

Reforço de Pilares de Betão por Confinamento Híbrido de FRP



Sérgio Henriques

Aluno MSc
IST/UL
Lisboa
sergio.henriques@ist.utl.pt



Fernando G. Branco*

Professor Auxiliar
INESC-Coimbra,
U. Coimbra / U. Lúrio
Coimbra / Pemba
fjbranco@dec.uc.pt



Eduardo Júlio

Professor Catedrático
ICIST, IST/UL
Lisboa
eduardo.julio@tecnico.ulisboa.pt

SUMÁRIO

A reabilitação de edifícios e pontes requer com frequência o reforço de elementos estruturais. No caso dos pilares, algumas das técnicas existentes incluem o aumento do seu confinamento através de betão, aço ou polímeros reforçados com fibras (FRPs). A utilização de FRPs como técnica de reforço apresenta diversas vantagens, tais como: o aumento negligenciável da espessura e do peso dos elementos estruturais originais, a facilidade de aplicação do reforço, e a elevada resistência e durabilidade destes materiais compósitos. A eficiência desta técnica depende da geometria do elemento a reforçar, sendo ainda fortemente dependente do tipo de fibra de reforço - essencialmente carbono (C), aramida (A), e vidro (G) - as quais apresentam propriedades materiais e custos muito distintos.

O principal objectivo do estudo aqui apresentado consistiu em otimizar a eficiência da técnica de reforço de pilares circulares através de confinamento exterior com soluções híbridas de FRP, i.e. combinando diferentes tipos de fibras. Os resultados obtidos permitiram identificar as soluções de confinamento mais eficientes, entendidas como aquelas que maximizam a relação custo/benefício.

Palavras-chave: FRP, encamisamento, betão, reforço, sistemas híbridos.

1. INTRODUÇÃO

As estruturas apresentam um período de vida útil limitado, correspondendo a 50 anos no caso de estruturas correntes. Depois de ultrapassado este período de tempo, estas deverão ser avaliadas e sujeitas a intervenções de reparação ou reforço caso se considere necessário. Por outro lado, mesmo no decurso da sua vida útil, as estruturas necessitam frequentemente de intervenções, motivadas por necessidade de adaptação a novas utilizações. Deste modo, a reparação e o reforço de estruturas apresenta cada vez mais um papel importante na Engenharia Civil.

Existe um número considerável de soluções técnicas a que se pode recorrer para a execução de operações de reforço estrutural. No caso de pilares em betão armado, algumas das técnicas existentes incluem o seu encamisamento através de betão, aço ou polímeros reforçados com fibras (FRPs). O encamisamento de pilares de betão com FRP contribui para um aumento do confinamento, tendo como consequências um aumento da sua resistência mecânica. Neste tipo de aplicação, utilizam-se mantas, tecidos ou tubos prefabricados. Os tecidos e as mantas, caracterizam-se por possuírem elevada flexibilidade no momento de aplicação, sendo facilmente adaptáveis à geometria das secções transversais. Os tubos pré-fabricados, além de servirem de armaduras transversais, também podem ser utilizados como cofragens dos pilares [1]. Nos pilares, as mantas de FRP são aplicadas por forma a envolvê-los, estando as fibras orientadas, usualmente, segundo a direcção transversal ao eixo longitudinal do elemento, por forma a aumentar o confinamento. As fibras confinam o betão e aumentam a resistência axial, criando uma distribuição triaxial de tensões no betão. As mantas de FRP também aumentam a resistência ao corte e previnem roturas prematuras, que poderão surgir quando os pilares sofram a acção de forças laterais resultantes, por exemplo, de acção sísmica [2].

As principais vantagens da aplicação dos FRP resultam directamente das propriedades intrínsecas aos próprios FRP, como a elevada resistência à tracção, um peso volúmico muito reduzido, resistência à corrosão e à fadiga, diversidade e versatilidade dos sistemas comercializáveis [3,4]. Esta técnica implica um aumento negligenciável da espessura e do peso dos elementos estruturais originais, a facilidade de aplicação do reforço, e a elevada resistência e durabilidade destes materiais compósitos.

Em contra ponto, os principais inconvenientes apresentados pelos compósitos de FRP são a exigência de mão-de-obra especializada, uma elevada sensibilidade ao fogo [5], a necessidade de protecção contra os raios ultravioletas e o comportamento elástico dos materiais compósitos até à rotura, não apresentando um patamar de cedência como sucede no aço.

