

## **Dimensionamento de um painel de contraventamento condicionado à tese do uso de 100% do limite de escoamento do aço na alvenaria estrutural armada**

**Everson Danilo Cajuhi Souza<sup>1</sup>, Paulo Vitor Souza Santos<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Faculdade de Tecnologia e Ciências / Graduando em Engenharia Civil / danilo.cajuhi@gmail.com

<sup>2</sup>Faculdade de Tecnologia e Ciências / Professor de Engenharia Civil / projetos@engpaulovitor.com

### **Resumo**

A possibilidade de resistir a esforços de tração com a associação da alvenaria estrutural ao aço devolveu ao sistema construtivo sua competitividade com relação às estruturas convencionais em concreto armado. No entanto, as normas vigentes de projeto subestimam o aproveitamento do aço estrutural ao limitar sua tensão de escoamento em 50%. Neste trabalho é realizado o estudo do painel de contraventamento de um edifício de 10 pavimentos em alvenaria estrutural com bloco de concreto, submetido a ações horizontais devidas ao vento, dimensionado à flexo-compressão tanto pelas recomendações da ABNT NBR 15961-1:2011, quanto pela tese de IZQUIERDO (2015), que recomenda a utilização de 100% do limite de escoamento do aço estrutural que arma a alvenaria estrutural com bloco de concreto. O estudo comparativo é feito, ainda, admitindo a possibilidade de utilização de CA50 ou de CA60 na armadura longitudinal do painel de contraventamento analisado. A planta do edifício foi obtida em SANTOS (2016), para a qual admitiu-se a hipótese simplificadora de bissetria, além de todas as simplificações recomendadas nas normas de projeto. O estudo evidencia uma economia significativa na demanda de aço estrutural quando se utiliza a tese de IZQUIERDO (2015) no dimensionamento do elemento flexo-comprimido.

### **Palavras-chave**

Alvenaria estrutural armada; bloco de concreto; painel de contraventamento; limite de escoamento do aço.

### **Introdução e Justificativa**

Devido ao programa habitacional Minha Casa, Minha Vida (MCMV), o sistema construtivo conhecido como alvenaria estrutural ganhou grande notoriedade no mercado brasileiro por viabilizar as habitações de interesse popular. Em 2010 e 2011 as normas que versam sobre o projeto de estruturas de alvenaria com bloco cerâmico e de concreto, respectivamente, substituíram a antiga norma baseada na filosofia de projeto em tensões admissíveis. No entanto, a aplicabilidade de preceitos semiprobabilísticos no dimensionamento dos elementos não implicou em estruturas mais econômicas (SANTOS E ARAGÃO, 2014).

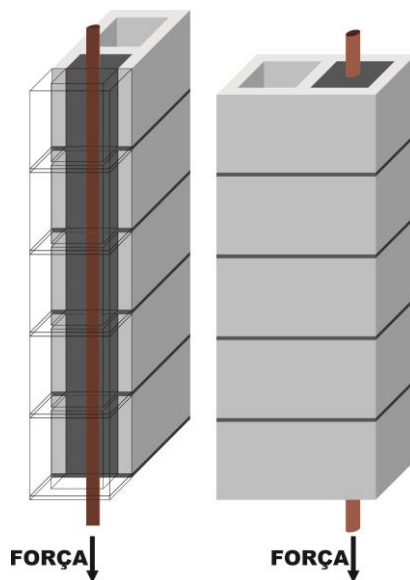
A facilidade de execução, a economia de formas e a redução de especialidades de mão-de-obra aliados à possibilidade de associação do aço com a alvenaria pôs o sistema construtivo em grande vantagem competitiva com relação ao sistema convencional de

concreto armado reticulado. E não obstante, o sistema passou a ser demandado em empreendimentos de média e grande altura, onde as pressões dinâmicas do vento geram esforços significativos na estrutura de contraventamento.

