

Cubica · Sísmico Expedito

Validação numérica do programa contra os casos de aplicação publicados

Métodos expeditos I e II para edifícios de alvenaria e de betão armado

Nota técnica · programa versão v0.34 · setembro de 2026 · Gonçalo Correia Lopes

Âmbito desta validação

Coberto por esta nota	Fora desta nota
Implementação das expressões e das tabelas dos Métodos I e II	Leitura do modelo BIM (paredes resistentes, pisos, áreas, pilares): validada à parte, em modelos de ensaio corridos no Revit
Capacidades de paredes e de pilares	Critérios de aplicabilidade que dependem de inspeção: regularidade, edifícios adjacentes, estado de conservação
Resultados por piso e veredictos	Propriedades dos materiais e armaduras do edifício avaliado: dados de entrada, da responsabilidade de quem avalia
Fórmulas das folhas de cálculo entregues ao utilizador	

Resumo

Esta nota documenta a verificação do programa Cubica · Sísmico Expedito contra os casos de aplicação com que os métodos expeditos de avaliação sísmica foram publicados pelo LNEC e pela SPES. Para a alvenaria usam-se os exemplos da Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas (Série III, n.º 12, 14 e 16); para o betão armado, o exemplo do Relatório LNEC 81/2019. Em cada caso, o programa recebe os mesmos dados que a publicação e os resultados são comparados valor a valor, piso a piso e veredicto a veredicto. A comparação é levada até às folhas de cálculo entregues ao utilizador, cujas fórmulas são recalculadas no Microsoft Excel e confrontadas com o motor de cálculo: no betão armado com o próprio caso publicado, na alvenaria com um edifício de ensaio, pelas razões expostas na secção 5. Nas capacidades de 14 tipos de parede o desvio máximo é de 2,49 %; na resistência ao corte por piso do edifício de alvenaria de 5 pisos, de 0,5 %; nas oito capacidades do pilar de betão armado de referência, de 0,15 kN; todos os veredictos publicados são reproduzidos. A nota delimita também o que esta verificação não cobre: a leitura dos dados de entrada a partir de um modelo BIM, que é objeto de validação separada.

1. Introdução

Os métodos expeditos permitem avaliar, com um número reduzido de dados, se um edifício existente satisfaz a exigência sísmica regulamentar ou se requer uma análise mais detalhada. Em Portugal, a Portaria n.º 302/2019 associa a esta avaliação uma consequência legal: quando a capacidade fica abaixo de 90 % da exigência, é obrigatória a elaboração de um projeto de reforço sísmico.

Um programa que automatiza estes métodos só merece confiança se reproduzir os casos com que eles foram publicados. Esta nota organiza essa demonstração em três níveis:

- elemento — as capacidades de cada parede ou pilar, comparadas com as tabelas publicadas;
- edifício — as grandezas por piso e os veredictos, comparados com os exemplos de aplicação;
- folha de cálculo — as fórmulas do ficheiro Excel entregue, recalculadas no Excel e comparadas com o motor.

O terceiro nível é o que distingue esta verificação de uma simples comparação de números. O relatório do programa não é uma impressão estática: as células são fórmulas, e o utilizador pode alterar a zona sísmica, o

tipo de terreno ou os materiais e ver o veredicto recalcular-se. Se essas fórmulas divergissem do motor, os valores lidos pelo utilizador deixariam de ser os valores verificados.

2. Enquadramento normativo e métodos implementados

2.1 Edifícios de alvenaria

Seguem-se as notas técnicas LNEC/SPES publicadas na RPEE [2–4], no quadro da NP EN 1998-3:2017, Anexo C [1]. O Método II compara, piso a piso, o coeficiente sísmico de capacidade corrigido com a exigência:

$$CS = V_{Rd} / W \quad CS_C = \alpha \cdot CS^{(1 - 1,50 \cdot CS)} \quad CS_{C,j} \geq \eta_j \cdot CS_E$$

A correção da expressão (3) tem constantes próprias para pavimentos rígidos ($\alpha = 0,50$, teto 0,52) [3] e flexíveis (Tabela 6) [4], e aplica-se ao coeficiente de cada piso. A resistência de cada parede é a menor de três capacidades — flexão, corte diagonal e deslizamento:

$$\begin{aligned} V_{fl} &= \sigma_0 \cdot t \cdot l^2 / (2 \cdot \alpha \cdot h) \cdot (1 - 1,15 \cdot \sigma_0 / f_k) \\ V_{cd} &= (f_{tk} \cdot l \cdot t / b) \cdot \sqrt{(1 + \sigma_0 / f_{tk})}, \quad b = \min(1,5; \max(1,0; h/l)) \\ V_{cl} &= l \cdot t \cdot (f_{v0k} + \mu \cdot \sigma_0), \quad \mu = 0,4 \end{aligned}$$

O Método I compara a área de paredes resistentes em cada direção com a exigência $A_{par}/A_{piso} \geq \alpha_E/\beta$, com $\beta = \min(2; f_{v0}/1,35/0,10)$.

