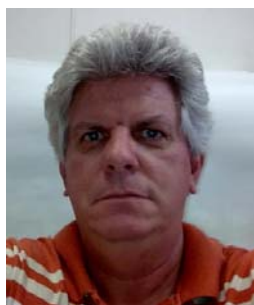


Comparação entre resultados teóricos e experimentais de vigas de micro concreto armado em flexão de três pontos



**Luiz Carlos
de Almeida¹**



**José Luiz A.
de O. e Sousa¹**



Gonzalo Ruiz²



Rena C. Yu²

RESUMO

Um programa experimental abordando a influência da espessura da seção comprimida no fraturamento de vigas de concreto armado é descrito neste artigo. Vigas de micro-concreto levemente armadas foram ensaiadas, com quatro seções transversais diferentes: uma retangular e três T com variação na dimensão da mesa. Propriedades mecânicas do concreto foram obtidas em ensaios independentes. Erros experimentais devidos à heterogeneidade do material ou aos arranjos dos ensaios foram minimizados para assegurar um alto nível de controle durante a execução. Esses resultados indicam que o pico de carga aumenta menos que o esperado, de acordo com procedimentos usuais de cálculo, quando as vigas retangulares são comparadas com as vigas T. As vigas foram simuladas no programa computacional ATENA no estado plano de tensão com todas as propriedades mecânicas dos materiais obtidas nos ensaios de caracterização. Os resultados teóricos e experimentais são apresentados e quando comparados apresentaram uma boa aderência.

PALAVRAS CHAVES

Fratura em concreto estrutural, modelos coesivos em concreto, efeito de forma, elementos finitos.

¹ Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 13083-852 Campinas, São Paulo, Brasil. almeida@fec.unicamp.br

¹ Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 13083-852 Campinas, São Paulo, Brasil. jls@fec.unicamp.br

² E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Castilla-La Mancha, 13071 Ciudad Real, España. Gonzalo.Ruiz@uclm

² E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Castilla-La Mancha, 13071 Ciudad Real, España. Chengxiang.Yu@uclm.es

1. INTRODUÇÃO

Vários experimentos com vigas levemente reforçadas [1, 2] estão baseados na idéia de que vigas minimamente armadas são estruturas frágeis susceptíveis à análise teórica com a mecânica da fratura. Estes programas experimentais mostraram que colapso frágil das vigas pouco armadas é dependente da dimensão, o que sugere que a ruptura é devida ao processo de fratura em concreto. Especificamente, Hededal e Kroon [3] consideraram que as propriedades de aderência da armadura ao seu entorno tem substancial influência na resposta da viga. Ruiz et al. [4] realizaram uma série de ensaios que mostraram a influência de vários parâmetros, tais como tamanho, taxa de armadura, tensão de escoamento do aço e a aderência aço-concreto - no comportamento à fratura do concreto. Além disso, fizeram uma completa caracterização do material através de ensaios diretos com o objetivo de testar possíveis modelagens numéricas [5, 6].

No entanto, ainda existem vários pontos a serem estudados. Por um lado, a maioria dos trabalhos abordando colapso das vigas frágeis pela mecânica da fratura tem sido feito em vigas de seções retangulares. Ozcebe et al. [7] utilizaram uma abordagem tecnológica para estudar a ruína das vigas de seção T e Ruiz e Carmona [6] usaram vigas seção retangulares e um tipo de viga T para o estudo da influência da forma na propagação da fissura. Por outro lado, Ruiz et al. [8] e Carmona [10] mostraram teoricamente a existência de um pico secundário no diagrama de carga versus deslocamento devido ao início da propagação da fissura através na mesa da viga T. Com a ajuda de um modelo numérico eles também mostraram que a zona fissuração se desenvolve como se a viga T fosse uma viga retangular de altura maior, que se manifesta em um pequeno efeito de forma. Este efeito de forma é análogo ao efeito de tamanho da viga, uma vez que o pico de carga aumenta menos do que previsto pela teoria das estruturas à medida que se torna mais larga a mesa da viga. Esses fenômenos não tinham sido observados experimentalmente, o que justifica um programa experimental abrangendo esses tópicos. Para tanto foram escolhidas vigas T executadas com um micro concreto cujas mesas variam da largura da seção retangular até uma largura de mesa igual à altura da viga. Todas as vigas foram executadas a partir dos mesmos materiais micro concreto e barras de aço cujas propriedades permaneceram constantes para todos os espécimes ensaiados. Todas as vigas tinham o mesmo número de barras e arranjadas da mesma forma.

