

SOLUÇÕES DE MODELAÇÃO PARA AVALIAÇÃO SÍSMICA DE ALVENARIA

RODRIGO SOUSA CHAPARRO DE ALMEIDA DIAS

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS E GEOTECNIA

Orientador: Professor Doutor João Paulo Sousa Costa de Miranda Guedes
Coorientador: Professor Doutor Alexandre Aníbal Meira Guimarães da Costa

JUNHO 2026

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2025/2026

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E GEORRECURSOS

Tel. +351-22-508 1901



m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2025/2026 - Departamento de Engenharia Civil e Georrecursos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2026*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus pais

*“Eles nem sabem, nem sonham,
Que o sonho comanda a vida.
Que sempre que um homem sonha
o mundo pula e avança
como bola colorida
entre as mãos de uma criança”*

António Gedeão

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação não teria sido possível sem o contributo de um conjunto de pessoas a quem devo um sincero reconhecimento.

Ao Professor Doutor João Miranda Guedes, orientador desta dissertação, o meu primeiro agradecimento por ter aceite acompanhar este trabalho quando me propus tê-lo como orientador. A sua disponibilidade e confiança foram determinantes para que este projecto se tornasse realidade.

Ao Professor Doutor Alexandre Costa, co-orientador, uma palavra de profundo reconhecimento pelo conhecimento transmitido, pela paciência inesgotável e pela disponibilidade em ajudar em qualquer altura e instante. A sua palavra de apoio e encorajamento nos momentos mais difíceis foi sempre um ponto de luz ao longo deste percurso.

À equipa do NCREP, um agradecimento especial pelo acolhimento caloroso desde o primeiro dia. O conhecimento partilhado, o ambiente de trabalho e os bons momentos vividos em conjunto foram uma parte muito especial deste percurso.

À minha família, Pai, Mãe, Irmão e Avós, pelo apoio incondicional ao longo destes cinco anos. A vossa presença constante e o vosso incentivo foram o alicerce que tornou tudo isto possível.

Aos meus amigos, por nunca deixarem de acreditar em mim e por terem a capacidade de, em qualquer momento, me fazer sorrir e seguir em frente. A vossa amizade foi um dos maiores presentes deste percurso.

À Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pela instituição de excelência que é e pelo papel fundamental que desempenha na formação de novos profissionais. É um privilégio ter feito parte desta comunidade.

A todos os Professores que ao longo deste percurso se cruzaram comigo e que, de uma forma ou de outra, deixaram a sua marca na minha formação. O contributo de cada um foi essencial para o engenheiro que me tornei.

Por fim, a todas as pessoas, sem exceção, com quem tive a oportunidade de partilhar momentos ao longo deste percurso académico. Cada convívio, cada conversa e cada experiência partilhada tornaram este caminho mais rico e mais humano.

A todos, o meu sincero obrigado.

RESUMO

A presente dissertação desenvolve e aplica uma metodologia de avaliação sísmica de nembos de alvenaria não reforçada, comparando sistematicamente três abordagens de cálculo: uma folha de cálculo analítica baseada no Eurocódigo 8 Parte 3 (EC8-3) e no Código Italiano (NTC 2018/*Circolare* 2019), e dois programas de análise não linear: o *SeismoStruct* e o *3Muri*. O objetivo central é compreender as diferenças entre os resultados produzidos por cada ferramenta, identificando as hipóteses internas que as explicam, e estabelecendo uma chave de interpretação para a sua utilização prática.

A folha de cálculo foi desenvolvida para os três mecanismos de rotura no plano, flexão, corte por deslizamento e corte diagonal, e validada com base nos resultados teóricos publicados por Celano et al. (2021). A validação confirmou a equivalência algébrica das expressões implementadas com as formulações de referência da literatura, nomeadamente a equação de Magenes e Calvi (1997) para o corte por deslizamento, que constitui uma solução fechada sem necessidade de processo iterativo.

A análise de quatro nembos fictícios com geometrias controladas permitiu identificar o comportamento interno de cada programa. O *SeismoStruct* revelou um comportamento diferenciado consoante o mecanismo condicionante: a verificação da flexão é efetuada sempre em condição de bi-encastramento ($\alpha = 0,5$), independentemente da condição de fronteira configurada pelo utilizador, facto confirmado pela *Seismosoft*; a verificação do corte depende da condição modelada, com a secção de base a refletir a condição configurada e a secção de topo a manter a referência de encastramento. O *3Muri* assume a condição de consola ($\alpha = 1,0$) de forma sistemática, produzindo valores concordantes com as expressões analíticas de uma consola.

A metodologia foi posteriormente aplicada a sete nembos reais de fachadas do centro histórico do Porto, com as condições de fronteira identificadas por análise modal no *SAP2000*. Os resultados confirmaram as conclusões obtidas com os nembos fictícios. Um dos casos analisados, com o nembo modelado em consola, onde o mecanismo de flexão é condicionante, evidenciou uma limitação específica do *SeismoStruct*: o programa identificou incorretamente corte como mecanismo, com um *performance ratio* de 0,91 sem *reach* (demand = capacity), demonstrando que, nesta configuração, os resultados devem ser analisados com especial atenção.

A análise do mecanismo de corte diagonal em nembos de alvenaria irregular demonstrou que a resistência é independente das condições de fronteira, uma vez que a formulação da *Circolare* 2019 não envolve o coeficiente α que determina a condição de fronteira. Como consequência, quando o corte diagonal é condicionante, os três métodos convergem para o mesmo valor, independentemente da condição de fronteira.

Por fim, analisou-se a fachada da Rua São Bento da Vitória em dois modelos complementares, de 1 piso e 2 pisos, comparando as curvas de capacidade obtidas pelo *SeismoStruct* e pelo *3Muri*. O objetivo central foi verificar se o padrão de diferenças entre os dois programas é consistente entre os dois modelos. Concluiu-se que o rácio entre os patamares dos dois programas é constante e igual a 1,72 em ambos os modelos, com escala idêntica na passagem de 1 para 2 pisos (fator 1,41), evidenciando uma divergência estrutural e proporcional entre os programas. Uma análise complementar em condições controladas, com substituição dos lintéis por uma barra rígida rotulada, aplicação de esforços axiais equivalentes e supressão do peso próprio, permitiu isolar o efeito dos lintéis e das massas, reduzindo o rácio para 1,29 e mostrando que a maior parte da divergência inicial tem origem nestes fatores. De qualquer forma, ambos os programas verificam a segurança ao estado limite de Dano Significativo para a ação sísmica definida para o Porto.

Palavras-Chave: Condições de fronteira; EC8-3; Mecanismos de rotura; *3Muri*; *SeismoStruct*.

ABSTRACT

This dissertation develops and applies a seismic assessment methodology for unreinforced masonry piers, systematically comparing three calculation approaches: an analytical spreadsheet based on Eurocode 8 Part 3 (EC8-3) and the Italian Code (NTC 2018/*Circolare* 2019), and two nonlinear analysis programs, *SeismoStruct* and *3Muri*. The central objective is to understand the differences between the results produced by each tool, identifying the internal assumptions that explain them and establishing an interpretation key for their practical use.

The spreadsheet was developed for the three in-plane failure mechanisms, flexure, sliding shear, and diagonal shear, and validated against the theoretical results published by Celano et al. (2021). The validation confirmed the algebraic equivalence of the implemented expressions with the reference formulations in the literature, namely the Magenes and Calvi (1997) equation for sliding shear, which constitutes a closed-form solution requiring no iterative process.

The analysis of four fictitious piers with controlled geometries allowed the internal behaviour of each program to be identified. *SeismoStruct* exhibited differentiated behaviour depending on the governing failure mechanism: flexural verification is always performed under double-fixed boundary conditions ($\alpha = 0.5$), regardless of the boundary condition configured by the user, a fact confirmed by *Seismosoft*, while shear verification depends on the modelled condition, with the base section reflecting the configured condition and the top section maintaining the double-fixed reference. *3Muri* systematically assumes cantilever conditions ($\alpha = 1.0$), producing values consistent with the analytical cantilever results.

The methodology was subsequently applied to seven real piers from facades in the historic centre of Porto, with boundary conditions identified through modal analysis in *SAP2000*. The results confirmed the conclusions drawn from the fictitious piers. A specific case, Rua do Pinheiro, modelled as a cantilever with flexure as the governing mechanism, revealed a specific limitation of *SeismoStruct*: the program incorrectly identified shear as the governing mechanism, with a performance ratio of 0.91 without *reach*, demonstrating that, in this configuration, the results must be analysed with particular care.

The analysis of the diagonal shear mechanism in irregular masonry piers demonstrated that the resistance is independent of boundary conditions, since the *Circolare* 2019 formulation does not involve the coefficient α . The three methods converge to the same value when diagonal shear governs under any boundary condition, diverging only when the governing mechanism changes with α .

Finally, the São Bento da Vitória street façade was analysed in two complementary models, one storey and two storeys, comparing the capacity curves obtained with *SeismoStruct* and *3Muri*. The central aim was to verify whether the pattern of differences between the two programs is consistent across the two models. It was concluded that the ratio between the two programs' strength plateaus is constant and equal to 1.72 in both models, with identical scaling from one to two storeys (factor of 1.41), evidencing a structural and proportional divergence between the programs. A complementary analysis under controlled conditions replacing the spandrels with a hinged rigid bar, applying equivalent axial forces in both programs and suppressing self-weight allowed the effect of the spandrels and masses to be isolated, reducing the ratio to 1.29 and showing that most of the initial divergence originates from these factors. Nevertheless, both programs satisfy the Significant Damage limit state for the seismic action defined for Porto.

Keywords: Boundary conditions; EC8-3; Failure mechanisms; *3Muri*; *SeismoStruct*.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO GERAL	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2 ESTADO DE ARTE	5
2.1 A ALVENARIA ESTRUTURAL COMO SISTEMA RESISTENTE.....	5
2.2 MECANISMOS DE ROTURA DE PAREDES DE ALVENARIA NO PLANO.....	6
2.2.1 Rotura por Flexão	6
2.2.2 Rotura por Corte de Deslizamento	7
2.2.3 Rotura por Corte Diagonal	8
2.3 CONDIÇÕES DE FRONTEIRA E A SUA INFLUÊNCIA NA RESISTÊNCIA.....	8
2.4 NÍVEIS DE CONHECIMENTO	10
2.5 ENQUADRAMENTO NORMATIVO.....	11
2.5.1 Flexão.....	12
2.5.1.1 Eurocódigo 8 Parte 3 (EC8-3).....	12
2.5.1.2 NTC 2018.....	12
2.5.2 Corte de deslizamento	13
2.5.2.1 Eurocódigo 8 Parte 3 (EC8-3).....	13
2.5.2.2 NTC 2018.....	14
2.5.3 Corte diagonal	15
2.6 ANÁLISE NÃO LINEAR ESTÁTICA (<i>PUSHOVER</i>)	16

2.7 FERRAMENTAS NUMÉRICAS DE MODELAÇÃO, <i>SEISMOSTRUCT</i> E <i>3MURI</i>	17
2.7.1 <i>SeismoStruct</i>	17
2.7.2 <i>3Muri</i>	17
2.8 SÍNTESE	18
3 MODELAÇÃO NUMÉRICA DE ELEMENTOS DE ALVENARIA	19
3.1 INTRODUÇÃO	19
3.2 MODELAÇÃO NO <i>SEISMOSTRUCT</i>	19
3.2.1 <i>Arquitetura do elemento de alvenaria</i>	19
3.2.2 <i>Sub-elemento de fibras comportamento de flexão e axial</i>	20
3.2.3 <i>Calibração da Curva MIMK_pinched para Representação do EC8-3</i>	21
3.2.4 <i>Resistência ao corte, VRd</i>	25
3.2.5 <i>Rigidez inicial</i>	25
3.2.6 <i>Deslocamento último e construção da curva de capacidade</i>	26
3.3 MODELAÇÃO NO <i>3MURI</i>	26
3.3.1 <i>Macro-elemento bilinear</i>	26
3.3.2 <i>Rigidez inicial</i>	27
3.3.3 <i>Critérios de resistência</i>	27
3.3.4 <i>Drift último e construção da curva de capacidade</i>	28
3.4 CURVAS DE COMPORTAMENTO E ANÁLISE COMPARATIVA	28
3.4.1 <i>Nembo esbelto — mecanismo de flexão</i>	29
3.4.2 <i>Nembo atarracado — mecanismo de corte</i>	30
4 DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA DE CÁLCULO	33
4.1 FOLHA DE CÁLCULO EC8-3 E NTC 18: FUNCIONAMENTO E LÓGICA DE IMPLEMENTAÇÃO	33
4.1.1 <i>Estrutura Geral e Dados de Entrada</i>	33
4.1.2 <i>Cálculo das Tensões de Compressão ao Longo da Altura</i>	34
4.1.3 <i>Lógica de Cálculo para os Três Mecanismos de Rotura</i>	35

