

## REFORÇO SÍSMICO DE EDIFÍCIOS – ANÁLISE DE UM CASO DE ESTUDO



Ana Carreira  
Assistente da  
Universidade do  
Algarve



Augusto Gomes  
Professor Auxiliar  
Departamento de  
Eng<sup>a</sup> Civil do IST

### SUMÁRIO

Neste artigo apresenta-se uma metodologia para o dimensionamento do reforço sísmico de edifícios existentes com estrutura de betão armado. Aplica-se o método a um caso de estudo real, para o qual se efectua uma análise de um conjunto de soluções de reforço, estabelecendo-se comparação entre as diversas respostas obtidas em termos de frequência, esforços e deslocamentos horizontais.

### 1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, tem-se verificado que muitas estruturas de betão não dúcteis apresentam severos danos, ou mesmo colapso, durante a ocorrência de fortes sismos, pelo que surge a necessidade de reparação e reforço de edifícios existentes. A Regulamentação Portuguesa no domínio das estruturas tem vindo a evoluir no sentido de agravar o valor das acções sísmicas a considerar no projecto e na introdução de novas regras de pormenorização dos elementos estruturais. Verifica-se constantemente que as estruturas dos edifícios existentes apresentam grandes deficiências ao nível da cintagem dos elementos estruturais e da amarração dos estribos e dos varões longitudinais nos nós. Perante estas situações justifica-se verificar se as estruturas existentes definidas nos regulamentos actuais resistem às acções, e se cumprem as disposições construtivas e caso seja necessário proceder ao reforço das mesmas.

Os procedimentos para estabelecer o diagnóstico e sugerir uma forma de intervenção de reforço para um dado tipo de edifícios é complexo e heterogéneo. Na selecção do tipo de reforço a aplicar numa estrutura tem de ser tomado em consideração não só o factor económico, mas também o interesse de minimizar o número de zonas de intervenção, de forma a tornar o menos impeditiva possível a utilização do edifício.

Os aspectos anteriormente referidos e o facto de actualmente ainda não existir regulamentação ao nível das técnicas de reforço, conduz a um dimensionamento destas soluções baseado unicamente em critérios de bom senso e na experiência prática de cada projectista. Esta situação traduz-se, muitas vezes, numa dificuldade, sentida por parte dos diferentes intervenientes num projecto de reforço, em escolher a técnica mais adequada a utilizar em cada tipo de estrutura.

## **2. METODOLOGIA ADOPTADA PARA O DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO DE EDIFÍCIOS**

As estruturas existentes construídas antes da entrada em vigor da actual regulamentação estão, naturalmente, dimensionadas e executadas segundo regras construtivas diferentes das hoje aplicadas. Por esta razão não é aceitável proceder da mesma forma na avaliação da capacidade resistente de uma estrutura existente e num projecto de uma estrutura nova.

Neste parágrafo apresenta-se a metodologia adoptada para a concepção do reforço de edifícios existentes com estrutura em betão armado, sujeitos à acção sísmica. O método de análise adoptado é constituído por duas fases, que a seguir se descrevem:

- avaliação da segurança dos edifícios existentes para a acção sísmica;
- dimensionamento e comparação das soluções de reforço.

Na fase de avaliação estrutural o primeiro objectivo consiste em verificar se a estrutura resiste às acções previstas no seu período de vida residual, de forma a excluir a hipótese de uma intervenção de reforço cujos custos são geralmente elevados. Caso se verifique ser necessário o reforço da estrutura, passa-se ao dimensionamento das soluções de reforço e à comparação destas em termos de comportamento sísmico e custos associados às mesmas.

O reforço de uma estrutura existente pode ser encarado em termos de resistência ou em termos de ductilidade. Em edifícios, devido à complexidade e ao elevado número de elementos estruturais é difícil optar pelo reforço através do aumento da ductilidade. Para obtermos resultados aceitáveis seria necessário intervir, praticamente, em toda a estrutura. Pelas razões expostas na metodologia desenvolvida o reforço é conseguida através do aumento da resistência da estrutura.

