

Ductilidade e modos de rotura de vigas pré-esforçadas com FRP



Miguel Morais¹

RESUMO

Os materiais compósitos (FRP) têm um comportamento elástico linear até à rotura. Quando utilizados como armadura, em peças de betão, torna-se necessário definir com clareza o que é a ductilidade. De forma a dimensionar uma estrutura segura deve-se garantir a capacidade de rotação necessária, para que seja válida a utilização da análise plástica. Em regiões sísmicas a estrutura deve ainda ser capaz de dissipar energia. Próximo da rotura a estrutura deve avisar do colapso incipiente, devendo ter pouca energia elástica armazenada para evitar um colapso explosivo. Neste artigo são apresentadas formas de obter estruturas dúcteis com FRP. É possível obter estruturas com capacidade de rotação mas que não são capazes de dissipar muita energia. O modo de rotura das vigas é também importante, a rotura dos varões em FRP ou do betão confinado é bastante explosiva e portanto de evitar.

Os resultados do ensaio experimental de nove vigas pré-esforçadas com varões de aço e FRP são apresentados. Três tipos de betão foram utilizados: betão de resistência normal, betão confinado com espiral em AFRP (FRP com fibras Aramidas) e betão reforçado com fibras de aço. Algumas vigas foram dimensionadas para ter uma rotura pela armadura e outras pelo betão. Quando a rotura se dá pelo esmagamento do betão, utilizando espirais para seu confinamento é possível uma deformabilidade e dissipação de energia bastante elevadas, a rotura é no entanto explosiva devido á rotura da espiral de confinamento. A utilização de fibras de aço no betão permite aumentar a plasticidade do betão e consequentemente da viga sendo, no entanto, necessário ter cuidado com o alinhamento das fibras. Na rotura pela armadura não existe qualquer resistência residual, tendo esta no entanto uma elevada capacidade de deformação.

PALAVRAS-CHAVE

Ductilidade, FRP, pré-esforço, rotura, dissipação de energia, capacidade de rotação

¹ Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, 3810-193 Aveiro, Portugal. miguelmorais@ua.pt

1. INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos (FRP) têm um comportamento elástico linear até à rotura, sem o típico patamar de plasticidade do aço. O comportamento das vigas em betão pré-esforçadas com materiais compósitos é portanto elástico não linear até à rotura. Este comportamento tem motivado alguma preocupação em saber se estas estruturas são dúcteis.

Muita da investigação nesta área tem-se ocupado em encontrar formas de quantificar a ductilidade equivalentes às existentes para o aço. No entanto é importante definir o que é ductilidade e quais os requisitos de uma estrutura para que se comporte de forma dúctil.

No dimensionamento de estruturas, os engenheiros devem-se preocupar com duas fases:

- (a) Garantir que o modelo de cálculo é seguro.
- (b) Garantir que a estrutura dá sinal de colapso e não deve colapsar de forma explosiva ou catastrófica.

O primeiro requisito significa que a estrutura deve ter capacidade de rotação para que sejam válidos os teoremas da plasticidade. Em zonas sísmicas deve ainda ter capacidade de dissipar energia. O segundo requisito significa que no colapso a estrutura deve ter um patamar com um ligeiro aumento da capacidade de carga e que apenas uma pequena quantidade de energia elástica deve ser libertada na rotura.

Por forma a melhorar a ductilidade de vigas pré-esforçadas com FRP foram sugeridas as seguintes hipóteses:

- (a) A utilização de FRP parcialmente aderente ao betão;
- (b) A utilização de FRP híbridos (com vários tipos de fibras) com um comportamento bilinear;
- (c) A utilização de armadura de compressão;
- (d) A colocação de varões em várias fiadas que resulta num colapso progressivo;
- (e) O incremento da capacidade plástica do betão.

Este artigo explora este último ponto e aborda como o aumento da capacidade de extensão do betão pode ser utilizado e como influencia o comportamento da viga.

2. ENSAIO EXPERIMENTAL

O programa experimental consistiu no ensaio de vigas à flexão. Foram ensaiadas vigas simplesmente apoiadas carregadas aos terços (Figura 1).