4.1.4 Representação Gráfica e Leitura de Resultados.....	37
4.1.5 Drift e Parâmetros de Deformabilidade.....	38
4.2 VALIDAÇÃO DA FOLHA DE CÁLCULO	39
4.2.1 Condições de Cálculo Adotadas na Validação.....	39
4.2.2 Equivalência Algébrica das Expressões Implementadas.....	40
4.2.3 Mecanismo de Flexão	40
4.2.4 Mecanismo de Corte por Deslizamento	41
4.2.4.1 Expressões de partida.....	41
4.2.4.2 Dedução sem limite ativo.....	41
4.2.4.3 Dedução com limite ativo.....	42
4.2.5 Mecanismo de Corte Diagonal.....	43
4.2.6 Validação Numérica com Base na Literatura.....	43
4.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO	45
5 NEMBOS FICTÍCIOS: CALIBRAÇÃO E ANÁLISE COMPARATIVA.....	47
5.1 MOTIVAÇÃO E ESTRATÉGIA	47
5.1.1 Caracterização Geométrica dos Quatro Nembos.....	47
5.1.2 Resultados da folha de Cálculo EC8-3.....	49
5.2 MODELAÇÃO NO SEISMOSTRUCT.....	50
5.3 MODELAÇÃO NO 3MURI	52
5.4 SÍNTESE COMPARATIVA: EC8-3, SEISMOSTRUCT E 3MURI	54
5.5 ANÁLISE DE NEMBOS DE FACHADAS REAIS DO PORTO	55
5.5.1 Apresentação das Fachadas e Caracterização Geométrica.....	55
5.5.2 Identificação das Condições de Fronteira por Análise Modal no SAP2000.....	57
5.6 RESULTADOS: FOLHA DE CÁLCULO, SEISMOSTRUCT E 3MURI	59
5.6.1 Folha de Cálculo EC8-3	59
5.6.2 SeismoStruct.....	60
5.6.3 3Muri.....	61

5.7 SÍNTESE COMPARATIVA	62
5.8 SÍNTESE DO CAPÍTULO	63
6 ANÁLISE DO MECANISMO DE CORTE DIAGONAL	65
6.1 O MECANISMO DE CORTE DIAGONAL E A SUA FORMULAÇÃO	65
6.2 DEFINIÇÃO DOS QUATRO NEMBOS	66
6.3 RESULTADOS DO CÁLCULO ANALÍTICO E DO 3MURI.....	67
6.4 RESULTADOS DO SEISMOSTRUCT E ANÁLISE DE COERÊNCIA.....	68
6.5 SÍNTESE COMPARATIVA	69
6.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO	70
7 ANÁLISE DE UMA FACHADA	73
7.1 ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS	73
7.2 MODELOS DA FACHADA	73
7.3 ANÁLISE DAS CURVAS DE CAPACIDADE.....	75
7.3.1 Modelo de 1 piso.....	76
7.3.2 Modelo de 2 pisos.....	77
7.3.3 Análise complementar em condições controladas	78
7.3.4 Hipóteses Explicativas para a Divergência entre Curvas de Capacidade	80
7.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO	83
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	85
8.1 CONCLUSÕES.....	85
8.2 TRABALHOS FUTUROS	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Mecanismo de flexão	7
Figura 2 - Mecanismo de corte de deslizamento	7
Figura 3 - Mecanismo de corte diagonal	8
Figura 4 - a) Nembo com efeito de consola; b) Nembo com efeito de Bi-encastamento	9
Figura 5 - Zona comprimida do nembo ao corte de deslizamento	14
Figura 6 - Lei constitutiva tensão-extensão de uma fibra no modelo, mas_par sob solicitação cíclica (comportamento à flexão), no SeismoStruct.	20
Figura 7 - Discretização da secção mws (<i>masonry wall section</i>) em 190 fibras no SeismoStruct (Secção W1)	21
Figura 8 - Curva MIMK_pinched do SeismoStruct: parâmetros de definição (Seismosoft, 2026)	22
Figura 9 - Sobreposição da curva EC8-3 (azul) e da curva MIMK_pinched original (vermelho): ambas com pico/quebra em $dtot = du = 0,40\%$, divergindo no comportamento pós-pico	24
Figura 10 - Macro-elemento de viga não-linear do 3Muri: graus de liberdade nodais (esquerda) e comportamento força de corte T vs deslocamento lateral δ com degradação de rigidez (direita) (S.T.A. DATA srl (2024))	27
Figura 11 - Nembo esbelto modelado	29
Figura 12 - Curvas de comportamento do nembo esbelto: comparação entre 3Muri e SeismoStruct (consola e bi-encastamento)	29
Figura 13 - Nembo atarracado modelado	30
Figura 14 - Curvas de comportamento do nembo atarracado: comparação entre 3Muri e SeismoStruct (consola e bi-encastamento)	31
Figura 15 - Esquema dos valores de entrada	34
Figura 16 - Esquema dos valores de saída	35
Figura 17 - Esquema dos resultados obtidos para Flexão	35
Figura 18 - Esquema dos resultados obtidos para corte de deslizamento	36
Figura 19 - Esquema dos resultados obtidos para corte diagonal	37
Figura 20 - Esquemas dos valores compilados dos vários mecanismos	37
Figura 21 - Curvas de comportamento dos três mecanismos para meia altura	38
Figura 22 - Nembo fictícios	48
Figura 23 - 7 fachadas de estudo	57
Figura 24 - Deformadas modais das 7 fachadas	59
Figura 25 - Caracterização dos nembo	67
Figura 26 - Modelo de 1 piso no SeismoStruct com carregamento lateral	73
Figura 27 - Deformada do modelo de 1 piso em SeismoStruct	74
Figura 28 - Modelo de 1 piso no 3Muri: deformada com mecanismo de dano	74
Figura 29 - Modelo de 2 pisos no SeismoStruct: fachada completa com carregamento lateral	74

Figura 30 - Deformada do modelo de 2 pisos em SeismoStruct.....	75
Figura 31 - Modelo de 2 pisos no <i>3Muri</i> : piso 1 plastificado, piso 2 elástico	75
Figura 32 - Curvas de capacidade do modelo de 1 piso: <i>SeismoStruct</i> (41kN) vs <i>3Muri</i> (kN), ...	76
Figura 33 - Curvas de capacidade do modelo de 2 pisos: <i>SeismoStruct</i> (58 kN) vs <i>3Muri</i> (33,87 kN)	77
Figura 34 - Modelo de 1 piso no <i>SeismoStruct</i> com barra rígida no topo em substituição dos lintéis .	78
Figura 35 - Curvas de capacidade do modelo de 1 piso em condições controladas (peso próprio nulo): <i>SeismoStruct</i> (30,8 kN) vs <i>3Muri</i> (24,0 kN)	79

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre os níveis de conhecimento e o que os caracterizam	10
Tabela 2 - Valores dos coeficientes de confiança.....	11
Tabela 3 - Parâmetros de calibração da curva MIMK_pinched para representação do EC8-3	24
Tabela 4 - Geometria dos nembos.....	28
Tabela 5 - Parâmetros geométricos e mecânicos dos casos de validação (Celano et al., 2021)	43
Tabela 6 - Comparação entre os resultados da folha de cálculo e os valores teóricos de Celano et al. (2021)	44
Tabela 7 - Validação do mecanismo de corte diagonal e verificação de flexão (Caso 114-R, alvenaria irregular)	44
Tabela 8 - Caracterização geométrica dos quatro nembos fictícios	48
Tabela 9 - Resultados do cálculo analítico (EC8-3) para os quatro nembos — secção intermédia para corte e secção inferior para flexão	49
Tabela 10 - <i>Comparação entre os valores analíticos (EC8-3) e os resultados do SeismoStruct para os quatro nembos.</i>	51
Tabela 11 - <i>Comparação entre os valores analíticos (EC8-3) e os resultados do 3Muri para os quatro nembos.</i>	53
Tabela 12 - <i>Síntese comparativa: EC8-3, SeismoStruct e 3Muri para os quatro nembos (V em kN) ..</i>	54
Tabela 13 - Caracterização geométrica dos nembos e cargas axiais calculadas para as sete fachadas	55
Tabela 14 - <i>Condições de fronteira identificadas por análise modal no SAP2000 para as sete fachadas</i>	58
Tabela 15 - <i>Resultados da folha de cálculo EC8-3 para os sete nembos, com a condição de fronteira identificada pelo SAP2000</i>	59
Tabela 16 - <i>Resultados do SeismoStruct para os sete nembos</i>	60
Tabela 17 - <i>Resultados do 3Muri para os sete nembos</i>	61
Tabela 18 - <i>Síntese comparativa: Excel, SeismoStruct e 3Muri para os sete nembos</i>	62
Tabela 19 - <i>Caracterização geométrica dos quatro nembos para análise do corte diagonal</i>	66
Tabela 20 - <i>Resultados do cálculo analítico (Excel) e do 3Muri para os quatro nembos</i>	67
Tabela 21 - <i>Comparação entre a folha de cálculo e o SeismoStruct (NTC 2018) para os quatro nembos (V em kN). Co. = consola; Bi. = bi-encastamento; C. diagonal = corte diagonal.</i>	68
Tabela 22 - <i>Síntese comparativa: folha de cálculo, 3Muri e SeismoStruct para os quatro nembos (V em kN). Co. = consola; Bi. = bi-encastamento; C. diag. = corte diagonal.</i>	69

Símbolos, Acrónimos e Abreviaturas

A	$[m^2]$	Área da secção transversal da parede
b	$[-]$	Coefficiente corretivo dependente da esbelteza do painel (corte diagonal)
B	$[m]$	Comprimento total da parede (notação de Celano et al.)
CF	$[-]$	Coefficiente de confiança geral
CF_m	$[-]$	Coefficiente de confiança para alvenarias
D	$[m]$	Comprimento (dimensão horizontal) da parede no plano
D'	$[m]$	Comprimento da zona comprimida da parede (corte por deslizamento)
E	$[GPa]$	Módulo de elasticidade (módulo de Young)
e	$[m]$	Excentricidade da carga axial
f_d	$[MPa]$	Resistência de cálculo à compressão da alvenaria
f_k	$[MPa]$	Resistência característica à compressão da alvenaria
f_m	$[MPa]$	Resistência média à compressão da alvenaria obtida por ensaios in situ
f_{td}	$[MPa]$	Resistência de cálculo à tração diagonal da alvenaria
f_{tk}	$[MPa]$	Resistência característica à tração diagonal da alvenaria
f_{vd}	$[MPa]$	Resistência de cálculo ao corte da alvenaria
$f_{vd,lim}$	$[MPa]$	Limite superior da resistência de cálculo ao corte (EC8-3)
$f_{v,lim}$	$[MPa]$	Limite superior da resistência ao corte (formulação combinada EC8-3/Circolare)
f_{vk}	$[MPa]$	Resistência característica ao corte da alvenaria
f_{vk0}	$[MPa]$	Resistência inicial ao corte (na ausência de carga vertical)
f_{v0}	$[MPa]$	Resistência ao corte na ausência de carga vertical considerando coeficientes de segurança e do material
$f_{y,lim}$	$[MPa]$	Limite superior de cedência ao corte (NTC 2018)
G	$[GPa]$	Módulo de distorção (módulo de corte)