Um dos fatores que tornam o dimensionamento de elementos de alvenaria estrutural antieconômico é o coeficiente de minoração das resistências adotado em combinações normais, que reduz pela metade a resistência da alvenaria e do graute.

No caso da alvenaria estrutural armada o caso fica ainda mais crítico, pois além de aplicar o coeficiente de 1,15 (combinações normais) ao material aço, as normas brasileiras pedem que se considere para a resistência de cálculo do aço, apenas a metade do seu valor de escoamento o que resulta, sempre, na aplicação de um coeficiente de minoração igual a 2,30 na tensão característica de escoamento do material.

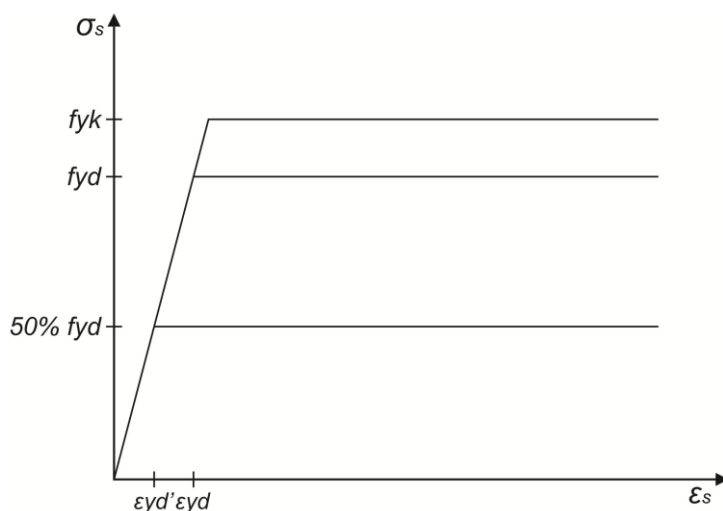
A proposta conservadora de se adotar um coeficiente de minoração igual a 2,30 para o aço da alvenaria estrutural armada, construída com bloco de concreto, não mais representa uma consideração de projeto prudente, posto que a contribuição de IZQUIERDO (2015) no estudo do mecanismo de ruptura da associação de bloco de concreto, graute e vergalhão de aço, evidencia por meio de ensaio do tipo *pull out* (Figura 1), que o sistema rompe, preferencialmente, pelo escoamento do aço e não pelo deslizamento do graute dentro da parede do bloco.



**Figura 1 – Corpo de prova do ensaio *pull out***

Com a consideração da metade da tensão de escoamento, conforme especificado na norma de projeto, o diagrama equivalente que caracteriza o comportamento elastoplástico do aço antecipa a deformação de escoamento (Figura 2), a partir da qual, o material passa a ser considerado no regime plástico com tensão igual a  $50\% \cdot f_{yd}$ . Como

pode ser visto na Tabela 1, no caso do CA50, por exemplo, a deformação que caracteriza o início do escoamento do aço deixa de ser 2,07‰ ( $f_{yd}$ ) e passa a ser 1,04‰ ( $f_{yd}'$ ).