Assim, embora os critérios aplicados em cada uma das fases desta metodologia sejam diferentes, a avaliação da segurança em qualquer uma delas baseia-se na comparação entre a capacidade resistente disponível pela estrutura e a capacidade resistente exigida pela acção sísmica, independentemente segundo duas direcções ortogonais. Dada a complexidade das estruturas de edifícios a única solução possível para avaliar a sua segurança é através da força de corte em cada piso.

## 2.1. Avaliação da segurança dos edifícios existentes para a acção sísmica

A avaliação da segurança dos edifícios existentes à acção sísmica consiste em definir a relação entre a sua capacidade resistente e a acção sísmica regulamentar. Para tal, a metodologia adoptada baseia-se na comparação entre a força de corte basal total, ao nível do piso térreo, exigida pela combinação de acções que considera como acção de base o sismo e a força de corte basal total, ao nível do piso térreo, que a estrutura existente resiste. O nível de segurança das estruturas existentes é então definido pela expressão I, expressa em termos percentuais:

$$R_{\text{sismo}(n)} = 100 \times \frac{\sum_i V_{Rdi_n}}{\sum_i V_{Sdi_n}} \quad (\text{I})$$

Na expressão I,

- $R_{\text{sismo}}$  representa a resistência, em percentagem, da estrutura existente ao sismo de projecto regulamentar;
- $V_{Sdi}$  é a força de corte basal, ao nível do piso térreo, que a combinação de acções que considera como acção de base o sismo exige ao elemento vertical “i”. Para a determinação desta grandeza, optou-se por realizar uma análise elástica tridimensional baseada em espectros de resposta, cujos resultados dos esforços são obtidos dividindo os resultados desta análise pelo coeficiente de comportamento;
- $V_{Rdi}$  é a força de corte basal, ao nível das fundações, que o elemento vertical “i” tem capacidade para resistir. A quantificação das capacidades resistentes dos elementos é baseada nas secções existentes (geometria das secções e pormenorização das armaduras) e nos valores característicos dos materiais. Os valores de  $V_{Rdi}$  são determinados pela expressão II.

$$V_{Rdi} = \frac{M_{Rd}^{\text{inferior}} + M_{Rd}^{\text{superior}}}{h} \quad (\text{II})$$

Na expressão II,  $M_{Rd}^{\text{inferior}}$  e  $M_{Rd}^{\text{superior}}$  são os momentos resistentes nas extremidades do elemento vertical correspondentes a um andar e  $h$  é a altura do elemento.

Em certas estruturas, nomeadamente estruturas com paredes, os esforços máximos podem não surgir ao nível do piso térreo, pelo que a avaliação da segurança deverá ser realizada ao nível de todos os pisos das estruturas. Para tal propõe-se a utilização da expressão I a todos os níveis do edifício em análise.

Por aplicação da expressão I independentemente em duas direcções ortogonais é possível definir o nível de resistência (em termos globais) do edifício existente em cada uma das direcções e tomar a decisão se é necessário ou não proceder ao reforço da mesma.

## 2.2. Dimensionamento e comparação das soluções de reforço

O reforço de edifícios existentes para a acção sísmica consiste em introduzir, na estrutura, novos elementos resistentes ou reforçar os já existentes, de forma que globalmente esta passe a ter capacidade suficiente para resistir à totalidade das acções sísmicas regulamentares. A metodologia adoptada no dimensionamento das soluções de reforço é idêntica à definida para a avaliação das estruturas existentes à acção sísmica.

De acordo com o referido, a resistência da estrutura reforçada é avaliada através da força de corte basal ao nível do piso térreo e de todos os pisos superiores, por aplicação da expressão I. É de referir que nesta expressão os valores a considerar para  $V_{Rdi}$  e  $V_{Sdi}$  incluem os esforços dos elementos de reforço.

Para que seja viável a comparação entre as diferentes soluções de reforço adoptadas foi necessário definir um critério, que nesta metodologia, corresponde a que todas as soluções de reforço possuam capacidade de resistência à acção sísmica da ordem dos 100%. A satisfação deste critério envolve um processo iterativo que consiste em estudar um conjunto de soluções com distintos níveis de reforço até se atingir o nível de resistência desejado.

