

Linha de Pesquisa: Métodos Numéricos

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho trata da aplicação do Método da Partição e do Método dos Elementos Finitos Generalizados (Duarte, 2000) na análise plana de sólidos bidimensionais contendo múltiplas fissuras. Esta classe de problemas insere-se na Mecânica da Fratura Elástico-Linear. O Método da Partição, Babuška & Andersson (2005), propõe uma decomposição do problema original em três subproblemas (princípio de sobreposição), dentre os quais destacamos o segundo, que procura levar em conta o efeito local de concentração de tensão na vizinhança da ponta da fissura. A análise desse subproblema quando conduzida pelo MEF em sua forma convencional exige elevado grau de refinamento da malha, aumentando o custo computacional. Sendo assim, neste trabalho propõe-se que o Método dos Elementos Finitos Generalizados (MEFG) seja utilizado como alternativa de resolução do subproblema local, ao invés do Método dos Elementos Finitos (MEF) convencional, tendo-se em vista sua capacidade de proporcionar resultados satisfatórios mesmo com malhas pouco refinadas, reduzindo o custo computacional.

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, michell@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, persival@sc.usp.br



2 METODOLOGIA

No que se refere à metodologia do trabalho, destaca-se a revisão bibliográfica realizada com o objetivo de coletar informações relativas ao Método da Partição, que ainda se trata de um método pouco conhecido e testado. Ainda se realizou uma pesquisa referente aos métodos aproximativos tais como o MEF e o MEFG. Posteriormente a implementação computacional do Método da Partição aliado tanto ao MEFG quanto ao MEF. Em seguida realizou-se a comparação de resultados do subproblema local do Método da Partição tendo em vista os resultados obtidos via MEFG e MEF. Após as comparações foram feitas as conclusões.

3 DESENVOLVIMENTO

Em Andersson *et al* (1998) apresenta-se o Método da Partição que propõe uma decomposição do problema original \mathbf{P} em três subproblemas. O primeiro, dito $\mathbf{P}_G^{(0)}$, considera o domínio do sólido com as condições de contorno prescritas, porém sem a presença das I fissuras. O objetivo deste subproblema é a obtenção da distribuição de tensões nas linhas de fissuras. O segundo subproblema $\mathbf{P}_L^{(k)}$ é concebido como um problema local, consistindo da análise de fissura imersa em meio infinito, cujas faces são submetidas a distribuições de tensões incógnitas (constante, linear, quadrático, etc) associadas ao modo I de abertura. Por simplificação neste trabalho considera-se somente este modo, no entanto, o método apresenta metodologia geral que pode ser estendida aos outros modos. Nota-se que diferentes subproblemas locais podem ser definidos, a depender das características (geometria e carregamento) de cada fissura. Dois são os objetivos do segundo subproblema: as estimativas do fator de intensidade de tensão na ponta da fissura e do campo de deslocamentos em linha de contorno arbitrariamente definida a partir das faces da fissura, caracterizando uma vizinhança que inclui a sua ponta. A razão principal para a definição dessa linha de contorno é permitir a consideração dos efeitos de interação entre fissuras. Quanto maior o número J de carregamentos polinomiais utilizados na aproximação maior se faz a precisão da solução deste subproblema. Tais aspectos diferem o método da partição de outros métodos de decomposição semelhantes. Após este procedimento, leva-se em conta a influencia de uma fissura sobre as demais, sendo este o objetivo do terceiro subproblema $\mathbf{P}_G^{(k)}$. Nele, considera-se novamente o domínio global ausente de fissuras, empregado no primeiro subproblema, porém, aplicam-se os campos de deslocamentos obtidos nas linhas de contorno dos problemas locais. Este procedimento é realizado para cada fissura, determinando-se as distribuições de tensões por eles provocadas nas linhas das fissuras externas ao contorno da própria fissura. Sendo que a sobreposição dos $M=I \times J$ subproblemas nos leva ao sistema linear:

$$[IG] \cdot \{\alpha\} = \{r\} \quad (1)$$

Sendo que o vetor solução $\{\alpha\}$ reúne os parâmetros α responsáveis pela determinação dos fatores de intensidade de tensão para cada fissura, conforme indica a relação seguinte:

$$K^{(i)}(J) = \sum_{j=1}^J \alpha_{j+(i-1)J} \cdot K_j^{(j)} \quad (2)$$

onde $K_j^{(j)}$ foram calculados nos subproblemas locais $P_L^{(k)}$.

As soluções do problema original P_G , expressa, por exemplo, pelas respostas em termos de deslocamentos, distribuições de tensões e fatores de intensidade de tensão, podem ser determinadas mediante combinação dos subproblemas descritos:



$$P_G = P_G^{(0)} + \sum_{k=1}^M \alpha_k \cdot P_L^{(k)} + \sum_{k=1}^M \alpha_k \cdot P_G^{(k)} \quad (3)$$

4 RESULTADOS OBTIDOS

Com o objetivo de demonstrar a eficácia do Método da Partição aliado ao MEFG, considerou-se um problema utilizando malha pouco refinada no subproblema local. Sendo assim, o mesmo problema foi comparado com outro resolvido via MEF, no qual foi empregada malha bastante refinada para a obtenção da mesma precisão obtida no problema anterior. Ainda em relação ao emprego do MEFG, explorou-se enriquecimento polinomial combinado com malha de refinamento graduado em direção à ponta da fissura (subproblema local), composta por elementos quadrilaterais bilineares, constituindo discretização com as seguintes características:

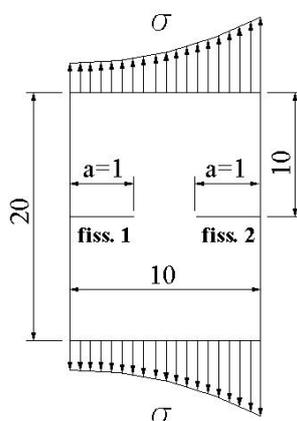


Figura 1 – Chapa com 2 fissuras e carregamento não-uniforme.

