

Análise Experimental e Numérica de Pilares Medianamente Esbeltos Reforçados Com Chapas Metálicas

Anne Karolynne Monteiro¹, Francisco dos Santos Rocha², Artur Madeiro Teixeira Júnior³, Bryan Delmond Silva⁴, Vitor dos Santos Albuquerque⁵
^{1,2,3,4,5}Universidade do Estado do Amazonas /annekarolynne@gmail.com¹, francasantos@uol.com.br², artur.madeiro@hotmail.com³, bryandelmond25@gmail.com⁴, vitoralbuquerque9@gmail.com⁵

Resumo

Na construção civil, há diversos tipos de reforços em pilares, como, por exemplo, o uso de chapas metálicas coladas que é um material de fácil aquisição, rápida execução e sem grandes acréscimos à seção transversal. A pesquisa consistiu em analisar o aumento da capacidade portante de pilar com seção retangular com chapas coladas nas suas faces, através do ensaio de resistência à compressão centrada e da simulação numérica pelo método dos elementos finitos. Na análise numérica, foi empregado o software ANSYS. Foram utilizados protótipos de pilares reforçados e não reforçados (pilares referência). Após essa fase, foi realizada a análise comparativa dos resultados obtidos experimentalmente e numericamente. Os resultados mostraram aumento percentual de capacidade portante de 145,10% e 390% para pilares encamisados e de 122,72% e 304,54% para chapas coladas em faces opostas.

Palavras-chave

Reforço estrutural; pilares medianamente esbeltos; análise numérica.

Introdução

Os pilares são elementos estruturais que transmitem ações nas edificações para as fundações, entretanto, mesmo com rigoroso controle em relação às prescrições da ABNT NBR 6118 (2014) na fase de implantação do projeto, ainda estão sujeitos a problemas estruturais decorrentes de execução.

Segundo Takata (2009), as principais patologias observadas em pilares, quando há falha de execução, são trincas devido ao mau escoramento de formas e falhas no concreto devido ao precário controle tecnológico. Por conta disso, há diversas opções para sanar esse tipo de problema, como reforço estrutural, que é um tipo de intervenção utilizado em edificações que visa corrigir falhas de projetos, execução ou mudança do uso da edificação, através do aumento da capacidade portante.

Segundo Adorno, Dias e Silveira (2015), reforço estrutural tem como finalidade o acréscimo de capacidade resistente, antes de alcançar o estado limite-último. Do mesmo modo, Adorno, Dias e Silveira (2015) afirmam que recuperação é uma maneira de assegurar o uso da estrutura em si após as manifestações patológicas que influenciaram quanto à resistência e utilização.

Entre as técnicas de reforço de pilares, pode-se citar: aumento da seção transversal, protensão externa, adição de chapas ou perfis metálicos e compósitos de fibras de carbono (CFRP). Do ponto de vista científico, não há muitas pesquisas brasileiras disponíveis

quanto ao efeito do reforço em pilares, sobretudo em elementos medianamente esbeltos, que são elementos estruturais onde podem ser considerados os efeitos de segunda ordem por processo aproximado, como, por exemplo, o método do pilar-padrão.

Segundo Tarabia e Albakry (2014), o uso de chapas metálicas como reforço estrutural é muito eficiente e há ganho na capacidade resistente. Filho (2003) destaca que essa técnica é uma boa solução quando o aço das armaduras existentes na peça é deficiente e a qualidade do concreto e suas dimensões continuam apropriadas. Embora o emprego desse procedimento seja usual, não há norma brasileira vigente para dimensionamento de peças que necessitam de reforço estrutural, baseando-se então, em grande parte, em métodos empíricos. Em relação às normas estrangeiras, é recorrente o uso do Eurocode N° 4, sendo necessária a adaptação para as variáveis brasileiras.

Portanto, englobando todas as variáveis citadas, especificamente a escassez de referencial científico sobre a eficácia do reforço estrutural em pilares medianamente esbeltos e normas técnicas, este trabalho tem como objetivo analisar experimentalmente e numericamente o aumento da capacidade portante dos pilares de concreto armado medianamente esbeltos reforçados com elementos metálicos, relativamente aos pilares sem reforço.

Análise experimental

Na fase experimental, foram utilizados cinco corpos de prova prismáticos: um sem reforço estrutural e quatro com chapas metálicas. O elemento estrutural de referência é um pilar com as seguintes dimensões: seção transversal = 20cm x 20cm; altura = 220cm. As seções transversais dos protótipos, em escala reduzida 1:50, passaram a ter as seguintes definições: 10cm x 10cm. As reduções decorrem da dificuldade em realizar ensaios com as dimensões reais.