**Figura 2 – Diagrama tensão-deformação para aços de armaduras passivas**

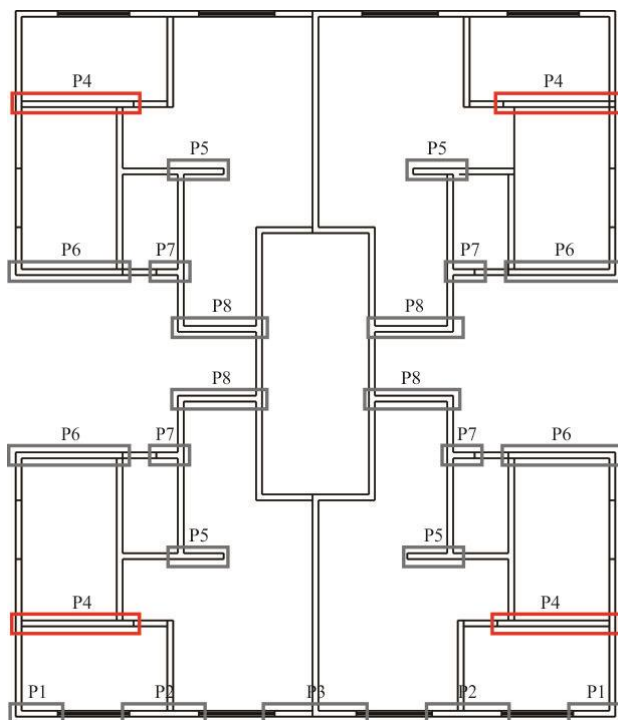
**Tabela 1 – Propriedades mecânicas dos aços.**

AÇO	$f_{yk}$ (MPa)	$f_{yd}$ (MPa)	$\epsilon_{yd}$ (‰)	$f_{yd}'$ (MPa)	$\epsilon_{yd}'$ (‰)
CA50	500	435	2,07	218	1,04
CA60	600	522	2,48	260	1,24

Considerando os avanços técnicos patrocinados pela análise experimental de IZQUIERDO (2015) e aproveitando a geometria do pavimento tipo estudado por SANTOS (2016), neste trabalho foi realizado o dimensionamento de um painel de contraventamento de um edifício de 10 pavimentos, projetado para ser construído em Feira de Santana – BA ( $v_0=30\text{m/s}$ ), considerando as hipóteses de que a resistência de cálculo ao escoamento da armadura é 50% de  $f_{yd}$  (conforme recomendação normativa) e 100% de  $f_{yd}$ .

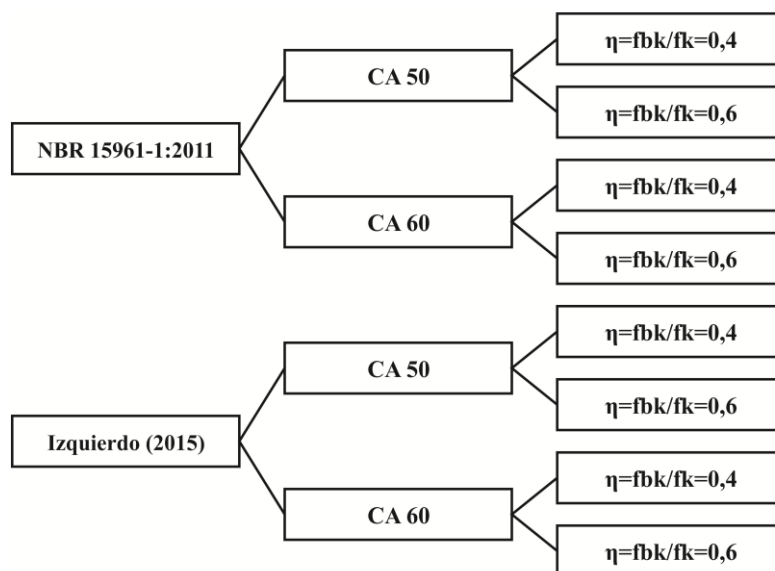
### **A Geometria do Problema e as Metodologias de Dimensionamento**

Para fins de simplificação, a geometria do edifício estudado, extraída de SANTOS (2016), foi admitida bissimétrica, conforme Figura 3.



**Figura 3 – Planta baixa do edifício piloto considerado**

Dentre as 8 paredes que colaboram para o contraventamento da estrutura submetida a uma pressão dinâmica de vento na direção X, atuante nas fachadas YZ, o painel P4 é o que apresenta a maior rigidez relativa sendo, portanto, o painel escolhido para avaliação da demanda de aço considerando 2 (duas) metodologias de dimensionamento: segundo a ABNT NBR 15961-1:2011 e segundo a tese de IZQUIERDO (2015), 2 (dois) tipos de vergalhão e 2 (duas) eficiências bloco/alvenaria, totalizando 8 (oito) dimensionamentos (Figura 4).