Os dados complementares do exemplo são os seguintes:

- ✓ Propriedades do material: módulo de elasticidade transversal $G = 1,0$; coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$;
- ✓ Carregamento descrito pela seguinte relação:

$$\sigma(x) = 1 + \left(\frac{x}{10}\right)^2$$

- ✓ Explorou-se a simetria horizontal;
- ✓ Malha graduada a partir da ponta da fissura, com elementos de dimensões em torno de 10% do comprimento da fissura (MEFG);
- ✓ Número total de nós nos problemas = 669 (MEFG) e 25107 (MEF);
- ✓ Número total de elementos = 605 (MEFG) e 8310 (MEF);
- ✓ Os nós enriquecidos contidos em um círculo cujo raio possui comprimento equivalente a 10% do valor do comprimento da fissura, sendo a origem deste raio a própria ponta desta fissura (MEFG);
- ✓ Número de nós abrangidos pelo círculo: 16;
- ✓ Base da função enriquecedora: $L_{i(\alpha)} = \{1 + 3y\}$ $c/i = 2$; $\alpha = 1, \dots, 16$;



- ✓ Número total de graus de liberdade: 1370 (MEFG) e 50214 (MEF).

Os resultados obtidos aplicando-se o Método da Partição para a determinação dos fatores de intensidade de tensão para as duas fissuras estão apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Valores de K_I obtidos via MEF

| Fissura 1: $K_{I\text{EXATO}}=1,633$ | | | Fissura 2: $K_{I\text{EXATO}}=3,642$ | | |
|--------------------------------------|---------------------|------|--------------------------------------|---------------------|------|
| Nº termos Aprox. | $K_{I\text{APROX}}$ | E(%) | Nº termos Aprox. | $K_{I\text{APROX}}$ | E(%) |
| 1 | 1,668 | 2,14 | 1 | 3,661 | 0,52 |
| 2 | 1,629 | 0,24 | 2 | 3,636 | 0,16 |
| 3 | 1,632 | 0,06 | 3 | 3,638 | 0,11 |

Tabela 2 – Valores de K_I obtidos via MEFG

| Fissura 1: $K_{I\text{EXATO}}=1,633$ | | | Fissura 2: $K_{I\text{EXATO}}=3,642$ | | |
|--------------------------------------|---------------------|------|--------------------------------------|---------------------|------|
| Nº termos Aprox. | $K_{I\text{APROX}}$ | E(%) | Nº termos Aprox. | $K_{I\text{APROX}}$ | E(%) |
| 2 | 1,627 | 0,37 | 2 | 3,625 | 0,47 |
| 3 | 1,634 | 0,06 | 3 | 3,626 | 0,44 |

Nota-se que os resultados obtidos para os valores de K_I são da mesma ordem de precisão (erro inferior a 0,5%) daqueles da simulação com o MEF convencional. Além disso, comparativamente, a simulação com o MEFG empregou, no problema local, apenas 2,73% do número de graus de liberdade.

5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Tendo o exemplo exposto como representativo dos resultados da pesquisa, podemos concluir que nas simulações, com o emprego do MEF convencional e do MEFG, obtiveram-se estimativas de alta precisão para os fatores de intensidade de tensão. A adoção de um número maior de termos aproximativos dos campos de tensão nas faces das fissuras, conforme prescreve o procedimento de formulação do Método da Partição, proporcionou taxas de convergência exponenciais, relativas à redução do erro de aproximação. A utilização do MEFG para a análise dos mesmos problemas locais, por conta de permitir explorar malhas menos refinadas, e mesmo com enriquecimento polinomial de baixa ordem, proporcionou uma redução bastante significativa no custo computacional.

6 AGRADECIMENTOS

À CAPES pelo apoio financeiro para realização e publicação desta pesquisa.

7 REFERÊNCIAS

ANDERSSON, B.; BABUŠKA, I.; STEHLIN, P. **Reliable 3D multiple-site fracture mechanics analysis**. Stockholm: The Aeronautical Research Institute of Sweden. (Ffa-Tn-1998-18).



BABUŠKA, I.; ANDERSSON, B. The splitting method as a tool for multiple damage analysis. **Siam J. Sci. Comput.**, v. 26, n. 4, p. 1114-1145, 2005.

DUARTE, C. A.; BABUŠKA, I.; ODEN, J. T. Generalized finite element methods for three-dimensional structural mechanics problems. **Computer & Structures**, v. 77, n. 2, p. 215-232, 2000.

TORRES, I. F. R. **Desenvolvimento e aplicação do método dos elementos finitos generalizados em análise tridimensional não-linear de sólidos**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.



FORMULAÇÕES HÍBRIDO-MISTAS DE ELEMENTOS FINITOS EM ANÁLISE NÃO-LINEAR

Raimundo Gomes de Amorim Neto¹ & Sergio Persival Baroncini Proença²

Resumo

O presente trabalho trata do desenvolvimento de uma variante não-convencional do método dos elementos finitos (MEF), de modo a estender a aplicação da metodologia das deformações assumidas, inserindo-a no contexto do Método dos Elementos Finitos Generalizados (MEFG), para abordagem de problemas que incluem regimes de plasticidade, bem como de grandes deformações. Para a consideração das respostas inelásticas e dos efeitos do encruamento do meio, será estudado um adequado modelo de plasticidade para análise tridimensional no âmbito MEFG.

Palavras-chave: Análise não-linear. Elementos finitos generalizados. Formulações híbrido-mistas.

MIXED-HYBRID FINITE ELEMENTS IN NON-LINEAR ANALYSIS

Abstract

This paper deals with the development of non-conventional finite element method (FEM) in order to extend the application of the methodology of the enhanced assumed strain (EAS), putting it into the context of the Generalized Finite Element Method (GFEM) to approach problems include a plasticity and large deformations. For the consideration of inelastic response and the effects of hardening, will be studied a suitable model for analyzing three-dimensional plasticity in GFEM.

Keywords: Non-linear analysis. Generalized finite element method. Mixed-hybrid elements.