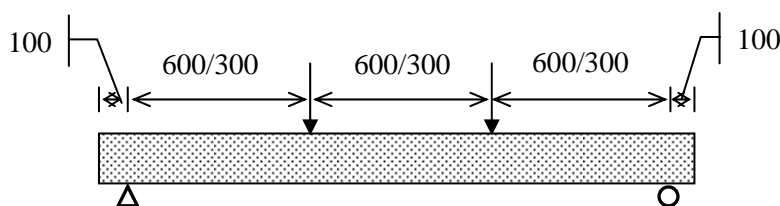


Figura 1. Carregamento da viga (valores em mm)

Estas vigas foram ensaiadas de modo a estudar como a ductilidade e localização são influenciadas por distintas propriedades do betão e armadura, por colapsos com e sem plastificação/rotura das armaduras e por diferentes tamanhos das vigas. Alterando a percentagem de armadura é possível obter colapsos com e sem plastificação/rotura das armaduras.

Foram ensaiadas vigas de dois tamanhos. As propriedades das vigas estão descritas na Quadro 1. f_{cu} é a resistência média dos cubos no dia do ensaio. A Fig. 2 representa a secção transversal das vigas:

Quadro 1. Propriedades das vigas ensaiadas

Nome da viga	b (mm)	h (mm)	A_s (mm ²)	Força de Pré- esforço (kN)	f_{cu} (MPa)
Oc-St-UR-L	106	200	58.9	68.3	57.0
Oc-St-UR-S	63	128	19.6	22.3	50.9
Oc-St-OR-L	106	200	137.4	155.5	52.4
Oc-St-OR-S	63	128	39.3	47.9	50.9
Oc-Ar-UR-L	106	200	25.2	41.1	56.7
Oc-Ar-OR-L	106	200	120.7	105.7	48.5
Cc-Ar-OR-L	106	200	120.7	107.7	51.7
FRc-Ar-OR-L	106	200	120.7	106.3	49.3

b – Largura da viga

h – Altura da Viga

A_s – Área dos cabos de pré-esforço

Nota: Cada viga é identificada por uma série de letras. A primeira indica o tipo de betão, a segunda representa o material dos cabos de pré-esforço, a terceira identifica o tipo de rotura o último corresponde ao tamanho da viga; conforme a legenda:

Oc – betão normal	Cc – betão confinado	FRc – betão com fibras
St – cabos de Aço	Ar – cabos de AFRP	
UR – rotura com plastificação/rotura da armadura	OR – rotura sem plastificação/rotura da armadura	
S – viga pequena	L – viga grande	

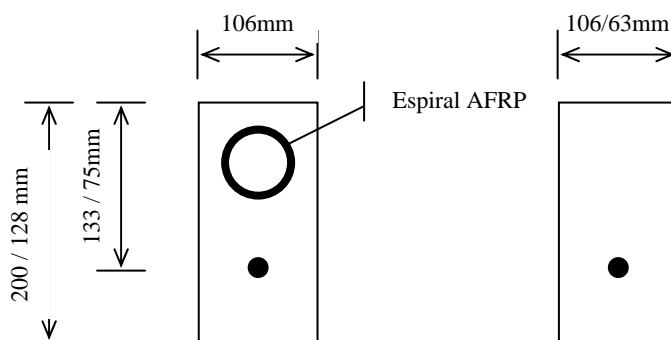


Figura 2. Secção transversal das vigas ensaiadas

Os varões utilizados para pré-esforço eram de dois materiais: aço e FRP com fibras Aramidas (AFRP). Foram utilizados dois tipos de varões de aço. Para as vigas pequenas e para a viga grande com plastificação da armadura utilizaram-se fios pré-esforço de 5mm. Na viga grande com colapso sem plastificação da armadura foi utilizado um cabo de 7 fios de 15mm (Quadro 2). Para os cabos de AFRP foram utilizados varões de dois diâmetros: 4mm e 14mm.

De modo a tensionar os cabos de AFRP, estes foram ligados a um varão de aço roscado através de um conector. Os cabos de AFRP foram colocados dentro de um tubo de aço que depois foi cheio com uma argamassa de cimento expansível. O interior do tubo foi roscado de um dos lados e ligado a um varão roscado. Esta técnica foi utilizada para tensionar varões de FRP por Harada [1] e Less [2],[3].

