

ANÁLISE DE PROGRAMAS DE CÁLCULO PARA ESTRUTURAS DE ALVENARIA RESISTENTE



Ivone Maciel¹



Paulo Lourenço²

ivone@civil.uminho.pt pbl@civil.uminho.pt

¹ Mestranda e Bolseira de investigação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho

² Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho

RESUMO

A alvenaria como a técnica construtiva mais antiga da história da humanidade, tende a ressurgir após um período de domínio do aço e betão que levou à estagnação da sua utilização na construção civil. A investigação nesta área tem permitido caracterizar convenientemente, quer em termos mecânicos, quer funcionais, este tipo de solução estrutural, desenvolver novos materiais e novas técnicas construtivas. Neste artigo apresenta-se um estudo realizado sobre as metodologias de dimensionamento de uma selecção de programas de cálculo automático existentes no mercado para estruturas em alvenaria resistente não armada, permitindo deste modo avaliar a viabilidade da sua aplicação nacionalmente.

1. INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos tem-se vindo a observar uma rápida evolução dos meios informáticos, tornando-se o computador e os programas de cálculo automático ferramentas indispensáveis no projecto de estruturas. Apesar de permitirem uma maior rapidez na execução dos cálculos e, em princípio, uma maior precisão nos resultados, o projectista não pode aceitar passivamente as soluções obtidas. Os conhecimentos e sensibilidade estrutural do projectista são essenciais para prevenir erros grosseiros. No caso das estruturas de alvenaria, e face à menor utilização nacional, é importante conhecer as verificações e algoritmos de cálculo que estão escondidos sob um interface gráfico.

A avaliação de diferentes metodologias de dimensionamento de edifícios em alvenaria resistente, contribui para um conhecimento mais aprofundado do comportamento deste tipo de estruturas e permite definir as melhores ferramentas de análise. Para esse fim, efectuou-se uma pesquisa sobre os programas de dimensionamento de estruturas em alvenaria resistente existentes no mercado internacional, ver Quadro 1, tendo-se seleccionado três destes programas para análise. Os programas adoptados e analisados designaram-se por programa A, B e C. Este último apresenta duas versões de dimensionamento de estruturas em alvenaria, nomeadamente C.1 e C.2.

Salienta-se que os programas considerados permitem a definição total da estrutura e a introdução das suas características. A partir de uma modelação global é efectuado o dimensionamento de cada parede, quer para forças estáticas, quer para forças sísmicas.

2. DESCRIÇÃO DOS PROGRAMAS DE CÁLCULO AUTOMÁTICO

2.1 Programa A

O programa B é um *software* estrutural Italiano que efectua o dimensionamento de alvenaria resistente com bases nas seguintes normas italianas: norma geral para a construção em alvenaria D.M. 20.11.1987 e norma sísmica “*Ordinanza 3274/2003*”, com referência aos estados limites de dano e último, ou D.M. 1996.

2.2 Programa B

O programa B é um *software* estrutural Norueguês que efectua o dimensionamento segundo as normas Europeias (*Eurocódigo 6*) para estruturas de alvenaria armada, confinada ou simples. Para além do módulo de dimensionamento de alvenaria estrutural segundo Eurocódigo 6 (EC6), permite ainda efectuar o dimensionamento das lajes, vigas e/ou pilares segundo o Eurocódigo 2 e coberturas tipo em madeira segundo o Eurocódigo 5.

2.3 Programa C.1

O programa C.1 é um *software* estrutural Italiano que efectua o dimensionamento com base nas normas italianas, onde a norma sísmica adoptada é o D.M.'96, apresentando uma verificação sísmica baseada no desempenho da estrutura segundo a Circular nº 21745.

2.4 Programa C.2

O programa C.2 é um *software* estrutural Italiano que só efectua análises sísmicas, com base na norma “*Ordinanza 3274/2003*” e com referência aos estados limites de dano e último. O modelo gerado pelo programa recorre a pórticos equivalentes, no qual os “pilares” (barras verticais) são os troços contínuos das paredes resistentes e as “vigas” (barras horizontais) representam as zonas de parede acima e abaixo das aberturas. A intersecção entre elementos verticais e horizontais pode ser considerada infinitamente rígida.

O programa permite efectuar análises lineares, não lineares, estática e dinâmica. Para as análises não lineares, considera-se o comportamento elástico-plástico da estrutura.