H	$[m]$	Altura total da parede (nembo)
$H0$	$[m]$	Altura de corte efetiva (distância à secção de momento nulo)
h	$[m]$	Altura do painel (notação de esbelteza h/D)
KL	$[-]$	Nível de conhecimento (Knowledge Level)
l	$[m]$	Comprimento total da parede (notação NTC 2018)
l'	$[m]$	Comprimento da parte comprimida da parede (NTC 2018)
Med	$[kN \cdot m]$	Momento fletor de cálculo atuante
Mu	$[kN \cdot m]$	Momento resistente correspondente ao colapso por flexão composta (NTC 2018)
N	$[kN]$	Carga axial atuante na parede (positiva se compressão)
Ned	$[kN]$	Esforço axial de cálculo
$Ninf$	$[kN]$	Carga axial na secção inferior do nembo
$Nmid$	$[kN]$	Carga axial na secção intermédia do nembo
$Nsup$	$[kN]$	Carga axial na secção superior do nembo
s	$[m]$	Espessura da parede (notação de Celano et al.)
t	$[m]$	Espessura da parede
V	$[kN]$	Força de corte (esforço transverso)
Vcd	$[kN]$	Resistência ao corte diagonal
Ved	$[kN]$	Esforço transverso de cálculo atuante
Vf	$[kN]$	Resistência ao esforço transverso associada ao mecanismo de flexão (EC8-3)
VR	$[kN]$	Capacidade resistente global da parede (mínimo dos três mecanismos)
VR,bi	$[kN]$	Capacidade resistente analítica em condição de bi-encastramento
VR,co	$[kN]$	Capacidade resistente analítica em condição de consola
Vt	$[kN]$	Resistência ao esforço transverso associada ao mecanismo de corte diagonal (Circolare 2019)
vd	$[-]$	Esforço axial normalizado (adimensional)

LETRAS GREGAS

α	$[-]$	Coefficiente de condição de fronteira ($\alpha = 1,0$ consola; $\alpha = 0,5$ bi-encastramento)
γ	$[kN/m^3]$	Peso volúmico da alvenaria
γ_m	$[-]$	Coefficiente parcial de segurança para alvenaria
μ	$[-]$	Coefficiente de atrito (corte por deslizamento)
σ_0	$[MPa]$	Tensão normal média de compressão referida à área total da secção
σ_n	$[MPa]$	Tensão normal na secção considerada (NTC 2018)
τ_0	$[MPa]$	<i>Tensão de corte de referência (coesão) — parâmetro introduzido no 3Muri</i>

ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

<i>3Muri</i>	<i>Software de análise sísmica baseado no modelo de pórtico equivalente (S.T.A. DATA)</i>
ASCE	American Society of Civil Engineers
CF	Coefficiente de Confiança (Confidence Factor)
DSS	Diagonal Stepped Sliding — corte por deslizamento em degrau
EC6	Eurocódigo 6 — Projeto de estruturas de alvenaria
EC8-3	Eurocódigo 8 Parte 3 — Avaliação e reforço sísmico de edifícios (NP EN 1998-3)
EFM	Equivalent Frame Model — modelo de pórtico equivalente
KL1	Nível de conhecimento limitado (Knowledge Level 1)
KL2	Nível de conhecimento normal (Knowledge Level 2)
KL3	Nível de conhecimento integral (Knowledge Level 3)
MDOF	Multiple Degree of Freedom — sistema de múltiplos graus de liberdade
NTC 2018	Norme Tecniche per le Costruzioni — Norma Técnica Italiana (2018)
Circolare 2019	Istruzione per l'applicazione delle NTC 2018 — Código Italiano (Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP.)

SDOF Single Degree of Freedom — sistema de um único grau de liberdade

SeismoStruct *Software de análise não linear de estruturas (Seismosoft)*

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO GERAL

A alvenaria constitui um dos sistemas construtivos mais representativos do edificado histórico europeu e, em particular, do parque edificado português. Em Portugal, uma parte significativa das construções existentes é de alvenaria não reforçada, muitas das quais erguidas sem qualquer consideração de ação sísmica e localizadas em regiões de sismicidade moderada a elevada. Este cenário confere especial urgência à avaliação da vulnerabilidade sísmica deste tipo de edificado, tanto em contexto de reabilitação como de gestão do risco sísmico.

Do ponto de vista do comportamento estrutural, as paredes de alvenaria quando sujeitas a ações horizontais podem desenvolver três mecanismos de rotura distintos no seu plano: a flexão, o corte por deslizamento e o corte diagonal. A identificação do mecanismo condicionante depende da geometria do painel, das propriedades mecânicas dos materiais e das condições de fronteira impostas pelos elementos adjacentes. Em alvenaria mais regular, em particular mais estratificada, como tende a ser a alvenaria do edificado histórico do Porto e do norte do país, os mecanismos de flexão e de corte por deslizamento tendem a ser condicionantes. O corte diagonal assume maior relevância em alvenaria irregular, característica do edificado mais antigo da região de Lisboa e do sul do país, cuja resistência a este mecanismo é governada pela coesão interna do material e não é contemplada pelo Eurocódigo 8 Parte 3 (EC8-3), sendo o seu cálculo remetido para o Código Italiano (NTC 2018 e *Circolare* 2019).

A avaliação quantitativa da resistência de nembos de alvenaria pode ser realizada por métodos analíticos, com base nas expressões do EC8-3 e da norma italiana, ou por recurso a ferramentas numéricas de análise não linear, como o *SeismoStruct* e o *3Muri*. Estas ferramentas implementam modelos distintos de representação do comportamento estrutural: o *SeismoStruct* baseia-se em elementos de barra com secção em fibras, enquanto o *3Muri* utiliza o modelo de pórtico equivalente com macro-elementos. Embora ambos os programas referenciem as mesmas normas de verificação de segurança, as hipóteses internas de modelação, nomeadamente as condições de fronteira assumidas para os nembos, podem diferir significativamente entre si e face ao cálculo analítico, com implicações diretas nos valores de resistência e de deformabilidade obtidos.

Neste contexto, a presente dissertação propõe-se comparar sistematicamente os três métodos de avaliação, a folha de cálculo analítica baseada no EC8-3 e no Código Italiano, o *SeismoStruct* e o *3Muri*, para diferentes tipologias de nembos e condições de análise, com o objetivo de compreender as diferenças entre os resultados produzidos e as suas causas, contribuindo assim para uma utilização mais informada destas ferramentas na prática de engenharia.

1.2 OBJETIVOS

A presente dissertação tem como objetivo principal avaliar e comparar o comportamento de diferentes soluções de modelação para a análise sísmica de paredes de alvenaria, identificando as hipóteses internas de cada ferramenta e as suas implicações nos resultados. Para o efeito, definem-se os seguintes objetivos específicos:

- i) Desenvolver e validar uma folha de cálculo analítica que implemente as expressões do EC8-3 e do Código Italiano para os três mecanismos de rotura no plano, flexão, corte por deslizamento e corte diagonal, verificando a sua equivalência com resultados de referência da literatura.
- ii) Identificar as condições de fronteira efetivamente assumidas pelo *SeismoStruct* e pelo *3Muri* na modelação de nembos isolados, através da comparação sistemática dos resultados de capacidade e de *drift* com os valores analíticos correspondentes às condições de consola ($\alpha = 1,0$) e de bi-encastramento ($\alpha = 0,5$).
- iii) Aplicar a metodologia desenvolvida a nembos reais de fachadas de alvenaria do centro histórico do Porto, confrontando os três métodos em condições geométricas e de carregamento heterogéneas.
- iv) Analisar o comportamento dos três métodos face ao mecanismo de corte diagonal, com recurso a nembos fictícios de alvenaria irregular, avaliando a capacidade de cada ferramenta para identificar e quantificar corretamente este mecanismo.
- v) Estender a análise à escala de uma fachada completa, comparando as curvas de capacidade obtidas pelas análises *pushover* do *SeismoStruct* e do *3Muri* e discutindo as implicações das diferenças de modelação ao nível do comportamento global da estrutura.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se organizada em oito capítulos, cuja estrutura reflete a progressão metodológica do trabalho, partindo da revisão bibliográfica e da validação das ferramentas analíticas até à análise comparativa a diferentes escalas.

O Capítulo 1 apresenta o enquadramento geral do trabalho, define os objetivos e descreve a estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 desenvolve o estado da arte, abordando a alvenaria estrutural como sistema resistente, os mecanismos de rotura no plano, a influência das condições de fronteira, os níveis de conhecimento definidos pela NP EN 1998-3, o enquadramento normativo do EC8-3 e do Código Italiano, as ferramentas numéricas utilizadas e o método de análise *pushover*.

O Capítulo 3 descreve, com base nos respetivos manuais técnicos, a formulação dos dois programas numéricos utilizados. Para o *SeismoStruct*, apresenta-se a arquitetura do elemento de alvenaria (modelo de fibras e *links* de corte em série), a calibração da curva *MIMK_pinched* para representar o comportamento normativo EC8-3 e a construção da curva de capacidade. Para o *3Muri*, descreve-se o macro-elemento bilinear, a rigidez inicial determinada pela fórmula de Timoshenko, os três critérios de resistência considerados e o conceito de *drift* último (du) sendo o deslocamento lateral máximo que um elemento de alvenaria consegue suportar antes de perder a sua capacidade resistente, expresso como fração da sua altura. O capítulo conclui com a comparação das curvas de comportamento de dois nembos fictícios, esbelto e atarracado, que ilustram as diferenças de formulação entre os dois programas.

O Capítulo 4 descreve o desenvolvimento e a validação da folha de cálculo analítica, apresentando a sua estrutura, a lógica de implementação dos três mecanismos de rotura e a sua comparação com resultados de referência da literatura (Celano et al., 2021), tanto por equivalência algébrica, como por validação numérica.

O Capítulo 5 desenvolve-se em duas etapas complementares. Na primeira, quatro nembos fictícios permitem calibrar os modelos numéricos e identificar as condições de fronteira assumidas internamente pelo *SeismoStruct* e pelo *3Muri*. Na segunda, a metodologia é aplicada a sete nembos reais de fachadas do centro histórico do Porto, com condições de fronteira identificadas por análise modal no SAP2000.

O Capítulo 6 analisa o mecanismo de corte diagonal através de quatro nembos fictícios de alvenaria irregular, comparando os resultados da folha de cálculo analítica, do *3Muri* e do *SeismoStruct*, e avaliando a independência da resistência V_{cd} face às condições de fronteira.

O Capítulo 7 estende a análise à escala de uma fachada completa. Compara as curvas de capacidade do *SeismoStruct* e do *3Muri* da fachada de um edifício na Rua São Bento da Vitória, supondo a existência de 1 ou 2 pisos, e discute a consistência do padrão de diferenças entre programas.

O Capítulo 8 apresenta as conclusões gerais do trabalho; sintetiza os principais resultados obtidos em cada etapa e identifica os desenvolvimentos futuros que naturalmente decorrem das limitações e questões em aberto identificadas ao longo do trabalho.

2

ESTADO DE ARTE

2.1 A ALVENARIA ESTRUTURAL COMO SISTEMA RESISTENTE

A alvenaria é um dos materiais de construção mais antigos da humanidade, com uma presença marcante no parque edificado europeu. Trata-se de um material compósito, heterogéneo, descontínuo, resultante da associação de unidades (blocos cerâmicos, de betão, de pedra, de terra crua...), com ou sem argamassa de assentamento entre fiadas. Trata-se de um material anisotrópico, que apresenta uma grande variabilidade das propriedades mecânicas, fortemente dependente dos materiais constituintes e técnicas construtivas empregues (Ferreira, 2014; Vaz, 2022).