Linha de Pesquisa: Métodos Numéricos

1 INTRODUÇÃO

O Método dos Elementos Finitos (MEF) em virtude de sua simplicidade, eficiência e boa precisão, é uma das principais ferramentas de análise estrutural. Em sua formulação clássica, o MEF determina deslocamentos nodais, e posteriormente estima tensões e deformações. Este procedimento é bastante adequado para a solução de uma vasta gama de problemas, todavia, a obtenção de resultados mais precisos em determinados tipos de problemas (para os campos de tensões e deformações) é condicionada a um elevado grau de refino da rede. O emprego de redes bastante discretizadas, assim como, de estratégias de refinamento, traz como consequência imediata um maior custo computacional.

No intuito de contornar limitações da metodologia convencional do MEF têm sido desenvolvidas inúmeras estratégias alternativas. Entre estas, destaca-se o emprego de formulações, nas quais, além de aproximar campos de deslocamento, aproximam também tensões e/ou deformações, de modo a aperfeiçoar a determinação destas grandezas, via método dos elementos

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, ramorim@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, persival@sc.usp.br



finitos. Nesse padrão se encaixam os modelos mistos, híbridos, bem como os modelos com campos de deformações intrínsecas ou assumidas (*assumed strain*).

O método das deformações assumidas baseia-se numa formulação variacional (Hu-Washizu) em três campos (tensão, deslocamento e deformação), e sua idéia-chave parte da convenção de que o campo de deformações é composto por duas parcelas: a primeira, clássica, que depende da relação de compatibilidade entre deslocamentos e deformações (parcela compatível) e a segunda parcela é denominada de deformação assumida e constitui um enriquecimento, sendo este obtido por meio das funções *modos incompatíveis*.

O Método dos Elementos Finitos Generalizados (MEFG) consiste numa combinação entre o MEF clássico e técnicas de geração de aproximações enriquecidas típicas dos métodos sem malha, como a multiplicação de funções partição da unidade (PU) por funções especiais. As PU se caracterizam por apresentar soma unitária dos seus valores em pontos do domínio e no caso do MEFG são definidas pelas funções de forma básicas dos elementos da malha. Os domínios das funções de aproximação são 'nuvens', formadas pelos elementos que dividem um nó, ou vértice comum. O enriquecimento pode, então, ser seletivo, ou restrito a determinado conjunto de nuvens, dispensando custosos refinamentos de malha.

2 METODOLOGIA

A metodologia utilizada consiste em revisão e implementação computacional de formulações de elementos finitos generalizados, em regime não-linear. Um aspecto importante em relação à aplicação do MEFG é o emprego de funções enriquecedoras baseadas na própria solução exata do problema,

3 DESENVOLVIMENTO

A proposta do presente trabalho é estender a aplicação da metodologia das deformações assumidas desenvolvida no mestrado, inserindo-a no contexto do MEFG, para abordagem de problemas que incluem regimes de plasticidade, bem como de grandes deformações. Para a consideração das respostas inelásticas (irreversíveis) e dos efeitos do encruamento do meio, será adotado um adequado modelo de plasticidade para análise tridimensional no âmbito GFEM.

As principais características deste modelo são: critério de plastificação de *von Mises*, encruamento isotrópico e assumida-se a hipótese de associatividade tanto para lei de encruamento e como para evolução das deformações plásticas. Para utilização do modelo, um algoritmo de mapeamento implícito (essencialmente, uma tentativa considerando que a resposta da tensão seja elástica, "*previsão*", posteriormente esta tensão é projetada sobre a superfície do critério de plastificação, "*correção plástica*") será implementado de modo a integrar o modelo constitutivo de forma incremental.

Neste sentido, é usado um tensor constitutivo elasto-plástico tangente consistente, sendo este adotado no processo incremental e iterativo de Newton-Raphson para a obtenção da seqüência de respostas de equilíbrio e compatibilidade a nível de análise estrutural sólida. A formulação mista em deformações assumidas permite que a realização destas etapas se dê de forma independente para cada ponto da quadratura de integração numérica.



4 RESULTADOS ESPERADOS

Os principais resultados esperados referem-se à maior eficiência em termos de custo computacional e precisão dos novos procedimentos numéricos desenvolvidos, em relação ao emprego do MEF convencional. Em particular, busca-se obter melhores taxas de convergência.

5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Após o desenvolvimento da pesquisa espera-se demonstrar a eficiência e da combinação entre o MEFG e a metodologia das deformações assumidas em classes de problemas não-lineares.

6 AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo auxílio financeiro concedido.

Ao Prof. Dr. Sergio Persival Baroncini Proença pela orientação impar.

7 REFERÊNCIAS

HUGHES, T. J. R. **The Finite Element Method**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1987.

WILSON, E. L.; TAYLOR, R. L.; DOHERTY, W. P.; GHABOUSSI, J. Incompatible displacement models. **Numerical and computer models in Structural Mechanics**, p. 43-57, 1973.

SIMO, J. C.; RIFAI, M. S. A class of mixed assumed strain method of incompatible modes. **International journal for numerical methods in engineering**, v. 29, p.1595-1638, 1990. ISSN: 0029-5981.

AMORIM NETO, R. G. **Sobre formulações não-convencionais de elementos finitos: revisão e análise numérica**. 2008. 169 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.



UMA FORMULAÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO E SOLUÇÃO DO IMPACTO BIDIMENSIONAL ENTRE ESTRUTURA E ANTEPARO RÍGIDO UTILIZANDO MULTIPLICADORES DE LAGRANGE

Robenson Luiz Minski¹ & Humberto Breves Coda²

Resumo

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma formulação, via Método dos Elementos Finitos (MEF), para a identificação e solução do impacto não linear bidimensional entre estruturas reticuladas e anteparo rígido. O comportamento dinâmico não linear geométrico é feito por meio de uma formulação posicional classificada como Lagrangiana total com cinemática exata. Utiliza-se o integrador temporal de Newmark modificado para descrever o comportamento dinâmico, de forma a garantir a estabilidade na análise do impacto. Desenvolveu-se um algoritmo de identificação da ocorrência do impacto, utilizando-se uma superfície adicional originada a partir do anteparo rígido. A solução do impacto é feita com a utilização dos multiplicadores de Lagrange considerando situações sem atrito.

