

ANÁLISE COMPUTACIONAL DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE VIGAS DE CONCRETO REFORÇADAS COM FIBRAS LONGAS

Josué Andrade Costa¹; Koji de Jesus Nagahama²; Anderson de Souza Matos Gadéa³

1. Bolsista PROBIC/UEFS, Graduando em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), e-mail:

jcostalbr@yahoo.com.br

2. Orientador, Departamento de Tecnologia (DTEC), UEFS, e-mail: kjnagahama@gmail.com

3. Co-orientador, DTEC, UEFS, e-mail: agadeca@gmail.com

PALAVRAS-CHAVE: tração direta; fibra de sisal; método dos elementos.

INTRODUÇÃO

Os compósitos destacam-se por possibilitam a otimização das propriedades de engenharia pela associação de outros componentes em conjunto com materiais tradicionais. Na engenharia civil, os materiais compósitos mais utilizados ainda são aqueles à base de cimento, reforçados com fibras, destacando-se o cimento amianto (asbesto). Entretanto, pesquisas mostraram que o asbesto pode causar várias doenças, entre estas o câncer (DEMENT *et al.*, 2007 e RICHARDSON, 2009), o que provocou a proibição da utilização deste material em muitos países.

Considerando a abundância do sisal, haja vista que o Brasil é o maior produtor de sisal do mundo, cuja exportação chegou a gerar receitas superiores a 80 milhões de dólares (SUINAGA *et al.*, 2006), aliado ao baixo custo de produção, vislumbra-se assim um grande potencial, revelando-se como estratégia para o desenvolvimento nacional. A utilização da fibra de sisal como reforço para materiais de construção agregará valor ao produto e garantirá uma maior demanda para as fibras. Assim sendo, a utilização da fibra de sisal não desperta apenas um interesse no âmbito tecnológico, mas também sócio-econômico e ambiental.

Nenhum material, com função estrutural, poderá ser incorporado à construção civil sem que se possa prever o seu comportamento. Para isto são necessárias investigações experimentais e de cunho analítico e/ou numérico. Os experimentos ocorrem com muito mais frequência (SAVASTANO JR *et al.*, 2006; TOLEDO FILHO *et al.*, 2002; SANJUÁN e TOLEDO FILHO, 1998), porém são processos lentos e onerosos, o que torna importante descrever teoricamente o comportamento deste compósito, para que as pesquisas tenham impulso e seja possível criar critérios de dimensionamento para o mesmo, garantindo a durabilidade e a segurança do elemento estrutural, permitindo assim a utilização do sisal na construção civil, com todos os benefícios agregados ao mesmo.

Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo simular o comportamento de algumas placas de matriz cimentícia, reforçadas com fibras longas de sisal, submetidas a esforços de tração direta, produzidas e ensaiadas por Lima (2004). Para a simulação computacional foi utilizado o programa DIANA 9.0

METODOLOGIA

Tendo em vista o esforço computacional verificado nas modelagens iniciais por elementos finitos, fez-se a opção de considerar a simetria da resposta estrutural em torno dos dois eixos do plano da placa, sendo adotado em todas as análises apenas um quarto da placa original, introduzindo-se adequadamente condições de contorno e carregamento associadas à simetria, reduzindo-se assim, o tempo despendido para se obter a resposta computacional. A malha de elementos finitos possuía um total de 300 elementos. Optou-se pela utilização do elemento de casca CQ40S do DIANA, baseados na teoria de Mindlin-Reissner, que considera os efeitos do cisalhamento transversal. As placas aqui modeladas foram produzidas, ensaiadas e denominadas de P3C2, P3C3, P6C2 e P6C3 por Lima (2004).

Para a modelagem do comportamento estrutural das placas compósitas foi necessário definir os seguintes aspectos para a matriz: modelo de fissuração, modelo de comportamento à tração e compressão, módulo de elasticidade, G_f (energia de fratura no Modo I), h (faixa de fissura), resistência à tração e compressão, além do β (fator de retenção ao cisalhamento). No caso da fibra de sisal, o importante era estabelecer o melhor modelo de comportamento, uma vez que já se conhecia seu módulo de elasticidade longitudinal.

A partir dos resultados experimentais de Lima (2004), definiu-se o módulo de elasticidade da matriz (35 GPa) e também da fibra (19,3 GPa). A resistência à compressão foi adotada como sendo dez vezes a resistência à tração, proporção esta bastante utilizada para concretos convencionais. O valor da faixa de fissura (“crack-band width”) foi fixado em 7,2 mm, obtido através da equação proposta por Bažant e Oh (1983) onde $hc = da \cdot na$, com $na = 3$, uma vez que a argamassa pode ser considerada um concreto sem agregado graúdo e $da = 2,4$ mm (diâmetro máximo do agregado). Com não houve ensaios para a determinação do G_f também foi necessária uma retro-análise para sua quantificação. Para o parâmetro β , usualmente é utilizado é 0,2 (BAŽANT, 1997), o que foi adotado no presente trabalho.