3. VERIFICAÇÕES DE SEGURANÇA

Descrevem-se a seguir resumidamente as verificações tipo de segurança que os programas efectuam, salientando-se as diferenças entre a normativa adoptada.

3.1 Compressão vertical para acções estáticas

A verificação de segurança à compressão vertical por efeito das acções estáticas é realizada no programas A e no C.1 segundo o D.M.'87 e no programa B segundo o EC6. A tensão normal na parede deve ser igual ou inferior à tensão resistente de compressão apresentada na seguinte expressão:

$$\sigma_{Sd} = \frac{N_{Sd}}{\Phi \times A} \leq \sigma_{Rd} \quad [1]$$

em que: σ_{Sd} – valor de cálculo da tensão de compressão;
 N_{Sd} – valor de cálculo do esforço normal;
 Φ – coeficiente de redução, função da esbelteza e da excentricidade do carregamento;
 A – área transversal da parede;
 σ_{Rd} – valor de cálculo da resistência à compressão.

No programa A a combinação de acções considerada nesta verificação é a acção base sobrecarga, sendo possível definir a acção do vento e os coeficientes de combinação das acções. O programa B não permite definir a acção do vento, pelo que a verificação é realizada para a acção base sobrecarga sem vento com os coeficientes de combinação estabelecidos no Eurocódigo 1. O programa C.1 efectua a verificação à compressão para a acção base sobrecarga com vento e para a acção base vento com sobrecarga, com os coeficientes de combinação definidos no D.M.'87.

As secções onde é verificada a segurança à compressão são as seguintes: programa A – secção de base e intermédia; programa B – secção de topo, intermédia e de base; e programa C.1 – secção intermédia.

O coeficiente de redução da resistência é determinado de forma semelhante em todos os programas, recorrendo à respectiva norma. O programa A exige que o utilizador defina a excentricidade devida às acções verticais, enquanto nos restantes programas o cálculo desta excentricidade é automático.

A tensão normal de cálculo para a secção de base no programa B é determinada pelo método dos elementos finitos (M.E.F.), em estado plano de tensão, enquanto que nos restantes programas esta tensão resulta dos esforços normais devidos às acções verticais aplicadas superiormente.

Os programas efectuam ainda a verificação da esbelteza, sendo o valor máximo de 20 segundo a norma italiana D.M.'87 e de 27 segundo o EC6.

3.2 Flexão composta para acções estáticas no plano

A verificação da segurança para acções estáticas no plano é prescrita na norma italiana D.M.'87, consistindo numa verificação semelhante à verificação de segurança à compressão vertical, onde o valor de cálculo da tensão normal actuante vem majorado através de um novo coeficiente de redução da resistência:

$$\sigma_{Sd} = \frac{N_{Sd}}{\Phi_t \times \Phi_l \times A} \leq \sigma_{Rd} \quad [2]$$

em que: Φ_t e Φ_l – coeficientes de redução transversal e longitudinal, função da esbelteza e da excentricidade transversal e longitudinal (respectivamente) do carregamento.

Os programas que efectuem esta verificação são o A e o C.1, para a secção de base. Nesta verificação a acção do vento é considerada para o cálculo da excentricidade longitudinal, sendo o valor da excentricidade longitudinal limitado a $\frac{1}{3}$ do comprimento da secção transversal.

3.3 Corte para acções estáticas no plano

Os programas que efectuem a verificação de segurança ao corte no plano para as acções estáticas são o programa A e o programa C.1, segundo a norma D.M.'87. A verificação impõe que a acção horizontal de cálculo V_{Sd} seja inferior à resistência ao corte de cálculo V_{Rd} :

$$V_{Sd} \leq \frac{f_{vk}}{\gamma_M} \times A^* \quad [3]$$

em que: V_{Sd} – valor de cálculo da tensão de compressão;
 f_{vk} – valor característico da resistência ao corte da parede;
 γ_M – coeficiente parcial de segurança para o material;
 A^* – área transversal efectiva da parede.

A área da secção transversal da parede à compressão (ver Figura 1) é determinada aplicando um coeficiente à secção transversal total que tem em conta a eventual zona da parede sujeita a tracção:

$$\frac{6e_l}{l} \leq 1 \rightarrow \beta = 1$$

$$1 < \frac{6e_l}{l} \leq 1.3 \rightarrow \beta = \frac{3}{2} - \frac{3e_l}{l} \quad [4]$$

em que: e_l – excentricidade longitudinal;
 β – coeficiente de redução da área transversal;
 l – comprimento da parede.