Palavras-chave Método dos Elementos Finito. Não linearidade geométrica. Impacto. Multiplicadores de Lagrange.

A FORMULATION FOR IDENTIFICATION AND SOLUTION OF THE TWO-DIMENSIONAL IMPACT BETWEEN STRUCTURE AND RIGID WALL USING LAGRANGIAN MULTIPLIERS

Abstract

This work addresses the development of a formulation based on the Finite Element Method (FEM), for identification and solution of two-dimensional nonlinear impact between reticulated structures and rigid wall. The dynamic geometrically nonlinear behavior is treated regarding a positional formulation classified as total Lagrangean with exact kinematics. The time integrator of modified Newmark is used to describe the dynamic behavior assuring the stability in the impact analysis. An algorithm of occurrence impact identification was developed using an additional surface originated from the rigid wall. The impact solution is realized using of Lagrangian multipliers considering without friction situations.

Keywords: Finite Element Method. Geometric non linearity. Impact. Multipliers Lagrangian.

Linha de Pesquisa: Métodos Numéricos

1 INTRODUÇÃO

A resolução de problemas envolvendo a não linearidade geométrica em estruturas apresenta formulações onde existem diferenças na descrição das coordenadas referenciais. Uma destas é a chamada descrição Lagrangiana que pode ser classificada em três tipos: total, parcialmente atualizada

¹ Mestre em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, rlminski@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, hbcoda@sc.usp.br



e atualizada. Aqui neste trabalho foi utilizado a descrição Lagrangiana total, como em outras formulações encontradas nos artigos de Surana (1983) e Schulz & Filippou (1990).

Uma outra formulação não linear de destaque é a formulação de cinemática exata que pode ser encontrada em diversas produções, como os artigos de Reissner (1973), Simo et al. (1986) e Wriggers & Simo (1990), sendo estes baseados na teoria não linear de vigas de Reissner. Deve-se comentar que a formulação aqui utilizada se enquadra nesta categoria, sendo o tratamento da não linearidade geométrica da estrutura baseada numa formulação posicional (Método dos Elementos Finitos Posicional – MEF Posicional), apresentado em Coda (2004) e Coda & Geco (2004) para problemas estáticos. Já os problemas dinâmicos tiveram embasamento em um algoritmo desenvolvido por meio de uma família de integradores temporais de Newmark, aplicado em Greco & Coda (2006).

O comportamento do contorno em problemas dinâmicos com impacto, pode ser solucionado conhecido método dos multiplicadores de Lagrange utilizado nos artigos de Simo et al. (1985), Nour-Omid & Wriggers (1986), sendo este o método empregado neste trabalho.

A primeira dificuldade no desenvolvimento de algoritmos para problemas de contato/impacto é determinar a ocorrência do mesmo. O trabalho apresentado a seguir pode ser enquadrado na técnica “master-slave”, onde cria-se uma superfície adicional ao anteparo rígido delimitando uma região que servirá de apoio na determinação do contato.

2 FORMULAÇÃO NÃO LINEAR GEOMÉTRICA (MEF - POSICIONAL)

A formulação do (MEF-Posicional) para problemas de pórticos planos, utiliza o Princípio da Mínima Energia Potencial Total, e tem como parâmetros nodais, para um elemento com aproximação geométrica qualquer, as posições Y_i^l e giro θ^l , para cada nó l e direção i .

Para um problema estrutural associado com um sistema de referencia fixo, o funcional de energia potencial total, pode ser escrito como a composição da energia de deformação total U_e , a energia potencial das forças conservativas (externas) aplicadas P e a energia cinética K , como segue:

$$\Pi = U_e - P + K \quad (1)$$

A forma integral da energia de deformação é escrita como a integral da energia de deformação específica u_e em V_0 (volume inicial), expressa por:

$$U_e = \int_{V_0} u_e dV_0 = \int_{V_0} \frac{1}{2} E_{ij} C_{ijkl} E_{kl} dV_0 \quad (2)$$

A energia potencial das forças externas é escrita como:

$$P = F_i Y_i \quad (3)$$

onde Y_i representa o conjunto de parâmetros nodais (posições e giros), posicionados onde atuam as forças F_i , na direção i . Nota-se que esta energia pode ser diferente de zero na configuração inicial.

A energia cinética é dada por:

$$K = \int_{V_0} \frac{1}{2} \rho_0 \dot{Y}_i \dot{Y}_i dV_0 \quad (4)$$

onde \dot{Y}_i é a velocidade e ρ_0 a densidade de massa no volume inicial.

Para a resolução do impacto através do multiplicador de Lagrange uma parcela adicional aparece no funcional de energia total Π^C , dada por:



$$\Pi^C = \int_{\Gamma^C} \lambda g d\Gamma \tag{5}$$

onde o índice C , representa a superfície em contato, λ o multiplicador de Lagrange, que no caso do contato ocorrer representa a força de contato, e g a função restrição (GAP), com (λ, g) respeitando as condições de otimização de Kuhn-Tucker. Portanto, o funcional de energia total fica expresso como:

$$\Pi^{lag}(Y_i, \lambda) = \Pi(Y_i) + \Pi^C(Y_i, \lambda) \tag{6}$$

Minimizando o mesmo,

$$F_{cont} = \frac{\partial U_e}{\partial Y_k} - F_{ext} + F_{iner} \tag{7}$$

de forma que as variáveis $\partial U_e / \partial Y_k$, F_{ext} , F_{iner} e F_{cont} representam o vetor de forças internas, o vetor de forças externas, o vetor inercial e a força de contato, se este houver ocorrido, respectivamente.

3 ALGORITMO DE IDENTIFICAÇÃO DO IMPACTO

Neste trabalho foi desenvolvido um algoritmo simples de identificação de impacto, porém eficiente quando aplicado a problemas específicos. Neste utiliza-se uma superfície adicional circunscrita ao anteparo rígido, como mostrado na Figura 1.