O artigo está estruturado da seguinte forma. Uma breve descrição do programa experimental é apresentada na seção 2. Os materiais e espécimes estão descritos na seção 3. A seção 4 resume os procedimentos experimentais. Na seção 5 está apresentado o resumo dos procedimentos numéricos utilizados. Os resultados são apresentados e discutidos na seção 6. Por último, na seção 7 algumas conclusões são apresentadas.

2. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi destinado ao estudo da influência da forma da seção transversal sobre a evolução do processo de fratura de vigas de concreto armado à medida que são carregadas. Foram escolhidas vigas T executadas com um micro concreto cuja largura da mesa variou desde a largura da alma (seção retangular) até uma largura igual à altura das vigas. Além disso, o programa forneceu uma caracterização do material para permitir uma completa interpretação dos resultados dos ensaios que possam ser úteis para futuras investigações. Por último, o comportamento das vigas de laboratório deve ser representativo do comportamento das vigas de tamanho normal feitas de concreto convencional.

No que diz respeito à dimensão dos espécimes, o número de fragilidade de *Hillerborg* [11] foi usado como parâmetro comparativo. Como uma primeira aproximação, duas estruturas geometricamente

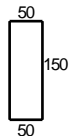
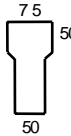

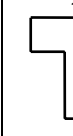
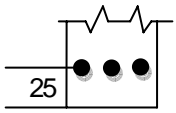
semelhantes irão exibir um comportamento semelhante à fratura frágil se os seus números de fragilidade são iguais [3, 6]. β_H é definido como:

$$\beta_H = \frac{D}{l_{ch}}, \quad \text{onde } l_{ch} = \frac{E_c G_F}{f_t^2} \quad (1)$$

onde D é a altura da viga e l_{ch} é o comprimento característico de Hillerborg; E_c é o módulo de elasticidade do concreto, G_F a energia de fratura e f_t a resistência à tração. De acordo com esses dados, um micro concreto relativamente frágil foi selecionado com um comprimento característico de 60,4 mm. Uma vez que o comprimento característico de um concreto convencional é de 150 milímetros em média, a viga de laboratório com altura de 150 mm é esperado simular o comportamento de uma viga de concreto convencional de 350 mm de altura, que é considerado tamanho razoável para o estudo.

A Tabela 1 apresenta as dimensões das vigas retangulares e T escolhidas, o arranjo das barras da armadura e os nomes dos espécimes para este programa experimental.

Tabela 1 – Dimensões das seções transversais das vigas retangulares e T's.

Armadura				
	R3-1	TP3-1	TM3-1	TG3-1
	R3-2	TP3-2	TM3-2	TG3-2

Ensaio padronizados de caracterização e controle foram realizados para determinar a resistência à compressão, a resistência à tração, o módulo de elasticidade e a energia de fratura do micro concreto. Do mesmo modo, os parâmetros mecânicos do aço e as propriedades de aderência entre aço e concreto também foram determinadas em ensaios de laboratório.

3. MATERIAIS E CORPOS DE PROVA

3.1 Micro concreto

Um único micro concreto foi utilizado em todos os experimentos, feito com uma areia com 5 mm de diâmetro máximo que segue a curva de granulométrica correspondente de Fuller, e cimento Portland 52,5 (ASTM tipo 1). As proporções da mistura, em peso foram de 1: 3,0: 0,46 (cimento: agregado: água). O abatimento medido a partir do cone de Abrams apresentou um valor médio de 6,5 cm. Todos os corpos de prova foram executados em moldes de aço, vibrados em mesa vibratória, mantidos por 24 horas em cura selada, desmoldados e armazenados por 5 semanas em uma câmara úmida a 20 °C e 98% de umidade relativa, até data dos ensaios. A Tabela 2 apresenta as características mecânicas e parâmetros do micro concreto determinados em vários ensaios de caracterização e controle.