3.4 Flexão composta para acções sísmicas fora do plano

A verificação de segurança sísmica à flexão composta é realizada em todos os programas analisados. No programa A e no programa C.2 esta verificação é efectuada com base na norma sísmica “*Ordinanza 3274/2003*” onde se deve verificar a seguinte condição:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad [5]$$

em que: M_{Sd} – valor de cálculo do momento flector actuante;
 M_{Rd} – valor de cálculo do momento flector resistente.

No programa B a verificação é efectuada segundo o EC6 (ver equação [1]) onde o coeficiente de redução da resistência é determinado em função da excentricidade que tem em conta a acção sísmica e a tensão normal de cálculo é determinada para a acção base sismo. No programa C.1 a norma sísmica utilizada para a verificação de segurança à flexão composta para acções fora do plano é o D.M.'96 que apenas difere da verificação segundo o EC6 na determinação da acção sísmica e nas combinações de acções consideradas.

Exceptuando o programa B que efectua a verificação nas secções de topo, intermédia e de base da parede, os restantes programas apenas verificam a secção intermédia pois é a secção que apresenta maior excentricidade devido às acções horizontais de carácter sísmico.

3.5 Corte para acções sísmica

A verificação sísmica ao corte é realizada no programa B, C.1 e C.2, consistindo na verificação da condição apresentada na equação [3], onde a tensão de corte de cálculo deverá ser inferior à tensão resistente de corte da alvenaria.

As normas sísmicas aplicadas nesta verificação dependem do programa, contudo baseiam-se no mesmo princípio de aplicação das forças horizontais equivalentes à acção sísmica no centro de massa de cada piso e na distribuição das mesmas pelas paredes em função da sua rigidez relativa. No programa B e no programa C.2 a tensão de corte de cálculo é obtida pelo M.E.F. para elementos planos e elementos de viga, respectivamente.

3.6 Flexão composta para acções sísmicas no plano

A verificação de segurança sísmica à flexão composta para acções no plano é efectuada no programa C.1 e no programa C.2 de acordo com a norma sísmica D.M.'96 e “*Ordinanza 3274/2003*” respectivamente. No programa C.2 os esforços são determinados pelo M.E.F. e a verificação consiste na obtenção de um factor de segurança (relação entre o esforço resistente ao corte e o esforço de corte actuante) superior a 1.0. No programa C.1 a verificação consiste em cumprir a condição apresentada na equação [2], onde a tensão normal de cálculo deverá ser inferior à tensão resistente de compressão da alvenaria.

3.7 Verificação de segurança com base na avaliação de desempenho da estrutura

A verificação de segurança da estrutura com base na avaliação de desempenho da mesma é efectuada no programa A e no programa C.2 através da análise sísmica estática não linear “*pushover*” com base na norma sísmica italiana “*Ordinanza 3274/2003*”. No programa C.1 é realizada também uma avaliação do desempenho da estrutura pelo método “*Por*” definido na circular italiana nº21745.

A diferença principal entre estes dois métodos é que a avaliação do comportamento é efectuada piso a piso no método *Por*, enquanto que pela análise “*pushover*” a curva obtida refere-se ao comportamento global da estrutura. Nestes métodos considera-se o comportamento elástico-plástico das paredes e a curva final representa a relação entre a força de corte basal e o deslocamento sofrido pela estrutura.

4. DIMENSIONAMENTO

Apresenta-se em seguida o dimensionamento de um edifício efectuado pelos programas analisados, com o objectivo de comparar os resultados. Numa primeira fase manteve-se as acções verticais constantes verificando para que nível da acção sísmica o edifício deixa de cumprir os requisitos de segurança e, numa segunda fase, na ausência de acção sísmica, aumentou-se o valor das acções verticais até ao limite a partir do qual o edifício deixa também de cumprir os requisitos de segurança.

A geometria adoptada para o edifício analisado é apresentada na Figura 2. O edifício possui dois pisos ($r/c + 1$) e é constituído por dois blocos de dimensões em planta $4.00 \times 6.00 \text{ m}^2$ e $5.00 \times 6.00 \text{ m}^2$, perfazendo uma área de 53.00 m^2 , em cada piso, com altura medida ao eixo das lajes de 3.00 m. As lajes são em betão armado com espessura de 0.20 m e as paredes têm uma espessura de 0.25 m, apresentando várias aberturas: duas janelas de dimensões de $1.00 \times 1.00 \text{ m}^2$ na direcção X e três portas com dimensões de $1.00 \times 2.00 \text{ m}^2$ na direcção Y.