2.2 Edifícios de betão armado

Seguem-se o Guião LNEC/SPES [6] e o Relatório LNEC 81/2019 [5]. O Método I verifica, em cada piso j , a área de pilares relativamente à área de implantação; o Método II soma, por piso e em cada direção, o menor dos esforços transversos resistentes por flexão e por corte:

$$\begin{aligned} 100 \cdot A_{PC,j} / A_{impl} &\geq \eta_j \cdot A_{PE} \\ V_{H,j} &= \Sigma \min(V_F; V_C) \quad CS_{C,j} = V_{H,j} / W_E \geq \eta_j \cdot CS_E \end{aligned}$$

As capacidades usadas são as expressões calibradas do método publicado [5], e não a expressão geral do EC8-3, que o próprio relatório considera desadequada para este fim e que o programa reporta apenas a título informativo:

$$\begin{aligned} V_F &= 1,24 \cdot (b \cdot h^2 \cdot \rho_l \cdot f_{yl} / L_v)^{0,73} \\ V_C &= 0,87 \cdot A_c \cdot (\tau_c \cdot [1 - 0,16 \cdot \min(5; L_v/h)] + \rho_w \cdot f_{yw} / 1,55), \quad \tau_c = 0,24 \text{ MPa} \end{aligned}$$

3. Metodologia de verificação

Todas as comparações são automáticas e refazíveis a partir do código do programa. Distinguem-se dois tipos de valor publicado, e a distinção importa:

- valores usados na calibração — os que serviram para confirmar a transcrição das expressões (Tabela 14, exemplo de 5 pisos, Pilar 20). Reproduzi-los mostra que as expressões foram bem transcritas;
- valores não usados na calibração — tabelas de resultados dos mesmos documentos que não intervieram na afinação (Tabelas 15, 16 e 17 da RPEE III-14; Tabelas 6.13 a 6.15 do Relatório 81/2019). Reproduzi-los é uma previsão, não um ajuste.

A tolerância de comparação é a do arredondamento com que cada tabela foi publicada (em regra, duas casas decimais nos coeficientes e uma nas forças). Os veredictos — verifica ou não verifica — têm de coincidir exatamente.

4. Caso 1 — Capacidade de 14 tipos de parede [RPEE III-14, Tabela 14]

A Tabela 14 publica, para catorze paredes do edifício de exemplo, as três capacidades resistentes, com $f_k = 4,0$ MPa, $f_{vk} = 0,20$ MPa e a tensão de compressão de cada parede. O programa recalcula-as com os mesmos dados. O Quadro 1 mostra a comparação completa.

Quadro 1 — Tabela 14: capacidades publicadas e calculadas pelo programa (kN)

#	t (m)	l (m)	h (m)	σ_o (MPa)	V_fl pub.	V_fl prog.	V_cd pub.	V_cd prog.	V_cl pub.	V_cl prog.
1	0,11	0,75	3	0,35	6,5	6,5	24,3	24,3	28,1	28,0
2	0,11	1,85	3	0,35	39,5	39,5	59,9	59,9	69,2	69,2
3	0,11	0,70	3	0,35	5,7	5,7	22,7	22,7	26,2	26,2
4	0,16	5,25	3	0,33	450,3	439,1	361,0	365,2	278,0	278,9
5	0,11	5,25	3	0,35	318,1	318,1	255,0	255,0	196,4	196,3
6	0,11	3,45	3	0,35	137,4	137,4	167,6	167,6	129,0	129,0
7	0,47	0,75	3	0,35	27,7	27,7	103,8	103,8	119,9	119,8
8	0,47	1,20	1	0,00	0,0	0,0	169,2	169,2	112,8	112,8
9	0,47	1,40	3	0,35	96,7	96,7	193,7	193,7	223,7	223,7
10	0,47	1,10	3	0,35	59,7	59,7	152,2	152,2	175,8	175,8
11	0,47	0,55	3	0,35	14,9	14,9	76,1	76,1	87,9	87,9
12	0,47	1,50	1	0,00	0,0	0,0	211,5	211,5	141,0	141,0
13	0,47	1,65	3	0,35	134,3	134,3	228,3	228,3	263,7	263,7
14	0,47	2,10	3	0,35	217,5	217,5	305,1	305,1	335,6	335,6