Quadro 2. Propriedades dos cabos de pré-esforço

Material	E_t (MPa)	ϕ (mm)	A_s (mm ²)	P_{ult} (kN)
Fio de Aço	200,000	5	19.6	34.4
Cordão de Aço		15	137.4	245.0
AFRP	54,000	4	12.6	22.7
		14	122.7	227.0

E_t	- Módulo de Elasticidade
ϕ	- Diâmetro do cabo
P_{ult}	- Carga Máxima de rotura do cabo

A composição do betão foi definida para que fosse possível aplicar a carga de pré-esforço ao fim de 3 dias e para uma resistência média de cubos de 50 MPa aos 5 dias, dia do ensaio.

Para confinar o betão foram utilizadas espirais em AFRP desenvolvidas por Leung[4]. Estas espirais são feitas de fibras aramidadas embebidas numa resina epoxy. Foram utilizadas espirais com um diâmetro de 80mm e um espaçamento de 20mm.

Para o betão reforçado com fibras (FRC) foi utilizada uma percentagem de fibras de 0,5% por volume. As fibras usadas eram em aço com extremidades dobradas com um comprimento de 30mm e diâmetro de 0,50mm. Com esta percentagem de fibras era esperado um comportamento semelhante ao betão confinado.

As vigas foram dimensionadas para evitar a rotura por esforço transversal. As vigas em que não há a rotura da armadura em AFRP tinham uma elevada capacidade de carga em flexão sendo possível ocorrer rotura por esforço transversal. Assim, estas vigas foram armadas com estribos. Foram utilizados estribos fechados de 8mm espaçados de 150 mm. Não foram colocados estribos na zona de momento constante de modo a não confinar o betão nessa zona.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Durante os ensaios a carga foi aplicada com um macaco hidráulico, a carga foi medida por uma célula de carga e os deslocamentos foram medidos com transdutores.

3.1 Gráficos carga/deslocamento

Os gráficos carga/deslocamento para as vigas pré-esforçadas com aço estão representadas na Fig. 3. Na Fig. 4 estão representadas as curvas carga/deslocamento para as vigas pré-esforçadas com AFRP e também da viga pré-esforçada com aço em que a armadura plastifica, por ser considerado o comportamento ideal.

Todas as vigas pré-esforçadas com FRP tiveram um comportamento semelhante até à rotura, correspondente a um comportamento elástico linear até à fendilhação seguido de um comportamento elástico linear até à rotura com menor rigidez. As vigas sem rotura da armadura tiveram uma rigidez fissurada superior devido à maior área de armadura. As vigas de AFRP tiveram uma menor rigidez fissurada que as de aço devido ao menor módulo de elasticidade do AFRP.

As vigas com armadura em aço em que houve plastificação das armaduras, após o comportamento elástico linear fissurado exibiram um patamar, devido à plastificação das armaduras. A viga correspondente em AFRP não apresentou este patamar, uma vez que o material tem um comportamento elástico linear até à rotura, a armadura rompeu levando ao colapso da estrutura.