Tabela 2 – Características do micro concreto.

f_c MPa	f_t MPa	E_C GPa	G_F N/m	l_{ch} mm	β_H
54,6	4,8	25,5	55,6	60,4	2,5

3.2 Ensaios do aço e de aderência

Para as dimensões das vigas selecionadas, e a taxa de aço desejada, não foi possível utilizar barras de aço padrão para armadura de concreto armado, dessa forma foi escolhida uma barra de aço de 1,20 m de comprimento e 3,0 mm de diâmetro nominal, com rosca em toda sua extensão para ser utilizada como armadura das vigas.

A Figura 1a mostra a curva tensão-deformação do aço utilizado para armar as vigas. O módulo de deformação longitudinal é 205 GPa, a tensão de escoamento nominal para uma deformação de 0,2% é 765,0 MPa, e a deformação máxima é 0,6%.

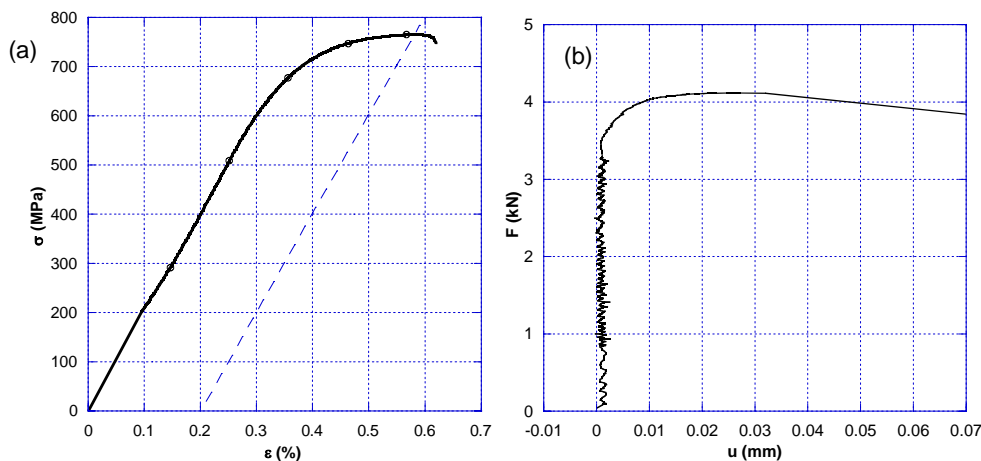


Figura 1 – Diagrama tensão versus deformação do aço e carga versus deslocamento da barra.

Para os ensaios de arrancamento foram adotados corpos de prova de concreto com as dimensões de 50 x 50 x 75 mm com uma barra de armadura incorporada ao longo seu eixo longitudinal. A Figura 1b também mostra a curva de carga versus deslocamento da barra por escorregamento em um ensaio típico de arrancamento. A tensão média de aderência encontrada foi de 6,2 MPa.

3.3 Corpos de prova de controle e caracterização

Oito corpos de provas cilíndricos com 150 mm de comprimento e 75 mm de diâmetro foram executados para determinar as propriedades mecânicas, sendo 4 para ensaios de compressão simples e 4 para compressão diametral.

Foram executadas 4 vigas de concreto simples e posteriormente entalhadas na caracterização das propriedades do concreto à fratura. Todas as vigas executadas tiveram as seguintes dimensões: 50 mm de largura, 75 mm de altura e de 337,5 mm de comprimento. O entalhe foi executado na seção central com uma profundidade da metade da altura total.

3.4 Vigas armadas de micro concreto

A Figura 2 e a Tabela 1 resumem as características geométricas das vigas armadas de micro concreto. Os espécimes foram executados em moldes metálicos onde as barras da armadura eram transpassadas e fixadas nas paredes das formas de modo a garantir sua posição durante a concretagem. As vigas de micro concreto foram compactadas em uma mesa vibratória.

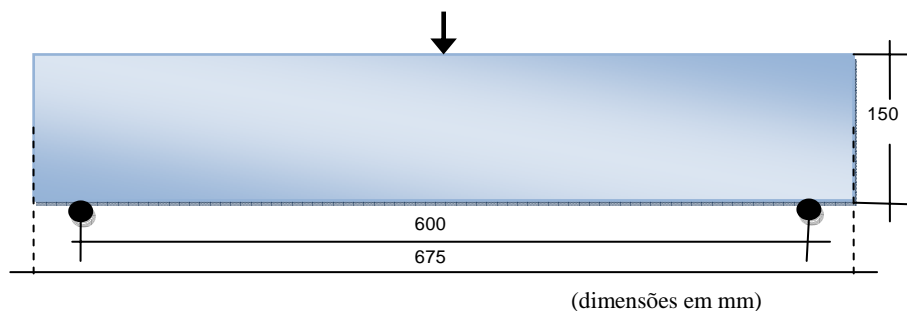


Figura 2 - Vista longitudinal da viga com dimensões e condições de carregamento.