**Figura 4 – Árvore com a distribuição das hipóteses de cálculo adotadas**

### Dimensionamento à flexo-compressão

Com base nas prescrições da ABNT NBR 15961-1, a resistência da seção foi estimada pelas seguintes equações:

$$N_{Rd} = f_d \cdot b \cdot y + f_{s1} \cdot A_{s1} - f_{s2} \cdot A_{s2} \quad (1)$$

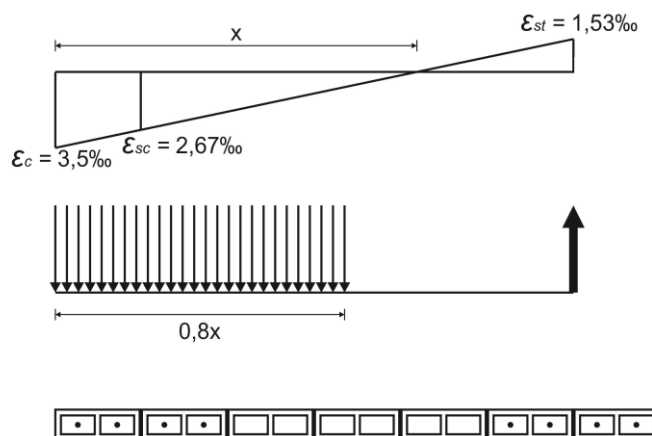
$$M_{Rd} = 0,5 \cdot f_d \cdot b \cdot y \cdot (h - y) + f_{s1} \cdot A_{s1} \cdot (0,5 \cdot h - d_1) + f_{s2} \cdot A_{s2} \cdot (0,5 \cdot h - d_2) \quad (2)$$

Sendo que, na avaliação das tensões nos vergalhões, as deformações específicas médias maiores que  $\epsilon_{yd}'$  e menores que  $\epsilon_{yd}$ , resulta sempre  $f_{s1} = f_{s2}$ , para o dimensionamento de acordo com a ABNT NBR 15961-1 e  $f_{s1} \neq f_{s2}$ , para o dimensionamento de acordo com a tese de IZQUIERDO (2015).

### Hipóteses simplificadoras

A análise de deformações nas seções armadas com múltiplas barras de aço foi realizada admitindo-se uma deformação específica média no centro geométrico das barras distribuídas nas regiões tracionada e comprimida (PARSEKIAN *et al.*, 2012).

Para a seção resistente do painel PX4, pertencente ao pavimento térreo e calculado para eficiência bloco/alvenaria igual a 0,6 (Tabela 5), as deformações específicas médias dos vergalhões CA50 comprimidos e tracionados são 2,67‰ e 1,53‰, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 5.



**Figura 5 – Distribuição de tensão e deformação na seção resistente do painel PX4**

Para o exemplo supramencionado, convém observar, com base nas deformações específicas apresentadas na Tabela 1, que a deformação específica média do aço na região tracionada, embora seja maior que 1,04‰ (o que permite considerar  $f_s = 50\% \cdot f_{yd}$ ), é menor que 2,07‰ (devendo ter sua tensão estimada por  $f_s = E \cdot \epsilon_{st}$ ).

Na Tabela 2 estão apresentadas as solicitações de projeto que atuam flexo-comprimindo o painel de contraventamento PX4. A análise estrutural foi realizada admitindo-se que a pressão dinâmica do vento é a força estática equivalente representada na coluna 2.