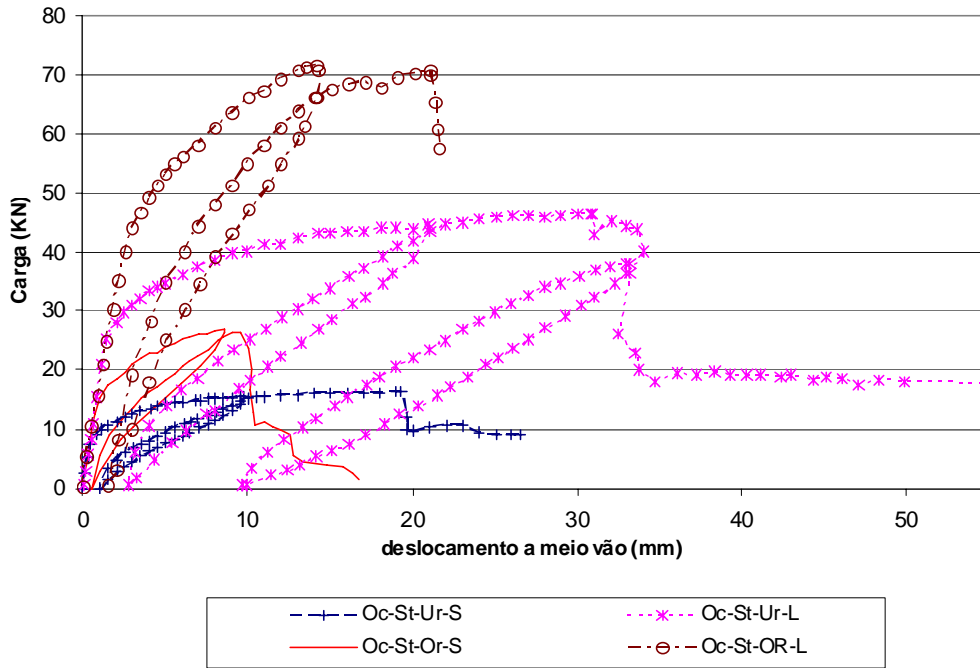


Figura 3. Carga-Deslocamento para as vigas pré-esforçadas com Aço

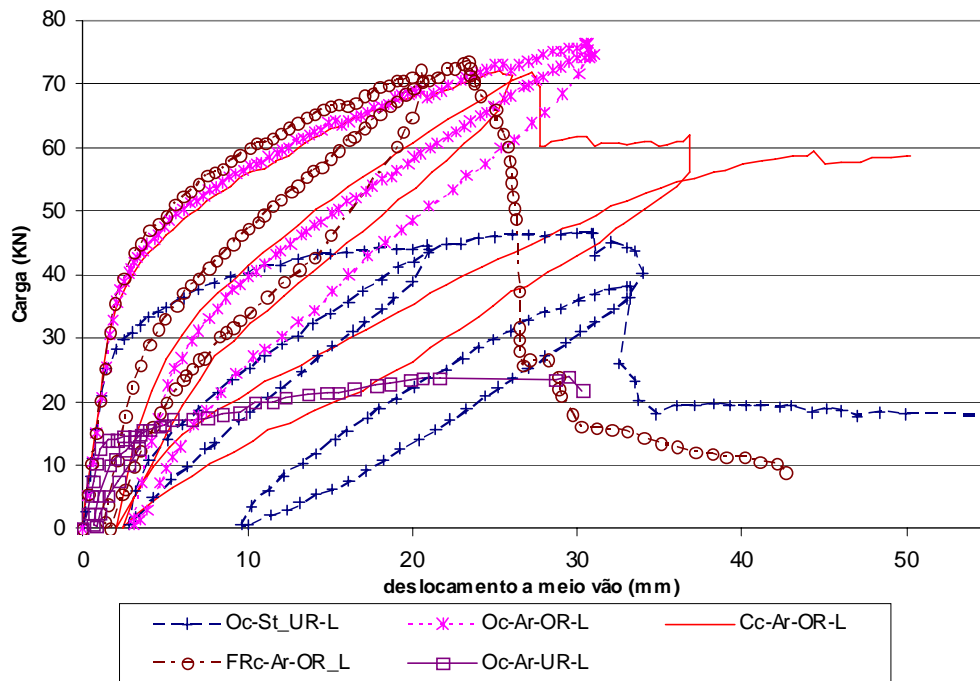


Figura 4. Carga-Deslocamento para as vigas pré-esforçadas com AFRP e Aço

Excepto na viga em FRP com pouca armadura (com rotura da armadura) e da viga com betão confinado, o colapso final deu-se por esmagamento do betão. Na viga com betão confinado o colapso foi explosivo resultado da rotura da espiral de confinamento. Esta rotura foi precedida por uma redução da capacidade de carga resultante do destacamento do betão exterior à espiral.

A utilização de betão reforçado com fibras não alterou em muito o comportamento até à carga máxima. No entanto, a rotura foi bastante suave por esmagamento do betão, que permitiu monitorizar a curva descendente da curva carga-deslocamento, pós-pico.

3.2 Fissuração

As principais fissuras foram de flexão e estavam regularmente distribuídas ao longo da viga. Apenas na viga grande, pré-esforçada com aço, em que não houve plastificação da armadura, o colapso resultou de uma viga de esforço transversal - flexão.

Na viga com betão reforçado com fibras houve mais fissuras mais próximas. O número de fissuras e o seu espaçamento médio na zona de momento constante está representado no Quadro 3.