4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

4.1 Ensaios de caracterização e controle

Ensaios de compressão simples foram realizados em 4 corpos de provas cilíndricos de acordo com a ASTM C39 e C469 com exceção da redução no tamanho. A deformação foi medida por strain gage de 50 milímetros de comprimento através da média de dois extensômetros colocados simetricamente. Os ensaios foram executados sob controle deslocamento, a velocidade de 0,3 mm/min.

Ensaios de compressão diametral (Brazilian Test) também foram realizados em 4 espécimes cilíndricos seguindo os procedimentos recomendados pela ASTM C-469. A velocidade de deslocamento do atuador foi de 0,3 mm/min.

Ensaios estáveis de flexão em três pontos nas vigas entalhadas foram realizados para obter as propriedades do concreto na fratura segundo os procedimentos concebidos pela Elices, Guinea e Planas [9]. O vão da viga foi de 300 mm. Os ensaios foram realizados em controle linear de posição com três rampas em diferentes taxas de deslocamento: 5 μ m/min durante os primeiros 18 min, 25 μ m/min durante os seguintes 20 min e 50 μ m/min, até ao final do ensaio. A Figura 3 mostra algumas curvas típicas de carga por deslocamento.

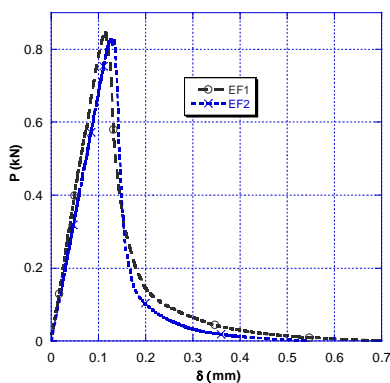


Figura 3 - Curvas de carga versus deslocamento no ponto de aplicação no ensaio de flexão em 3 pontos.

4.2 Ensaios das vigas armadas

As vigas armadas foram ensaiadas na flexão em três pontos. A primeira rampa de carregamento foi executada em controle de carga até esta atingir 5 kN em 5 minutos. Esta rampa de carga ficou localizada inteiramente dentro da resposta linear da viga. De acordo com [6] este tipo de espécimes poderia apresentar retrocesso no deslocamento (snap-back) após o pico de carga. Portanto, a fim de registrar esse fenômeno na curva de carga versus deslocamento ($P-\delta$), o controle da máquina de ensaio foi realizado através de um clip gage, posicionado na face inferior da viga, até os incrementos de deslocamento passarem a ser positivos novamente. A base do clip gage era de 90 mm e a taxa de abertura de 2 $\mu\text{m}/\text{min}$. O controle foi bem sucedido em quase todas as vigas ensaiadas. Lamentavelmente, em uma delas, ou seja, a viga denominada como TG3-1, uma nucleação de fissuras de cisalhamento fora da zona abrangida pelo clip gage fez a máquina de ensaio perder o controle, o que provocou a ruptura imediata da viga. A terceira, quarta e quinta rampas foram realizadas em controle de posição com taxas de 25 $\mu\text{m}/\text{min}$ durante 30 min, 125 $\mu\text{m}/\text{min}$ durante 10 min e 625 $\mu\text{m}/\text{min}$, até ao final do ensaio, respectivamente. A Figura 7 apresenta algumas curvas típicas de carga por deslocamento. Na Figura 4 está apresentada uma fotografia do ensaio da viga TM3-1.



Figura 4 - Detalhe da viga TM3-1 durante o ensaio de flexão em 3 pontos.

5. MODELAGEM NUMÉRICA

Os ensaios de flexão em três pontos foram modelados numericamente no programa comercial ATENA - Advanced Tool for Engineering Nonlinear Analysis [12], adotando-se o estado plano, com a discretização do contínuo em elementos finitos quadriláteros denominados de CCQ10SBeta. As propriedades adotadas para o material SBeta material foram as obtidas nos ensaios de caracterização do micro concreto e estão apresentados na Tabela 2. A armadura foi adotada como sendo discreta com posição semelhante a do experimento e as propriedades adotadas no material Reinforcement foram as encontradas nos ensaios de caracterização do aço e mostrados na Figura 1. A análise não linear foi realizada com cargas incrementais através do método Arc length Solution Parameters. Na Figura 5 está apresentada uma viga modelada na posição deformada em um dado passo de carga.