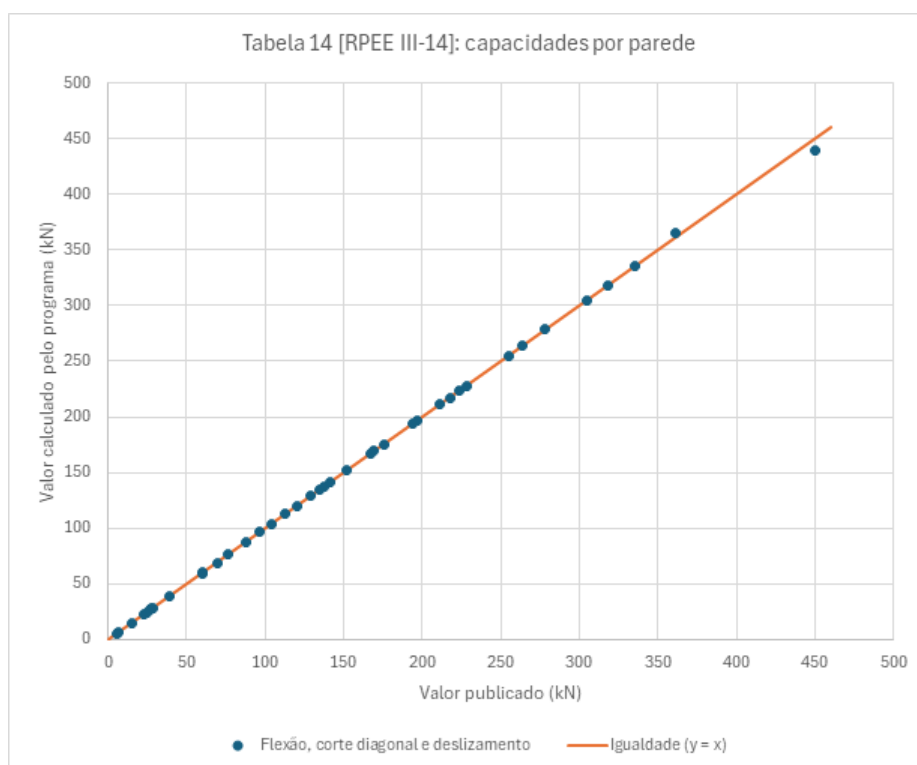


Figura 1 — Tabela 14: cada ponto é uma das capacidades publicadas (abscissa) e a calculada pelo programa (ordenada). Os pontos sobre a reta $y = x$ coincidem.

Treze das catorze paredes coincidem à décima de kN nas três capacidades. A exceção é a parede 4, onde o desvio máximo — 2,49 % na capacidade por flexão — decorre da tensão de compressão publicada para essa

parede (0,33 MPa), ela própria arredondada. A capacidade condicionante dessa parede, a de deslizamento, difere apenas 0,3 %.

5. Caso 2 — Edifício de alvenaria de 5 pisos [RPEE III-14 e III-16]

O exemplo de aplicação dos dois artigos é o mesmo edifício: 5 pisos, 156,25 m² de planta, em Lisboa (zona 1.3), terreno tipo B, avaliado uma vez com pavimentos rígidos [3] e outra com flexíveis [4]. A massa total é 850 t e a tensão de compressão é declarada no artigo como 0,07 MPa por piso acima.

Delimitação importante. A publicação fornece as paredes da direção X e o perfil de tensões declarado, mas não o edifício completo em ambas as direções. O programa recebe exatamente esses dados. Uma leitura do edifício a partir de um modelo BIM, com as paredes das duas direções a partilharem a carga, conduziria a tensões diferentes das declaradas e não seria, por isso, o mesmo caso.

Quadro 2 — Resistência ao corte e coeficiente corrigido por piso (pavimento rígido, Tabela 16)

Piso	σ_o (MPa)	V_Rd,j pub. (kN)	V_Rd,j prog. (kN)	Desvio	CS_C,j pub.	CS_C,j prog.
1	0,35	2470	2475	0,2 %	0,25	0,255
2	0,28	2210	2213	0,1 %	0,22	0,225
3	0,21	1925	1931	0,3 %	0,19	0,193
4	0,14	1600	1608	0,5 %	0,15	0,155
5	0,07	1180	1180	0,0 %	0,11	0,107

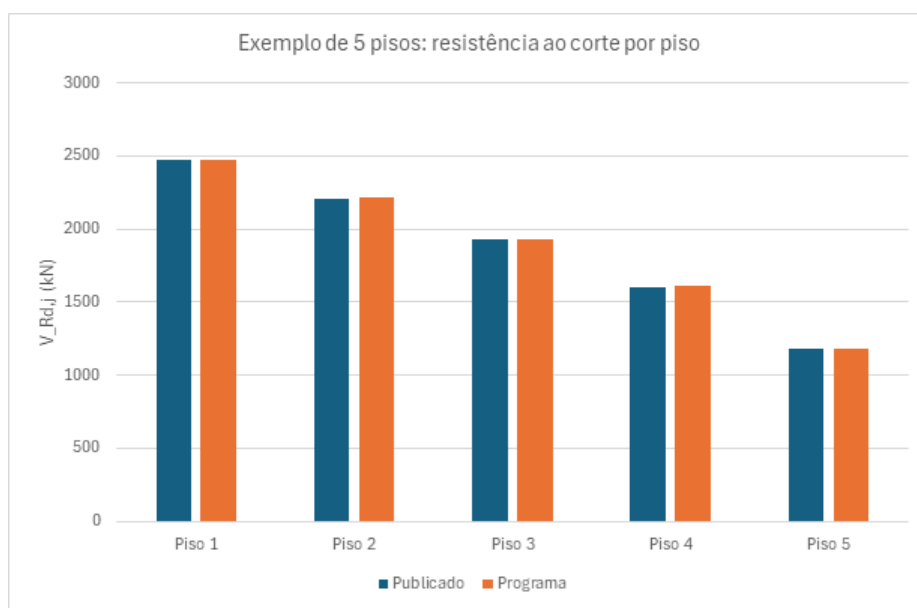


Figura 2 — Resistência ao corte por piso: valores publicados e calculados pelo programa.