O modelo de fissuração fixo foi o adotado para uma primeira análise, por se tratar de um modelo mais simples (ROTHS, 1988). Para o modelo de comportamento à tração adotou-se o exponencial do DIANA.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As primeiras análises foram realizadas considerando-se comportamento linear elástico para a fibra. Nesses resultados, observou-se que a tenacidade obtida a partir da resposta computacional foi sempre superior àquela determinada para a resposta experimental. Isso é explicado pelo possível arrancamento da fibra da matriz. Segundo Lima (2004), quando as tensões de cisalhamento atingem o valor de 0,6 MPa, começa o processo de decoesão e posterior arrancamento das fibras, o que pode explicar a ocorrência do “softening” nas curvas experimentais.

Para simular o arrancamento das fibras adotou-se o modelo de comportamento para as fibras do tipo “softening” incorporado ao programa através de arquivo externo, reduzindo-se assim a capacidade da fibra de absorver esforços de tração para representar a perda de capacidade da matriz de transferir esforço para a fibra.

Para criar o modelo de comportamento da fibra adequado para cada placa, foi necessário verificar em que nível de tensões normais inicia-se o arrancamento, monitorando as respectivas tensões de cisalhamento na matriz, para cada incremento de carregamento. Após esta análise, verificou-se que as tensões normais variavam de 90 MPa a 120 MPa aproximadamente para um cisalhamento de 0,6 MPa. Em seguida, realizou-se uma retro-análise para determinar os melhores modelos de comportamento para a fibra, afim de simular este arrancamento.

Utilizando como referência o modelo proposto por Naaman *et al.* (1991), o patamar e o primeiro ramo descendente, em todos os modelos de comportamento adotados para a fibra, representam o processo de decoesão e o outro ramo descendente o arrancamento, sendo todos os resultados obtidos por retro-análise. Para todas as placas a tensão máxima suportadas pela fibra foi de 95 MPa e o processo de arrancamento iniciou-se em 50 MPa, sendo o patamar inicial a única diferença entre os modelos encontrados para representar o processo de arrancamento da fibra em cada placa, ou seja, parte da energia necessária para completar o processo de decoesão.

É importante ressaltar que não somente a fibra influencia no comportamento pós-pico dos compósitos mais também a energia de fratura G_f . Desta forma, esta retro-análise levou também à determinação de G_f para cada laminado.

Na Figura 1 estão representados os correspondentes resultados tensão *versus* deformação para os corpos-de-prova estudados na presente análise, já introduzidos os comportamentos “softening” aplicados às fibras.

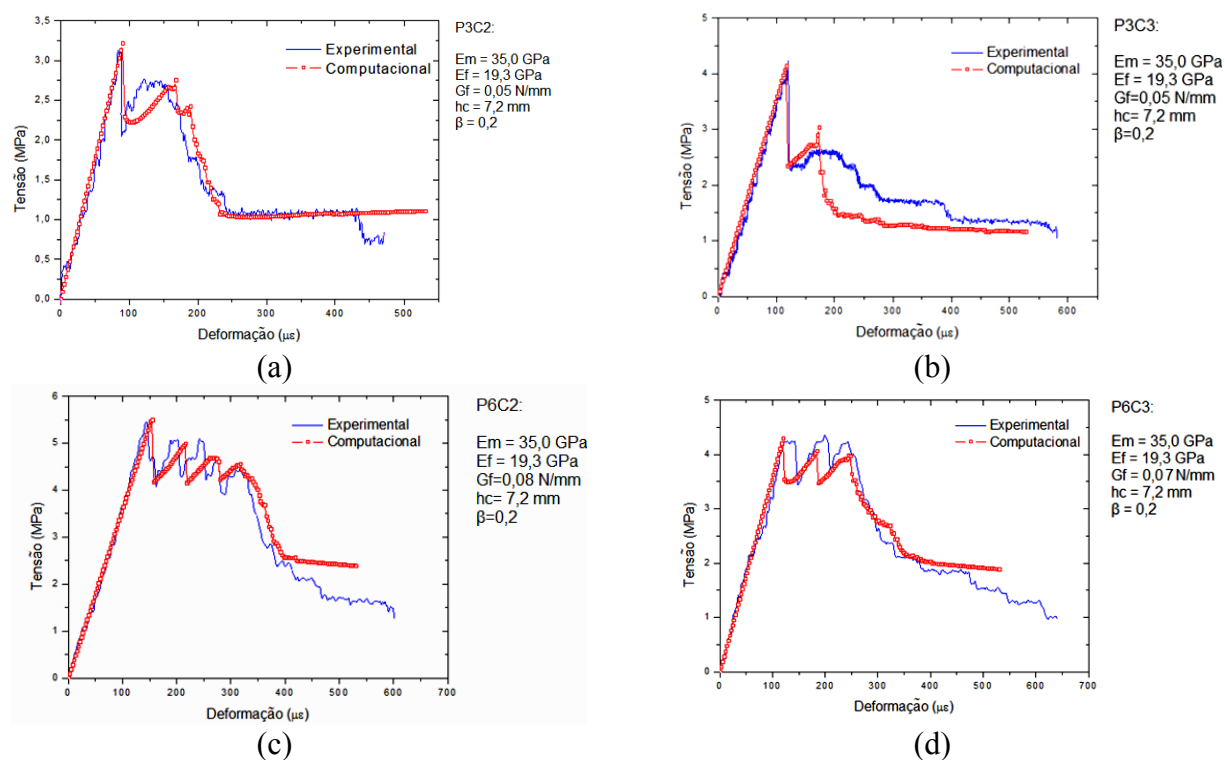


Figura 1 – Trajetória de equilíbrio das placas sob tração direta.