No elemento estrutural de referência, as armaduras longitudinais seguiram as prescrições da ABNT NBR 6118:2014, diâmetro igual a 12,5mm, uma barra de aço reta CA-50 em cada vértice, por se tratar de uma seção poligonal. Os estribos são de aço CA – 60, com diâmetro de 8mm e espaçamento de 20cm. Nos protótipos em escala reduzida, as armaduras passaram a ter os seguintes diâmetros: longitudinais = 6,3mm; transversais = 4,2mm, conforme ilustra a figura 1.

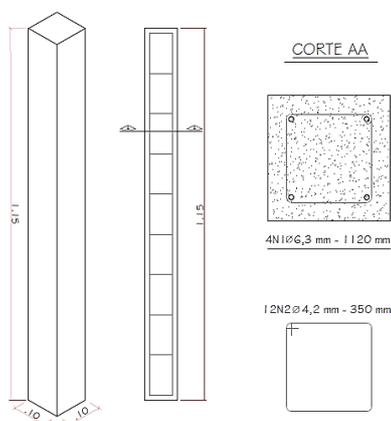


Figura 1: Detalhamento das armaduras longitudinais e transversais

Materiais componentes dos protótipos

Os materiais para execução do concreto, adquiridos em lojas de Materiais de Construção na cidade de Manaus, são: areia, brita granítica e cimento. Os agregados, areia e brita granítica, foram caracterizados no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Estado do Amazonas. O cimento utilizado foi o CPI – S – 40, marca CEMEX, com massa específica real de 3150 kg/m³.

Os ensaios do agregado miúdo apresentaram os seguintes parâmetros: massa específica real = 2500 kg/m³ (NBR NM 52); módulo de finura = 1,57 e diâmetro máximo = 1,18 mm (NBR NM 248:2003); massa unitária compactada = 1502 kg/m³ (NBR NM 45). O agregado graúdo, pedra britada granítica, os seguintes parâmetros = massa específica real = 2700 kg/m³ (NBR NM 53); módulo de finura = 1,82 e diâmetro máximo = 9,5 mm (NBR NM 248); massa unitária compactada = 1470 kg/m³ (NBR NM 45).

Corpos de prova de concreto

Os corpos de prova de concreto foram executados adotando: resistência característica à compressão de 20MPa; desvio padrão = 5,5MPa e abatimento do tronco de cone = (90 +/- 10)mm. A partir desses dados e seguindo as recomendações da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), chegou-se ao seguinte traço unitário (cimento: areia : brita : água): 1:1,62:2,19:0,53.

As formas utilizadas para moldagem dos protótipos são de chapas de compensado, com espessura de 15mm. O desmoldante utilizado é da marca Viapol, indicado para formas de madeira e compensado, e o cobrimento das armaduras adotado foi de 15mm, garantido através de espaçadores plásticos, posicionados entre a armadura e a fôrma.

O ensaio de abatimento do concreto, *slump-test*, forneceu o valor de 65mm. Foram moldados três corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 15cm e altura 30cm, para estimar a resistência característica do concreto endurecido.

Na fase de execução de cada elemento, foram seguidas as prescrições da ABNT NBR 12655:2015. Os corpos de prova moldados permaneceram à temperatura ambiente até a desmoldagem, por um período de vinte e quatro horas, figura 2. Após a desmoldagem, os protótipos ficaram em câmara úmida por vinte e oito dias.



Figura 2: Protótipos pré-moldados de concreto armado

Corpo de prova misto

A amostra consistiu em cinco corpos de prova, um pilar referência sem reforço estrutural e quatro corpos de prova reforçados com chapas metálicas coladas com resina epóxi: dois com chapas em faces opostas e dois com todas as faces laterais revestidas com chapas metálicas. As espessuras das chapas metálicas empregadas foram 1mm e 2mm.

A quantidade de corpos de prova foi baseada no trabalho científico de Adam *et. al* (2009), que analisou pilares reforçados com tiras de aço, a fim de avaliar o aumento da capacidade portante através de análises experimentais e numéricas.

A superfície do concreto a ser reforçada foi preparada para colagem da chapa: remoção das impurezas, escovação, lavagem e secagem. Na fase de colagem, foram empregadas resina epóxi, Sidakur® Epóxi da marca Sika, trincha e espátula, aplicando resina na superfície da chapa e na face do elemento estrutural.