Quadro 3. Fissuração

<i>Nome da Viga</i>	<i>Número de fissuras na zona de momento constante</i>	<i>Espaçamento médio entre fissuras (mm)</i>	<i>Espaçamento máximo entre fissuras (mm)</i>
<i>Oc-St-UR-L</i>	3	188	213
<i>Oc-St-UR-S</i>	2	115	115
<i>Oc-St-OR-L</i>	4	218	231
<i>Oc-St-OR-S</i>	2	149	149
<i>Oc-Ar-UR-L</i>	3	257	276
<i>Oc-Ar-OR-L</i>	4	228	248
<i>Cc-Ar-OR-L</i>	4	192	203
<i>FRc-Ar-OR-L</i>	5	138	147

3.3 Ductilidade

Para quantificar a ductilidade foram utilizados dois índices. O primeiro proposto por Mufti[5] está relacionado com a capacidade de rotação da viga. Este factor tem em consideração o acréscimo de momento e de curvatura ou deformação, por forma a ter em conta que o acréscimo de curvatura é mais benéfico se for acompanhado por um aumento de capacidade. Os autores consideraram que a viga está em regime elástico se o betão tiver uma extensão de compressão inferior a 0.001. Este J-factor pode ser quantificado pela expressão:

$$J - factor = \frac{P_{ult}}{P_{0.001}} \times \frac{\delta_{ult}}{\delta_{0.001}} \quad (1)$$

Em que:

- P_{ult} – Máxima capacidade de carga;
- $P_{0.001}$ – Carga correspondente a uma extensão de compressão no betão de 0.001;
- δ_{ult} – Deslocamento a meio vão para a carga máxima;
- $\delta_{0.001}$ – Deslocamento a meio vão correspondente a uma extensão de comp. betão de 0.001;

O segundo índice utilizado foi proposto por Naaman and Jeong [6] e considera as energias elástica e dissipada. Os autores defenderam que uma deformação grande antes da rotura não correspondia necessariamente a uma boa ductilidade uma vez que a rotura final pode ser bastante explosiva. Propuseram assim a seguinte expressão para medir a ductilidade:

$$\xi = \frac{1}{2} \left(\frac{E_{tot}}{E_{elastic}} + 1 \right) \quad (2)$$

Em que:

- E_{tot} – Energia total armazenada na viga;
- $E_{elastics}$ – Energia elástica armazenada na viga;

No Quadro 4 estão representados os valores destes dois índices para as vigas ensaiadas.

Quadro 4. Índices de ductilidade e modo de rotura para as vigas ensaiada

Nome da Viga	$P_{0.0001}$	$\delta_{0.001}$	P_{ult}	δ_{ult}	J-factor	ξ	Rotura
Oc-St-UR-L	23.6	1.3	46.4	30.9	46.7	2.15	Cedência das armaduras/ Esmagamento do betão
Oc-St-UR-S	8.5	0.5	16.2	19.4	73.9	2.39	Cedência das armaduras/ Esmagamento do betão
Oc-St-OR-L	38.4	2.4	70.0	21.3	16.2	1.38	Esforço Transverso
Oc-St-OR-S	12.7	0.7	26.3	9.5	28.1	1.32	Esmagamento do betão
Oc-Ar-UR-L	13.5	1.2	23.9	29.5	43.5	1.49	Cabo de pré-esforço
Oc-Ar-OR-L	35.3	2.1	76.4	30.6	31.5	1.33	Esmagamento do betão
Cc-Ar-OR-L	34.0	1.8	58.7	50.3	48.2	1.66	Espiral de confinamentol
FRC-Ar-OR-L	36.6	2.1	73.5	23.4	23.4	1.34	Esmagamento do betão

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

As vigas pré-esforçadas com AFRP tiveram rácios de dissipação de energia, ξ , inferiores aos das vigas pré-esforçadas com Aço. Das vigas com AFRP, a viga com betão confinado com uma espiral teve um maior índice de dissipação de energia e um maior J-factor; corresponde no entanto à viga com uma rotura mais explosiva. Assim, o índice de dissipação de energia, ξ , não permitiu medir o quão explosiva é a rotura.

As vigas sem plastificação/rotura das armaduras apresentaram todas aproximadamente o mesmo índice de dissipação de energia, tiveram no entanto valores bastante distintos do índice J-factor e portanto de capacidade de rotação (Fig. 5). É possível concluir que o índice de dissipação de energia não permite medir a capacidade de rotação das vigas.

