



COMPORTAMENTO DE PLACAS FINAS DE CONCRETO TÊXTIL SUJEITAS À COMPRESSÃO

Fernanda Cristinna Alonso dos Santos

Daniel Carlos Taissum Cardoso

fernandaalonsocs@gmail.com

dctcardoso@puc-rio.br

Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Rua Marquês de São Vicente, 225, 22451-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Resumo. O concreto têxtil é um material compósito que consiste em uma matriz cimentícia de granulometria fina reforçada com camadas de tecido. Este material é comumente aplicado no reforço de estruturas existentes, porém, seu uso como elemento estrutural vem aumentando. O compósito apresenta diversas vantagens em relação aos materiais de construção tradicionais tais como maior resistência à corrosão e possibilidade de projetar elementos de concreto mais esbeltos e leves e com elevada capacidade de carga. Este artigo apresenta os resultados de uma investigação experimental em curso sobre o comportamento de placas finas de concreto têxtil sujeitas à compressão. As propriedades relevantes do material, determinadas experimentalmente, são reportadas e o desenvolvimento de um modelo analítico capaz de prever relações normal-momento-curvatura ($N-M-\Phi$) considerando a não-linearidade do material é descrito. Para validar o modelo, ensaios de flexão em quatro pontos foram realizados em placas, mostrando um bom acordo entre os resultados teóricos e experimentais. Finalmente, a partir dessas relações, um modelo numérico foi desenvolvido com objetivo de prever o comportamento força-deslocamento de colunas sujeitas à compressão. Boa concordância foi obtida entre os resultados numéricos e aqueles obtidos experimentalmente, mostrando que o modelo proposto pode ser utilizado com sucesso para previsão do comportamento desses elementos.

Palavras-chave: Concreto têxtil, Placas, Compressão, Normal-momento-curvatura, Flambagem.

1. INTRODUÇÃO

O concreto têxtil (CT) é um material compósito constituído por uma ou mais camadas de tecidos embebidos em uma matriz cimentícia composta por materiais granulométricos finos. Dentre as vantagens com relação aos materiais de construção tradicionais (e.g. concreto armado), pode-se citar a elevada resistência à corrosão e excelente resistência mecânica, possibilitando a produção de elementos estruturais mais leves e esbeltos. Os tecidos, que são principalmente constituídos de fibras de carbono, vidro e aramida, são flexíveis e possibilitam a criação de elementos estruturais de diversas formas e geometrias devido à sua maleabilidade (Bramshuber & Brockmann, 2006).

Embora o uso do concreto têxtil como elementos portantes principais em sistemas estruturais ainda seja muito limitado, uma ampla gama de possibilidades de design foram possíveis como resultado dos avanços na caracterização e modelagem, como é o caso de passarelas e painéis sanduíches (Kulas, 2015) e coberturas estruturais (Scholzen et al., 2015).

À medida que a esbeltez das estruturas cresce, seu comportamento resistente passa a ser governado pelo estado limite de instabilidade. Embora o fenômeno de flambagem de elementos de concreto armado tenha sido estudado por diversos autores (Bazant, 2010; MacGregor, 1986), não foram encontrados trabalhos sobre elementos de concreto têxtil na base de dados consultada. Mesmo com relação ao uso de barras de polímero reforçado com fibras em elementos comprimidos de concreto armado, a ACI 440.1R-15 (2015) recomenda desprezar a contribuição do reforço, apesar de trabalhos recentes apontarem o contrário (Afifi et al., 2014).