Em Portugal, uma parte significativa dos edifícios existentes é constituída por estruturas de alvenaria não reforçada, muitas delas localizadas em regiões de sismicidade elevada e construídas sem qualquer tipo de dimensionamento sísmico (Ferreira, 2014). O parque edificado nacional apresenta uma grande diversidade de tipologias construtivas, diretamente relacionadas com a época de construção e com as tecnologias empregues, que podem ser agrupadas em função das suas características estruturais: edifícios com estrutura de alvenaria anteriores a 1755, edifícios da época pombalina e similares, entre 1755 e 1880, edifícios do tipo "gaioleiro", entre 1880 e 1920, edifícios com estrutura mista de alvenaria e betão, de 1920 a 1940, e edifícios com estrutura de betão armado posteriores a 1960 (Pinho, 2008, citado em Vaz, 2022). As paredes resistentes destes edifícios podem ser de pedra regular ou irregular, de tijolo maciço ou furado, ou de blocos de betão, com juntas argamassadas à base de cal aérea ou hidráulica nos edifícios mais antigos, nos edifícios de meados do século XX (Candeias et al., 2020). Esta realidade, transversal a todo o território nacional, incluindo cidades como o Porto, onde o edificado histórico em alvenaria de tijolo e pedra é particularmente expressivo, justifica a necessidade de avaliar e caracterizar a capacidade resistente deste tipo de paredes quando sujeitas à ação sísmica.

Do ponto de vista estrutural, a alvenaria apresenta uma boa resistência à compressão, mas uma resistência à tração muito reduzida, dependendo fundamentalmente da ação estabilizadora da gravidade. Esta característica torna o seu comportamento particularmente vulnerável quando solicitada por ações horizontais, como é o caso da ação sísmica (Branco, 2019).

Em Portugal, uma parte significativa dos edifícios existentes é constituída por estruturas de alvenaria não reforçada, muitas delas localizadas em zonas de sismicidade elevada e construídas sem qualquer dimensionamento sísmico. Esta realidade justifica a necessidade de um estudo aprofundado sobre o comportamento resistente deste tipo de estruturas, nomeadamente no que diz respeito à sua capacidade de resistência ao corte e à flexão quando sujeitas a ações horizontais (Ferreira, 2014; Branco, 2019). A entrada em vigor do Decreto-Lei n.º 95/2019 e da Portaria n.º 302/2019, que tornaram obrigatória a avaliação da vulnerabilidade sísmica em obras de reabilitação significativas, veio reforçar ainda mais a relevância da avaliação e reforço sísmico deste tipo de edificado ao abrigo da NP EN 1998-3:2017 (Candeias et al., 2020).

2.2 MECANISMOS DE ROTURA DE PAREDES DE ALVENARIA NO PLANO

O comportamento sísmico de uma parede de alvenaria é, em grande medida, determinado pelos mecanismos de rotura que se desenvolvem quando esta é solicitada no seu plano. A caracterização desses mecanismos é fundamental para a correta avaliação da resistência do elemento estrutural, e constitui a base dos métodos de verificação de segurança preconizados pela regulamentação europeia.

A literatura identifica três mecanismos principais de rotura no plano de uma parede de alvenaria (Calderini et al., 2009; Magenes e Calvi, 1997): rotura por flexão, por corte de deslizamento e por corte diagonal.

Na prática, estes modos de rotura raramente ocorrem de forma isolada, verificando-se frequentemente combinações entre eles, o que torna a avaliação da resistência das paredes de alvenaria uma tarefa complexa. O valor resistente global da parede (V_R) é determinado pelo princípio do "elo mais fraco", ou seja, corresponde ao mínimo das resistências calculadas para cada modo de rotura:

$$V_R = \min (V_{f(\text{flexão})}; V_{f(\text{corte deslizamento})}; V_{cd(\text{corte diagonal})}) \quad (1)$$

2.2.1 Rotura por Flexão

O mecanismo de flexão-compressão ocorre tipicamente em painéis esbeltos submetidos a baixos níveis de compressão vertical. O carregamento horizontal induz fendas de tração nos cantos tracionados e o painel tende a comportar-se como um corpo rígido, rodando em torno da extremidade comprimida da base, fenómeno vulgarmente designado por *rocking*. Quando a compressão vertical é mais elevada, o mecanismo evolui para o esmagamento do canto comprimido. Os fatores que mais influenciam este modo de rotura são a resistência à tração da argamassa, a qualidade da ligação entre argamassa e unidades e a relação entre cargas verticais

e horizontais (Ferreira, 2014). Na formulação do EC8-3, este mecanismo é classificado como “dúctil”, uma vez que a parede possui capacidade de deformação significativa antes do colapso, o que tem implicações diretas nos fatores de segurança aplicáveis (Candeias et al., 2020).

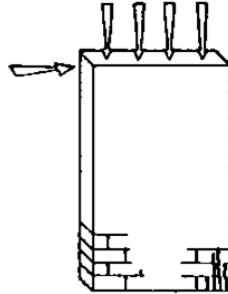


Figura 1 - Mecanismo de flexão

2.2.2 Rotura por Corte de Deslizamento

O mecanismo de corte por deslizamento surge tipicamente em painéis com reduzida compressão vertical e resulta do deslizamento ao longo de uma junta horizontal (*bed joint sliding*), geralmente localizada numa das extremidades do painel. A fraca resistência ao corte da argamassa e a deficiente aderência na interface argamassa/unidade são os fatores preponderantes neste modo de rotura. Tomazevic et al. (2009) verificaram experimentalmente que, para níveis de pré-compressão inferiores a 10% da resistência à compressão da alvenaria, as fendas diagonais tendem a seguir o traçado das juntas de assentamento em degrau, confirmando o deslizamento como mecanismo dominante. Este mecanismo é classificado pelo EC8-3 como “frágil”, pelo que a capacidade resistente não pode ser excedida mesmo em análises lineares, e é mais comum em alvenarias típicas regulares (Ferreira, 2014; Branco, 2019).

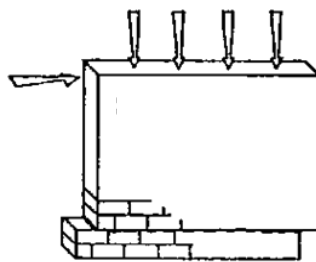


Figura 2 - Mecanismo de corte de deslizamento

2.2.3 Rotura por Corte Diagonal

Traduz-se no aparecimento de fendas diagonais que se iniciam no centro do painel e se propagam para os cantos. Este modo ocorre predominantemente quando a compressão vertical é elevada em relação às cargas laterais, sendo os parâmetros mais determinantes a resistência ao corte da argamassa, a aderência na interface e a resistência à compressão das unidades. Tomazevic *et al.* (2009) demonstraram que, para níveis de pré-compressão superiores a 10% da resistência à compressão, as fendas diagonais atravessam as próprias unidades de alvenaria, configurando um mecanismo de tração diagonal (*diagonal tension failure*). Este critério foi originalmente proposto por Turšek e Čačovič (1970), que introduziram a hipótese de a resistência ser governada pela tensão de tração principal máxima desenvolvida num painel elástico, homogéneo e isotrópico. Importa notar que este mecanismo de corte diagonal não é contemplado pelo EC8-3 na sua versão atual, sendo o seu cálculo remetido para a norma italiana (Circolare 2019). Por fim, salienta-se que o corte diagonal é mais comum nas alvenarias irregulares (Ferreira, 2014; Branco, 2019).

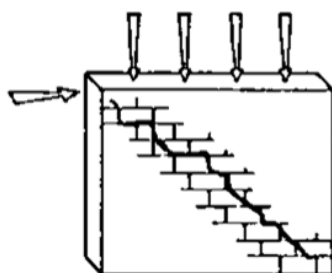


Figura 3 - Mecanismo de corte diagonal

2.3 CONDIÇÕES DE FRONTEIRA E A SUA INFLUÊNCIA NA RESISTÊNCIA

Quando sujeitos a ações horizontais de origem sísmica, os painéis de alvenaria deformam-se de acordo com as condições de fixação nas suas extremidades. Para descrever corretamente o estado de solitação interno, as formulações analíticas do EC8-3 recorrem ao conceito de "altura de corte" H_0 , definida como a distância entre a secção mais desfavorável (em princípio a base da parede, onde o momento fletor é máximo) e o ponto de inflexão, ou seja, o ponto onde o momento fletor é nulo (Candeias *et al.*, 2020).

Esta grandeza está diretamente relacionada com a altura total da parede H através do coeficiente α , que traduz as condições de fronteira:

$$H_0 = \alpha H \quad (2)$$

O coeficiente α reflete a proporção da altura do painel até ao ponto de inflexão. Do ponto de vista físico, H_0 representa o braço de momento entre a força de corte aplicada e a secção de referência, governando assim a magnitude do momento fletor máximo e, consequentemente, a capacidade resistente do painel. Quanto menor for H_0 em relação a H , maior é a capacidade resistente à flexão, o que ilustra a influência direta das condições de fronteira no cálculo. Dependendo dessas condições de fixação, o valor de α assume dois casos limite:

Comportamento em consola: o painel está encastrado na base e livre no topo, sem restrição de rotação na extremidade superior. O diagrama de momentos é triangular, o momento é máximo na base e nulo no topo, pelo que o ponto de inflexão coincide com o topo do painel. Resulta $H_0 = H$ e $\alpha = 1$. Este caso é típico de paredes de piso térreo sem laje de cobertura, ou de nembos em andares superiores com reduzida rigidez do painel acima.

Comportamento bi-encastrado: o painel apresenta restrição de rotação em ambas as extremidades, situação que ocorre quando os pavimentos têm rigidez suficiente para impedir a rotação do topo da parede. O diagrama de momentos é anti-simétrico, com momentos iguais e de sinais opostos na base e no topo, pelo que o ponto de inflexão (momento nulo) se localiza a meia altura do elemento. Resulta $H_0 = \frac{H}{2}$ e $\alpha = 0,5$.

A identificação correta do valor de α é determinante na avaliação sísmica, uma vez que este parâmetro entra diretamente nas expressões analíticas de resistência à flexão e ao corte do EC8-3. A título de exemplo, na expressão de resistência à flexão (equação 2), um valor $\alpha = 0,5$ em vez de $\alpha = 1$ implica uma redução de H_0 para metade, o que duplica a capacidade resistente calculada para o mesmo nível de esforço axial. Esta sensibilidade justifica que a escolha das condições de fronteira seja feita de forma criteriosa e devidamente fundamentada no modelo estrutural adotado (Candeias et al., 2020; Branco, 2019).

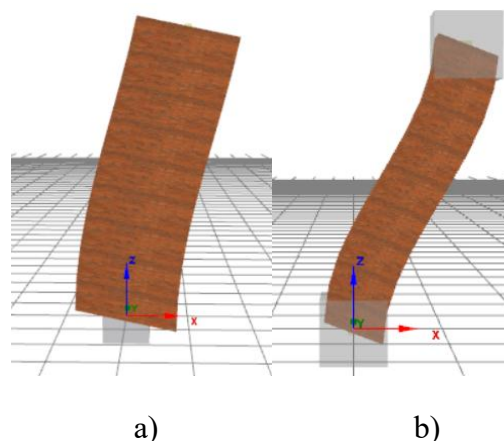


Figura 4 - a) Nembo com efeito de consola; b) Nembo com efeito de Bi-encastramento

2.4 NÍVEIS DE CONHECIMENTO

Os níveis de conhecimento (*Knowledge Levels* KL) constituem um elemento central da metodologia de avaliação sísmica de edifícios existentes preconizada pela NP EN 1998-3:2017. Estes níveis exprimem o grau de incerteza associado ao conhecimento da geometria, das disposições construtivas e das propriedades mecânicas dos materiais do edifício a avaliar, sendo determinados com base na quantidade e qualidade das informações recolhidas por meios como inspeções *in situ*, ensaios destrutivos e não destrutivos, desenhos de dimensionamento, e fontes de dados genéricos. O Anexo Nacional da NP EN 1998-3:2017 destaca a importância da realização de ensaios de identificação dinâmica, como forma de melhorar significativamente a informação recolhida nos ensaios *in situ*, sendo particularmente úteis para edifícios de alvenaria, uma vez que permitem identificar comportamentos globais, no plano e fora do plano das paredes, bem como a interação entre eles (Candeias et al., 2020; NP EN 1998-3:2017, Anexo C).