**Tabela 2 – Esforços solicitantes.**

PAV.	Fv (kN)	Fdes (kN)	Vd (kN)	Nd (kN)	Md (kN.m)
10	17,3	2,42	2,48	56,14	7,44
9	34,6	2,42	7,14	112,3	28,86
8	34,6	2,42	11,8	168,4	64,26
7	34,6	2,42	16,46	224,6	113,64
6	31,09	2,42	20,68	280,7	175,68
5	29,07	2,42	24,65	336,8	249,63
4	29,07	2,42	28,62	393	330,55
3	25,86	2,42	32,18	449,1	432,03
2	25,86	2,42	35,74	505,3	539,25
1	32,53	2,42	40,14	561,4	659,67

## Resultados

As demandas de aço obtidas no dimensionamento do painel de contraventamento PX4 para as 4 (quatro) possibilidades consideradas estão apresentadas nas Tabelas 3, 4, 5 e 6.

**Tabela 3 – Demanda de aço para eficiência de bloco/alvenaria = 0,4 segundo a ABNT NBR 15961-1: 2011**

PAV.	CA50	$f_{bk}$ (CA50)	CA60	$f_{bk}$ (CA60)
10	4 $\phi$ 16mm	4 MPa	4 $\phi$ 16mm	4 MPa
9	4 $\phi$ 16mm	4 MPa	4 $\phi$ 16mm	4 MPa
8	4 $\phi$ 16mm	4 MPa	4 $\phi$ 16mm	4 MPa
7	4 $\phi$ 16mm	4 MPa	4 $\phi$ 16mm	4 MPa
6	4 $\phi$ 16mm	6 MPa	4 $\phi$ 16mm	6 MPa
5	4 $\phi$ 20mm	6 MPa	4 $\phi$ 16mm	6 MPa
4	4 $\phi$ 20mm	8 MPa	4 $\phi$ 20mm	6 MPa
3	4 $\phi$ 20mm	12 MPa	4 $\phi$ 20mm	10 MPa
2	6 $\phi$ 20mm	12 MPa	6 $\phi$ 20mm	10 MPa
1	8 $\phi$ 20mm	14 MPa	6 $\phi$ 20mm	14 MPa

Para a consideração de uma eficiência bloco/alvenaria igual a 0,4 a demanda de resistência do bloco no pavimento térreo é 14 MPa tanto para o dimensionamento segundo a ABNT NBR 15961-1:2011 (Tabela 3) quanto para o dimensionamento segundo IZQUIERDO (2015), mostrado na Tabela 4.

**Tabela 4 – Demanda de aço para eficiência de bloco/alvenaria = 0,4 segundo a IZQUIERDO (2015)**

PAV.	CA50	$f_{bk}$ (CA50)	CA60	$f_{bk}$ (CA60)
10	4 $\phi$ 16mm	4 MPa	4 $\phi$ 16mm	4 MPa
9	4 $\phi$ 16mm	4 MPa	4 $\phi$ 16mm	4 MPa
8	4 $\phi$ 16mm	4 MPa	4 $\phi$ 16mm	4 MPa
7	4 $\phi$ 16mm	4 MPa	4 $\phi$ 16mm	4 MPa
6	4 $\phi$ 16mm	6 MPa	4 $\phi$ 16mm	6 MPa
5	4 $\phi$ 20mm	6 MPa	4 $\phi$ 16mm	6 MPa
4	4 $\phi$ 20mm	8 MPa	4 $\phi$ 20mm	6 MPa
3	4 $\phi$ 20mm	12 MPa	4 $\phi$ 20mm	10 MPa
2	6 $\phi$ 20mm	12 MPa	6 $\phi$ 20mm	10 MPa
1	8 $\phi$ 20mm	14 MPa	6 $\phi$ 20mm	14 MPa

A consideração da eficiência bloco/alvenaria igual a 0,6 segundo a ABNT NBR 15961-1:2011 (Tabela 5), embora não apresente nenhuma redução na demanda de aço (Tabela 3), reduz a demanda de resistência característica do bloco para 10 MPa.