O objetivo do presente trabalho é, portanto, investigar o comportamento de elementos de concreto têxtil sujeitos à compressão, avaliando se as metodologias empregadas para análise de colunas de concreto armado são aplicáveis. A primeira parte do trabalho descreve o programa experimental: materiais utilizados; geometria e moldagem das placas; instrumentação e set-up dos ensaios de flexão e compressão. Na segunda parte, são descritos os modelos numéricos desenvolvidos e implementados no software *Maple 2015* (Maple User Manual, 2015). Finalmente, os resultados teóricos e experimentais são comparados e discutidos.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais utilizados

No presente estudo, o tecido utilizado foi o *SITgrid017KB* produzido pela *V. Fraas*. É um tecido bidirecional feito de fibra de carbono (Fig. 1a) com as seguintes medidas: abertura de malha de 10 mm na longitudinal e 8,5 mm na transversal; largura de 4,2 mm na longitudinal e 2,7 na transversal e seção transversal de 1,8 mm². Através de ensaios de tração uniaxial da fibra observou-se que o material apresenta comportamento linear e foi possível obter as seguintes propriedades mecânicas médias: resistência à tração de $2097 \pm 92,6$ MPa e módulo

de elasticidade longitudinal de $346 \pm 13,1$ GPa. Para aumentar a aderência entre tecido e concreto, a rugosidade superficial foi melhorada a partir da impregnação do tecido com resina epóxi (e.g. *Sikadur 32*) e areia (Donnini et al., 2016), conforme ilustrado na Fig. 1b.

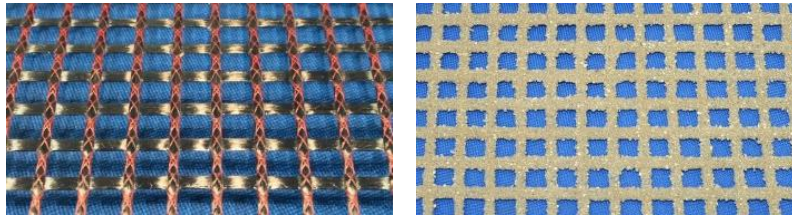


Figura 1. (a) Tecido de fibra de carbono; (b) Tecido impregnado com resina epóxi e areia

A matriz utilizada tem o traço apresentado na Tabela 1. Através de ensaios de compressão simples, foi possível obter as seguintes propriedades mecânicas médias: resistência à compressão de $53,5 \pm 2,63$ MPa e módulo de elasticidade de $27,6 \pm 3,95$ GPa. Essa matriz é caracterizada pela alta fluidez e pela granulação fina (grãos menores do que 2 mm), de forma a penetrar entre os vazios do tecido e obter uma boa aderência.

Tabela 1. Traço para a produção de um litro de concreto

Material	Peso (g)
Areia (1,18 mm)	947
Cimento CP2	632
Cinza Volante	265
Microsílica	50,5
Água	280
Superplastificante	6,31

2.2 Geometria e moldagem das placas

Foram utilizadas diferentes geometrias e processos de moldagem das placas para cada tipo de ensaio.

Para o ensaio de flexão foram utilizadas formas de aço, a fim de produzir três placas retangulares de 120 mm de largura, 12 mm de espessura e 1000 mm de comprimento, com uma fração volumétrica de fibras longitudinais de 1,125%. Inicialmente, uma camada de concreto de aproximadamente 3 mm foi aplicada de modo uniforme por toda a extensão da

forma, com posterior posicionamento do tecido de carbono impregnado com a resina epóxi e areia sobre essa camada. Espaçadores foram utilizados para evitar que o tecido encostasse no fundo da placa. Depois, outra camada de concreto foi colocada até atingir aproximadamente 12 mm, espessura desejada da placa (Fig. 2). As placas foram cobertas com papel filme até serem desmoldadas após 24 horas e colocadas em uma câmara úmida, na qual permaneceram por 28 dias.