Através dos resultados obtidos da metodologia proposta é possível concluir quais as intervenções de reforço que conferem um melhor comportamento da estrutura para a acção sísmica.

## 3. CASO DE ESTUDO – APLICAÇÃO A UM EDIFÍCIO EXISTENTE

Neste parágrafo realiza-se o estudo de um edifício existente face à acção sísmica. Tendo-se observado que a segurança do mesmo era verificada apenas para níveis inferiores da acção sísmica regulamentar actuante definida pelo RSA [1], foi efectuada uma análise de um conjunto de soluções de reforço, estabelecendo-se comparação entre as diversas respostas obtidas em termos de frequência, esforços e deslocamentos horizontais. Neste estudo o objectivo fundamental foi a melhoria do comportamento sísmico das estruturas.

### 3.1. Descrição do edifício existente e características da estrutura

Trata-se de um edifício construído em 1958 em Faro, com 4 pisos que é destinado a habitação.

Os materiais utilizados na construção correspondem ao betão B20 e ao aço A235. Relativamente ao sistema estrutural propriamente dito, trata-se de uma estrutura em pórtico com lajes maciças de 0.13 m de espessura nos pisos intermédios e de 0.12 m de espessura na cobertura. As vigas apresentam secções diferentes e estão apoiadas em pilares de 3.6 m de comprimento entre as fundações e a primeira laje, e em pilares de 2.8 m entre as restantes

lajes (distâncias piso a piso). Estes por sua vez assentam em fundações directas constituídas por sapatas. Em seguida apresenta-se um esquema da estrutura do edifício (figuras 1 e 2) e das dimensões dos elementos estruturais (figura 3).