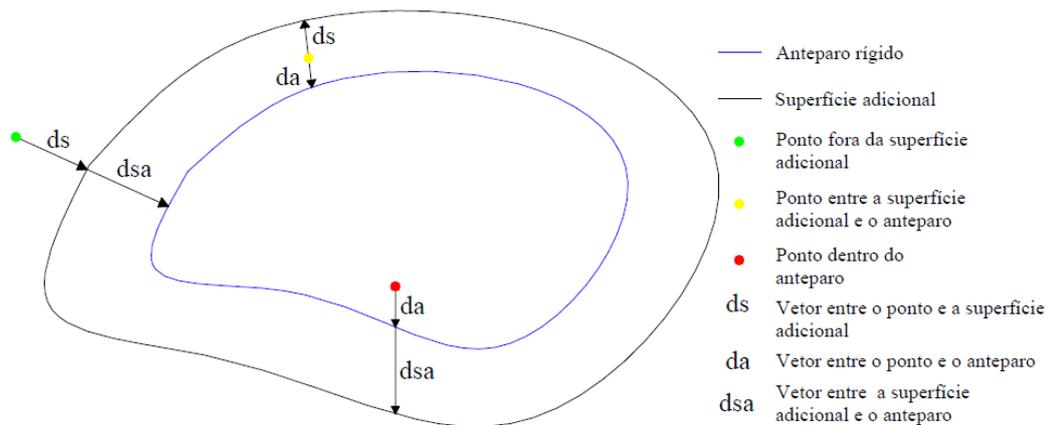


Figura 1 – Modelo de identificação do impacto.

Conforme pode ser visto há três possíveis localizações de um ponto da estrutura móvel, sendo que este se encontraria entre a superfície adicional e o anteparo quando:

$$(da) (ds) < 0 \tag{8}$$

de outro modo qualquer:

$$(da) (ds) > 0 \tag{9}$$

sendo que, para um ponto fora da superfície adicional $ds + dsa = da$, e dentro do anteparo $da + dsa = ds$. Portanto o impacto será configurado quando houver uma segunda troca de sinal na multiplicação dos vetores, mostrados na Figura 1, combinado com a distância entre o ponto e o anteparo.



4 EXEMPLOS NUMÉRICOS

Apresenta-se aqui um exemplo comparativo com Greco (2004), referente ao impacto entre estrutura e anteparo rígido em forma de funil.

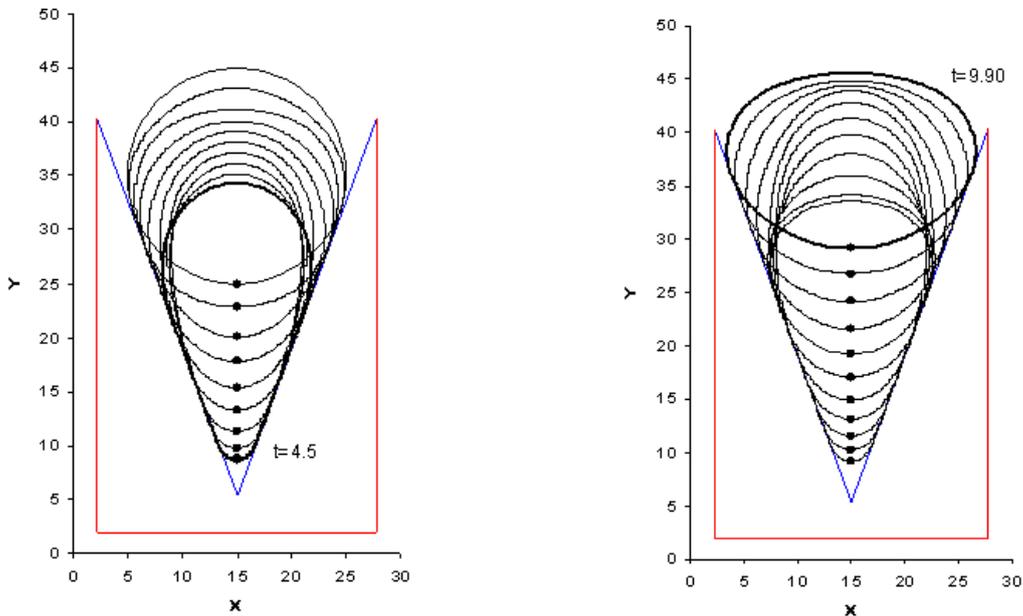


Figura 2 – Configurações anelares para certos passos de tempo.

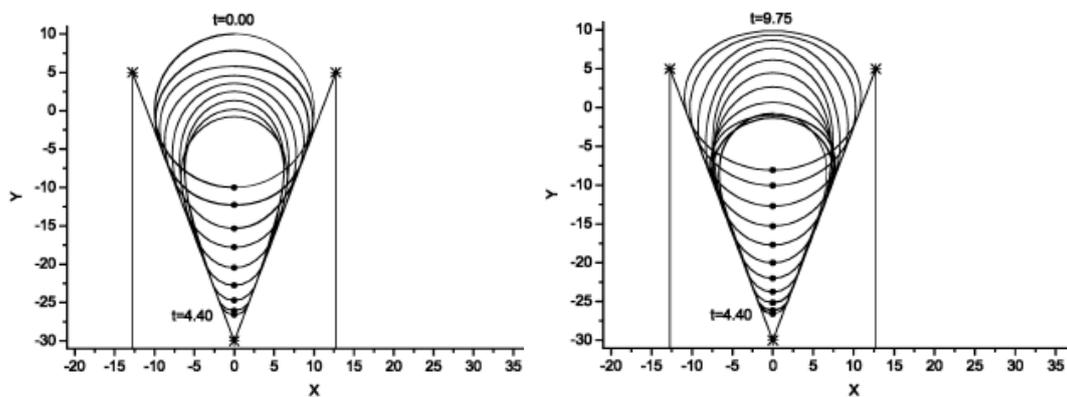


Figura 3 – Respostas de Greco (2004).

5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Os resultados obtidos mostram aparentemente uma melhora na solução do impacto com o uso dos multiplicadores de Lagrange em relação a literatura. No entanto resultados obtidos comparados com a literatura mostram a grande importância na discretização geométrica e temporal na busca da convergência para a resposta esperada, ou mais precisa.