4.1 Verificação de segurança para acção sísmica crescente

As acções aplicadas à estrutura foram as seguintes neste caso: acções permanentes nas lajes – 5 kN/m^2 ; peso próprio da alvenaria – 20 kN/m^3 ; acção sísmica crescente com períodos espectrais $T_B = 0.16\text{s}$, $T_C = 0.40\text{s}$ e $T_D = 2.40\text{s}$, com coeficiente de comportamento $q = 2.0$ (ver Eurocódigo 8). Para as propriedades mecânicas dos materiais adoptaram-se os seguintes valores: resistência característica à compressão da alvenaria – $f_k = 5 \text{ MPa}$; resistência característica ao corte sob compressão nula – $f_{vk0} = 0.15 \text{ MPa}$; módulo de elasticidade $E = 5 \text{ GPa}$; módulo de distorção $G = 2 \text{ GPa}$.

Nos Gráficos 1 a 3, efectua-se uma comparação em termos de aceleração máxima suportada pelo edifício obtida nos diferentes programas, para que todas as paredes resistentes satisfaçam as verificações de segurança e individualmente para cada tipo de análise sísmica efectuada.

Constata-se que a análise sísmica global de dimensionamento apresenta diferenças muito significativas nos diferentes programas, com referência aos valores máximos da aceleração sísmica, ver Gráfico 1. Para a análise sísmica não linear, os valores da aceleração máxima suportada pela estrutura são mais próximos, ver Gráfico 2. No entanto, a variação é ainda enorme (de 1.256 m/s^2 para 2.943 m/s^2 , ou de 1 para 2.3).

Finalmente, no Gráfico 3 apresenta-se uma comparação entre a aceleração máxima obtida pelas análises efectuadas pelo mesmo programa, utilizando a análise dinâmica recorrendo a forças horizontais equivalentes e a análise dinâmica modal. A diferença entre os valores máximos é também muito significativa (de 1 para 1.5).

Os resultados indicam que a modelação adoptada para o edifício e o tipo de análise estrutural adoptada possuem uma enorme diferença nos resultados, pelo que a sua selecção deverá ser cuidadosa em Portugal, onde a acção sísmica assume importância no dimensionamento das estruturas.

4.2 Verificação se segurança para acção vertical permanente crescente

As acções aplicadas à estrutura foram as seguintes neste caso: acções permanentes nas lajes – valor crescente; peso próprio da alvenaria – 20 kN/m^3 ; acção sísmica – nula. Mantiveram-se as propriedades mecânicas adoptadas anteriormente.

O Gráfico 4 mostra os resultados da acção permanente máxima na laje para os diferentes programas, de forma a cumprir todas as verificações. A discrepância de resultados é notória, com valores de 7.0 a 52.0 kN/m^2 (de 1 para 7.4). Estas diferenças são inaceitáveis, mesmo assumindo a realidade de diferentes modelações adoptadas.

5. CONCLUSÕES

Com o presente artigo pretendeu-se apresentar uma primeira avaliação de programas de cálculo automático de estruturas de alvenaria com os objectivos de permitir um conhecimento mais aprofundado do dimensionamento destas estruturas, verificar as diferenças nas abordagens de cálculo dos programas e discutir a variabilidade encontrada.

Conclui-se que os programas conduzem a diferenças muito significativas na capacidade resistente de um edifício analisado como exemplo, quer no caso de acções verticais, quer no caso da acção sísmica. Este resultado pode estar relacionado com a modelação adoptada para a estrutura, que num dos casos recorre ao método dos elementos finitos (estado plano de tensão), enquanto que nos outros casos se recorre a barras equivalentes ou elementos de viga. Adicionalmente, as diferenças nos resultados obtidos podem estar relacionado com as normas aplicadas, com o tipo de análise sísmica efectuada, com o modo de distribuição das acções, com os coeficientes de combinação de acções, e outras hipóteses que nem sempre estão claras para o utilizador. No entanto, as diferenças de resultados são inaceitáveis e prejudicam a utilização de ferramentas de cálculo automático no dimensionamento de estruturas de alvenaria.