Na fase de colagem, o adesivo epóxi foi aplicado com trincha, tomando o cuidado de preencher todas as cavidades. Foi utilizada a especificação de Helene (1994), que recomenda espessura entre 2 e 3mm de aplicação do produto com auxílio de uma chapa de madeira pressionando fortemente a chapa de aço para obter espessura uniforme inferior a 1,5mm (figura 3).



Figura 3: Protótipos de concreto revestidos com chapas de aço.

Procedimento na fase experimental

Na fase experimental, foi utilizada uma prensa hidráulica com capacidade de 300kN (30t), projetada no Laboratório de Materiais e Construção da Universidade do Estado do Amazonas (figura 4). O corpo de prova foi posicionado para obter, durante o ensaio, esforços uniformemente distribuídos, tensões normais constantes, nos pontos de aplicações das ações do eixo da peça. Foram colocadas chapas metálicas nas faces superior e inferior do protótipo. A aplicação das cargas ocorreu por processo manual e de modo lento e gradual. Foram também utilizados grampos nas faces laterais dos pilares reforçados para evitar acidentes.



Figura 4: Prensa Hidráulica com corpo de prova.

Análise numérica pelo método dos elementos finitos

Segundo Lotti *et al.* (2006, p. 36), “em linhas gerais, pode-se definir o Método dos Elementos Finitos (MEF) como um método matemático, no qual um meio contínuo é discretizado em elementos que mantêm as propriedades de quem os originou”. Para Soriano (2009), o MEF permite a análise do comportamento de qualquer sistema físico regido por equações diferenciais ou integrais, como aqueles observados nos problemas da resistência dos materiais deformáveis, condução do calor e de massa, e do eletromagnetismo.

Na simulação dos pilares reforçados com elementos metálicos, foram utilizados os seguintes elementos finitos presentes na biblioteca do ANSYS: SOLID65; LINK180; CONTA173; TARGE170.

O elemento finito SOLID65 é um elemento utilizado para modelagem tridimensional de sólidos de concreto armado. Suas propriedades são: oito nós com três graus de liberdade cada, onde citam-se as translações nas direções x , y e z ; reprodução do comportamento de tração e esmagamento na compressão; comportamento de deformação plástica e fluência.

LINK180 consiste em um elemento capaz de modelar as armaduras longitudinais e transversais do concreto. As propriedades são citadas a seguir: dois nós com três graus de liberdade cada, onde se citam as translações nas direções x , y e z ; reprodução do comportamento de deformações elástico-plásticas, escoamento à tração e tensão-compressão uniaxial.

CONTA 173 é um elemento finito utilizado para simular superfícies de contato. As propriedades são listadas a seguir: três graus de liberdade em cada nó, ou seja, translações nas direções x , y e z ; capacidade de simular esforços de cisalhamento. Esse contato tem o auxílio da superfície 3D simulada através do elemento finito TARGE170. Os elementos de contato sobrepõem os elementos sólidos que descrevem o limite do corpo deformável. Esses dois elementos finitos trabalham em conjunto, onde o elemento de segmento TARGE170 é emparelhado com a superfície de contato.

Procedimento na análise numérica

Na análise numérica do comportamento dos elementos estruturais, protótipos de concreto e concreto e aço (misto), foram desenvolvidas as seguintes fases: modelação do volume do modelo, condições de contorno e definição das ações.

Os elementos finitos utilizados foram: SOLID65, para modelagem do concreto, com oito nós e três graus de liberdade; LINK180, para simular as armaduras longitudinais e transversais, com dois nós e três graus de liberdade; CONTA173 e TARGE170, para simular a aderência entre o elemento metálico e o concreto, com um nó e três graus de liberdade.

A classe de agressividade ambiental (CAA) adotada para o concreto do protótipo foi CAA I, ABNT NBR 6118:2014, conduzindo aos seguintes parâmetros: resistência à compressão axial = 20MPa; módulo de elasticidade = 25044MPa; coeficiente de Poisson = 0,2. A chapa de aço usada no reforço possui os seguintes parâmetros mecânicos: módulo de elasticidade longitudinal = 200GPa e coeficiente de Poisson = 0,3.

Na simulação numérica dos elementos de concreto e misto, como condição de contorno, foram rotuladas as extremidades superior e inferior do protótipo. Gerou-se a malha mapeada da malha de elementos finitos, definida na discretização como 20mm, conforme figura 5.