Na Tabela 1 temos a relação entre os níveis de conhecimento e os três campos que as caracterizam.

Tabela 1 - Relação entre os níveis de conhecimento e o que os caracterizam

Nível de Conhecimento	Geometria	Disposições construtivas	Materiais
Conhecimento limitado (KL1)	A partir dos desenhos de dimensionamento geral do projeto e de uma inspeção visual	Projeto simulado de acordo com a prática de origem e a partir de uma inspeção <i>in situ</i> limitada	Valores por defeito de acordo com as normas em vigor à data da construção e a partir de ensaios <i>in situ</i> limitados
Conhecimento normal (KL2)	de uma amostragem ou a partir de uma inspeção integral	A partir de uma inspeção <i>in situ</i>	A partir de ensaios <i>in situ</i> alargados
Conhecimento integral (KL3)		A partir de uma inspeção <i>in situ</i> completa	A partir de ensaios <i>in situ</i> completos

A NP EN 1998-3:2017 estabelece três níveis de conhecimento: limitado (KL1), normal (KL2) e integral (KL3). Os níveis de conhecimento são determinados com base na quantidade e qualidade da informação obtida sobre a geometria, as disposições construtivas e os materiais utilizados na construção do edifício, como referido anteriormente (3.3 da NP EN 1998-3:2017).

Os coeficientes de confiança (CF) são fatores multiplicativos utilizados para ajustar as propriedades médias dos materiais obtidas através de ensaios *in situ* e de fontes de informação adicionais, de modo a refletir a incerteza inerente ao nível de conhecimento alcançado. Nas verificações de segurança, os valores médios das propriedades dos materiais são divididos pelo

CF_m na determinação das capacidades dos elementos estruturais, ou multiplicados por ele na determinação das capacidades dos elementos “dúcteis” para transmissão, por equilíbrio, dos efeitos das ações aos elementos “frágeis” (Candeias et al., 2020; NP EN 1998-3:2017, Anexo C).

A Tabela 2 apresenta os valores a usar para os coeficientes de confiança, em função do nível de conhecimento existente sobre o elemento.

Tabela 2 - Valores dos coeficientes de confiança

Nível de conhecimento	Método de análise	Coeficiente de confiança (CF _m)
Conhecimento limitado (KL1)	Métodos de análise linear (LF, MRS)	1.35
Conhecimento normal (KL2)	Métodos de análise linear e não linear	1.2
Conhecimento integral (KL3)	Métodos de análise linear e não linear	1.0

2.5 ENQUADRAMENTO NORMATIVO

A avaliação e reabilitação sísmica de estruturas de alvenaria existentes exigem o recurso a metodologias normativas robustas que permitam quantificar a capacidade resistente dos elementos. A nível europeu, esta verificação é enquadrada pelo Eurocódigo 8 Parte 3 (EC8-3), que define as expressões analíticas basilares para o cálculo da resistência aos mecanismos de rotura no plano, nomeadamente por flexão e por esforço transversal.

No contexto da reabilitação do edificado histórico, assume também particular relevância o quadro normativo italiano, constituído pela NTC 2018 e pela *Circolare* 2019. Embora partilhem a mesma filosofia de segurança do EC8-3, estes documentos distinguem-se pelo maior detalhe na classificação dos materiais: a NTC 2018 estipula as formulações de resistência à flexão e ao corte para alvenarias de tipologia regular, tal como o EC8-3, ao passo que a *Circolare* 2019 colmata a lacuna das construções mais antigas, apresentando expressões analíticas adaptadas especificamente ao comportamento ao corte de paredes de alvenaria irregular.

2.5.1 Flexão

2.5.1.1 Eurocódigo 8 Parte 3 (EC8-3)

A resistência ao esforço transversal associada ao mecanismo de flexão é calculada pela expressão:

$$V_f = \frac{DN}{2 H \alpha} * (1 - 1,15 v_d) \quad (2)$$

Em que,

$$v_d = \frac{N}{D t f_d} \quad (2.1)$$

$$f_d = \frac{f_m}{C F_m} \quad (2.2)$$

onde D é a dimensão horizontal da parede no plano, H é a distância entre a secção onde é atingida a capacidade de flexão e o ponto de inflexão, α depende das condições de fronteira ($\alpha = 1$ para consola; $\alpha = 0,5$ para bi-encastamento), N é a carga axial, t é a espessura da parede, σ_0 é a tensão normal média, referida à área total da secção ($\sigma_0 = \frac{N}{lt}$, com N sendo a força axial atuante, positiva se for de compressão), f_m é a resistência média à compressão obtida por ensaios in situ e de fontes de informação adicionais é dividido pelo $C F_m$ que corresponde ao coeficiente de confiança para alvenarias.

2.5.1.2 NTC 2018

Para o mecanismo sujeito a flexão o NTC/Norma 2018, apresenta:

$$M_u = \left(l^2 t \frac{\sigma_0}{2} \right) \left(1 - \frac{\sigma_0}{0.85 f_d} \right) \quad (3)$$

onde, M_u é o momento correspondente ao colapso por flexão composta, l é o comprimento total da parede, t é a espessura da parede, σ_0 é a tensão normal média (se o esforço axial N for de tração será $M_u = 0$), f_d é a resistência à compressão de projeto da alvenaria $= \frac{f_k}{\gamma_m}$ e γ_m é o coeficiente parcial de segurança da alvenaria.

A análise comparativa entre o Eurocódigo 8 Parte 3 (EC8-3) e a norma italiana NTC 2018 para a avaliação da capacidade resistente à flexão revela que, apesar das diferenças de apresentação, ambos os documentos assentam nos mesmos princípios fundamentais de mecânica de secções, assumindo ausência de resistência à tração e uma distribuição retangular simplificada das tensões de compressão. A divergência real entre os dois métodos restringe-se ao fator redutor que contabiliza a profundidade do bloco de compressões: o EC8-3 utiliza o fator: $(1 - 1,15 \sigma_0/f_d)$, enquanto a NTC 2018 utiliza $(1 - \sigma_0/(0,85 f_d))$. Dado que $\frac{1}{0,85} \approx 1,176$, a norma italiana assume implicitamente um bloco de compressões ligeiramente menor, resultando numa estimativa marginalmente mais conservadora da capacidade resistente.

Para efeitos de modelação por macro-elementos e avaliação da curva de capacidade sísmica, as duas formulações conduzem a resultados quase iguais. A diferença na quantificação da capacidade de deformação última (e resistência) decorre mais rapidamente das opções normativas relativas à adoção dos coeficientes de segurança materiais (o uso de Fatores de Confiança CF_m no EC8-3 versus coeficientes parciais γ_m na NTC) do que da formulação mecânica do mecanismo de colapso por flexão, que se demonstra ser analiticamente análoga.

2.5.2 Corte de deslizamento

2.5.2.1 Eurocódigo 8 Parte 3 (EC8-3)

Para o mecanismo sujeito a esforço transversal, o EC8-3 apresenta:

$$V_f = f_{vd} D' t \quad (4)$$

Em que,

$$f_{vd} = \frac{f_{vm0}}{CF_m \gamma_m} + 0.4 \frac{N}{D' t} \leq 0.065 \frac{f_m}{CF_m \gamma_m} \quad (4.1)$$

onde D' representa o comprimento da zona comprimida da parede, N o esforço axial na parede, t a espessura da parede, f_{vm0} a resistência média ao corte na ausência de carga vertical, f_m a resistência média à compressão obtida a partir de ensaios in situ e de fontes de informação adicionais, que na expressão divide pelo CF_m coeficiente de confiança para alvenarias e γ_m , coeficiente parcial de segurança para alvenaria.

É importante notar que, ao contrário do EC6, que limita f_{vk} a $0,065 f_b$ (resistência do bloco, para alvenarias novas), o EC8-3 limita f_{vk} a $0,065 f_m$ (resistência média à compressão), dado que se dirige para a análise de paredes existentes cujas características são determinadas por ensaios in situ.

Como definir D' :

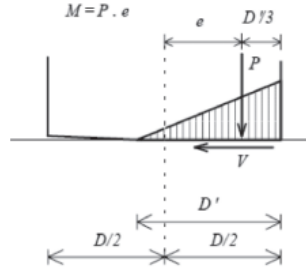


Figura 5 - Zona comprimida do nêbo ao corte de deslizamento

$$\begin{aligned} \frac{D}{2} &= e + \frac{D'}{3} \Leftrightarrow \frac{D'}{3} = \frac{D}{2} - e \Leftrightarrow D' = 3 \left(\frac{D}{2} - e \right) \Leftrightarrow D' = 3 \left(\frac{D}{2} - \frac{M_{ed}}{N_{ed}} \right) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow D' = 3 \left(\frac{D}{2} - \frac{V_{ed} h \alpha}{N_{ed}} \right) \end{aligned} \quad (4.2)$$

(Candeias et al.)

2.5.2.2 NTC 2018

Para o mecanismo sujeito a corte por deslizamento o NTC 2018, apresenta:

$$V_t = l' t f_{vd} \quad (5)$$

Em que,

l' é o comprimento da parte comprimida da parede, obtido com base num diagrama linear de compressões e na ausência de resistência à tração, e t é a espessura da parede.

No caso de análise não linear, a resistência ao corte pode ser calculada definindo $f_{vd} = f_{vm0} + 0.4 \sigma_n \leq f_{y,lim}$ em que, f_{vm0} é a resistência média ao corte da alvenaria (na ausência de determinação direta, pode-se assumir $f_{vm0} = f_{vk0}/0.7$ e $f_{y,lim} = f_{yk,lim}/0.7$).

Em suma, a análise comparativa entre a NP EN 1998-3 (EC8-3) e a NTC 2018 para a verificação do corte por deslizamento revela uma forte convergência, mas apresenta abordagens distintas na quantificação da segurança e na adaptação aos métodos de análise estrutural.

Ambos os documentos normativos partem da premissa do critério de Mohr-Coulomb, assumindo que a resistência depende exclusivamente da porção da parede efetivamente comprimida (D' no EC8-3 e l' na NTC), negligenciando a resistência à tração da alvenaria e adotando um coeficiente de atrito constante de 0,4.

Contudo, as principais divergências manifestam-se na calibração dos parâmetros e na imposição do limite superior de resistência. Enquanto o EC8-3 integra os fatores de confiança (CF_m) e parciais de segurança (γ_m) diretamente na equação geral, minorando a coesão e estabelecendo o limite máximo de corte em função da resistência média à compressão da parede ($0,065 f_m$), o texto da NTC 2018 introduz especificidades para análise estáticas não lineares.

Segundo o parágrafo 7.8.2.2.2 da NTC, em casos não lineares, a tensão resistente (f_{yd}) assume a forma explícita de $f_{vm0} + 0,4 \sigma_n$. A norma italiana diferencia-se ao impor um limite superior específico de cedência ao corte ($f_{y,lim}$), desvinculando-o da compressão simples. Além disso, a NTC 2018 estipula regras diretas para a determinação das resistências médias na ausência de ensaios in situ, permitindo que estas sejam estimadas a partir de valores característicos tabelados divididos pelo coeficiente de 0,7 (e.g., $f_{vm0} = f_{vk0}/0.7$ e $f_{y,lim} = f_{yk,lim}/0.7$). Esta abordagem confere à norma italiana uma grande versatilidade prática na modelação de edifícios existentes, quando a caracterização experimental é limitada.