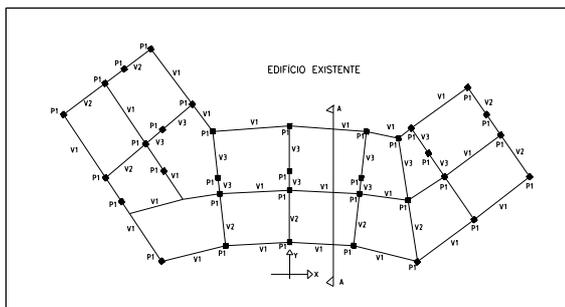


Figura 1: Planta estrutural do edifício existente

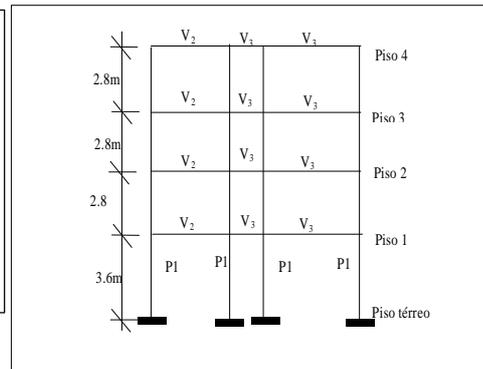


Figura 2: Corte A do edifício existente

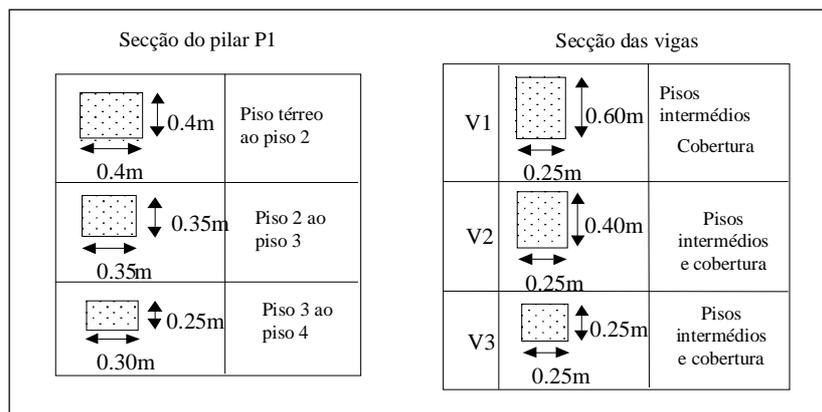


Figura 3: Secção dos pilares e das vigas da estrutura existente

### 3.2. Quantificação da acção sísmica e combinações de acções

Para simular a acção sísmica foi efectuada uma análise dinâmica linear tridimensional recorrendo a um programa comercial de cálculo automático [2]. A modelação da acção sísmica actuante na estrutura foi efectuada através dos espectros de resposta para a acção sísmica tipo 1 e tipo 2 do RSA [1].

As combinações de acções adoptadas são as preconizadas no RSA [1], que consideram como acção de base a acção sísmica e que se apresentam nas expressões seguintes:

$$\text{Combinação 1: } S_d = S_{Gk} + \gamma_q \times S_{Ek} + \psi_2 \times S_Q = S_{Gk} + 1,5S_{Ek} + 0,2 \times S_Q \quad (\text{III})$$

$$\text{Combinação 2: } S_d = S_{Gk} - \gamma_q \times S_{Ek} + \psi_2 \times S_Q = S_{Gk} - 1,5S_{Ek} + 0,2 \times S_Q \quad (\text{IV})$$

### 3.3. Avaliação da segurança do edifício existente

Das análises dinâmicas realizadas verificou-se que a frequência própria da estrutura existente é de 1,32Hz, pelo que a acção sísmica tipo 2 [1] é a mais gravosa para este edifício. A avaliação da segurança do edifício existente foi realizada de acordo com a metodologia apresentada no ponto 2.1 deste artigo. Pela aplicação da expressão I, ao nível do piso térreo, independentemente em duas direcções perpendiculares, chegou-se aos resultados apresentados na tabela 1, os quais correspondem à actuação da acção sísmica tipo 2.

Tabela 1: Resistência global da estrutura à acção sísmica tipo 2

Acção sísmica tipo 2 [1]				
	Combinação 1		Combinação 2	
	Direcção x	Direcção y	Direcção x	Direcção y
V <sub>sd</sub> (KN)	3383	4071	3382	4071
V <sub>Rd</sub> (KN)	1618	1618	1568	1568
Resistência ao sismo (%)	48%	40%	46%	39%

Tendo-se verificado que a resistência do edifício à acção sísmica é garantida para valores inferiores aos regulamentares (46% segundo a direcção X e 39% segundo a direcção Y), a avaliação da capacidade resistente do edifício constituiu a primeira fase do projecto de reforço do mesmo. Refere-se que para este edifício não foi necessário efectuar a avaliação da segurança ao nível dos pisos superiores, uma vez que se verificou logo no piso térreo que seria necessário proceder ao reforço do mesmo.

### 3.4. Dimensionamento das soluções de reforço do edifício existente

As intervenções de reforço propostas para esta análise comparativa são três, correspondendo duas delas a introdução de novos elementos resistentes (paredes de betão armado e elementos metálicos) e uma ao reforço dos elementos existentes. O procedimento adoptado para a concepção de cada uma das intervenções de reforço envolveu um processo iterativo, com o objectivo de se atingir níveis de resistência à acção sísmica da ordem dos 100% em todos os projectos de reforço, conforme o ponto 2.2. Destas análises chegou-se às soluções de reforço que a seguir se descrevem.

#### 3.4.1 Descrição e pormenorização das soluções de reforço

##### a) Reforço por introdução de paredes de betão armado

Esta intervenção de reforço consiste na introdução de duas paredes de betão armado (B25 e A400NR) com 2,4m de comprimento e 0,20m de espessura cada uma. As paredes situam-se

nas empenas do edifício e prolongam-se ao longo de toda a altura do edifício. Das análises efectuadas calculou-se as armaduras necessárias para os elementos de paredes tendo-se chegado à solução pormenorizada na figura 4.