Quadro 3 — Exigência por piso e grandezas do Método I

Grandeza	Publicado	Programa
V_Rd na base (kN)	2470	2475
CS_C, pavimento flexível [4]	0,23	0,235
CS_C, pavimento rígido [3]	0,25	0,255
CS_E,j piso 1 (zona 1.3) — Tabela 17	0,21	0,21
CS_E,j piso 2 (zona 1.3) — Tabela 17	0,19	0,19
CS_E,j piso 3 (zona 1.3) — Tabela 17	0,16	0,16
CS_E,j piso 4 (zona 1.3) — Tabela 17	0,13	0,13

Grandeza	Publicado	Programa
CS_E,j piso 5 (zona 1.3) — Tabela 17	0,09	0,09
α_E (zona 1.3, 5 pisos, terreno B)	0,14	0,14
$\beta = f_{v0}/1,35/0,10$	1,48	1,4815
$A_{paredes}/A_{piso} = 13,5/156,25$	0,086	0,0866

A Tabela 16 é a verificação mais exigente deste caso, porque não basta acertar no total: a correção da expressão (3) tem de ser aplicada ao coeficiente de cada piso separadamente. Aplicada uma única vez ao piso da base e escalada em altura, a mesma expressão reproduziria a base mas daria 0,12 no último piso, em vez dos 0,11 publicados.

Este caso é verificado ao nível do motor de cálculo e não através da folha de cálculo, e a razão deve ficar registada. A folha de cálculo do programa determina σ_0 a partir do peso por piso e da área de todas as paredes do piso, nas duas direções, e o mesmo peso entra no coeficiente CS. A publicação fornece as paredes da direção X (13,53 m² por piso), a tensão declarada e a massa total, mas não as paredes da direção Y. Com esses dados não existe um peso por piso que satisfaça as duas condições: reproduzir a tensão declarada exigiria 947 kN por piso, e reproduzir a massa publicada exige 1668 kN. Apresentar uma folha de cálculo deste exemplo obrigaria a inventar a direção Y, e por isso não se apresenta. Num edifício real, lido de um modelo com as paredes das duas direções, as duas grandezas são coerentes por construção.

Listagem 1 — Saída do programa (verif_publicados.py) para as Tabelas 15 a 19 da RPEE III-14

B) ALVENARIA — Tab.15/17/19 do RPEE III-14 (exemplo 5 pisos, Lisboa, solo B)

```

OK | Tab.15 zona 1.1: CS_E=0.30 (motor 0.30)
OK | Tab.15 zona 1.2: CS_E=0.26 (motor 0.26)
OK | Tab.15 zona 1.3: CS_E=0.21 (motor 0.21)
OK | Tab.15 zona 1.4: CS_E=0.17 (motor 0.17)
OK | Tab.15 zona 1.5: CS_E=0.10 (motor 0.10)
OK | Tab.15 zona 1.6: CS_E=0.05 (motor 0.05)
OK | Tab.15 zona 2.1: CS_E=0.19 (motor 0.19)
OK | Tab.15 zona 2.2: CS_E=0.16 (motor 0.16)
OK | Tab.15 zona 2.3: CS_E=0.17 (motor 0.17)
OK | Tab.15 zona 2.4: CS_E=0.11 (motor 0.11)
OK | Tab.15 zona 2.5: CS_E=0.08 (motor 0.08)
-- veredictos Tab.15 com CS_C=0.25 (publicado) --
zona 1.1 CS_E=0.30 -> NAO
zona 1.2 CS_E=0.26 -> NAO
zona 1.3 CS_E=0.21 -> VERIFICA
zona 1.4 CS_E=0.17 -> VERIFICA
zona 1.5 CS_E=0.10 -> VERIFICA
zona 1.6 CS_E=0.05 -> VERIFICA
zona 2.1 CS_E=0.19 -> VERIFICA
zona 2.2 CS_E=0.16 -> VERIFICA
zona 2.3 CS_E=0.17 -> VERIFICA
zona 2.4 CS_E=0.11 -> VERIFICA
zona 2.5 CS_E=0.08 -> VERIFICA
-- Tab.16: expr.(3) por piso com os Vrd_j publicados --
OK | Vrd=2470 kN -> CS_C=0.25 (motor 0.2543)
OK | Vrd=2210 kN -> CS_C=0.22 (motor 0.2247)
OK | Vrd=1925 kN -> CS_C=0.19 (motor 0.1918)
OK | Vrd=1600 kN -> CS_C=0.15 (motor 0.1543)
OK | Vrd=1180 kN -> CS_C=0.11 (motor 0.1072)
-- Tab.17: CS_E,j = eta_j*CS_E (zona 1.3, 5 pisos, solo B) --
OK | piso 1: CS_E,j=0.21 (motor 0.21)
OK | piso 2: CS_E,j=0.19 (motor 0.19)
OK | piso 3: CS_E,j=0.16 (motor 0.16)
OK | piso 4: CS_E,j=0.13 (motor 0.13)
OK | piso 5: CS_E,j=0.09 (motor 0.09)
-- Tab.18/19: Metodo I (flexivel? nao: III-14 = rigido) --
OK | beta = f_v0/1.35/0.10 = 1.4815 (publicado 1.48)
OK | alpha_E rigido (1.3, 5 pisos, B) = 0.14 (Tab.11: 0.14)
OK | A_PC/A_piso = 13.5/156.25 = 0.0864 (publicado 0.086)