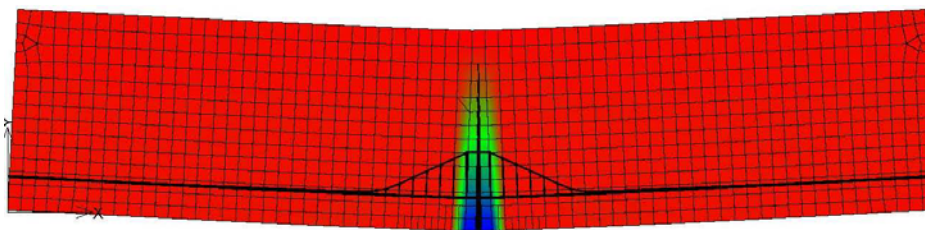


Figura 5 – Detalhe da posição deformada da viga modelada no programa ATENA.

A Figura 6 apresenta os gráficos de carga versus deslocamento do ponto de aplicação da carga obtidos a partir dos ensaios e da modelagem numérica no programa ATENA para as vigas R3-1, TP3-2, TM3-1 e TG3-2 em flexão de três pontos.

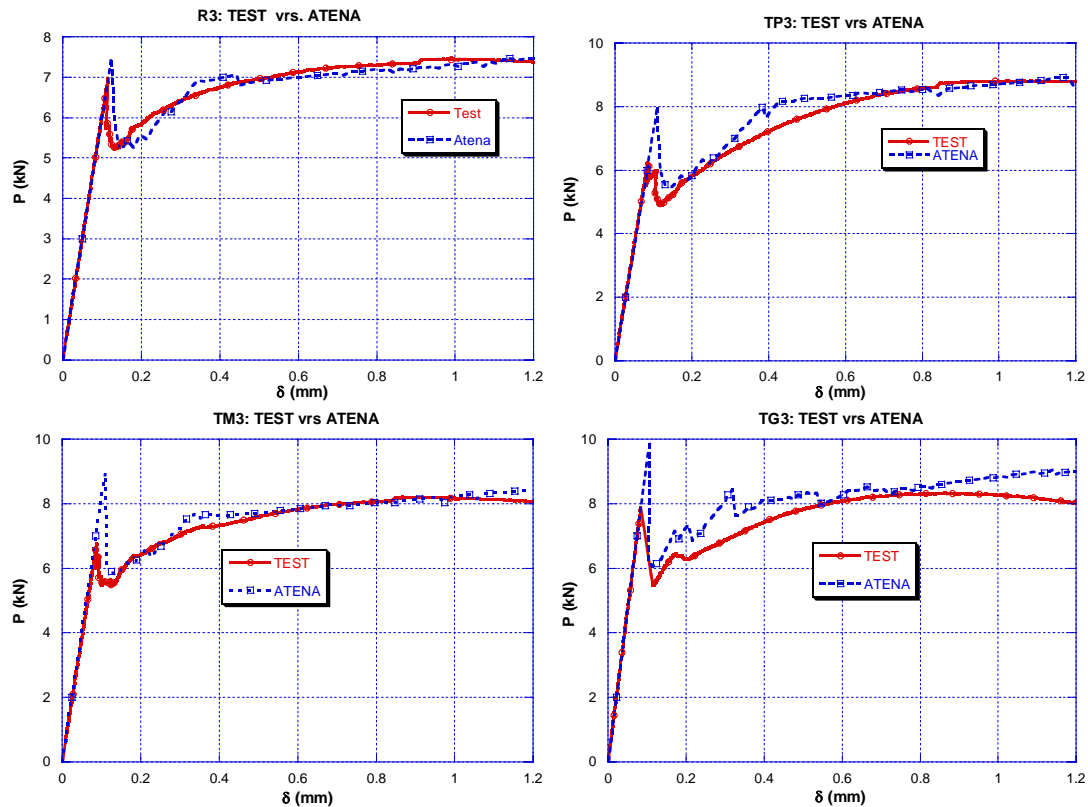


Figura 6 - Curvas de carga versus deslocamento no ponto de aplicação obtidas nos ensaios e através do programa ATENA das vigas R3-1, TP3-2, TM3-1 e TG3-2.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os principais resultados da caracterização do micro-concreto são apresentados na Tabela 2. A Figura 3 mostra que as curvas de carga versus deslocamento no ponto de aplicação da carga nos ensaios de flexão em três pontos, das vigas entalhadas para a determinação das propriedades do concreto na fratura, são estáveis e apresenta uma área muito semelhante entre si, o que demonstra o elevado nível de controle realizado durante os ensaios.