**Tabela 5 – Demanda de aço para eficiência de bloco/alvenaria = 0,6 segundo a ABNT NBR 15961-1: 2011**

PAV.	CA50	$f_{bk}$ (CA50)	CA60	$f_{bk}$ (CA60)
10	4 $\phi$ 16mm	4 MPa	4 $\phi$ 16mm	4 MPa
9	4 $\phi$ 16mm	4 MPa	4 $\phi$ 16mm	4 MPa
8	4 $\phi$ 16mm	4 MPa	4 $\phi$ 16mm	4 MPa
7	4 $\phi$ 16mm	4 MPa	4 $\phi$ 16mm	4 MPa
6	4 $\phi$ 16mm	4 MPa	4 $\phi$ 16mm	4 MPa
5	4 $\phi$ 20mm	6 MPa	4 $\phi$ 16mm	4 MPa
4	4 $\phi$ 20mm	6 MPa	4 $\phi$ 20mm	4 MPa
3	4 $\phi$ 20mm	8 MPa	4 $\phi$ 20mm	8 MPa
2	6 $\phi$ 20mm	10 MPa	6 $\phi$ 20mm	8 MPa
1	8 $\phi$ 20mm	10 MPa	6 $\phi$ 20mm	10 MPa

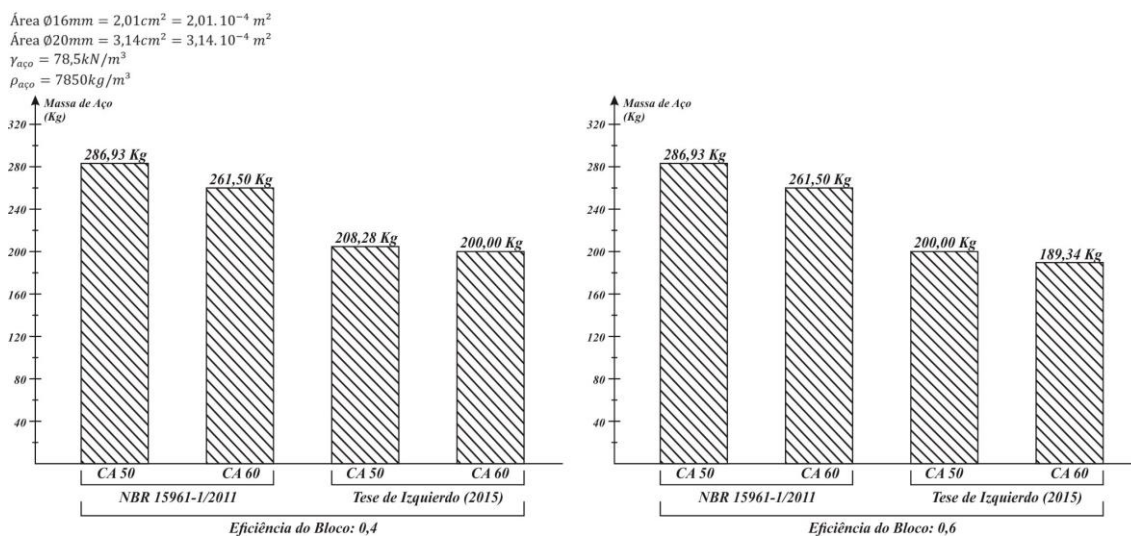
Para a consideração de  $100\% \cdot f_{yd}$  segundo a eficiência de bloco/alvenaria igual a 0,6 (Tabela 6), além da redução na demanda da resistência do bloco comparado à eficiência bloco/alvenaria igual a 0,4 (Tabela 4), observa-se, também, a redução na demanda de aço.