```

Quadro 4 — Exigência de referência CS_E por zona sísmica (5 pisos, terreno B) — Tabela 15

Zona	CS_E publicado	CS_E programa	Veredicto com CS_C = 0,25
1.1	0,30	0,30	não verifica
1.2	0,26	0,26	não verifica
1.3	0,21	0,21	verifica
1.4	0,17	0,17	verifica
1.5	0,10	0,10	verifica
1.6	0,05	0,05	verifica
2.1	0,19	0,19	verifica
2.2	0,16	0,16	verifica
2.3	0,17	0,17	verifica
2.4	0,11	0,11	verifica
2.5	0,08	0,08	verifica

6. Caso 3 — Edifício de betão armado [Relatório LNEC 81/2019]

6.1 Pilar 20: capacidades por flexão e por corte

O relatório detalha o cálculo das capacidades de um pilar de referência (Pilar 20) — secção $0,20 \times 0,40$ m nos pisos 2 a 4 e $0,20 \times 0,50$ m no piso 1, aço A400 com tensão média de 440 MPa. O programa recalcula as oito capacidades publicadas nas Tabelas 6.10 e 6.11.

Quadro 5 — Pilar 20: capacidades publicadas e calculadas (kN)

Grandeza	Publicado	Programa	Diferença
V_F, direção x, pisos 2–4	22,5	22,51	0,01
V_F, direção y, pisos 2–4	37,4	37,33	0,07
V_C, direção x, pisos 2–4	31,3	31,27	0,03
V_C, direção y, pisos 2–4	43,9	43,92	0,02
V_F, direção x, piso 1	21,0	20,93	0,07
V_F, direção y, piso 1	41,0	40,85	0,15
V_C, direção x, piso 1	32,1	32,11	0,01
V_C, direção y, piso 1	56,4	56,41	0,01

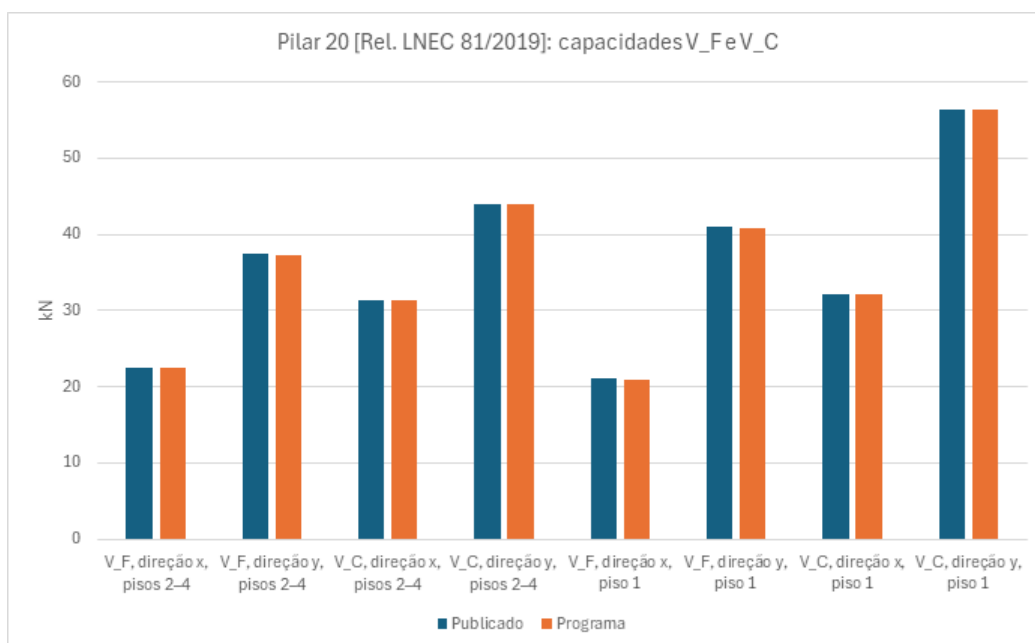


Figura 3 — Pilar 20: as oito capacidades publicadas e as calculadas pelo programa.

A diferença máxima é de 0,15 kN. Como contraprova, o programa verifica que a expressão geral do EC8-3 não reproduz esta tabela: afasta-se do valor publicado em mais de 15 %, o que confirma que as expressões calibradas e a expressão geral são formulações distintas e não intermutáveis.

6.2 Coeficiente sísmico por piso e por direção (Tabela 6.13)

Quadro 6 — Tabela 6.13: coeficiente de capacidade por piso e direção ($W_E = 9600$ kN)

Piso	V_H,x (kN)	V_H,y (kN)	CS_C,x pub.	CS_C,x prog.	CS_C,y pub.	CS_C,y prog.	Mínimo
1	732	1127	0,08	0,08	0,12	0,12	0,08
2	542	923	0,06	0,06	0,10	0,10	0,06
3	513	835	0,05	0,05	0,09	0,09	0,05
4	488	781	0,05	0,05	0,08	0,08	0,05

6.3 Exigência e veredicto por zona sísmica (Tabelas 6.14 e 6.15)

Quadro 7 — Tabelas 6.14 e 6.15: área de pilares exigida e veredicto por zona (4 pisos, terreno B)