A técnica de reforço de pilares de betão armado por encamisamento com materiais compósitos tem vindo a demonstrar ser eficaz quando aplicada em pilares circulares. No entanto, a sua aplicação a pilares rectangulares revela-se pouco eficiente. Algumas tentativas no sentido de melhorar estes resultados, pré-esforçando o encamisamento de

FRP através de injeções de resina de epóxico, revelaram-se pouco práticos com resultados pouco satisfatórios [6]. O monolitismo dos elementos reforçados depende do comportamento estrutural da interface entre o pilar original e o encamisamento adicionado. Trabalhos anteriores incidiram sobre o estudo da influência de parâmetros como a rugosidade do substrato; o tipo de betão adicionado; a utilização de conectores; e a aplicação de colas no comportamento de interfaces betão-betão [7]. A eficiência desta técnica é ainda fortemente dependente do tipo de fibra de reforço - essencialmente carbono (C), aramida (A), e vidro (G) - as quais apresentam propriedades materiais e custos muito distintos.

No presente trabalho, estudou-se o desempenho de pilares de betão armado reforçados por encamisamento de FRP, quantificando a influência de diferentes parâmetros nesse comportamento. Pretendia-se nomeadamente: (1) avaliar experimentalmente o desempenho de pilares reforçados; (2) avaliar a eficácia desta técnica de reforço de pilares de betão armado por encamisamento com diferentes tipos de materiais; (3) quantificar eventuais efeitos sinérgicos pela utilização de sistemas de encamisamento híbridos.

Seleccionaram-se quatro tipos de FRP correntemente utilizados em reforço estrutural de elementos de betão armado: fibra de vidro, aramida, carbono, e carbono de alto módulo. Produziram-se pilares cilíndricos em betão, os quais foram reforçados com três camadas de material de encamisamento, ligadas por resinas. Mantendo o número de camadas constante, efectuaram-se reforços com diferentes combinações dos materiais seleccionados, criando diversas alternativas de reforço híbrido. Os pilares foram sujeitos a ensaios de compressão uniaxial, sendo neste trabalho analisados e comentados os resultados obtidos.

2. DEFINIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

O estudo experimental consistiu na produção de provetes em betão, com uma secção circular de diâmetro 150mm e um comprimento de 600mm. Estes elementos foram reforçados com recurso a quatro tipos de fibras: fibras de carbono (CFRP), fibras de carbono de alto módulo de elasticidade (HM CFRP), fibras de vidro (GFRP) e fibras de aramida (AFRP). O número de camadas de fibras (três) foi mantido constante em cada provete, tendo sido testadas diferentes combinações de fibras. Todos os provetes foram produzidos com betão fornecido por central, apresentando uma resistência média à data dos ensaios de 34,4 MPa.

As propriedades dos FRP encontram-se apresentadas no Quadro 1.

A designação adoptada para identificação os provetes inicia-se com o código "PB", e em seguida a identificação das fibras, indicando a ordem pela qual as várias camadas de fibras foram colocadas, desde a camada interior até à exterior. Às fibras foram atribuídos os

códigos “C₁” (fibra de carbono, S&P C-Sheet 240, 300g/m²); “C₂” (fibra de carbono de alto módulo de elasticidade, S&P C-Sheet 640); “G” (fibra de vidro, S&P G-Sheet AR 90/10 type B) e “A” (fibra de aramida, S&P A-Sheet 120, 290g/m²). Assim, a designação PB.C₁.2A refere-se a um provete reforçado com uma camada de fibra de carbono de baixo módulo e duas camadas exteriores de fibra de aramida. Os provetes de referência, não reforçados, receberam a referência PB.000.

Quadro 1 – Propriedades das fibras fornecidas pelo fabricante.

Propriedades	C ₁	C ₂	A	G
Módulo de Elasticidade [GPa]	240	640	120	65
Tensão de Ruptura [MPa]	3800	2650	2900	3000
Extensão de ruptura [%]	1,55	0,4	2,5	4,3
Espessura [mm]	0,176	0,19	0,2	0,299
Área [mm ² /m]	176	190	200	299

Os provetes foram reforçados, tendo sido aplicadas três camadas de reforço em cada um, criando reforços híbridos (Figura 1a). As combinações dos reforços eram uma das variáveis de ensaio seleccionadas. Os provetes foram sujeitos a ensaios de compressão uniaxial, tendo sido monitorizadas as deformações axiais e tangenciais por eles sofridas (Figura 1b). Para cada situação de ensaio, foram testados dois provetes.