Por fim, apesar das diferenças de notação entre os dois referenciais normativos, ambas as expressões assentam no mesmo critério físico de rotura: o critério de Mohr-Coulomb, que estabelece que a resistência ao corte de uma interface depende de uma componente coesiva e de uma componente de fricção proporcional à tensão normal atuante (Celano et al., 2021; Calderini et al., 2009). A equivalência entre as duas formulações é assim de natureza mecânica, sendo as diferenças observadas entre os dois códigos atribuíveis exclusivamente à forma como cada um trata os parâmetros de segurança, e não ao modelo de rotura adotado.

2.5.3 Corte diagonal

O corte diagonal não é contemplado pelo EC8-3, sendo o seu cálculo efetuado com base no código italiano (*Circolare 21 gennaio 2019*, n. 7 C.S.LL.PP.). A expressão proposta é:

$$V_t = A \frac{f_{tk}}{b} \sqrt{\frac{\sigma_0}{f_{tk}} + 1} \quad (6)$$

$$b = \begin{cases} 1.5; & \frac{h}{l} \geq 1.5 \\ 1.0; & \frac{h}{l} < 1.0 \\ \frac{h}{l}; & 1.0 \leq \frac{h}{l} \leq 1.5 \end{cases} \quad (6.1)$$

Em que,

A é a área da secção da parede, f_{tk} é a resistência à tração da alvenaria (determinada tipicamente por ensaios de compressão diagonal), que corresponde a $f_{td} = 1.5 \tau$; $\sigma_0 = \frac{N}{(l \cdot t)}$ é a tensão normal média e b é um coeficiente corretivo dependente da esbelteza do painel.

Este critério, originalmente proposto por *Turnsek e Sheppard* (1980), é amplamente utilizado na avaliação sísmica de edifícios de alvenaria existentes, e encontra-se implementado nos principais programas de cálculo da especialidade (Branco, 2019).

2.6 ANÁLISE NÃO LINEAR ESTÁTICA (*PUSHOVER*)

A Análise Não-Linear Estática designada por análise *pushover*, é uma metodologia avançada e amplamente reconhecida para a avaliação do desempenho sísmico de estruturas. A estrutura é submetida a um padrão de forças horizontais que simulam a ação sísmica, cujas intensidades vão sendo incrementadas progressivamente. Em cada passo, regista-se a resposta da estrutura: deslocamentos, formação de rótulas plásticas e redistribuição de esforços, construindo-se a curva de capacidade, que relaciona a força de corte basal com o deslocamento no topo da estrutura (*Ferreira, 2014; Fajfar, 2000*).

Os objetivos principais da análise *pushover* são:

- Determinar a capacidade de deformação e resistência máxima da estrutura;
- Identificar a sequência de formação de rótulas plásticas (plastificação progressiva dos elementos);
- Identificar os mecanismos de colapso e os pontos fracos ou vulnerabilidades estruturais.

O valor da capacidade máxima obtido pelos programas *SeismoStruct* e *3Muri* resulta de uma análise detalhada e incremental. O Eurocódigo simplifica esta avaliação utilizando as expressões analíticas referidas nas secções anteriores, que constituem a forma direta de calcular o valor resistente máximo do elemento, equivalente ao valor de pico da curva de capacidade.

O método N2, proposto por *Fajfar e Fischinger* (1987) e formalmente implementado no Eurocódigo 8 (*Fajfar, 2000*), constitui o procedimento padrão para a verificação de segurança sísmica com base na curva de capacidade. O método combina a análise *pushover* de um modelo de múltiplos graus de liberdade (MDOF) com os espectros de resposta inelásticos em formato aceleração-deslocamento (AD), reduzindo o problema ao de um sistema equivalente com um único grau de liberdade (SDOF). A determinação do deslocamento-alvo é obtida a partir da interseção da capacidade do sistema equivalente com o espectro de resposta inelástico correspondente ao nível de ação sísmica em estudo. Segundo *Fajfar* (2018), a regra do igual deslocamento (*equal displacement rule*) é válida para estruturas com período fundamental superior ao período característico do espectro (TC), sendo que para estruturas mais rígidas é necessário corrigir o deslocamento elástico com o fator de redução $R\mu$. Para estruturas de alvenaria, o método N2 é aplicado de acordo com o Anexo B da NP EN 1998-1:2010, seguindo as indicações do EC8-3 para a construção da curva de capacidade bilinear elasto-perfeitamente plástica (*Candeias et al., 2020*).

2.7 FERRAMENTAS NUMÉRICAS DE MODELAÇÃO, *SEISMOSTRUCT* E *3MURI*

Com o desenvolvimento das ferramentas computacionais, têm sido propostos vários programas para a simulação do comportamento sísmico de estruturas de alvenaria. No âmbito deste trabalho, são utilizados o *SeismoStruct* e o *3Muri*, dois programas amplamente reconhecidos na comunidade científica e de engenharia.

2.7.1 *SeismoStruct*

O *SeismoStruct* é um programa de análise não linear de estruturas desenvolvido pela *Seismosoft*, que implementa metodologias de análise estática e dinâmica não linear. Para estruturas de alvenaria, o programa recorre a modelos baseados em elementos de barra equivalente com secção discreta em fibras (*fiber-based frame elements*), nos quais o comportamento não linear é modelado ao nível de cada fibra de material através de leis constitutivas uniaxiais. Caso a classe do elemento (*element class*), que define a curva de comportamento das fibras não seja reconfigurada, o programa executará a análise seguindo as predefinições padrão. A análise *pushover* pode ser realizada com diferentes padrões de carga lateral, possibilitando a obtenção da curva de capacidade da estrutura. As verificações de segurança ao corte e à flexão são efetuadas em cada passo da análise, por comparação entre as exigências calculadas e as capacidades definidas de acordo com as normas selecionadas, incluindo o Eurocódigo 8, a NTC-18 e a ASCE 41-23.

Para evitar a necessidade de cálculos manuais demorados na estimativa da capacidade dos elementos estruturais, o processo de cálculo incorpora verificações automáticas baseadas em diversas normas de dimensionamento (por exemplo, Eurocódigo 8, ASCE 41-23, NTC-18, KANEPE e TBDY). No caso dos elementos de alvenaria, as verificações fundamentais realizadas durante a análise *pushover* incluem a avaliação da capacidade ao corte (*Shear Capacity*), ao momento fletor (*Bending Moment*) e do *drift*, sendo este definido como o deslocamento relativo entre o topo e a base do nêmo, normalizado pela altura H .

Em cada passo da análise *pushover*, os resultados são registados em tempo real. O algoritmo regista a força de corte na base (*Base Shear*) em função do deslocamento do nó de controlo, gerando a curva de capacidade da estrutura. Em paralelo, a "exigência" (*demand*) registada em cada elemento de alvenaria é diretamente comparada com a "capacidade" (*capacity*) estipulada pelos códigos, permitindo ao utilizador identificar o momento exato em que os vários critérios de desempenho ou falha foram atingidos em cada secção da alvenaria.

2.7.2 *3Muri*

O *3Muri* foi desenvolvido na Universidade de Génova por Lagomarsino et al. (2013) e baseia-se no modelo de pórtico equivalente (*Equivalent Frame Model EFM*). Nesta abordagem, cada parede é discretizada num conjunto de macro-elementos deformáveis: nêmos (elementos verticais resistentes) e lintéis (elementos horizontais de acoplamento) ligados por nós rígidos que simulam as zonas de ligação de dimensões apreciáveis. O comportamento não linear dos

macro-elementos é simulado por leis elástico-plásticas com degradação de resistência, e com critérios de rotura por corte e por flexão de acordo com as formulações do EC8-3 e do código italiano (Candeias et al., 2020; Ferreira, 2014). Os pavimentos podem ser modelados como diafragmas deformáveis ou indeformáveis, e os resultados são apresentados em termos da curva de capacidade global e do estado de dano nos elementos estruturais.

O programa realiza análises *pushover*, fornece a curva de capacidade da estrutura e identifica a sequência de dano nos diferentes elementos. Os critérios de rotura implementados no *3Muri* para cada macro-elemento correspondem, em grande medida, às expressões analíticas apresentadas nas secções anteriores, o que torna este programa particularmente adequado para comparação com os cálculos manuais baseados no EC8-3 (Ferreira, 2014).

2.8 SÍNTESE

O estado da arte evidencia que a avaliação da capacidade resistente de paredes de alvenaria ao esforço horizontal é um problema multifacetado, que envolve a correta identificação do mecanismo de rotura condicionante, a adequada caracterização mecânica dos materiais e a escolha de um enquadramento normativo apropriado. Os três mecanismos de rotura no plano, flexão, corte por deslizamento e corte diagonal, governam de forma distinta consoante o nível de compressão vertical e a geometria do painel, com transição entre mecanismos documentada experimentalmente por *Tomazevic et al. (2009)*. O EC8-3, através do seu Anexo C, fornece as expressões analíticas para flexo-compressão e corte por deslizamento, classificando estes mecanismos como “dúctil” e “frágil” respetivamente, enquanto o cálculo do corte diagonal é remetido para a norma italiana (*Circolare 2019*). O nível de conhecimento alcançado sobre o edifício condiciona, tanto o método de análise admissível, como os coeficientes de confiança a aplicar, impactando diretamente as capacidades calculadas. As ferramentas numéricas *SeismoStruct* e *3Muri* implementam estas formulações em contexto de análise não linear estática (*pushover*), permitindo obter a curva de capacidade completa da estrutura. O método N2 (*Fajfar, 2000; 2018*) fornece então o procedimento para determinar o deslocamento-alvo e proceder à verificação de segurança sísmica. É precisamente na comparação entre a abordagem analítica simplificada do EC8-3 e os resultados dos programas de cálculo, e na análise da influência das hipóteses de modelação na curva de capacidade obtida, que se centra o presente trabalho.

3 MODELAÇÃO NUMÉRICA DE ELEMENTOS DE ALVENARIA

3.1 INTRODUÇÃO

A avaliação sísmica de estruturas de alvenaria por análise de *pushover* requer que cada programa numérico represente o comportamento não-linear dos elementos de parede de forma fisicamente fundamentada. Os dois programas utilizados neste trabalho, *SeismoStruct* e *3Muri*, adotam formulações distintas para modelar os elementos de alvenaria, o que tem consequências diretas na forma da curva de capacidade e nos valores de resistência e deformação obtidos. Este capítulo descreve, com base nos respetivos manuais técnicos (Seismosoft, 2026; S.T.A. DATA srl (2024)), como cada programa modela os elementos, como calcula as resistências à flexão e ao corte, como determina o deslocamento último, e como constrói a curva de capacidade. A compreensão destes mecanismos é indispensável para interpretar corretamente as diferenças observadas nos resultados apresentados nos capítulos seguintes.

3.2 MODELAÇÃO NO *SEISMOSTRUCT*

3.2.1 *Arquitetura do elemento de alvenaria*

O *SeismoStruct* modela cada nembo ou lintel de alvenaria através do elemento *masonry*, descrito no manual como uma combinação de três sub-elementos dispostos em série: dois *links* de corte posicionados nas extremidades do elemento e um sub-elemento interno de fibras que ocupa o trecho central (Seismosoft, 2026). Por estarem em série, o mesmo esforço de corte V atua nos três sub-elementos em simultâneo em cada incremento da análise.

O deslocamento total do elemento é a soma das contribuições de cada sub-elemento: deformação de corte nos *links* e deformação de flexão no sub-elemento de fibras. No caso da modelação o mecanismo que cede primeiro, *link* de corte ou fibras, determina o patamar da curva de capacidade.

3.2.2 Sub-elemento de fibras comportamento de flexão e axial

O sub-elemento interno é um elemento de pórtico 3D *force-based* com plasticidade distribuída. A secção transversal é caracterizada em fibras individuais, cada uma com a sua própria lei constitutiva uniaxial, no caso da alvenaria, os materiais, *mas_par* (modelo parabólico) ou *mas_tl* (modelo trilinear). O comportamento não-linear da secção emerge da integração das tensões e deformações de cada fibra, sem necessidade de definir um comprimento de rótula plástica a priori (Seismosoft, 2026).