Zona	A_PE pub. (%)	A_PE prog. (%)	Veredicto publicado	Veredicto do programa
1.1	3,6	3,6	não verifica	não verifica
1.3	2,1	2,1	não verifica	não verifica
1.5	0,6	0,6	verifica	verifica
1.6	0,3	0,3	verifica	verifica

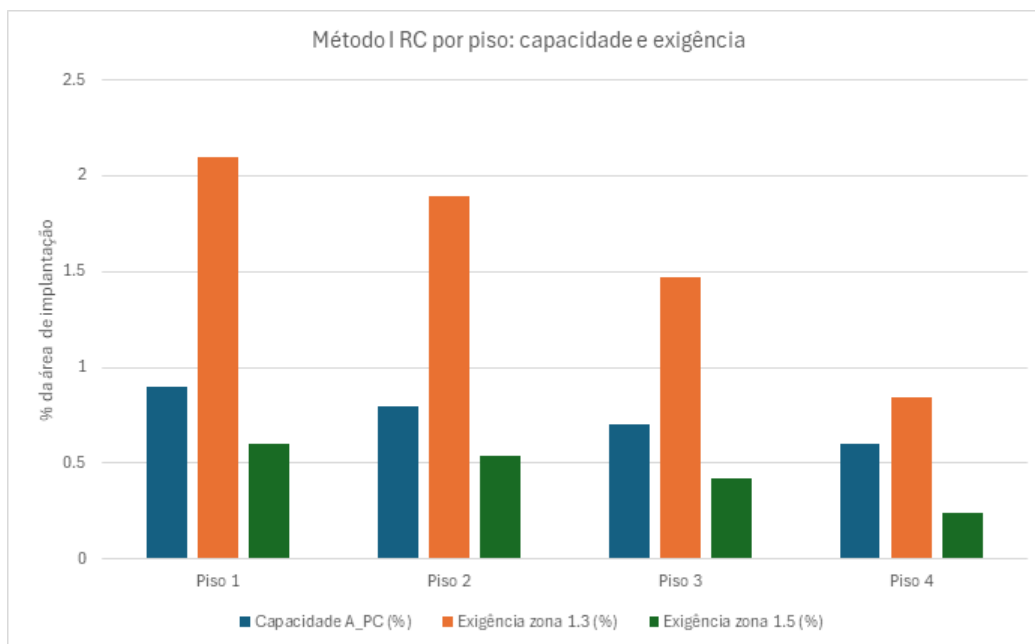
As dezasseis exigências da Tabela 6.14 (quatro zonas × quatro pisos) coincidem às duas casas decimais publicadas, e os quatro veredictos coincidem.

6.4 Método I por piso, corrido de ponta a ponta (Tabela 6.18)

Este é o caso de betão armado que atravessa o programa completo, até ao relatório. O exemplo publicado dá a área de pilares de cada piso em percentagem da área de implantação — 0,9 %, 0,8 %, 0,7 % e 0,6 % — e o método usa apenas essa área. No programa, cada piso foi introduzido com secções correntes (0,30 × 0,30 m e 0,20 × 0,20 m) cuja soma é exatamente a área publicada.

Quadro 8 — Método I por piso: capacidade e exigência (% da área de implantação)

Piso	Capacidade	Exigência zona 1.3	Verifica 1.3	Exigência zona 1.5 pub.	Exigência zona 1.5 prog.	Verifica 1.5
1	0,90	2,10	não	0,60	0,60	sim
2	0,80	1,89	não	0,54	0,54	sim
3	0,70	1,47	não	0,42	0,42	sim
4	0,60	0,84	não	0,24	0,24	sim

**Figura 4 — Método I por piso: a capacidade fica abaixo da exigência da zona 1.3 em todos os pisos e acima da da zona 1.5.**

O veredicto publicado — não verifica na zona 1.3, verifica na zona 1.5 — é reproduzido. As Figuras seguintes são o relatório do programa para as duas zonas. Antes de serem impressas, as duas folhas foram recalculadas no Microsoft Excel com os valores em cache removidos: as 120 células com fórmula coincidem todas com o motor. O que as figuras mostram é, portanto, o que a folha calcula, e não uma cópia dos resultados do motor.

Método I RC · área de pilares por piso vs exigência

Cláusulas: Guião LNEC/SPES §3.2.3, expr.(13) $A_{PC,j}/A_{impl} \geq A_{PE,j}$ e expr.(14) $A_{PE,j} = \eta_j \cdot A_{PE}$ (Tab.3.6 + Tab.3.2); Rel.81/2019 expr.(47)/(50), Tab.5.7/5.8. A área de pilares é a de CADA piso j — nunca a soma de todos os pisos.

Piso	A_pil,j [m²]	capacidade [%]	η_j	exigido $\eta_j \cdot A_{PE}$ [%]	veredicto
1	0.900	0.900	1.00	2.100	VERMELHO
2	0.800	0.800	0.90	1.890	VERMELHO
3	0.700	0.700	0.70	1.470	VERMELHO
4	0.600	0.600	0.40	0.840	VERMELHO

Método I RC — global (todos os pisos)

VERMELHO

Índice de pórtico: conta só pilares (StructuralColumns). Paredes de betão não somam (aba Pilares). Edifício dominado por paredes → Método II/III. Falha no Método I (crivo conservador) → recorrer ao Método II RC.