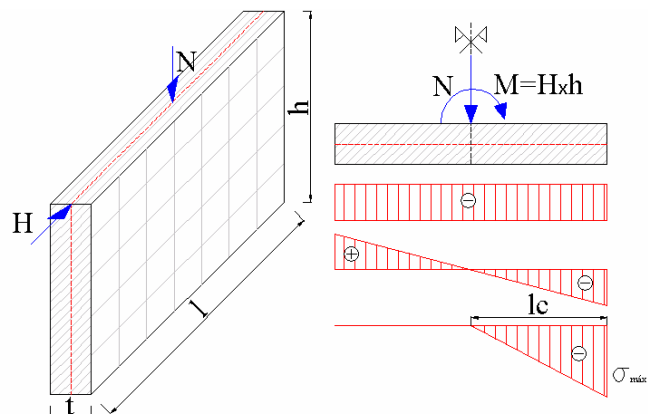


Figura 1 – Diagrama de esforços na secção longitudinal da parede devido às acções verticais e horizontais, caso o N actue fora do terço central.

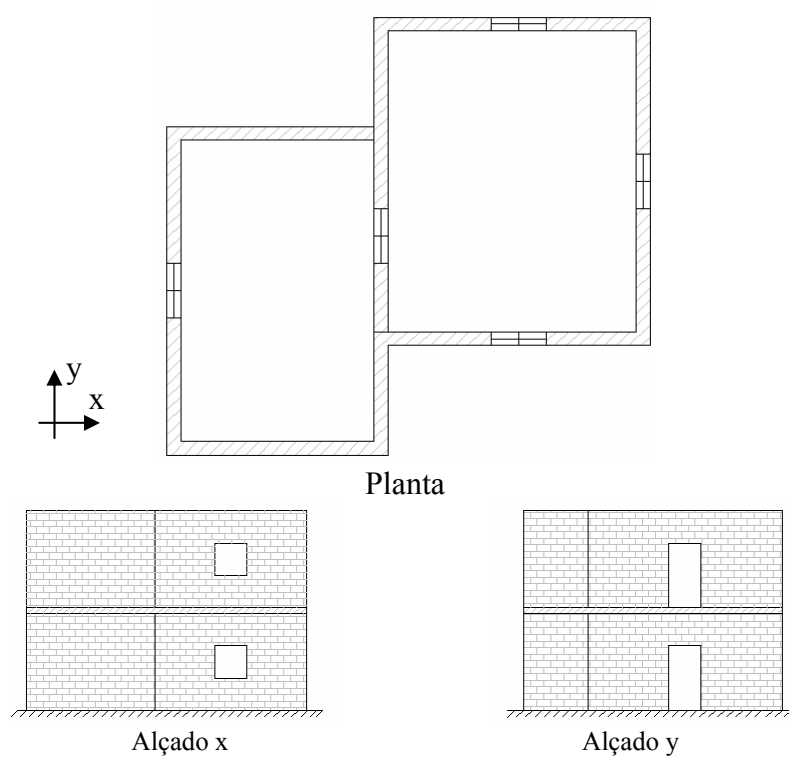


Figura 2 – Edifício adoptado no estudo comparativo.

Quadro 1 – Programas de dimensionamento de alvenaria estrutural.

Programa de cálculo	Língua	Regulamento adoptado	Endereço Web
AEDES	Italiano	Italiano	http://www.aedes.it/
CMT+L	Espanhol	EC6	http://www.arktec.com/cmtl.htm
CYPE	Português	EC6	http://cypecad.cype.pt/
FEDRA	Inglês	EC6	http://www.runet-software.com/1fedra.htm
Masonry design	Inglês	Norueguês	http://www.strusoft.com/default.asp
Por 2000	Italiano	Italiano	http://www.newsoft-eng.it/Por2000_eng.htm
TQS ALVEST	Português	Brasileiro	http://www.tqs.com.br/
TRICALC 13	Espanhol	EC6	http://www.arktec.com/new_t13.htm
TRICALC 17	Espanhol	EC6	http://www.arktec.com/portugal/new_t17p.htm
WinMason	Inglês	Americano	http://www.archonengineering.com/winmason.html
WinWall 2.5	Italiano	Italiano	http://www.crsoft.it/prodotti_winwall.html
3Muri	Italiano	Italiano	http://www.stadata.com/
ANDILWall	Italiano	Italiano	http://www.laterizio.it/
MURATS	Italiano	Italiano	http://www.softwareparadiso.it/murats.htm#Caratteristiche
Sismur2	Italiano	Italiano	http://www.franiac.it/sismur.html
TRAVILOG 2004 PRO	Italiano	Italiano	http://www.logical.it/2livello.asp?pag=murature
Tecnobit	Italiano	Italiano	http://www.tecnobit.info/products/murature.php
CDMaWin	Italiano	Italiano	http://www.stsweb.it/STSWeb/ITA/programmi/cdmwin.htm