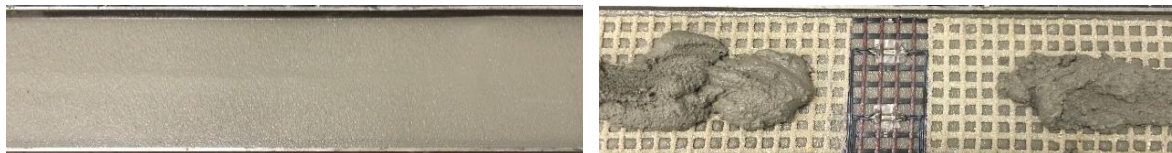


Figura 2. Processo de moldagem das placas para o ensaio de flexão

A moldagem de placas com configurações iguais é de extrema dificuldade, já que a espessura das placas é muito pequena e qualquer pequena variação na posição da fibra contribui para a mudança dos resultados experimentais. O objetivo era posicionar o tecido junto à face tracionada, porém como o concreto utilizado é bem fluido e a fibra é flexível, há uma tendência de levantamento do tecido após a moldagem. A Tabela 2 apresenta as dimensões das placas moldadas e a posição da fibra na seção localizada na metade do comprimento das placas, que foi calculada através de uma média aritmética entre as distâncias obtidas em vários pontos de cada seção transversal (Fig. 3).

Tabela 2. Dimensões das placas

Placa	Largura (mm)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)	Distância do fundo da placa até o eixo da fibra (mm)
FP2A	120	10,5	1000	5,8
FP2B	120	13,6	1000	8,2
FP3A	120	11,5	1000	6,2

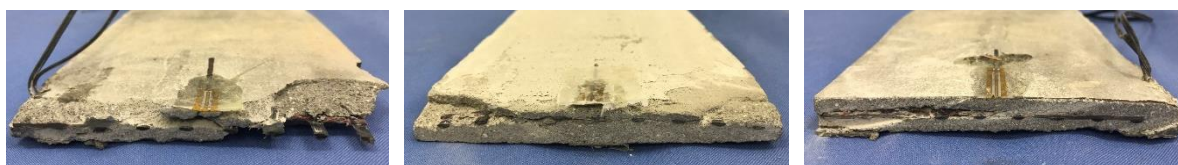


Figura 3. Posição da fibra na seção transversal do meio do vão nas placas FP2A, FP2B e FP3A.

Devido ao aparato experimental existente no laboratório, para o ensaio de compressão foi utilizada uma forma de acrílico no formato de seção I com as seguintes dimensões: alma de 100 mm, mesas de 50 mm e espessura de 12 mm. Uma camada de tecido foi posicionada no

meio da seção com espaçadores de 4 mm colados em ambos os lados, para garantir o posicionamento correto do reforço. Depois, o concreto foi lançado por cima até a altura desejada. Foram moldados dois perfis I com alturas de 65 cm e 100 cm. Depois da desmoldagem, realizada com 72 horas de idade, e cura de 28 dias em uma câmara úmida, os perfis foram cortados numa serra a fim de retirar as suas mesas. Dessa forma, foram produzidas duas placas de 70 mm de largura por 12 mm de espessura. O processo de moldagem é apresentado na Fig. 4.