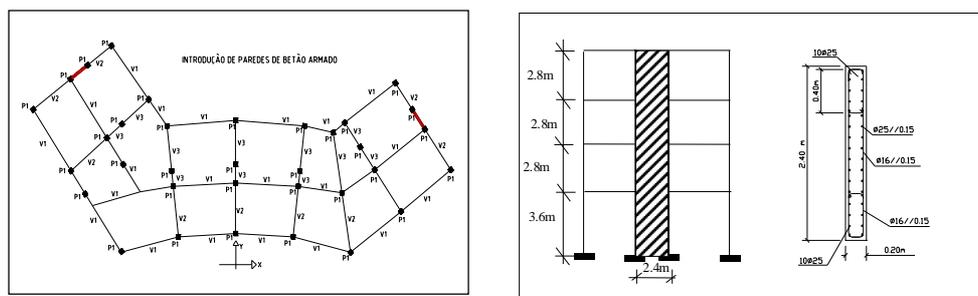


Figura 4: Pormenorização da solução de reforço com paredes de betão armado

b) Reforço por introdução de elementos metálicos

Este solução de reforço consiste na introdução de contraventamentos diagonais constituídos por elementos metálicos - perfis LNP80.8 [3] (aço Fe360) - em três pórticos de betão existentes, ao longo de toda a altura do edifício. Estes elementos de reforço vão absorver parte dos esforços sísmicos diminuindo, desta forma, os esforços nos elementos verticais existentes. Na figura 5 apresenta-se um pórtico da extremidade do edifício onde se esquematiza o contraventamento metálico. Indica-se, ainda na figura a secção do perfil utilizado no reforço.

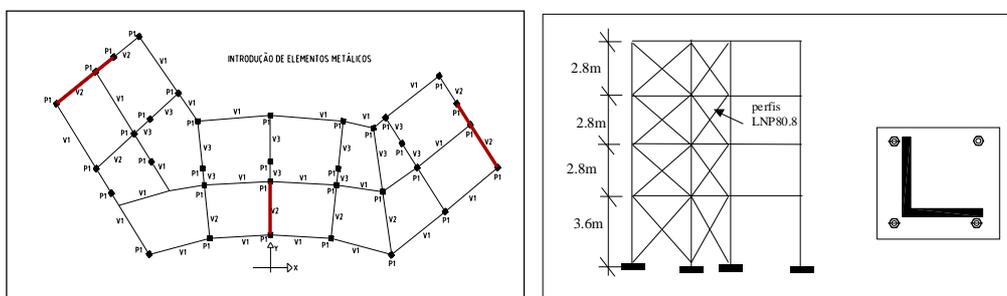


Figura 5: Pormenorização da solução de reforço com contraventamentos metálicos

c) Reforço por encamisamento dos pilares existentes

Esta solução de reforço consiste em aumentar as secções de alguns dos pilares existentes através da técnica de encamisamento com betão projectado. Desta forma provoca-se uma redistribuição de esforços na estrutura, passando os elementos reforçados a absorver grande parte dos mesmos. Os pilares reforçados passam a ter as secções apresentadas na tabela 2. Dos esforços obtidos das análises efectuadas, calculou-se as armaduras necessárias para os pilares reforçados, cuja pormenorização está esquematizada na figura 6.

Tabela 2: Secções dos pilares reforçados

	Secções da estrutura existente	Secções da estrutura reforçada
Piso térreo – piso 2	0,40m × 0,40m	0,80m × 0,40m
Piso 2 – piso 3	0,35m × 0,35m	0,75m × 0,35m
Piso 3 – piso 4	0,30m × 0,25m	0,75m × 0,35m