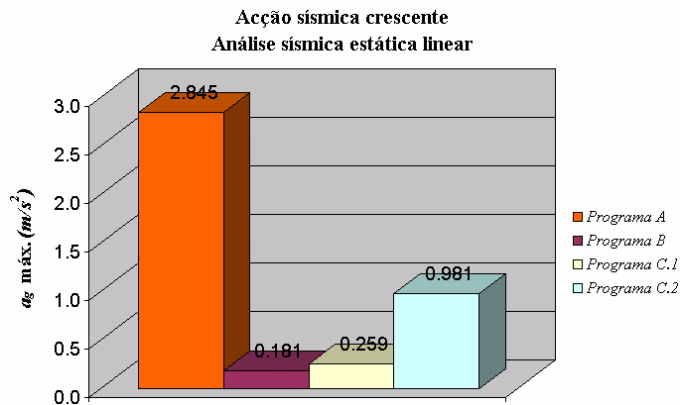


Gráfico 1 – Comparação entre a aceleração máxima (análise sísmica estática linear).

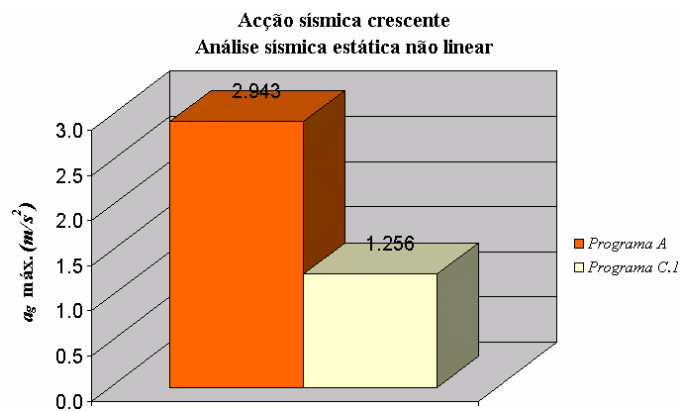


Gráfico 2 – Comparação entre a aceleração máxima (análise sísmica estática não linear).

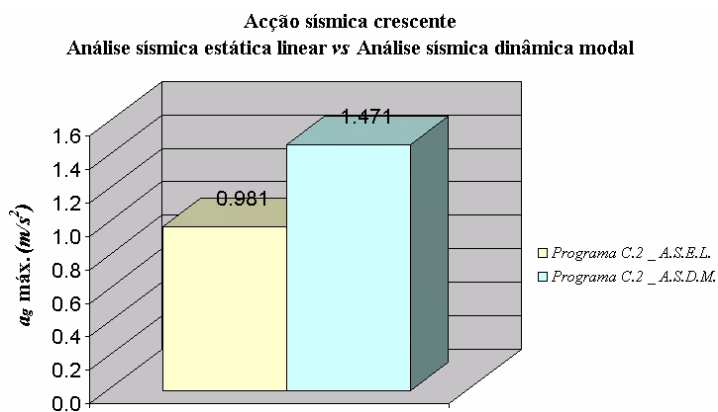


Gráfico 3 – Comparação entre a aceleração máxima (análise sísmica estática linear vs. análise dinâmica modal, programa C.2).

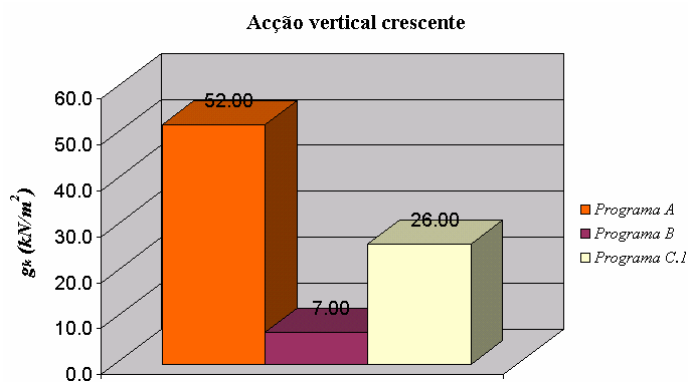


Gráfico 4 – Acção permanente vertical máxima.