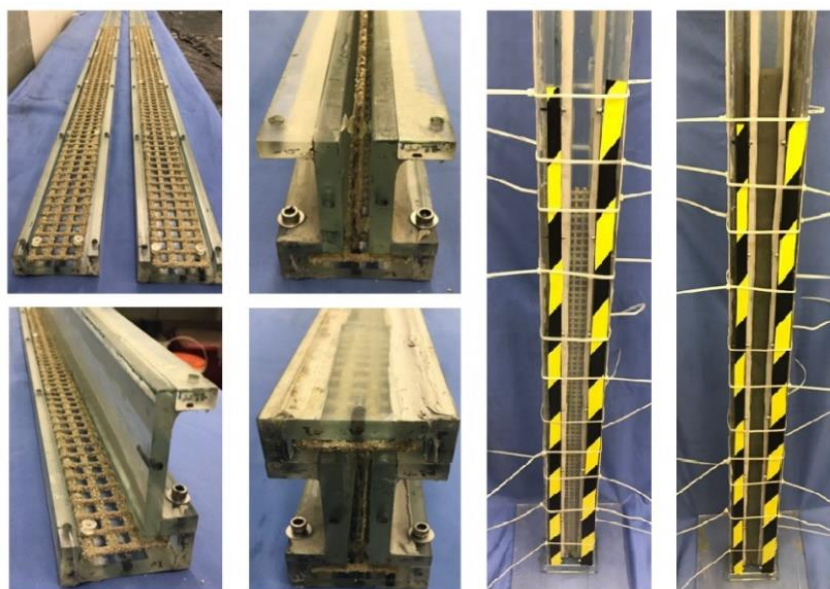


Figura 4. Processo de moldagem de uma seção I de concreto têxtil para a confecção das placas

2.3 Instrumentação e set-up dos ensaios

Ensaio de flexão de quatro pontos. O ensaio foi realizado com o set-up mostrado na Fig.5. Um apoio de primeiro gênero e um de segundo foram posicionados a uma distância de 50 cm entre si e os pontos de aplicação de carga foram posicionados a uma distância de 16,7 cm de cada apoio. O ensaio foi realizado em uma máquina servo-hidráulica com controle de deslocamento a uma taxa de 1,5 mm/min até um deslocamento de 80 cm.

Com o objetivo de medir as deformações da fibra, quatro extensômetros foram colados na superfície do tecido antes da moldagem das placas, sendo dois na face superior da fibra e dois na inferior, na região central da placa. Para a obtenção dos dados corretos, esta região não foi impregnada com resina. Outro extensômetro foi colado na face superior da placa de concreto têxtil para medir as deformações nessa região. Uma placa de alumínio foi colada na parte inferior da placa a fim de posicionar um transdutor de deslocamento capaz de medir a deflexão da placa no meio do vão.

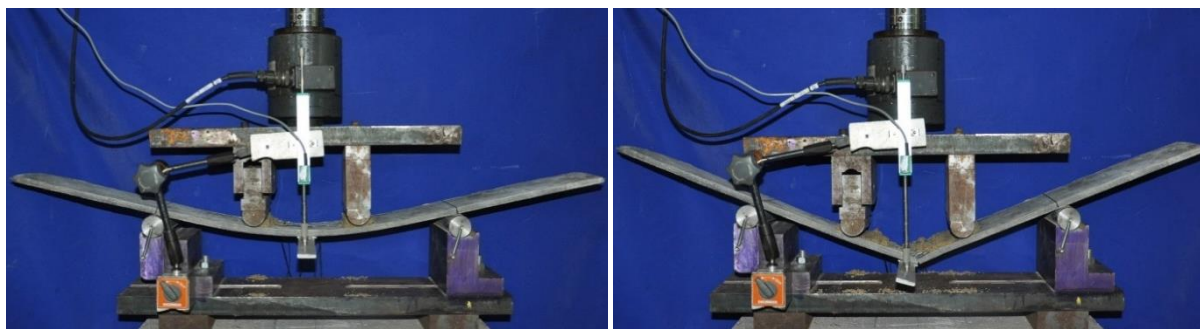


Figura 5. Ensaio de flexão de quatro pontos

Ensaio de compressão. O ensaio de compressão foi realizado com as duas extremidades das placas engastadas. Para evitar rotação nas bases, placas metálicas com 35 mm de espessura foram soldadas nas chapas de base e massa plástica (*Iberê*) foi utilizada para preencher os vazios e garantir que a carga fosse distribuída uniformemente no contato. Os comprimentos de 65 cm e 100 cm foram escolhidos de modo a investigar o comportamento para diferentes esbeltezes. Para essas condições, as cargas críticas obtidas pela expressão clássica de Euler são 26 e 11 kN, respectivamente, enquanto a resistência do material é de aproximadamente 45 kN para ambas as colunas. Os ensaios foram realizados em uma máquina universal servo-hidráulica com controle de deslocamento a uma taxa de 0,1 mm/min até a ruptura do compósito.