As curvas experimentais (P - δ) para as vigas armadas são mostradas na Figura 7a. Como é sabido, as condições de vinculação no ponto em que o atuador aplica a carga pode gerar pequenas variações na flexibilidade global da viga. Por conseguinte, a fim de facilitar a comparação entre as vigas semelhantes, a inclinação inicial da curva é corrigida para o seu valor teórico decorrente da Resistência dos Materiais.

As Figuras 7b e 8c mostram que após o pico o deslocamento apresenta um retrocesso (snap-back), enquanto a viga perde resistência, exceto para a viga TG3-2. A transferência de carga entre o concreto e a armadura permite que a viga recupere resistência e gera um trecho em forma de U, no gráfico (P - δ).

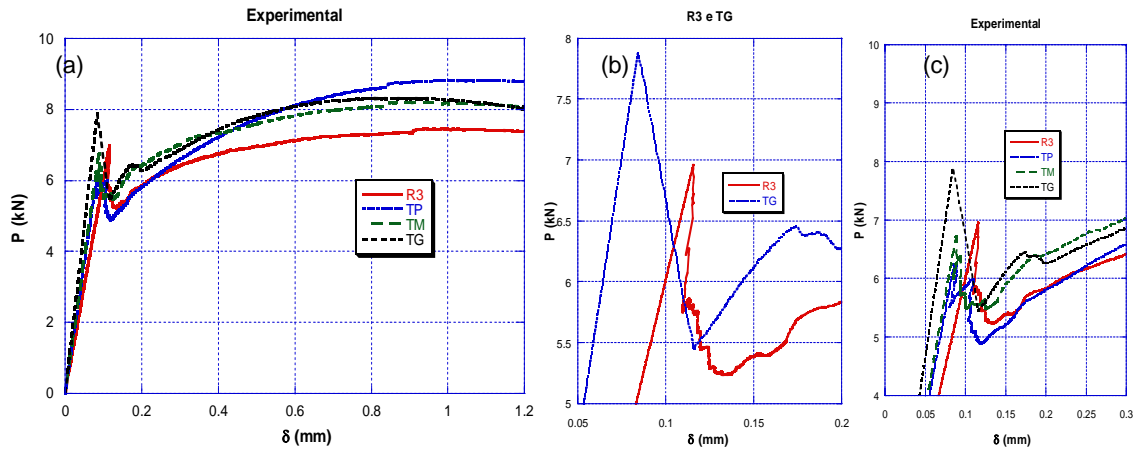


Figura 7- Curvas experimentais de carga versus deslocamento no ponto de aplicação das vigas TG3-2, TM3-1, TP3-2 e R3-1; e detalhe do primeiro pico de carga.

A Figura 7c também mostra uma ampliação do trecho pós pico para as vigas. Ele captura alguns picos que correspondem à passagem da fissura pela camada da barras de armadura. Logo após então, a viga enrijece e a carga cresce novamente. Na rampa ascendente é possível identificar um leve pico na curva que corresponde ao início da propagação da fissura através da mesa da viga T (Figuras 7a e 7c). Como as vigas são suficientemente armadas, a carga final é superior ao do primeiro pico que corresponde à carga de início de fissuração.

Nos gráficos da Figura 6 pode-se observar a boa aderência entre os resultados numéricos e os experimentais, indicando que as propriedades mecânicas encontradas nos ensaios de caracterização para os materiais foram de boa qualidade e de fundamental importância para a modelagem.

Na Figura 8a estão apresentados os resultados obtidos da modelagem numérica do ensaio de flexão em três pontos para as vigas R3-1, TP3-2, TM3-1 e TG3-2, no qual se pode observar um comportamento similar entre as 4 vigas. A Figura 8b mostra um detalhe da passagem pelo pico de carga, onde se observa que numericamente não foi conseguido obter o retrocesso (*snap-back*) do deslocamento no pós pico como o encontrado experimentalmente.