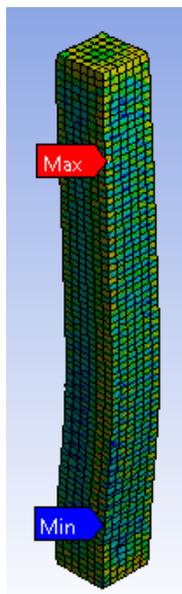


Figura 5: Duas faces reforçadas

Resultados e discussões

Os ensaios dos protótipos reforçados com chapas de aço, experimentais e numéricos, forneceram os resultados constantes na tabela 1. A carga máxima aplicada, carga crítica, é referente à ruptura do protótipo, como mostra a figura 6. A carga crítica foi obtida em ton, através do manômetro de leitura. As cargas críticas numéricas foram obtidas utilizando o *software* ANSYS, com base no método dos elementos finitos.

Tabela 1 – Resultados dos métodos aplicados

Corpo de Prova	Configuração do Reforço	Espessura (mm)	Carga Experimental (kN)	Carga Numérica (kN)
P _{SR1}	-			
P _{R1}	Chapas em	1,0	54,0	52,303
P _{R2}	quatro faces	2,0	100,0	93,74
P _{R3}	Chapas em duas	1,0	49,0	47,23
P _{R4}	faces opostas	2,0	89,0	84,953

Notação: P_{SRn} = pilar sem reforço; P_{Rn} = pilar reforçado.



Figura 6: Pilar reforçado com fissura

Em relação ao pilar referência, os protótipos apresentaram aumento percentual de capacidade portante de: 145,10% para P_{R1}; 390% para P_{R2}; 122,72% para P_{R3} e 304,54% para P_{R4}. Esses resultados são melhores entendidos através da figura 7, onde se observa que o encamisamento é mais eficiente como reforço estrutural.

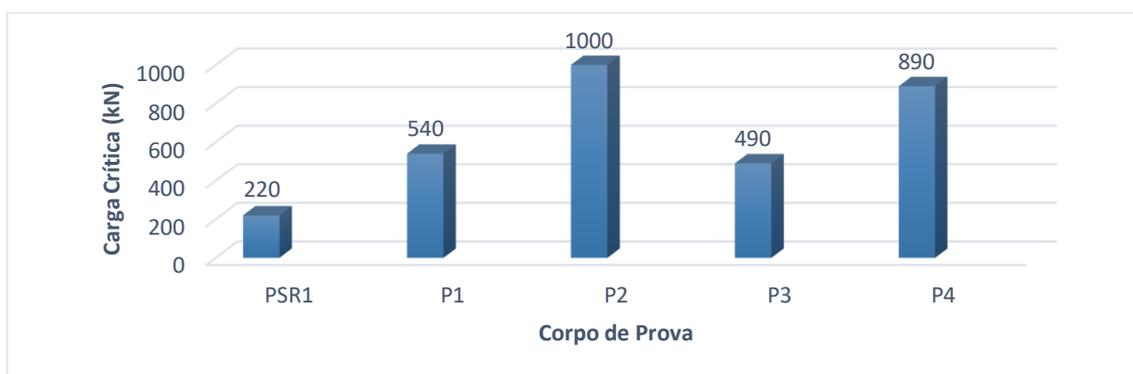


Figura 7: Gráfico do aumento da carga crítica para diferentes reforços estruturais

O aumento da espessura da chapa de aço para reforço alterou significativamente a intensidade da carga crítica do pilar. Comparando as duas configurações de reforço, conclui-se que: nos protótipos reforçados nas quatro faces, houve um aumento de 85%; nos protótipos reforçados em faces opostas, aumento de 81,63%, quando a espessura passa de 1 mm para

2mm. Portanto, o aumento da espessura melhora significativamente o comportamento dos pilares reforçados e, também, sua ductilidade.

A curva representativa dos esforços axiais máximos, figura 8, permite comparar os resultados experimentais e numéricos. As diferenças percentuais são 10%, 3%, 6,67%, 3,74 e 4,76%, respectivamente, para os pilares P_{SR1} , P_{R1} , P_{R2} , P_{R3} , P_{R4} . Os valores apontam para uma similaridade entre os dois métodos.