As placas foram instrumentadas com dois transdutores de deslocamento, um posicionado horizontalmente na metade do comprimento da placa enquanto outro foi disposto verticalmente junto à base para monitorar o encurtamento da coluna. O set-up do ensaio e as configurações iniciais e finais da placa de 65 cm são apresentados na Fig. 6.

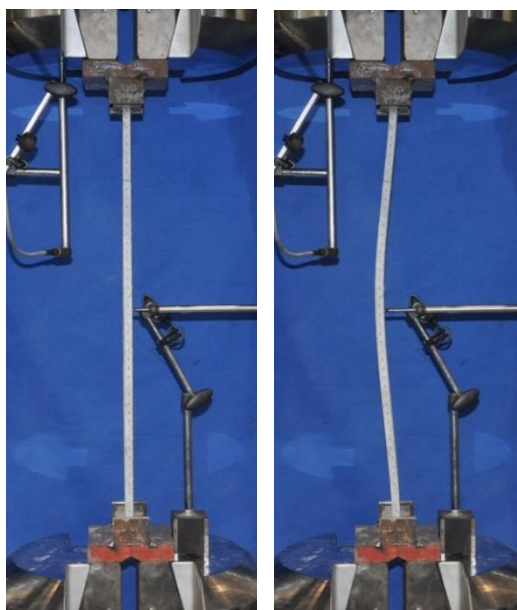


Figura 6. Ensaio de compressão da placa de 65 cm (a) Configuração inicial; (b) Configuração final

3. MODELOS NUMÉRICOS

3.1 Modelo normal-momento-curvatura (N-M- Φ)

Um modelo analítico capaz de prever relações não lineares de normal-momento-curvatura foi criado de forma iterativa a partir de uma rotina implementada no software *Maple 2015* (Maple User Manual, 2015). Este foi obtido através de analogia com o comportamento de vigas de concreto armado, substituindo as propriedades do aço pelas da fibra.

A tensão no concreto σ_c é baseada no modelo de Hognestad (1951), que define a relação tensão-deformação por uma parábola, e é dada pela seguinte equação:

$$\sigma_c = \left\{ f_c \left(1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^2 \right), \varepsilon_{cu} \leq \varepsilon_c \leq 0 \right\}; \left\{ E_c \varepsilon_c, 0 < \varepsilon_c \leq \frac{f_{ct}}{E_c} \right\} \quad (1)$$

onde ε_c é a deformação específica do concreto, ε_{cu} e ε_{c2} são as deformações específicas última e de início de plastificação do concreto, respectivamente, f_c e f_{ct} são as resistências à compressão e tração do concreto, respectivamente, e E_c é o módulo de elasticidade do concreto à tração.

A tensão na fibra σ_f é calculada pela seguinte expressão:

$$\sigma_f = \left\{ 0, \varepsilon_f < \frac{-f_f}{E_f} \right\}; \left\{ E_f \varepsilon_f, \frac{-f_f}{E_f} \leq \varepsilon_f \leq \frac{f_f}{E_f} \right\}; \left\{ 0, \varepsilon_f > \frac{f_f}{E_f} \right\} \quad (2)$$

onde ε_f é a deformação específica, f_f a resistência à tração da fibra e E_f o módulo de elasticidade.

Para o cálculo da força normal N e do momento fletor M , tem-se:

$$N = \int_0^h \sigma_c b dx + \sigma_f A_f \quad (3)$$

$$M = \int_0^h \sigma_c x b dx + \sigma_f A_f x_f - \frac{Nh}{2} \quad (4)$$

onde h é a espessura da placa, b a largura da placa, x_f a distância do eixo da fibra até o fundo da placa e A_f a área total de fibra na seção.

Vale ressaltar que as tensões no concreto e na fibra dependem da distribuição de deformações específicas na seção transversal, que por sua vez depende da curvatura Φ e da posição da linha neutra x_{LN} .