Figura 5 — Folha «Método I RC» do relatório do programa, zona 1.3: não verifica em nenhum piso.

Método I RC · área de pilares por piso vs exigência

Cláusulas: Guião LNEC/SPES §3.2.3, expr.(13) $A_{PC,j}/A_{impl} \geq A_{PE,j}$ e expr.(14) $A_{PE,j} = \eta_j \cdot A_{PE}$ (Tab.3.6 + Tab.3.2); Rel.81/2019 expr.(47)/(50), Tab.5.7/5.8. A área de pilares é a de CADA piso j — nunca a soma de todos os pisos.

Piso	$A_{pil,j}$ [m ²]	capacidade [%]	η_j	exigido $\eta_j \cdot A_{PE}$ [%]	veredicto
1	0.900	0.900	1.00	0.600	VERDE
2	0.800	0.800	0.90	0.540	VERDE
3	0.700	0.700	0.70	0.420	VERDE
4	0.600	0.600	0.40	0.240	VERDE

Método I RC — global (todos os pisos)**VERDE**

Índice de pórtico: conta só pilares (StructuralColumns). Paredes de betão não somam (aba Pilares). Edifício dominado por paredes → Método II/III. Falha no Método I (crivo conservador) → recorrer ao Método II RC.

Figura 6 — Folha «Método I RC» do relatório do programa, zona 1.5: verifica em todos os pisos.

Como contraprova, o programa verifica que somar a área de pilares de todos os pisos num único valor — em vez de a verificar piso a piso — inverteria o veredicto da zona 1.3 (3,0 % $\geq$ 2,1 %), produzindo uma aprovação indevida.

7. Das expressões às folhas de cálculo

Os valores dos capítulos anteriores são do motor de cálculo. Resta demonstrar que o relatório em Excel entregue ao utilizador reproduz o motor. O procedimento é mecânico: geram-se os livros, removem-se os valores em cache de todas as células com fórmula, o Microsoft Excel recalcula-os, e os resultados são comparados célula a célula com o motor. Esta verificação faz parte da bateria de testes do programa e corre, em cada versão, sobre dois edifícios de ensaio, um de cada material; o caso publicado de betão armado foi, além disso, verificado da mesma forma (secção 6.4).

Quadro 9 — Recálculo das fórmulas das folhas de cálculo no Microsoft Excel

	Alvenaria	Betão armado
Fórmulas recalculadas	117	108
Dentro do arredondamento do valor em cache	97	96
Iguais a menos de 0,5 %	6	0
Veredictos idênticos	14	12
Divergentes	0	0

Não há fórmulas divergentes, e os veredictos coincidem sem tolerância. Os desvios inferiores a 0,5 % resultam de os dados geométricos serem gravados com três casas decimais.

8. Âmbito e limitações

Esta verificação demonstra que os métodos publicados estão corretamente implementados e que as folhas de cálculo os reproduzem. Tem os seguintes limites, que devem ser tidos em conta na leitura de qualquer resultado do programa:

- Leitura do modelo BIM. Os casos publicados fornecem os dados de entrada já definidos. Num modelo de projeto, o programa deriva-os da geometria — paredes resistentes, pisos, áreas, pilares. Essa camada não é coberta por esta nota: está a ser validada à parte, em modelos de ensaio corridos no Revit. O

relatório assinala sempre os dados que teve de estimar, com o critério usado, e sai a vermelho quando a contagem dos elementos lidos não fecha.

- Domínio de aplicação. É o dos métodos publicados: alvenaria tradicional ou betão armado, classe de importância I ou II, até 5 pisos em alvenaria e 4 em betão armado, área em planta até 350 m² e 400 m² respetivamente, terrenos A, B ou C, e regularidade em planta e em altura. Fora deste domínio, o programa não emite veredicto favorável.
- Território. As tabelas de exigência derivam do Anexo Nacional português (período de retorno de 308 anos). O programa recusa-se a calcular fora de Portugal.
- Responsabilidade técnica. Os métodos são expeditos por definição: avaliam com poucos dados, dentro do seu domínio. Nenhum resultado dispensa a apreciação do engenheiro que assina o relatório, em particular quando dele decorre a obrigação legal de um projeto de reforço.

9. Conclusões

O programa reproduz os casos de aplicação publicados dos dois materiais: as capacidades de 14 tipos de parede, com desvio máximo de 2,49 % devido a um valor de entrada publicado arredondado; a resistência e o coeficiente corrigido piso a piso do edifício de alvenaria de 5 pisos; as oito capacidades do Pilar 20, com diferença máxima de 0,15 kN; e as exigências e veredictos por zona sísmica do edifício de betão armado, incluindo valores que não intervieram na calibração. As folhas de cálculo entregues reproduzem o motor em todas as fórmulas recalculadas, sem divergências e com veredictos idênticos.