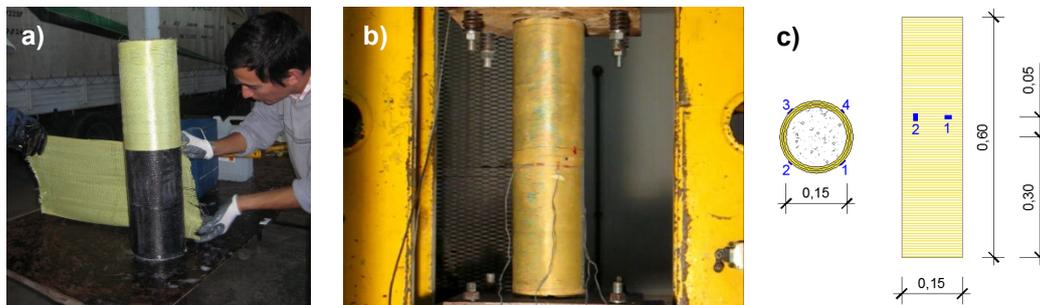


Figura 1 – Exemplo de um provete de ensaio: a) aplicação do reforço; b) provete em ensaio; c) esquema de ensaio.

Os ensaios foram realizados numa prensa *Walter+Bay* com capacidade de carga até 3000 kN. Os dados recolhidos foram registados com o auxílio de um *datalogger* de 8 canais modelo Quantum MX840 (HBM). Os deslocamentos axiais foram obtidos com recurso a dois transdutores de deslocamento vertical do tipo TML CDP-50 e a extensão lateral do encamisamento foi obtida com recurso a extensómetros eléctricos (120Ω) colocados na direcção perpendicular ao eixo longitudinal dos provetes (Figura 1d).

O Quadro 2 resume as condições de ensaio testadas.

Quadro 2 – Configurações dos compósitos de fibras utilizadas no confinamento dos modelos.

Série	Configuração do reforço por compósitos de FRP
PB.000	Provete não reforçado (referência)
PB.3C ₁	Reforço com três camadas de fibra de carbono
PB.3C ₂	Reforço com três camadas de fibra de carbono de alto módulo de elasticidade
PB.C ₁ .2C ₂	Reforço com uma camada de carbono corrente e duas de carbono de alto módulo exteriores
PB.2C ₁ .C ₂	Reforço com duas camadas de carbono corrente e uma de carbono de alto módulo exterior
PB.C ₁ .2A	Reforço com uma camada de carbono corrente e duas de aramida exteriores
PB.2C ₁ .A	Reforço com duas camadas de carbono corrente e uma de aramida exterior
PB.A.C ₁ .A	Reforço com uma camada de carbono corrente entre duas de aramida
PB.2A.C ₁	Reforço com duas camadas de aramida e uma de carbono corrente exterior
PB.3A	Reforço com três camadas de fibras de aramida
PB.2A.G	Reforço com duas camadas de aramida e uma de vidro exterior
PB.A.2G	Reforço com uma camada de aramida e duas de vidro exteriores
PB.3G	Reforço com três camadas de fibras de vidro

3. RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

A Figura 2 ilustra o aspecto na rotura, verificado em duas séries de ensaios; provetes reforçados com fibras de carbono de baixo módulo (Figura 2a) e provetes reforçados com um encamisamento híbrido, constituído por fibras de aramida e carbono de baixo módulo (Figura 2b).

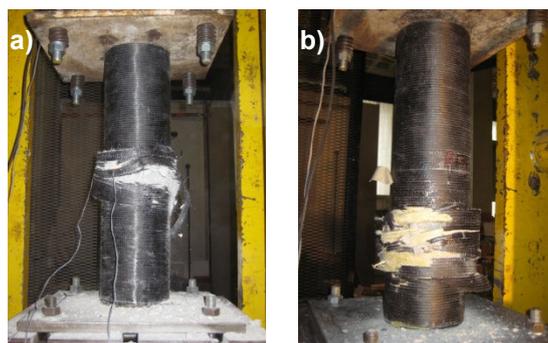


Figura 2 – Aspecto da rotura dos provetes confinados: a) rotura do provete PB.3C₁; b) rotura do provete PB.2A.C₁.