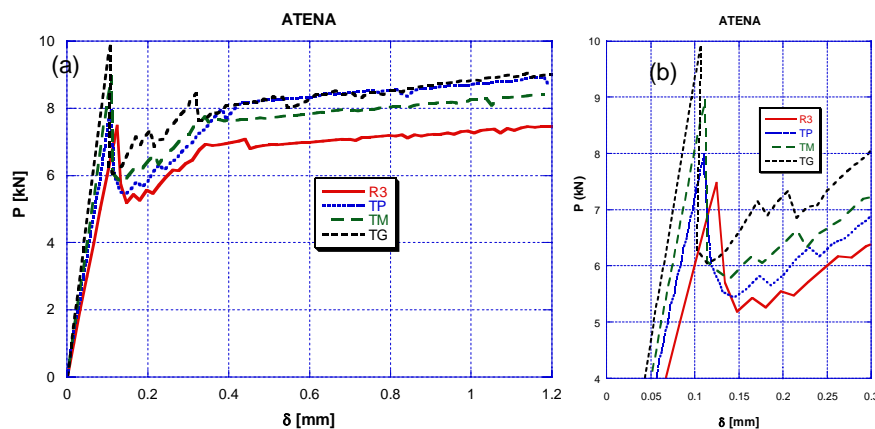


Figura 8 - Curvas numéricas de carga versus deslocamento no ponto de aplicação das vigas TG3-2, TM3-1, TP3-2 e R3-1; e detalhe do primeiro pico de carga.

Considerações adicionais sobre o papel da forma da seção transversal na resistência de vigas de seção T podem ser inferidas a partir de Figura 9, onde D_{eq} é a altura equivalente de uma viga de seção T, a qual pode é definida como a altura de uma viga retangular que resistiria a mesma carga máxima da viga de seção T, de acordo com a Resistência dos Materiais, com a hipótese do concreto não resistir à

tração; l_{ch} é o comprimento característico definido na equação (1). O eixo y corresponde à razão P_{max}/P_{nt} , onde P_{max} é a carga máxima obtida no ensaio das vigas T ou numericamente através do programa ATENA; P_{nt} é a carga máxima para a mesma viga T obtida de acordo com a Resistência dos Materiais com a hipótese do concreto não resistir à tração.

Na Figura 9a, os pontos representam os valores experimentais e numéricos para P_{max}/P_{nt} . A curva da figura reflete a variação da carga máxima (expressa pela razão adimensional P_{max}/P_{nt}) versus crescimento da largura da mesa da viga T (esse crescimento da mesa é representado pela altura adimensional equivalente D_{eq}/l_{ch}). O efeito da forma da seção transversal é claro e muito semelhante ao que se obtém quando é o tamanho que aumenta: a razão P_{max}/P_{nt} diminui e tende no limite a 1 quando a largura da mesa vai para o infinito. Os valores experimentais indicam que há um ligeiro decréscimo nas cargas adimensionais, mais acentuado que os numéricos devido a fissuras de cortante verificadas no ensaio, evidenciando assim a existência do efeito de forma, ou seja, o aumento da carga máxima com o aumento da largura da mesa das vigas T's é inferior ao previsto pela mecânica tradicional.