No caso das placas submetidas à flexão simples, a força normal na seção transversal é nula. Assim, para cada valor de curvatura, pode-se resolver as Eqs. (3) e (4) e determinar a posição da linha neutra e o momento fletor correspondentes. Dessa forma, é possível obter a relação M- Φ para cada placa ensaiada. Conforme será visto mais adiante, o modelo será validado para ensaios de flexão em placa. O modelo será adotado, então, para previsão do comportamento de colunas sob compressão, seguindo metodologia descrita na seção a seguir.

3.2 Modelo de viga-coluna

O modelo numérico para o cálculo de deflexões em uma viga-coluna   baseado na proposta de Bazant (2010) para uma coluna biapoiada. Algumas modifica es foram feitas para a considera o de uma coluna biengastada.

Admite-se que a deformada da se o w , tenha a seguinte forma senoidal ao longo da se o:

$$w(x) = A \sin^2(\pi x / L) \quad (5)$$

onde A   amplitude da curva senoidal e L o comprimento da placa.

Derivando-se duas vezes a Eq. (5), obt m-se a expressão da curvatura.

$$w''(x) = \Phi(x) = 2A(\pi / L)^2 (1 - 2\sin^2(\pi x / L)) \quad (6)$$

Dessa forma,   possível correlacionar a flecha no meio do comprimento ($x = L/2$), δ , com a curvatura no mesmo ponto como:

$$\delta = \Phi\left(\frac{L}{\sqrt{2}\pi}\right)^2 \quad (7)$$

Para a condi o de coluna biengastada com uma dada imperfei o inicial δ_0 , a condi o de equilíbrio na metade da coluna resulta em:

$$\delta + \delta_0 = \frac{2M}{N} \quad (8)$$

A partir das equa es que definem M e N (Eqs. (3) e (4)) e da correla o estabelecida entre δ e Φ (Eq. (7)),   possível encontrar, para uma dada curvatura arbitrária, qual a posi o da linha neutra que satisfaz a condi o dada na Eq. (8). A partir da , a força normal correspondente pode ser determinada. O processo numérico para obten o da curva P - δ consiste em variar a curvatura e obter os valores de P e δ correspondentes. Esse modelo será comparado com os resultados dos ensaios experimentais.

4. RESULTADOS DOS ENSAIOS E COMPARA O COM PREVISÃO NUMÉRICA

4.1 Ensaio de flexão de quatro pontos

Os gráficos de força-deslocamento e momento-curvatura para as três placas ensaiadas   flexão são apresentadas na Fig. 7.