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos para os provetes contendo três camadas do mesmo tipo de reforço. Na Figura 3 é visível também o resultado obtido para o provete de referência.

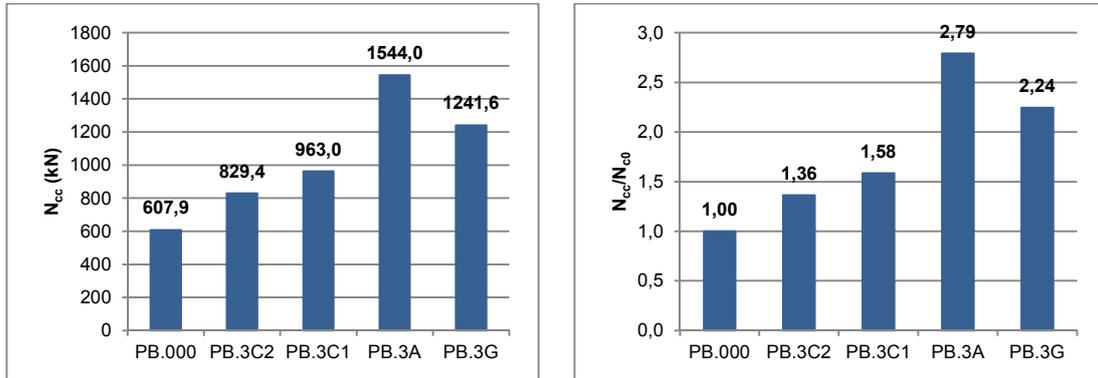


Figura 3 – Resultados experimentais: a) provetes reforçados com três camadas do mesmo tipo de fibra; b) resultados experimentais normalizados em relação ao provete de referência.

Como esperado, todos os provetes reforçados apresentam um aumento de resistência em relação ao provete não reforçado. No entanto, pode observar-se que nem todos os tipos de reforço apresentaram a mesma eficiência. Verifica-se que o reforço com fibras de aramida conduziu ao maior acréscimo de resistência (179%). O reforço com fibras de vidro permitiu uma melhoria de resistência de 124%. Já as fibras de carbono mostraram-se menos eficientes: fibras C_1 (58%) e C_2 (36%). O fraco resultado observado nas fibras de carbono, em especial as fibras de alto módulo de elasticidade, demonstra que nem sempre o material menos deformável se revela mais eficiente na realização de reforços por confinamento. De facto, o módulo de elasticidade elevado das fibras de carbono encontra-se associado a uma menor ductilidade quando comparado com as fibras de vidro ou aramida, e esse parece ser o parâmetro dominante nos resultados obtidos. O provete atinge a rotura sem que tenha sido possível mobilizar toda a capacidade resistente potencial das fibras mais resistentes.

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos em provetes híbridos, já normalizados em relação à resistência do provete não confinado.

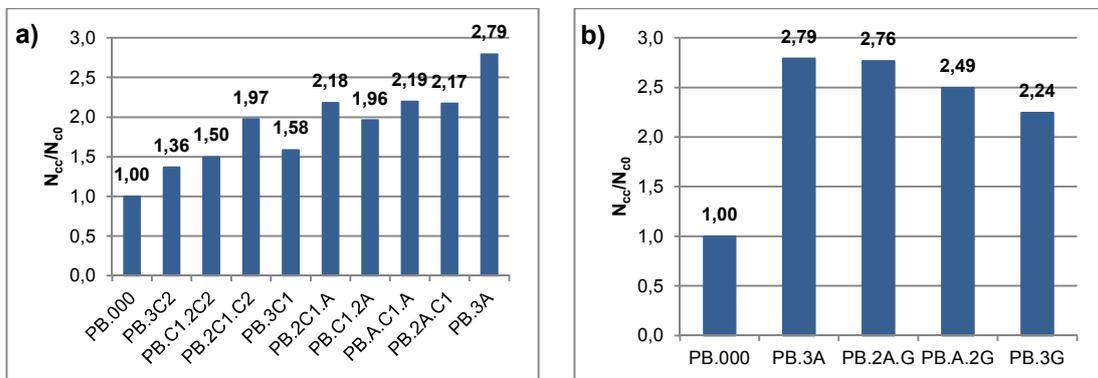


Figura 4 – Resultados experimentais para os provetes híbridos: a) provetes reforçados com fibras de carbono e/ou aramida; b) provetes reforçados com fibras de aramida e/ou de vidro.