Deve-se comentar o excelente comportamento geral do Método dos Elementos Finitos Posicional (MEF-Posicional) com o uso dos multiplicadores de Lagrange equiparando resultados com relação a outras técnicas implementadas.



Portanto, definem-se como trabalhos futuros o desenvolvimento de modelos de contato-impacto do tipo mestre-escravo e sua implementação em software de análise dinâmica não linear geométrica de estruturas tridimensionais compostas por elementos de barra geral e casca. Além disto utilizar o método dos multiplicadores de Lagrange para a análise de contato-impacto e ligações deslizantes no interior de estruturas, máquinas ou mecanismos e validar na prática a técnica em estruturas de antenas de satélites, garras mecânicas e biomecânicas.

6 REFERÊNCIAS

CODA H. B. **Análise não linear geométrica de sólidos e estruturas: uma formulação posicional baseada no MEF**. São Carlos, SET-EESC-USP, 2004. (Texto complementar para concurso de professor titular).

CODA H. B.; GRECO M. A simple FEM formulation for large deflection 2D frame analysis based on position description. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 193, p. 3541-3557, Ago., 2004.

GRECO M.; CODA H. B. Positional FEM formulation for flexible multi-body dynamic analysis. **Journal of Sound and Vibration**, v. 290, p. 1141-1174, May, 2006.

GRECO, M. **Análises de problemas de contato/impacto em estruturas de comportamento não linear pelo Método dos Elementos Finitos**. 2004. 153p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

HU, N. A solution method for dynamic contact problems. **Computers and Structures: Solids, Fluids, Multiphysics**, v. 63, n. 6, p. 1053-1063, June, 1997.

OGDEN, R. W. **Non-linear Elastic Deformations**. New York: Editora Horwood, Halsted Press, 1984. 532p. (Ellis Horwood series in mathematics and its applications).

REISSNER, E. On-dimensional large displacement finite-strain beam theory. **Studies in applied mathematics**, v. 52, p. 87-95, July, 1973.

SIMO, J. C.; WRIGGERS, P.; SCHWEIZERHOF, K. H. Finite deformation postbuckling analysis involving inelasticity and contact constraints. **International journal for numerical methods in engineering**, v. 23, n. 5, p. 779-800, May, 1986.

SCHULZ, M.; FILIPPOU, F. P. Non-linear spatial Timoshenko beam element with curvature interpolation. **International journal for numerical methods in engineering**, v. 50, p. 761-785, Sep., 1990.

SURANA, K. S. Geometrically non-linear formulation for 2 dimensional curved beam elements. **Computer and Structures**, v. 17, p. 105-114, Nov., 1983.



ANÁLISE DE INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Rodolfo André Kuche Sanches¹ & Humberto Breves Coda²

Resumo

O presente artigo traz um estudo do método dos elementos finitos como ferramenta numérica para análise de problemas de interação fluido-estrutura. Primeiramente é desenvolvida uma ferramenta computacional na qual o fluido é descrito em forma Lagrangeana-Euleriana arbitrária e o sólido em descrição Lagrangeana-posicional, a qual se mostra eficiente para problemas que aceitem a movimentação da malha do fluido sem a necessidade de reconstrução. Numa etapa subsequente, é desenvolvida uma nova técnica de Método dos Elementos Finitos baseada em B-splines imersas, a qual é testada em problemas de valor de contorno elípticos. Finalmente é proposta uma formulação alternativa para a análise de problemas de interação fluido-estrutura com o emprego da nova técnica de B-splines imersas, da qual se espera maior versatilidade.

Palavras-chave: Interação fluido-estrutura. Descrição ALE. MEF posicional. B-splines.

FLUID-STRUCTURE ANALYSIS BY THE FINITE ELEMENT METHOD

Abstract

This Paper presents a study about the finite element method as a numerical tool for fluid-structure problems analysis. Firstly we develop a computational tool where the fluid is described in an arbitrary Lagrangian-Eulerian description, formulation which is found efficient for problems that accept mesh moving without needing re-meshing. In another step, a new immersed B-spline finite element method technique is developed and tested to elliptic boundary value problems. Finally we propose an alternative formulation for fluid-structure interaction analysis employing the new B-spline technique, which we hope to be more versatile.

Keywords: Fluid-structure interaction. ALE description. Positional FEM. B-splines.

Linha de Pesquisa: Métodos Numéricos

1 INTRODUÇÃO

Os problemas de interação fluido-estrutura estão presentes nas mais diversas áreas de engenharia, tais como obras de engenharia civil, mecânica, aeronáutica, naval, e até em problemas de biomecânica. Como exemplos, citam-se o efeito do vento sobre edificações, flutter em aeronaves ou de pontes suspensas, e até mesmo a dilatação das artérias devido à circulação sanguínea.

A complexidade e o número elevado de operações de cálculo envolvidos na análise dos problemas de interação fluido-estrutura levam à busca de técnicas computacionais que auxiliem a resolução de tais problemas. O fato de que as estruturas vêm sendo projetadas cada vez mais leves e esbeltas, ou seja, muito mais susceptíveis a tais problemas, faz crescer a necessidade de ferramentas computacionais cada vez mais eficientes dedicadas a tal área.

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, raks@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, hbcoda@sc.usp.br



Assim, este trabalho objetiva fornecer um modelo numérico baseado Método dos Elementos Finitos (MEF) que seja eficiente e versátil para análise de problemas de interação fluido-estrutura.

2 METODOLOGIA

Numa primeira etapa do trabalho, no que se refere à Mecânica dos Fluidos Computacional, é desenvolvido um programa com integrador temporal explícito baseado em Zienkiewicz e Taylor (2000), em descrição Lagrangeana Euleriana Arbitrária (ALE) conforme descrita por Donea et al. (1982). A discretização espacial é feita através de elementos triangulares de aproximação linear para análises bidimensionais e tetraédricos de aproximação linear para análises tridimensionais.