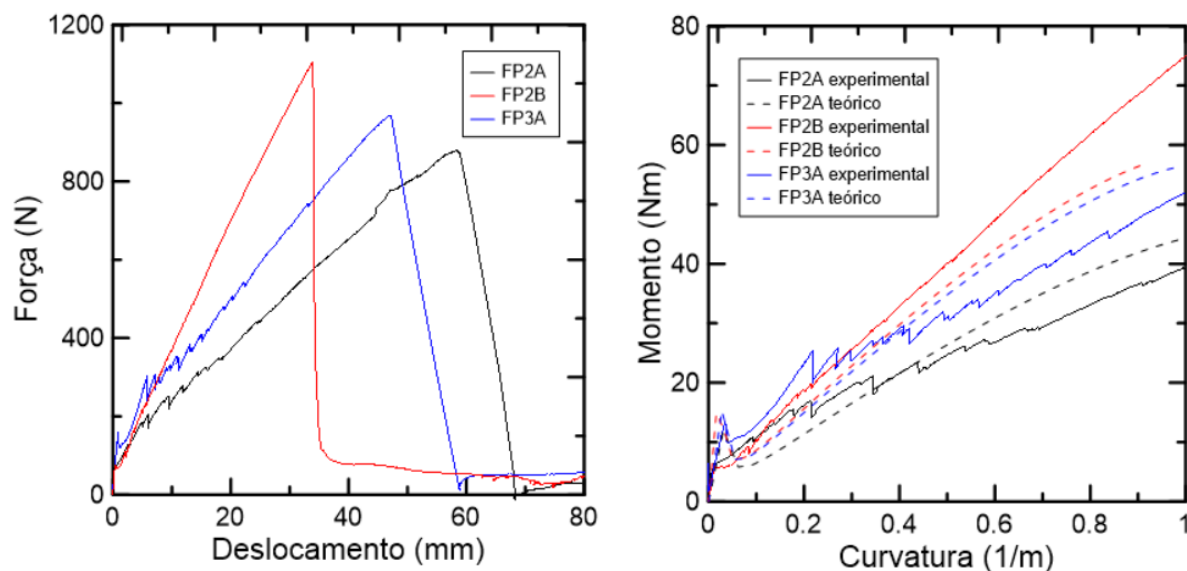


Figura 7. Gráficos força-deslocamento experimental e momento-curvatura

O gráfico de força-deslocamento foi obtido a partir do deslocamento medido pelo transdutor de deslocamento. Apesar do comportamento semelhante, os resultados entre as placas foram um pouco diferentes devido às diferenças na espessura e na posição das fibras na seção do meio do vão. As cargas de ruptura foram de 879, 1105 e 968 N, respectivamente para as placas FP2A, FP2B e FP3A. As curvas experimentais momento-curvatura foram obtidas através das equações da linha elástica, já que as deformações obtidas pelos extensômetros posicionados na fibra indicaram deformações pequenas associadas ao efeito de enrijecimento devido à colaboração do concreto (tension stiffening) (Mobasher, 2012).

Os diagramas momento-curvatura teóricos, também apresentados na Fig. 7, foram obtidos através do modelo descrito na seção 3.1 adotando-se a posição das fibras medida experimentalmente para cada corpo de prova.

De uma forma geral, os gráficos momento-curvatura teóricos e experimentais para cada placa foram próximos. Dessa forma, considera-se que o modelo analítico proposto é satisfatório.

4.2 Ensaio de compressão

Para os ensaios das colunas de 65 cm e 100 cm de comprimento, foram obtidos os gráficos de força-deslocamento, apresentados na Fig. 8. Na mesma figura estão ilustradas as curvas teóricas obtidas de acordo com o procedimento numérico descrito na seção 3.2 para diferentes valores de imperfeição inicial: 0,1 mm, 0,5 mm e 1 mm.