A resposta à flexão de cada secção decorre diretamente da lei constitutiva atribuída às fibras. No modelo, *mas_par*, adotado neste trabalho, cada fibra segue uma relação tensão-extensão de tipo parabólico em compressão, com um ramo ascendente até ao valor de pico seguido de um ramo descendente controlado, e uma resistência à tração reduzida que se anula após a fendilhação. A Figura 6 apresenta esta lei sob solicitação cíclica: em compressão (valores negativos), a fibra desenvolve tensão até ao pico, degradando-se em seguida ao longo do ramo descendente, com regras histeréticas de carga e descarga; em tração, a contribuição é praticamente nula, refletindo a baixa resistência à tração da alvenaria. É da integração deste comportamento ao longo de todas as fibras da secção que resulta a resposta momento-curvatura do elemento e, por conseguinte, o seu comportamento não linear à flexão.

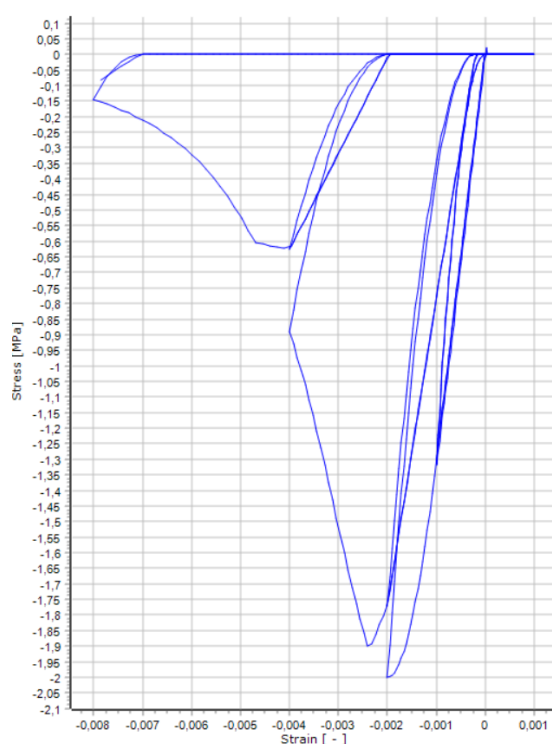


Figura 6 - Lei constitutiva tensão-extensão de uma fibra no modelo, *mas_par* sob solicitação cíclica (comportamento à flexão), no SeismoStruct.

O sub-elemento de fibras é exclusivamente responsável pelo comportamento axial e de flexão. As deformações de corte não são calculadas pelas fibras, ficando a cargo dos *links* externos. A palavra "*Simultaneously*" usada no manual confirma que os dois mecanismos, flexão nas fibras e corte nos *links*, atuam em paralelo temporal a cada incremento, não sequencialmente.

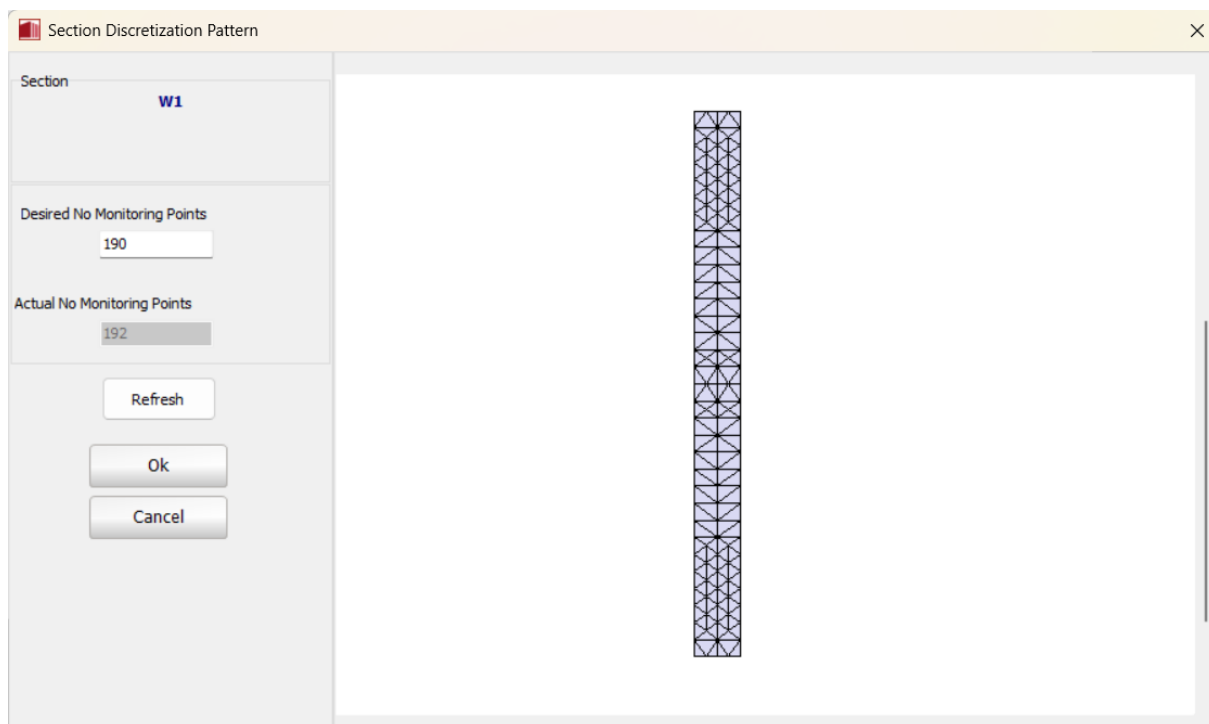


Figura 7 - Discretização da secção mws (*masonry wall section*) em 190 fibras no SeismoStruct (Secção W1)

3.2.3 Calibração da Curva *MIMK_pinned* para Representação do EC8-3

O *link* de corte do elemento *masonry* do SeismoStruct utiliza a curva histerética *MIMK_pinned* (*Modified Ibarra-Medina-Krawinkler deterioration curve with bilinear hysteretic rules and pinching*), originalmente desenvolvida para descrever o comportamento cíclico de elementos estruturais com degradação de resistência e rigidez. Na sua formulação completa, a curva é definida pelos parâmetros ilustrados na Figura 8 (Seismosoft, 2026):

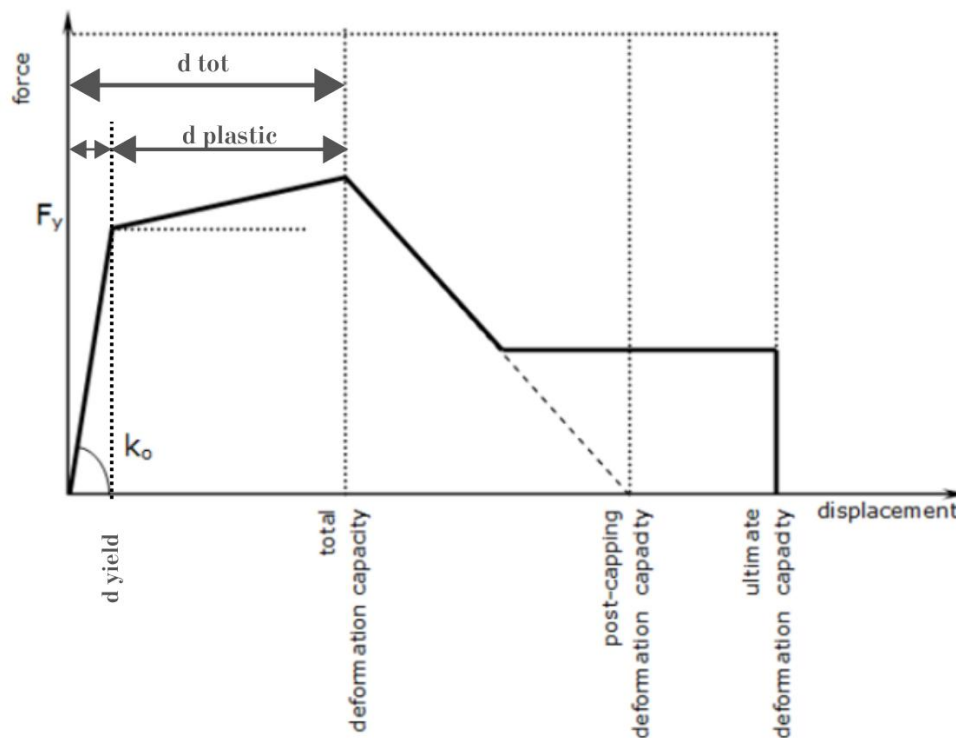


Figura 8 - Curva MIMK_pinched do SeismoStruct: parâmetros de definição (Seismosoft, 2026)

Onde k_0 representa a rigidez elástica inicial, calculada internamente pelo programa como $\beta \times K_{\text{não_fendilhada}}$, onde β é o fator de redução da rigidez não fendilhada definido pelo utilizador.

$F_y = VR_d$ representa a força de cedência, calculada automaticamente pelo programa pela fórmula normativa EC8-3 (expressão C.2 para corte deslizante), com base nas propriedades do material e na geometria da secção.

Total deformation capacity (dtot), representa a deformação correspondente ao pico máximo de resistência, definida como $dtot = d_{yield} + d_{plastic}$. O d_{yield} é calculado internamente pelo programa a partir de k_0 e F_y . É aqui que termina o endurecimento (*hardening*) e começa o ramo descendente (*softening*).

Post-capping deformation capacity, representa a deformação correspondente ao fim do ramo descendente, na interceção com o eixo zero.

Ultimate deformation capacity, representa a deformação a partir da qual não há resistência residual.

Residual shear strength ratio, é o rácio entre a resistência residual e a resistência máxima (no pico, em $dtot$).

Shear deformation hardening ratio, é o rácio entre a rigidez do ramo plástico e a rigidez elástica. Controla a inclinação do patamar entre d_{yield} e d_{tot} .

Parâmetros de deterioração cíclica (Δs , Δk , Δc), controlam a degradação de resistência e rigidez em carregamento cíclico. Um valor zero significa sem degradação.

Na sua forma completa, a curva `MIMK_pinched` representa um comportamento complexo com *hardening* no ramo plástico, pico acima de F_y , ramo descendente gradual, resistência residual e degradação progressiva em ciclos, adequado para análise dinâmica não-linear, mas mais complexo do que o necessário para reproduzir o comportamento normativo do EC8-3 numa análise *pushover* para alvenaria.

O comportamento normativo EC8-3:

O EC8-3 define a capacidade de deformação de paredes de alvenaria em termos de *drift* último (du), expresso como fração da altura do elemento. Para o mecanismo de corte em paredes primárias (Anexo C, EC8-3):

$$du = 0,4\% H$$

O comportamento normativo é bilinear elasto-perfeitamente plástico: fase elástica até $F_y = VR_d$, patamar perfeitamente plástico em VR_d até du , e queda abrupta para zero em du . Não há *hardening*, não há ramo descendente gradual e não há resistência residual.

Calibração da curva `MIMK_pinched`:

Para reproduzir o comportamento normativo do EC8-3 com a curva `MIMK_pinched`, os parâmetros foram calibrados de forma que o *link* de corte se comporte como o EC8-3 define. A estratégia de calibração assenta em três decisões fundamentais:

- **$dtot = du = 0,40\%$** , o total *deformation capacity* (pico da curva) é fixado no *drift* último normativo de corte do EC8-3. É aqui que a curva EC8-3 cai para zero, e é aqui que a `MIMK_pinched` atinge o pico máximo de resistência.
- **$ultimate = dtot = 0,40\%$** , ao fazer coincidir o *ultimate* com o *dtot*, não existe ramo descendente nem patamar residual: a resistência cai imediatamente para zero em du , reproduzindo a queda abrupta da curva EC8-3.
- **$hardening\ ratio = 0,00$** , elimina o *hardening* entre d_{yield} e d_{tot} , tornando o patamar plástico perfeitamente horizontal em VR_d , em coerência com o EC8-3.