Os resultados apresentados (Figura 4a) permitem observar que as soluções técnicas contendo mais de uma camada de fibras de carbono de alto módulo (C_2) apresentam um desempenho limitado, correspondendo a acréscimos de resistência abaixo dos 50%. Já as soluções efectuadas com recurso a carbono de baixo módulo (C_1) e aramida (A) apresentam aumentos de resistência que oscilam entre os 96% (PB.C₁.2A) e os 119% (PB.A.C₁.A). Testaram-se diferentes soluções contendo duas camadas de aramida e uma de carbono, tendo-se verificado que a posição relativa entre as fibras não revelou uma influência determinante na resistência final do conjunto.

A Figura 4b ilustra o desempenho de reforços híbridos contendo fibras de aramida (A) e de vidro (G). Verifica-se que, à medida que se vão substituindo as fibras de aramida por vidro, a resistência vai diminuindo progressivamente: A solução PB.2A.G apresenta um acréscimo de resistência de 176%, muito próxima da solução PB.3A (179%), mas o acréscimo de resistência decresce com PB.A.2G (149%), até PB.3G (124%).

A Figura 5 resume os resultados obtidos. Na Figura 5a observa-se a força de rotura normalizada em todas as séries ensaiadas, ordenadas por ordem crescente de resistência. Pode constatar-se a existência de três conjuntos de soluções, em função do seu desempenho mecânico: soluções com fibra de vidro e aramida, permitindo aumentos de resistência superiores a 149%; soluções híbridas carbono-aramida, bem como a série reforçada apenas com recurso a fibras de vidro, com acréscimos de resistência rondando os 100% e soluções contendo carbono de alto módulo, bem como a série produzida apenas com recurso a carbono C_1 , que apresentam acréscimos inferiores a 60%, com excepção da série PB.2C₁.C₂, que apresenta uma melhoria de resistência próxima dos 100%.

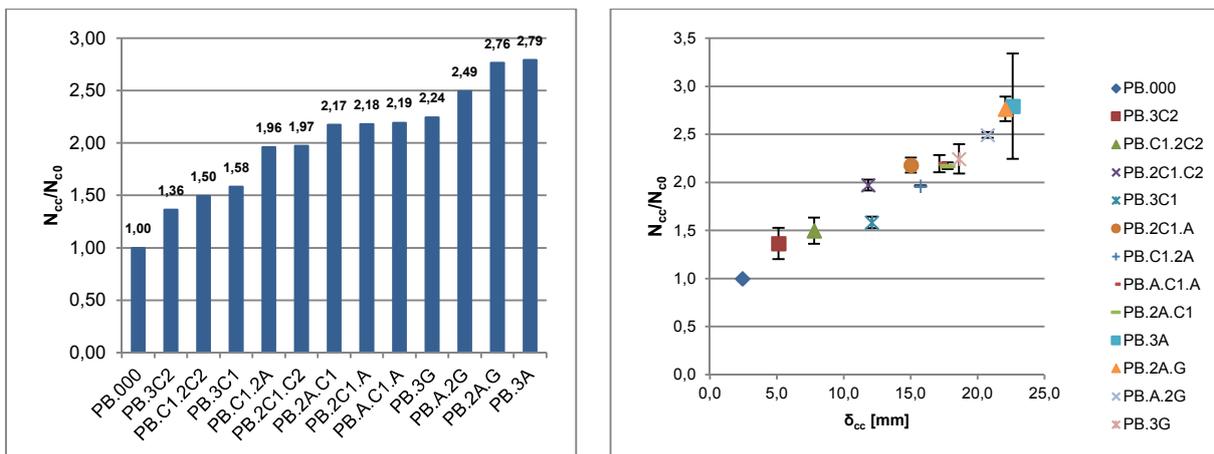


Figura 5 – Resultados experimentais: a) força de rotura normalizada; b) força de rotura normalizada vs deslocamento na rotura.