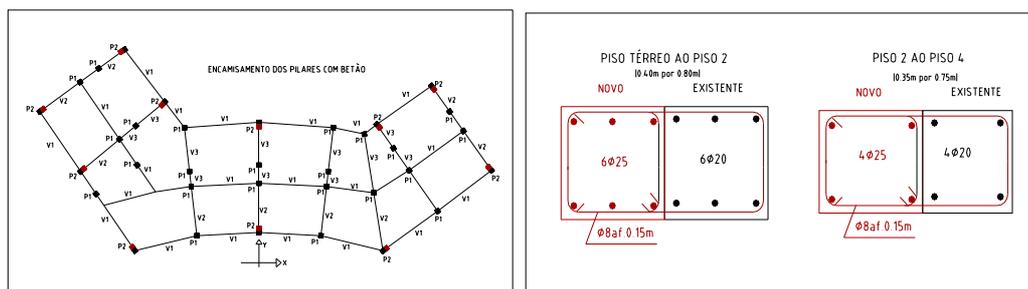


Figura 6: Pormenorização da solução de reforço por encamisamento dos pilares com betão

### 3.4.2 Comparação dos resultados obtidos das soluções de reforço

Neste parágrafo são analisados vários tipos de intervenção de reforço, para o edifício existente. Com o objectivo de definir a solução mais eficaz é realizada uma análise comparativa das frequências, deslocamentos e esforços das várias soluções de reforço.

#### a) Comparação de frequências das várias soluções de reforço

Neste parágrafo faz-se uma comparação entre as frequências de cada solução de reforço e as frequências da estrutura existente, correspondentes aos modos de translação segundo as direcções X e Y (tabela 3). As duas últimas colunas da tabela representam o acréscimo verificado no valor das frequências de cada solução de reforço relativamente à estrutura existente.

Tabela 3: Comparação de frequências das soluções de reforço propostas

Descrição da solução de reforço	Frequência modo X (HZ)	Frequência a modo Y (HZ)	Variação freq.x (%)	Variação freq.y (%)
Estrutura existente	1,58	1,32	-----	-----
Reforço da estrutura existente com a introdução de paredes de betão armado.	1,68	1,80	6%	36%
Reforço da estrutura existente com a introdução de elementos metálicos.	1,58	1,69	0%	28%

Reforço da estrutura existente por encamisamento dos pilares com betão.	2,02	1,61	28%	22%
---	------	------	-----	-----

Da análise da tabela 3 conclui-se que, a solução de reforço por encamisamento dos pilares é a que apresenta, em relação ao edifício existente, um maior aumento no valor da frequência correspondente ao modo segundo a direcção X. Relativamente à direcção Y, a solução que confere uma maior rigidez à estrutura existente é a que corresponde ao reforço com paredes de betão.

#### b) Comparação de deslocamentos das várias soluções de reforço

As análises efectuadas para a obtenção dos valores dos deslocamentos relativos entre pisos foram realizadas independentemente segundo duas direcções ortogonais. Os resultados das referidas análises apresentam-se em gráficos onde se inclui em simultâneo as respostas das três soluções de reforço, de forma a facilitar um estudo comparativo das mesmas.

Na figura 7 apresenta-se uma comparação para as três soluções de reforço, dos deslocamentos relativos entre pisos, do centro de massa da estrutura. Por análise das mesmas conclui-se que as soluções de reforço que conferem menores deslocamentos à estrutura segundo as direcções X e Y são, respectivamente, a solução de reforço por encamisamento dos pilares e a solução com introdução de paredes de betão.

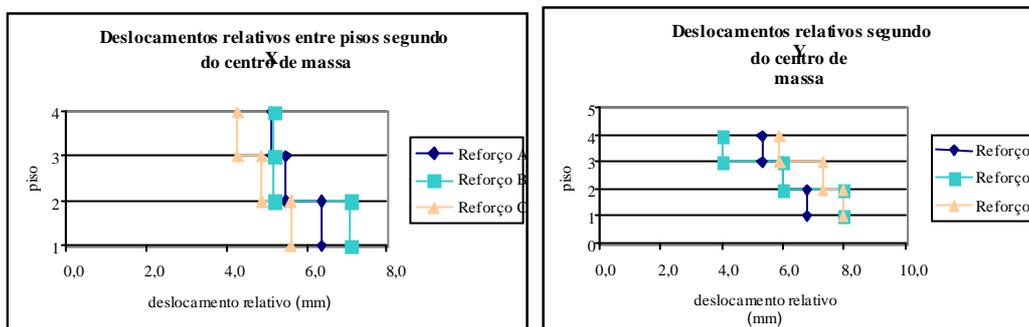


Figura 7: Deslocamentos relativos entre pisos do centro de massa das estruturas reforçadas