Numa segunda etapa, as limitações da formulação da primeira etapa são analisadas e então é proposta uma nova técnica de MEF abstratos, baseada em B-splines imersas, a qual é desenvolvida tendo em vista à aplicação em problemas de interação fluido-estrutura. A técnica é então testada em problemas de valor de contorno elípticos bidimensionais e tridimensionais, uma vez que o MEF é conhecido por ter melhor desempenho neste tipo de problemas. Em seguida, com uso da nova técnica, é proposta uma formulação Lagrangeana posicional explícita para a solução da mecânica dos fluidos e acoplamento com a estrutura.

Em ambas as etapas, a análise de Dinâmica das Estruturas é feita através da formulação posicional proposta por Greco e Coda (2004), sendo utilizados elementos de pórtico isoparamétricos com aproximação de ordem arbitrária para os casos bidimensionais e elementos isoparamétricos triangulares de casca, com ordem de aproximação cúbica para os casos tridimensionais.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Acoplamento de descrição ALE – Lagrangeana

É sabido que a descrição Euleriana é a mais adequada para a análise de escoamentos, onde as variáveis principais são velocidades. Para a mecânica dos Sólidos, no entanto, a descrição Lagrangeana é a mais adequada. Assim, para possibilitar o acoplamento com a estrutura, as equações governantes da mecânica dos fluidos (Navier-Stokes) são descritas em uma forma Lagrangeana-Euleriana arbitrária (ALE), que consiste no mapeamento do problema para um sistema de referência com movimento arbitrário (movimento da malha). Este mapeamento é ilustrado na figura 1 onde onde R , $C(t_0)$ e $C(t)$ são respectivamente os domínios de referência e o meio contínuo na configuração inicial e final (Donea et al., 1982).

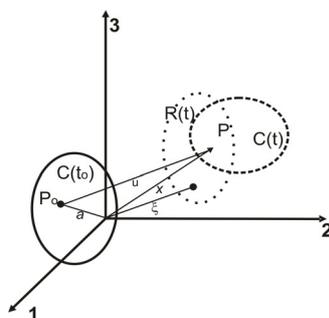


Figura 1 – Mapeamento ALE.



Para o problema de dinâmica estrutural, é empregada uma formulação não linear geométrica alternativa, denominada formulação posicional, onde as variáveis são obtidas diretamente das posições e não dos deslocamentos, cuja discretização temporal é feita através do integrador de Newmark estabilizado (Greco e Coda, 2004).

O acoplamento é particionado, ou seja, resolve-se a dinâmica do fluido independentemente da dinâmica da estrutura, transferindo-se as condições de contorno de um domínio para o outro (Felippa et al., 2001).

3.2 Método dos Elementos Finitos baseado em B-splines imersas para a dinâmica dos fluidos

O acoplamento ALE pode apresentar problemas devido à necessidade de movimentação da malha no contorno com a estrutura. Assim, propõe-se uma nova técnica de método dos elementos finitos baseada em B-splines imersas, onde a descrição geométrica e a análise numérica são baseadas em um bloco de malha cartesiana na qual o domínio do problema encontra-se imerso. Uma função distância assinalada ψ é usada para representar o contorno do domínio a ser analisado, sendo que o contorno corresponde à superfície de nível 0 de ψ .

Para que as condições de contorno possam se atendidas as funções B-splines de grau n B_i^n , geradas sobre a malha cartesiana são modificadas. Para tal, defini-se uma função ponderadora $w_i(x)$ para cada B-spline segundo a posição do ponto de máximo em relação ao contorno, de modo a evitar sistemas mal condicionados devido à presença de funções com pouca influência no domínio do problema e garantir a possibilidade de imposição de condições de contorno (Sanchez et al., 2009). Por fim, as funções de forma $N_i(x)$ são obtidas por:

$$N_i(x) = \frac{w_i(x)B_i^n(x)}{\sum_{i=1}^{n+1} (w_i(x)B_i^n(x))} \quad (1)$$

A formulação proposta para a dinâmica dos fluidos consiste em se resolver as equações na forma Lagrangeana em um passo no tempo, permitindo a malha se deformar. O contorno no tempo atual é identificado sobre a malha cartesiana não deformada e os pontos de quadratura são projetados sobre o domínio anterior para se buscar os valores a serem integrados. Com esta formulação são evitados os termos convectivos inadequados para resolução pelo processo de Galerkin.

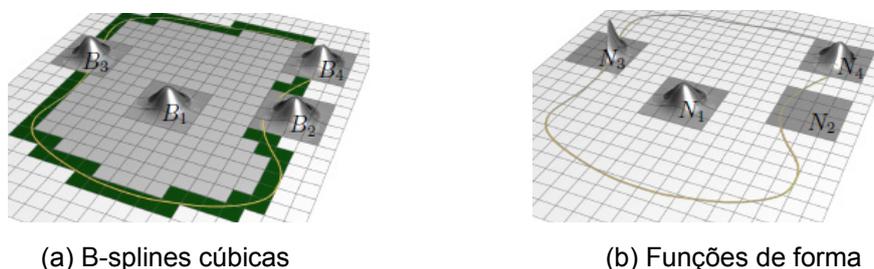


Figura 2 – Obtenção das funções de forma.