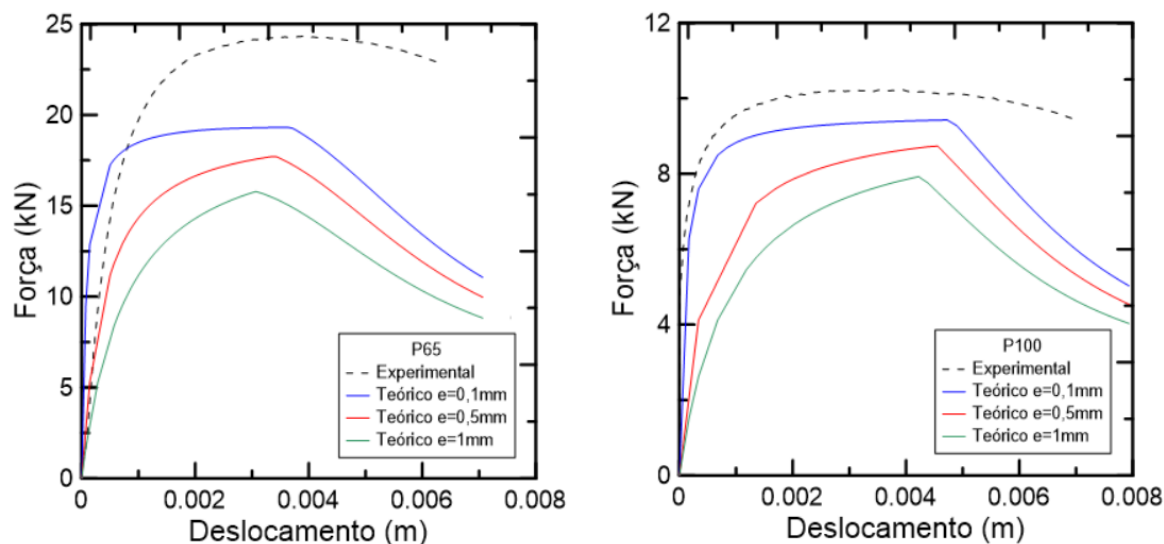


Figura 8. Gráficos força-deslocamento das placas (a) placa de 65 cm; (b) placa de 100 cm

Os resultados experimentais apresentaram o comportamento esperado. A placa de 65 cm obteve uma carga de ruptura maior do que a de 100 cm, porém elas tiveram praticamente o mesmo deslocamento total no meio do v o.

Ambas as placas apresentaram ruptura por flambagem global, uma vez que a carga crítica   muito mais baixa do que a resistência do material. As placas de 65 cm e 100 cm apresentaram cargas experimentais de 24 e 10 kN, respectivamente, sendo menores do que a carga do material que era de 45 kN.

Comparando os gráficos, pode-se observar que a placa de 100 cm tem uma imperfeição menor do que a de 60 cm, já que ela tem um comportamento muito parecido com a excentricidade inicial de 0,1 mm.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresentou a descrição do programa experimental realizado e da formulação utilizada para a elaboração dos modelos numéricos. A partir da comparação entre os resultados obtidos para a flexão das placas, foi possível validar o modelo numérico N-M- Φ desenvolvido. A partir deste, um novo modelo foi elaborado com o objetivo de analisar o comportamento   compressão de placas de CT. De uma forma geral, todos os resultados experimentais mostraram boa concordância com os resultados teóricos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pelo suporte financeiro recebido no desenvolvimento dessa pesquisa e aos técnicos do Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio pelo auxílio na realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS

- ACI 440.1R-15, 2015. *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars*. American Concrete Institute.
- Afifi, M. Z., Mohamed, H. M., Benmokrane, B., 2014. Axial capacity of circular concrete columns reinforced with glass-FRP bars and spirals. *Journal of Composites for Construction*, 18, pp. 04013017.
- Bazant, Z., & Cedolin, L., 2010. *Stability of structures: elastic, inelastic, fracture and damage theories*. Oxford University Press.
- Bramshuber, W., & Brockmann, T., 2006. 1 Introduction. *State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee TC 201 - TRC Textile Reinforced Concrete*, p.1–3.
- Donnini, J., Corinaldesi, V., & Nanni, A., 2016. Mechanical properties of FRCM using carbon fabrics with different coating treatments. *Composites Part B*, vol. 88, n. C, pp. 220–228.
- Hognestad, E., 1951. A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members. *Bulletin Series*, n. 399.
- Kulas, C., 2015. Actual applications and potential of textile-reinforced concrete. *The 17th International Congress of the GRCA*, pp. 1-11.
- MacGregor, J. G., 1986. Stability of reinforced concrete building frames. *Concrete framed structures - stability and strength*. Elsevier.
- Maple User Manual, 2015. Disponível em: https://www.maplesoft.com/documentation_center/maple19/UserManual.pdf. Acessado em 29 de agosto de 2017.
- Mobasher, B., 2012. *Mechanics of fiber and textile reinforced cement composites*. CRC Press.
- Scholzen, A., Chudoba, R., & Hegger, J., 2015. Thin-walled shell structure made of Textile Reinforced Concrete; Part I: structural design and construction. *Structural Concrete* 16, pp. 106–114.