Anexo — Reprodução das verificações

As verificações correm a partir do código-fonte do programa, sem dependências externas (o recálculo das folhas exige Microsoft Excel ou LibreOffice):

```
python cubica_sismico_core.py
python cubica_betao_core.py
python verif_publicados.py
python verif_literatura.py
python prova_excel.py
```

Excerto da saída de verif_publicados.py para o betão armado (valores publicados não usados na calibração; a parte da alvenaria está na Listagem 1):

```
=====
A) BETAO – Tab.6.13/6.14 do Rel.81 (capacidades PUBLICADAS, nao calculadas)
=====
OK | piso 4: V_H/W_E(=9600) reproduz CS_C,x=0.05 e CS_C,y=0.08
OK | piso 4: CS_C publicado (0.05) = MIN das duas direccoes
OK | piso 3: V_H/W_E(=9600) reproduz CS_C,x=0.05 e CS_C,y=0.09
OK | piso 3: CS_C publicado (0.05) = MIN das duas direccoes
OK | piso 2: V_H/W_E(=9600) reproduz CS_C,x=0.06 e CS_C,y=0.10
OK | piso 2: CS_C publicado (0.06) = MIN das duas direccoes
OK | piso 1: V_H/W_E(=9600) reproduz CS_C,x=0.08 e CS_C,y=0.12
OK | piso 1: CS_C publicado (0.08) = MIN das duas direccoes
OK | Tab.6.14 zona 1.1 piso 1: exigencia 0.27 (motor 0.27)
OK | Tab.6.14 zona 1.1 piso 2: exigencia 0.24 (motor 0.24)
OK | Tab.6.14 zona 1.1 piso 3: exigencia 0.19 (motor 0.19)
OK | Tab.6.14 zona 1.1 piso 4: exigencia 0.11 (motor 0.11)
OK | Tab.6.14 zona 1.3 piso 1: exigencia 0.16 (motor 0.16)
OK | Tab.6.14 zona 1.3 piso 2: exigencia 0.14 (motor 0.14)
OK | Tab.6.14 zona 1.3 piso 3: exigencia 0.11 (motor 0.11)
OK | Tab.6.14 zona 1.3 piso 4: exigencia 0.06 (motor 0.06)
OK | Tab.6.14 zona 1.5 piso 1: exigencia 0.05 (motor 0.05)
OK | Tab.6.14 zona 1.5 piso 2: exigencia 0.05 (motor 0.05)
OK | Tab.6.14 zona 1.5 piso 3: exigencia 0.04 (motor 0.04)
OK | Tab.6.14 zona 1.5 piso 4: exigencia 0.02 (motor 0.02)
OK | Tab.6.14 zona 1.6 piso 1: exigencia 0.02 (motor 0.02)
OK | Tab.6.14 zona 1.6 piso 2: exigencia 0.02 (motor 0.02)
OK | Tab.6.14 zona 1.6 piso 3: exigencia 0.01 (motor 0.01)
OK | Tab.6.14 zona 1.6 piso 4: exigencia 0.01 (motor 0.01)
```

OK		zona 1.1: NAO VERIFICA (publicado: NAO VERIFICA)
OK		zona 1.3: NAO VERIFICA (publicado: NAO VERIFICA)
OK		zona 1.5: VERIFICA (publicado: VERIFICA)
OK		zona 1.6: VERIFICA (publicado: VERIFICA)
--	Tab.6.15:	A_PE exigida (4 pisos, terreno B) --
OK		zona 1.1: A_PE=3.6% (motor 3.6%)
OK		zona 1.3: A_PE=2.1% (motor 2.1%)

Referências

- [1] IPQ — NP EN 1998-3:2017. Eurocódigo 8 — Projeto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 3: Avaliação e reabilitação de edifícios. Instituto Português da Qualidade, 2017.
- [2] Candeias, P.; Correia, A.; Campos Costa, A.; Catarino, J. M.; Pipa, M.; Cruz, H.; Cansado Carvalho, E.; Costa, A. — Aspetos gerais da aplicação em Portugal do Eurocódigo 8 — Parte 3 — Anexo C (Informativo) — Edifícios de alvenaria. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, Série III, n.º 12, março de 2020.
- [3] Bernardo, V.; Campos Costa, A.; Costa, A.; Catarino, J. M.; Candeias, P. X. — Métodos expeditos para avaliação sísmica de edifícios de alvenaria com pavimentos rígidos. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, Série III, n.º 14, novembro de 2020.
- [4] Bernardo, V.; Campos Costa, A.; Costa, A.; Catarino, J. M.; Candeias, P. X. — Métodos expeditos para avaliação sísmica de edifícios de alvenaria com pavimentos flexíveis. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, Série III, n.º 16, julho de 2021.
- [5] Sousa, R. R.; Campos Costa, A.; Costa, A. — Metodologia para a avaliação da segurança sísmica de edifícios existentes baseada em análises de fiabilidade estrutural. Edifícios de betão armado. Relatório LNEC 81/2019 — DE/NESDE (versão revista, outubro de 2019). Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, com a colaboração da SPES.
- [6] Sousa, R. R.; Campos Costa, A.; Costa, A. — Guião de avaliação da segurança sísmica de edifícios existentes de betão armado. LNEC e SPES, ao abrigo do Protocolo de Colaboração de 2014 para o Estudo de Procedimentos para Certificação Sísmica de Edifícios Existentes.
- [7] Portaria n.º 302/2019. Diário da República, 1.ª série, 2019.