Nesses resultados percebe-se uma aproximação entre as curvas experimental e numérica com aperfeiçoamento significativo do modelo, que é comprovado quando se analisa a tenacidade de cada amostra em comparação com os resultados computacionais. O compósito P3C2 possui uma tenacidade de 693,64 kN/m³ enquanto na modelagem este valor foi de 707,37 kN/m³, um acréscimo de 1,94%. Para o P3C3 a tenacidade é de 983,03 kN/m³ contra 859,43 kN/m³ do modelo, uma variação de 14,38%, sendo este o pior resultado. O P6C2 tem uma tenacidade de 1684,15 kN/m³ contra 1783,71 kN/m³ do modelo, diferença de 5,91%. Por último, o corpo-de-prova P6C3 possui uma tenacidade de 1377,37 kN/m³, já o modelo computacional é de 1386,91 kN/m³, uma diferença percentual de apenas 0,69% (melhor resultado).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base no que foi anteriormente descrito, é possível obter bons resultados na modelagem de placas de matriz cimentícia reforçadas com fibras de sisal, utilizando o software comercial DIANA, empregando o modelo de fissuração “smeared crack” mais simples; o fixo, sem a necessidade da utilização de uma malha de elementos finitos muito refinada. Para a realização de simulações através do modelo fixo de fissuração é necessário definir o modelo de comportamento na tração, a resistência à tração do material, módulo de elasticidade (E), a energia de fratura para o modo I de carregamento (G_f), o “crack-band width” (hc) além do fator de retenção ao cisalhamento (β). A resistência à tração do material, além módulo de elasticidade longitudinal (E), devem ser obtidos experimentalmente. O parâmetro G_f pode ser obtido através da equação (2.47) do CEB (1990) e o parâmetro hc pela equação proposta por Bazant e Oh (1983). Para o fator β deve-se utilizar o valor 0,2 proposto

por Bažant (1997). Quanto ao modelo de comportamento na tração deve-se utilizar o exponencial no caso do DIANA ou similar no caso de modelagens através de outros “softwares”. No que diz respeito ao comportamento da fibra, conclui-se, principalmente, que é possível representar o processo de arrancamento da fibra introduzindo um “softening” no modelo constitutivo da fibra de sisal.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UEFS, à CAPES e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual de Feira de Santana.

REFERÊNCIAS

- BAŽANT ZP, PLANAS J, 1997. **Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials**. CRC Press LLC.
- BAŽANT ZP, 2002. **Concrete fracture models: testing and practice**. *Engineering Fracture Mechanics*, 69 165-205.
- BAŽANT ZP, OH BH, 1983. **Crack band theory for fracture of concrete**. *Materials and Structures (RILEM)*, 16 (93), pp.155-177.
- COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON (CEB) & FEDERATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAITE (FIP). **Model Code 1990 – Design Code**, Lausanne: Thomas Telford Services Ltd, 1991.
- DEMENT JM, HEIN MJ, STAYNER LT, LEHMAN E, 2007. **Follow-up study of chrysotile textile workers: cohort mortality and exposure-response**. *Occupational and Environmental Medicine*. Vol. 64 pages 616-625.
- DIANA, 2005. **User's Manual -- Release 9**. Last modified Fri Apr 29 13:34:17 CEST 2005.
- LIMA PRL, 2004. **Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal**. Tese Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- NAAMAN AE, NAMUR GG, ALWAN JM, NAJM HS, 1991. **Fiber pullout and bond slip**. I: Analytical study. *Journal of structural engineering*, V. 117, p.2769-2800.
- SANJUÁN MA, TOLEDO FILHO RD, 1998. **Effectiveness of crack control at early age on the corrosion of steel bars in low modulus sisal and coconut fiber-reinforced mortars**. *Cement e Concrete Research*, Vol. 28, No. 4, pp. 555-565.
- SAVASTANO JR H, ROMA JR LC, MARTELLO LS, 2006. **Evaluation of mechanical, physical and thermal performance of cement-based tiles reinforced with vegetable fibers**. *Construction and Building Materials* 25 668-674
- SUINAGA FA, SILVA ORRF, COUTINHO WM, 2006. **O cultivo do sisal**. ISSN 1678-8710 Versão Eletrônica.
- TOLEDO FILHO RD, SILVA FA, FAIRBAIM EMR, MELO FILHO JA, 2007. **Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates**. *Construction and Building Materials*, 23 2409 – 2420.