#### c) Comparação dos esforços entre as várias soluções de reforço

Realizou-se ao nível do piso térreo a comparação entre a força de corte basal total exigida à estrutura e a força de corte basal total absorvida pela mesma. Também neste processo realizaram-se análises independentes segundo as duas direcções ortogonais. É de referir que este estudo foi realizado para as combinações de acções 1 e 2 (expressões III e IV) e que se verificou que para todas as soluções de reforço a combinação condicionante é a tipo 1. Destas análises chegaram-se aos resultados apresentados na tabela 4, os quais correspondem à combinação de acções condicionante (tipo 1).

Como se observa da tabela 4 o nível de resistência à acção sísmica de projecto ao nível do piso térreo é próximo de 100% para todas as soluções de reforço. Este foi o critério utilizado para tornar possível uma comparação das soluções de reforço que fosse realista.

Tabela 4: Resistência global das soluções de reforço propostas, ao nível do piso térreo

		Reforço com paredes de betão	Reforço com contraventamentos metálicos	Reforço por encamisamento dos pilares
Força de corte exigida à estrutura ( $V_{sd}$ ).	Direcção X	2078 KN	2180 KN	1961 KN
	Direcção Y	2443 KN	2591 KN	2378 KN
Força de corte absorvida pela estrutura ( $V_{rd}$ ).	Direcção X	2206 KN	2490 KN	2070 KN
	Direcção Y	2588 KN	2909 KN	2379
Resistência ao sismo da estrutura reforçada (%)	Direcção X	106%	115%	106%
	Direcção Y	106%	112%	100%

Para verificar qual a variação em altura da relação  $V_{rd}/V_{sd}$  foi determinada a força de corte total exigida pela acção sísmica e disponível pela estrutura ao nível de todos os pisos da mesma. Na figura 8 apresenta-se graficamente esta relação para as direcções X e Y e para as soluções de reforço com paredes de betão (reforço A), com introdução de elementos metálicos (reforço B) e por encamisamento dos pilares (reforço C).

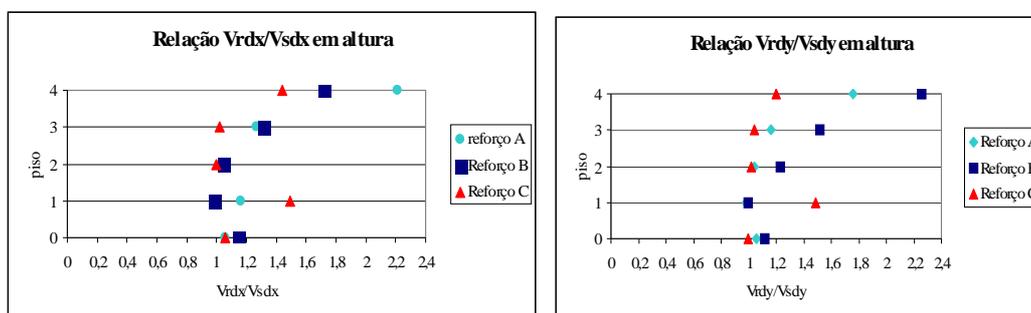


Figura 8: Relação  $V_{rd}/V_{sd}$  ao nível de todos os pisos do edifício, para as soluções de reforço

De uma maneira geral a resistência das estruturas reforçadas aumenta em altura (figura 8), sendo esta variação mais acentuada nas soluções com introdução de paredes de betão e com introdução de contraventamentos metálicos.

#### 4. REFERÊNCIAS

- [1] “Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes”, Imprensa Nacional- Casa da Moeda de Lisboa, 1984.
- [2] Manual do programa autoático SAP90
- [3] Eurocódigo 3 “Projecto de Estruturas de Aço”, Fevereiro de 1992.

REPAR2000 – Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas

Lisboa, LNEC, 14 a 17 de Junho de 2000