A Figura 5 relaciona a resistência normalizada das diversas soluções com o deslocamento axial registado na rotura. O gráfico contém ainda indicação do desvio-padrão de resistência observado nos ensaios. Pode verificar-se que, à excepção da série PB.3A, os resultados de todas as séries apresentaram baixa dispersão. As resistências mais elevadas encontram-se

associadas a maiores deformações, confirmando assim que o aumento de resistência dos provetes foi obtido à custa de um aumento da ductilidade dos mesmos. Este facto pode explicar o resultado menos satisfatório obtido quando o reforço foi efectuado com materiais mais rígidos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Realizaram-se ensaios sobre colunas em betão não armado, reforçadas através de encamisamento com FRP, recorrendo a diferentes tipos de fibras (carbono de baixo e alto módulo de elasticidade, aramida e vidro). Mantendo constante o número de camadas de reforço, analisou-se o desempenho mecânico de diferentes soluções híbridas. Os pilares foram sujeitos a compressão uniaxial, tendo sido registadas a força e deformação axial.

Os resultados obtidos permitiram concluir que as amostras reforçadas com fibras de aramida, ou reforços híbridos contendo aramida, conduziram a resistências de rotura mais elevadas, registando relações entre a força de rotura em situação reforçada / amostras sem reforço até 2,79 vezes. O encamisamento com fibras de vidro conduziu também a uma elevada taxa de reforço, revelando-se muito eficazes quando utilizadas como elemento confinante. Por outro lado, os elementos de reforço com fibras de carbono, especialmente fibras de elevado módulo de elasticidade, exibiram taxas mais baixas de reforço (inferiores a 1,5). O estudo permite concluir que o maior módulo de elasticidade e reduzida extensão na rotura podem conduzir a uma rotura prematura do reforço, antes de a força potencial máxima da coluna de betão ser mobilizada. Este facto pode explicar o pior desempenho de fibras de carbono de alto módulo quando comparadas, por exemplo, com fibras de aramida. O módulo de elasticidade mais baixo e a mais elevada extensão na rotura da aramida mantém o confinamento, conduzindo a uma mais elevada carga de rotura.

O trabalho realizado mostrou que é possível obter soluções híbridas com desempenhos mecânicos semelhantes e custos substancialmente mais baixo, como comprovado pelos resultados das soluções híbridas aramida-vidro. Verificou-se ainda que a posição relativa entre as camadas de fibras de diferentes materiais não influenciou significativamente o desempenho das colunas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação Ciência e Tecnologia (FCT) através do projecto PTDC/ECM/118271/2010 - "Protection Under Fire of Reinforced Concrete Structural Elements Reinforced with CFRP Composite Systems". Os autores agradecem o apoio recebido de S&P Clever Reinforcement Ibérica Lda (www.reinforcement.ch).

REFERÊNCIAS

- [1] Paula, A.R. - “Influência da Geometria das Secções no Confinamento de Pilares de Betão Armado com Compósitos de CFRP”, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Estruturas, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2003.
- [2] Green, M.F.; Bisby, L.A.; Fam, A.Z.; Kodur, V.K. - “FRP confined concrete columns: Behaviour under extreme conditions”, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 28, 2006, p. 928–937.
- [3] ACI 440.2R-02, 2002 – “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures”.
- [4] Nezamian, A.; Setunge, S. – “Case Study of Application of FRP Composites in Strengthening the Reinforced Concrete Headstock of a Bridge Structure”. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, September/October, 2007, p. 531-544.
- [5] Grilo, I.; Branco, F.G.; Júlio, E. – “Protecção a altas temperaturas com recurso a argamassas de elementos de betão reforçados com CFRP”. *1º Congresso Ibero-Latino-Americano em Segurança contra Incêndios (CILASTI 2011)*. Natal, Brasil, 10-12 Março, 2011.
- [6] Agante, M.A.B; Júlio, E.; Barros, J.A.O.; Santos, J.M.C. - "Active CFRP-based confinement strategies for RC columns with rectangular cross sections". Singapore: Ci-Premier, 2008.
- [7] Santos, P. – “A influência da rugosidade da superfície da interface betão-betão na sua resistência ao corte longitudinal”. Tese de Mestrado. Universidade de Coimbra. Portugal, 2005.