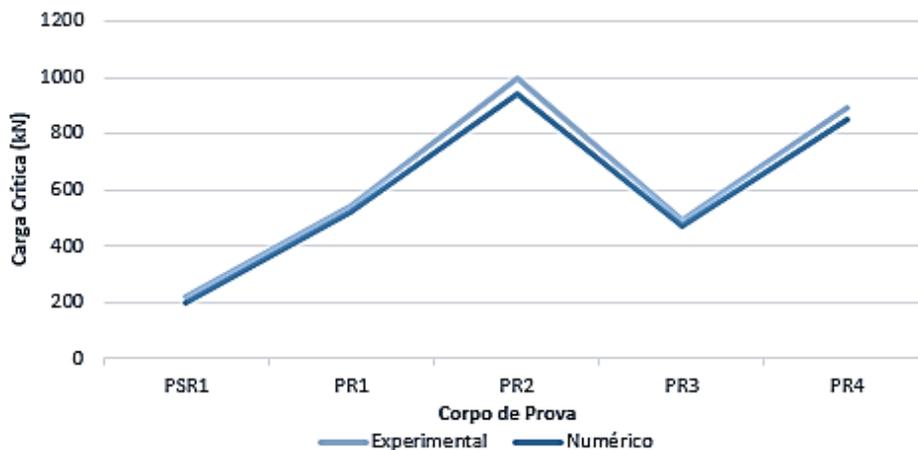


Figura 8: Curva representativa dos esforços axiais máximos

Conclusões

As capacidades portantes dos pilares P_{R1} , P_{R2} , P_{R3} e P_{R4} , no ensaio experimental, apresentaram, respectivamente, aumento de 32kN, 78kN, 27kN e 67kN em comparação ao pilar referência (P_{SR1}). Esse aumento confirma a eficiência do reforço empregado e possibilidade de emprego da técnica na área de reabilitação estrutural.

Em relação às duas configurações de reforço, é mais eficiente o emprego com chapas coladas em todas as faces, entretanto, o emprego com duas chapas coladas opostas também oferece um notável aumento percentual de desempenho. Foi realizada uma diferença percentual entre as duas configurações de reforço, para cada espessura adotada, ou seja, foi analisada a eficácia em termos de porcentagem, entre chapas em duas faces e quatro faces, respectivamente com espessura de 1mm e 2mm, onde obteve-se, com a chapa de 1mm, um aumento percentual de 18,23% e, para chapa de 2mm, 28,06%, entre as duas categorias de reforço estrutural.

No tocante à espessura das chapas, o elemento metálico de 2mm obteve um melhor desempenho que o elemento metálico de 1mm, tendo, em média, 83,31% de aumento de capacidade portante.

Esses resultados comprovam a funcionalidade da técnica e é uma opção de disposição das chapas metálicas, considerando que é usual a utilização do encamisamento como reforço estrutural.

Referências

ADAM, José; IVORRA, Salvador; PALARES, Francisco; GIMÉZES, Ester; CALDERÓN, Pedro. **STRUCTURES & BUILDINGS**. Axially loaded RC columns strengthened by steel

- gages, Espanha, v. 162, p. 199 – 208, nov. 2009. Disponível em: <10.1680/stbu.2009.162.3.199>. Acesso em: 13 jun. 2017, 09:55.
- ADORNO, Felipe; DIAS, Frederico; SILVEIRA, João. **Recuperação e reforço de vigas de concreto armado**. Goiânia: [S.n.], 2015. Disponível em: <https://www.eec.ufg.br/up/140/o/RECUPERAÇÃO_E_REFORÇO_DE_VIGAS.pdf>. Acesso em: 09 mar. 2017, 08:02.
- ANSYS. **Structures Applications**. Disponível em: <<http://www.ansys.com/Solutions/Solutions-by-Application/Structures>>. Acesso em: 12 mar. 2017, 23:00.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de Cimento Portland – Preparo, controle e recebimento - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado Miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.
- COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. **EUROCODE N°4**: Common unified rules for composite steel and concrete structures. Luxemburgo, 1985.
- FILHO, Marcello. **Modelagem numérica de reforço estrutural em vigas de concreto armado**. 2003. 110 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas), Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=3328@1>. Acesso em: 10 mar. 2017, 18:05.
- HELENE, Paulo. **Manual para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto**. São Paulo: PINI, 1992. 218 p.
- SORIANO, Humberto. **Elementos Finitos – Formulação e Aplicação na Estática e Dinâmica das Estruturas**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2009.
- TAKATA, Leandro. **Aspectos executivos e a qualidade de estruturas em concreto armado: Estudo de caso**. 2009. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/4655?show=full>>. Acesso em: 10 dez. 2017, 13:27.
- TARABIA, Ahmed; ALBAKRY, Hazem. Strengthening of RC columns by steel angles and strips. **Alexandria Engineering Journal**, Alexandria, v.53, n.3, p. 615 – 626, set. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016814000404>>. Acesso em: 16 mar. 2017, 21:15.