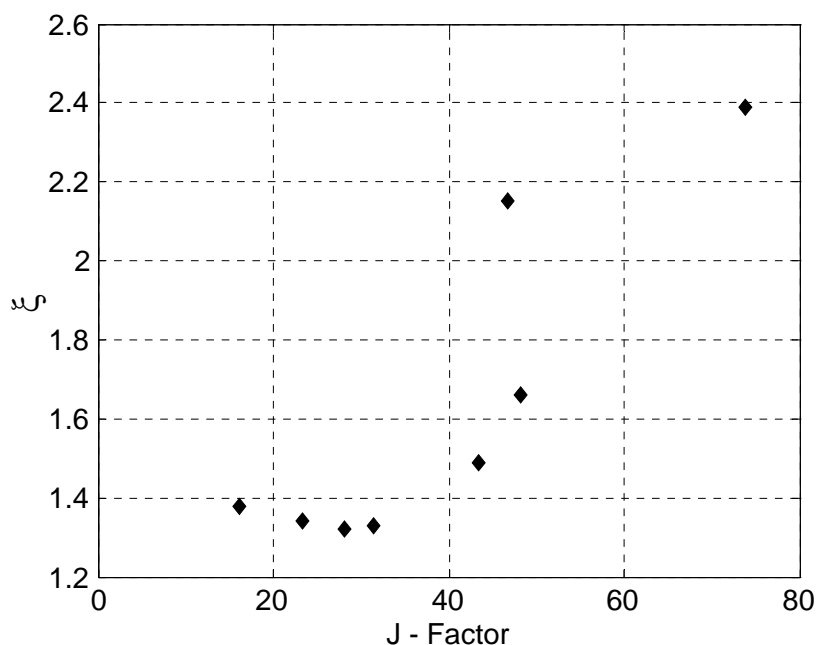


Figura 5. Dissipação de Energia Vs. J-factor

Nas vigas ensaiadas, as vigas pequenas tiveram uma maior capacidade de rotação que as vigas maiores.

Das vigas sem plastificação/rotura das armaduras, as pré-esforçadas com AFRP tiveram uma capacidade de rotação/redistribuição maior que as vigas pré-esforçadas com Aço.

A viga pré-esforçada com AFRP em que houve rotura da armadura e a viga com betão confinado tiveram um valor do índice J-factor semelhante ao da viga pré-esforçada com Aço em que houve plastificação da armadura.

5. CONCLUSÕES

Deste estudo podem ser retiradas as seguintes conclusões:

- (a) A rotura das vigas pré-esforçadas com AFRP em que há rotura da armadura é repentina mas com uma elevada capacidade de deformação;
- (b) A utilização de confinamento na zona de compressão de vigas pré-esforçadas com AFRP resulta num comportamento mais dúctil mas a rotura final é explosiva;
- (c) A dissipação de energia é um requisito para as estruturas apenas em regiões sísmicas. Não pode no entanto ser directamente relacionada com a capacidade de rotação/redistribuição nem com o quão explosivo é o colapso.

AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de agradecer à Fundação da Ciência e Tecnologia pela bolsa de doutoramento que permitiu a realização deste trabalho

REFERÊNCIAS

- [1] Harada, T., Idemitsu, T., Watanabe, A., Khim, M. And Soeda, K., “New FRP tendon anchorage system using highly expansive material for anchoring”, *Modern Prestressing Techniques and Their Applications, Proceedings Volume II, FIP '93 Symposium*, Japan Prestressed Concrete Engineering Association, 1993, pp.711-718
- [2] Lees, J. M., Gruffydd-Jones, B. and Burgoyne, C. J., “Expansive cement couplers – A means of pre-tensioning fibre-reinforced plastic tendons”, *Construction and Building Materials* V. 9, N°6, 1995, pp. 413-423.
- [3] Lees, J. M., “Flexure of Concrete Beams Pre-Tensioned With Aramid FRPs”, PhD thesis, Department of Engineering, University of Cambridge, UK, 1995, 279 pp.
- [4] Leung, H. Y., “Aramid Fibre Spirals to Confine Concrete in the Compression Zone”, PhD thesis, Department of Engineering, University of Cambridge, UK, 2000, 200 pp.
- [5] Mufti, A. A., Newhook, J. P. and Tadros, G., “Deformability versus ductility in concrete beams with FRP reinforcement”, *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures – 2nd International Conference*, The Canadian Society of Civil Engineering, 1996, pp. 189-199
- [6] Naaman, A. E. and Jeong, S. M., “Structural ductility of concrete beams prestressed with FRP tendons”, *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures – Proceedings of the Second*