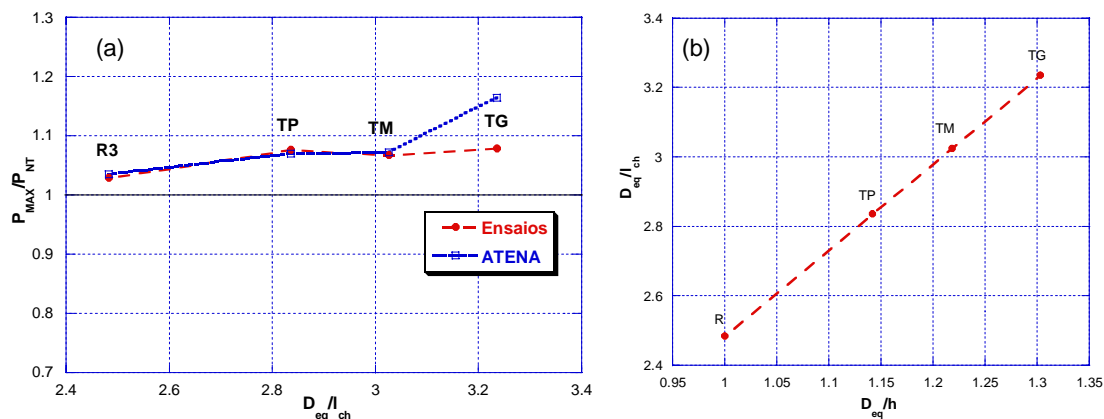


Figura 9 - Efeito da largura da mesa.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta recentes resultados experimentais em vigas de seção T executadas com um micro concreto nas quais a largura da mesa variou desde a largura da alma (seção retangular) até a largura igual à altura da viga. Todas as vigas foram executadas a partir dos mesmos materiais de micro concreto e barras de aço cujas propriedades permaneceram constantes para todos os espécimes do programa. Todas as vigas tinham o mesmo número de barras e foram dispostas da mesma forma. Os ensaios foram realizados de modo que o processo de fratura foi estável através do controle da deformação na superfície inferior da viga no trecho do pós pico até a carga voltar a crescer. As seguintes conclusões podem ser tiradas a partir desse estudo:

- A curva de carga versus deslocamento mostra que existe certa hiper-resistência imputável à propagação da fissura através da mesa da viga T.
- A carga de pico aumenta para as vigas T's quando a largura da mesa cresce e é inferior ao esperado de acordo com hipóteses tradicionalmente aceitas, com o que esse estudo experimental evidencia a existência de um efeito de forma.
- Com os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais obteve-se uma boa aderência entre os resultados numéricos e aos experimentais, indicando a importância da realização criteriosa desses ensaios para a modelagem numérica.

8. AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho foi viabilizado pela Bolsa de Pós-Doutorado no Exterior (Processo BEX2453/07-0), no âmbito do Convênio de Cooperação Internacional CAPES/ MECD (Brasil/Espanha) (Projeto 152/07) e pela participação no projeto temático Processo No. 2004/03049-1 financiado pela FAPESP.

9. REFERÊNCIAS

- [1] BOSCO C., CARPINTERI A., DEBERNARDI P.G., Fracture of reinforced concrete: Scale effect and snap-back instability, *Engineering Fracture Mechanics*, v.35 (n. 4-5) p. 228-236, 1990.
- [2] CARPINTERI A., ED., Minimum Reinforcement in Concrete Members (Number 24 in ESIS Publications. Elsevier, London), 1999.
- [3] RUIZ G., ELICES M., PLANAS J., Experimental study of fracture of lightly reinforced concrete beams, *Materials and Structures*, v. 31, p. 683-691, 1998.
- [4] Ruiz G., Influencia del tamaño y de la adherencia en la armadura mínima de vigas en flexión, (GHEO-IECA, Madrid), 1998.
- [5] RUIZ G., Propagation of a cohesive crack crossing a reinforcement layer, *International Journal of Fracture*, v. 111, p. 265-282, 2001.
- [6] RUIZ G., CARMONA R. J., Experimental study on the influence of the shape of the cross-section and the rebar arrangement on the fracture of LRC beams, *Materials and Structures*, v. 39, p.343-352, 2006.
- [7] OZEBE G., ERSOY U., TAKUT T., Minimum flexural reinforcement for T-beams made of high strength, *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 25, n.(5), 1999.
- [8] RUIZ G., CARMONA JR., CENDÓN D.A., Propagation of a cohesive crack through adherent reinforcement layers, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 195, p. 7237 – 7248, 2006.
- [9] ELICES M., GUINEA G. V., PLANAS J., Measurement of the fracture energy using three-point bend tests. 1 Influence of experimental procedures, *Materials and Structures*, v. 25, p. 121-218, 1992.
- [10] CARMONA, J. R. Study of cracking processes in reinforced concrete elements, Doctoral Thesis, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos - Universidad de Castilla-La Mancha, Ciudad Real, 2006.
- [11] HILLERBORG, A., MODEER, M., AND PETERSSON, P-E., Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cement and Concrete Research*, v. 6, p. 773-782, 1976.
- [12] CERVENKA, V., JENDELE, L., CERVENKA, J., ATENA Program Documentation - Part 1 - Theory, Cervenka Consulting, Prague, Czech Republic, 2007.