**Tabela 6 – Demanda de aço para eficiência de bloco/alvenaria = 0,6 segundo a IZQUIERDO (2015)**

PAV.	CA50	$f_{bk}$ (CA50)	CA60	$f_{bk}$ (CA60)
10	4 $\phi$ 16mm	4 MPa	4 $\phi$ 16mm	4 MPa
9	4 $\phi$ 16mm	4 MPa	4 $\phi$ 16mm	4 MPa
8	4 $\phi$ 16mm	4 MPa	4 $\phi$ 16mm	4 MPa
7	4 $\phi$ 16mm	4 MPa	4 $\phi$ 16mm	4 MPa
6	4 $\phi$ 16mm	4 MPa	4 $\phi$ 16mm	4MPa
5	4 $\phi$ 16mm	6 MPa	4 $\phi$ 16mm	6 MPa
4	4 $\phi$ 16mm	6 MPa	4 $\phi$ 16mm	6 MPa
3	4 $\phi$ 16mm	8 MPa	4 $\phi$ 16mm	8 MPa
2	4 $\phi$ 16mm	10 MPa	4 $\phi$ 16mm	10 MPa
1	4 $\phi$ 20mm	10 MPa	4 $\phi$ 20mm	10 MPa

Com base nas estimativas de demanda de aço apresentadas nas tabelas acima, e considerando peso específico de  $78,5 \text{ kN/m}^3$  para o aço, chega-se às demandas de aço apresentadas nos histogramas da Figura 4, calculadas para um pé-direito de 3,0m e desprezando-se os comprimentos de transpasse.





**Figura 6 – Demanda total de aço (em kg) por tipo de dimensionamento**

## Conclusões

Através dos resultados obtidos, verifica-se que a consideração do emprego de aço do tipo CA60 não gera economia significativa com relação à demanda de aço apresentada pelo emprego de vergalhões do tipo CA50. Também é possível concluir que o aumento da eficiência bloco/alvenaria, para uma mesma metodologia de dimensionamento, não impacta no consumo de aço demandado, embora reduza a demanda de resistência dos blocos empregados no sistema construtivo.

Já para uma mesma eficiência bloco/alvenaria, nota-se uma redução significativa no consumo quando se considera que o vergalhão empregado na alvenaria armada com bloco de concreto atinge sua tensão de escoamento antes do escorregamento do graute na parede do bloco. E essa redução é mais expressiva quando se trabalha com a eficiência bloco/alvenaria igual a 0,6.

Adotando a demanda de aço estimada segundo a ABNT NBR 15961-1:2011 como referência e para a eficiência bloco/alvenaria igual a 0,4 observa-se uma redução de 27,41% na massa de aço do tipo CA50 e uma redução de 23,52% na massa de aço do tipo CA60. Já para a eficiência bloco/alvenaria igual a 0,6 observa-se uma redução de 30,30% na massa de aço do tipo CA50 e uma redução de 27,59% na massa de aço do tipo CA60.

Cabe salientar que a redução estimada na demanda de aço do tipo CA50, que tem uso comercial, contempla a estimativa do aço empregado em apenas um painel de contraventamento, que apresenta rigidez relativa de apenas 9% e se repete 4 vezes na

planta baixa do edifício piloto, fato que nos permite concluir que o dimensionamento com base na tese de IZQUIERDO (2015) sugere uma economia significativa na quantidade demandada de aço nas obras de alvenaria estrutural com bloco de concreto.

## Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118: 2014 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6120: 1980 – Cargas para cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6123: 1988 – Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15961-1: 2011 – Alvenaria estrutural – Bloco de concreto. Rio de Janeiro, 2011.
- IZQUIERDO, O.S. Estudo da interface bloco/graute em alvenaria de blocos cerâmicos e de concreto. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2015.
- PARSEKIAN, G.A.; HAMID, A.A.; DRYSDALE, R.G. Comportamento e dimensionamento de alvenaria estrutural. São Carlos: EdUFSCar, 2012.
- SANTOS, P.V.S. Ações evolutivas em edifícios de paredes de concreto e de alvenaria, considerando a interação com o solo. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2016.
- SANTOS, P.V.S.; ARAGÃO, H.G. Avaliação das implicações técnicas promovidas pela introdução de estados limites no cálculo de alvenaria estrutural, 2014.