4 RESULTADOS OBTIDOS

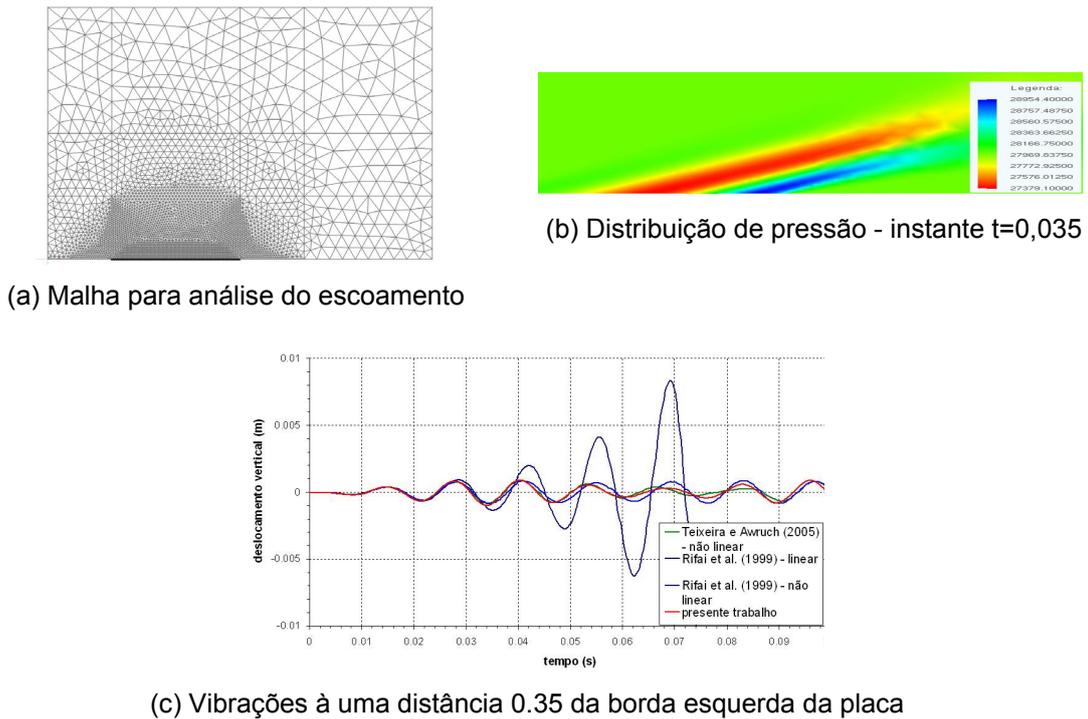


Figura 3 – Flutter de painel.

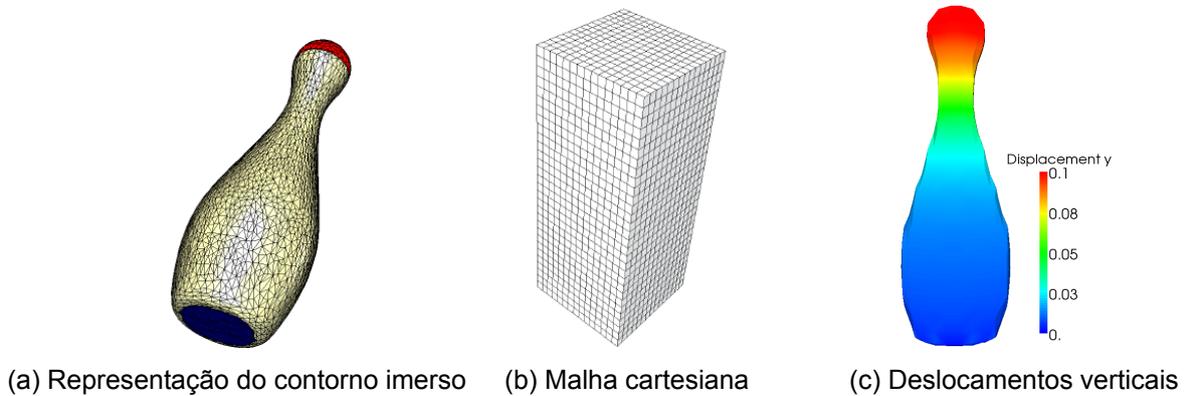


Figura 4 – Pino de boliche elástico linear.

Na figura 3 apresenta-se a análise de um problema de “flutter” de painel em escoamento supersônico (Mach 2.3), feita por meio do acoplamento ALE-Lagrangiano (Sanches e Coda 2008), bem como comparação com outros resultados da literatura.

Na figura 4 (a) é apresentado um pino de boliche elástico linear, engastado na parte azul e com deslocamento vertical $\Delta y = 0.1$ prescrito na parte vermelha. A análise é feita através da nova técnica de B-splines imersas, sendo malha da figura 4 (a) referente à superfície paramétrica usada para a obtenção da função distância assinalada. A figura 4 (b) e (c) mostram respectivamente a malha Cartesiana e a distribuição de deslocamentos verticais sobre o pino.



5 CONCLUSÕES PARCIAIS

É apresentado um método para a análise de interação fluido-estrutura, construído em descrição ALE-Lagrangiana, o qual se mostra eficiente para problemas com deslocamentos suaves da malha do fluido. Uma nova técnica de MEF baseada em B-splines imersas é apresentada e testada em problemas elípticos, mostrando eficiência. Finalmente é proposta uma nova formulação para análise de interação fluido-estrutura baseada nesta nova técnica, com a qual se espera obter maior versatilidade.

6 AGRADECIMENTOS

As autores são gratos ao CNPq por prestar suporte financeiro ao projeto.

7 REFERÊNCIAS

- DONEA, J.; GIULIANI, S.; HALLEUX, J. P. An arbitrary lagrangian-eulerian finite element method for transient dynamic fluid-structure interactions. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 33 p. 689-723, 1982.
- FELIPPA, C. A.; PARK, K. C.; FARHAT, C. Partitioned analysis of coupled mechanical systems. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 190 p. 3247-3270, 2001.
- GRECO M.; CODA H. B., A simple and precise FEM formulation for large deflection 2D frame analysis based on position description. **Computer Methods In Applied Mechanics and Engineering**, v. 193, p. 3541-3557, 2004.
- SANCHES, R. A. K.; CODA, H. B. Formulação bidimensional alternativa para a interação fluido-estrutura através do MEF. In: CONGRESSO IBERO LATINO AMERICANO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM ENGENHARIA, 29., **Anais...** Maceió, AL, 2008.
- ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. **The Finite Element Method: fluid dynamics**. Oxford, England: Butterworth-heinemann Linacre house, 2000. 5. ed. v 3.
- SANCHES, R. A. K.; LONG, Q.; CIRAK, F. Immersed B-spline finite element method for complex domains. In: CONGRESSO IBERO LATINO AMERICANO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM ENGENHARIA, 30., **Anais...** Armação de Búzios, RJ, 2009.