Os restantes parâmetros são diretamente consequentes: com $residual = 0,00$ e deterioração cíclica = $0,00$, o comportamento é monótono e sem degradação, adequado a uma análise *pushover* estática. O parâmetro *post-capping* torna-se irrelevante porque $dtot = ultimate$: a resistência cai instantaneamente para zero sem que o ramo descendente seja percorrido.

A Tabela 3 sintetiza os parâmetros adotados e a sua justificação, e a Figura 9 ilustra a sobreposição das duas curvas.

Tabela 3 - Parâmetros de calibração da curva MIMK_pinched para representação do EC8-3

Parâmetro	Valor adotado	Justificação
β (Elastic Stiffness Reduction)	0,50	Aproxima a rigidez inicial à rigidez fendilhada do 3Muri e do EC8-1
Total Shear Deformation Capacity (dtot)	0,40%	Drift último de corte EC8-3 para paredes primárias (Anexo C)
Post-Capping Deformation Capacity	100,00%	Ultimate = dtot, sem ramo descendente
Ultimate Shear Deformation Capacity	0,40%	Igual a dtot queda imediata para zero em du
Residual Shear Strength Ratio	0,00	Sem resistência residual após du
Shear Deformation Hardening Ratio	0,00	Patamar perfeitamente plástico em VRd
Cyclic Deterioration (Λ_s , Λ_k , Λ_c)	0,00	Sem deterioração cíclica, análise pushover monótona

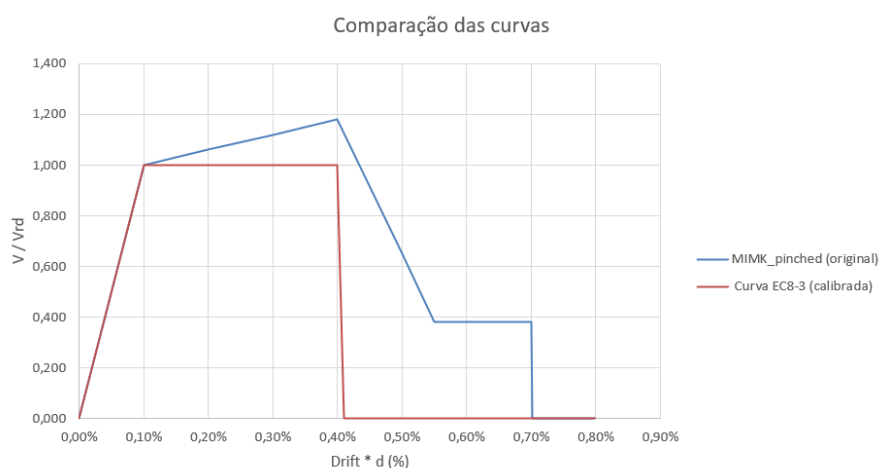


Figura 9 - Sobreposição da curva EC8-3 (vermelho) e da curva MIMK_pinched original (azul): ambas com pico/quebra em $dtot = du = 0,40\%$, divergindo no comportamento pós-pico

3.2.4 Resistência ao corte, VRd

O ponto de cedência do *link* ($F_y = VR_d$) não é definido pelo utilizador, é calculado automaticamente pelo programa com base nas propriedades do material, nas dimensões da secção e no código normativo selecionado. Para o EC8-3, o manual indica as seguintes expressões:

Para rotura por corte deslizante (expressão C.2 do EC8-3):

$$V_f = f_{vd} D' t$$

Para rotura por flexão (expressão C.1 do EC8-3):

$$V_f = \frac{D N}{(2 \times H_0)} (1 - 1,15 v_d)$$

O único valor que o modelo de fibras fornece ao cálculo do VR_d é a força axial N , obtida da integração das fibras em cada incremento. A partir de N , o programa calcula analiticamente D' (comprimento comprimido) e v_d (tensão axial normalizada). Todos os restantes parâmetros, f_{vd} , geometria, condição de fronteira, são inputs fixos definidos pelo utilizador. O VR_d é atualizado a cada incremento até à cedência do *link*, opção que o manual designa como predefinida por oferecer o melhor equilíbrio entre precisão e estabilidade numérica (Seismosoft, 2026).

Importa notar que as verificações normativas de flexão (*code-based checks*) utilizam sempre a expressão $V_f = 2M/L$, correspondente a bi-encastamento ($\alpha = 0,5$), independentemente da condição de fronteira modelada. Esta assunção não afeta a curva de capacidade gerada pela modelação, que respeita a condição de fronteira configurada, mas a mesma assunção tem um impacto nos rácios da verificação reportados pelo programa. Esta questão irá ser desenvolvida nos capítulos seguintes.

3.2.5 Rigidez inicial

A rigidez inicial global do elemento resulta da composição em série de duas contribuições: a rigidez de flexão do sub-elemento de fibras, determinada pelo módulo E do material e pela geometria da secção, e a rigidez de corte dos *links*, igual a $(\beta * K_{\text{não fendilhado}})$. Onde β é o fator de redução da rigidez elástica não fendilhada da curva força-deformação (SeismoSoft, 2026). O cálculo de $K_{\text{não fendilhado}}$ é realizado internamente pelo programa, não sendo detalhado no manual. Com $\beta = 0,50$, a rigidez de corte do *link* corresponde a 50% da rigidez de corte não fendilhada $K_{\text{não fendilhado}}$. A inclinação inicial da curva de capacidade reflete esta composição; não é uma propriedade diretamente introduzida pelo utilizador, mas emerge dos parâmetros do material e do fator β .

3.2.6 Deslocamento último e construção da curva de capacidade

O deslocamento último do elemento (dm) é controlado pelo parâmetro $dtot$ do *link* de corte, definido como (Seismosoft, 2026):

$$dtot = dyield + dplastic$$

O $dyield$ é calculado internamente pelo programa a partir de β e do VRd. O $dplastic$ é o que resta até ao $dtot$ definido pelo utilizador. Quando o *link* atinge o $dtot$, a resistência de corte cai para o valor residual definido (neste caso, zero). A curva de capacidade é construída incrementalmente: em cada passo, o programa aplica um incremento de deslocamento ao nó de controlo, resolve o equilíbrio dos três sub-elementos em série, calcula N atualizado pelas fibras, recalcula VRd e verifica se algum sub-elemento cedeu. O par (deslocamento do nó de controlo, corte basal) é registado e adicionado à curva.

3.3 MODELAÇÃO NO 3MURI

3.3.1 Macro-elemento bilinear

O 3Muri caracteriza a estrutura num pórtico equivalente composto por nembos, lintéis e nós rígidos, onde cada elemento vertical ou horizontal é modelado como um macro-elemento de viga não-linear. O manual descreve as características principais deste elemento (S.T.A. DATA srl (2024)):

- Rigidez inicial calculada a partir das propriedades elásticas fendilhadas do material (E, G e geometria).
- Comportamento bilinear com valores máximos de esforço de corte e momento fletor calculados nos estados limites últimos.
- Redistribuição dos esforços internos segundo o equilíbrio do elemento.
- Degradação de rigidez no ramo plástico.
- Controlo de ductilidade pelo *drift* último (du), diferenciado por mecanismo de rotura.
- Eliminação do elemento ao atingir o *drift* último, sem interrupção da análise global.

O comportamento não-linear é ativado quando um dos esforços nodais atinge o mínimo dos três critérios de resistência (flexão, corte de deslizamento e corte diagonal) (S.T.A. DATA srl (2024)).

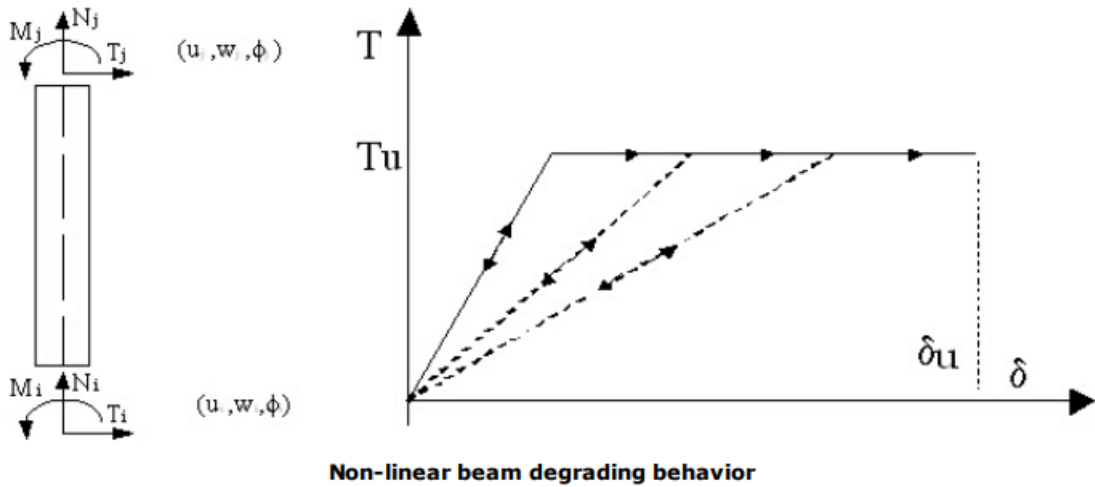


Figura 10 - Macro-elemento de viga não-linear do 3Muri: graus de liberdade nodais (esquerda) e comportamento força de corte T vs deslocamento lateral δ com degradação de rigidez (direita) (S.T.A. DATA srl (2024))

3.3.2 Rigidez inicial

A rigidez lateral do macro-elemento é calculada pela fórmula de *Timoshenko*, que combina as contribuições de flexão (EI) e de corte (GA) (S.T.A. DATA srl (2024)):

$$K = \frac{1}{\frac{h^3}{12EI} + \frac{h}{GA}\chi}$$

onde E e G são os módulos de elasticidade e distorção da alvenaria, h a altura do elemento, I o momento de inércia, A a área da secção e χ o fator de corte de *Timoshenko*. Esta rigidez é calculada diretamente a partir das propriedades fendilhadas do material; o utilizador não define um fator de redução separado como no *SeismoStruct*. A rigidez fendilhada é a rigidez de entrada no modelo, não uma redução aplicada sobre a rigidez não fendilhada.

3.3.3 Critérios de resistência

O *3Muri* avalia três critérios de resistência em cada elemento e em cada passo da análise, utilizando os esforços reais atuantes no elemento nesse instante:

- **Flexão:** momento último calculado com o bloco retangular de tensões (fator 0,85), em função da força axial N e da resistência à compressão f_m . O coeficiente α ($\alpha = 1/2$ bi-encastramento; $\alpha = 1$ consola) emerge do equilíbrio real do painel em cada passo, é calculado a partir da razão entre os momentos nodais actuantes M_i e M_j e o esforço de corte V, segundo a expressão $\alpha = M_{\max} / (V \times H)$, não sendo assumido a priori pelo programa (S.T.A. DATA srl (2024)).

- **Corte deslizante (Mohr-Coulomb):** $V_t = f_{vd} \times l' \times t$, onde l' é o comprimento comprimido calculado iterativamente em função do esforço de corte e do equilíbrio do painel.
- **Corte diagonal (Turnšek e Čačovič):** aplicado para alvenaria irregular, segundo o código italiano. Para EC8-3, este critério não é o condicionante.

O mecanismo condicionante em cada elemento é o que corresponde ao menor dos três valores de resistência. Este processo ocorre em cada incremento da análise, com os esforços atualizados passo a passo.

3.3.4 Drift último e construção da curva de capacidade

O deslocamento último de cada elemento é controlado pelo *drift* último (du), definido automaticamente pelo programa com base no mecanismo de rotura identificado e nas disposições normativas (S.T.A. DATA srl (2024)):

- **Corte:** $du = 0,4\% \times H$ (EC8-3, C.3)
- **Flexão:** $du = 0,8\% \times H_0/D$ (EC8-3, C.3)

Ao contrário do *SeismoStruct*, onde o $dtot$ é um parâmetro de input do utilizador, no *3Muri* o *drift* último é determinado automaticamente pelo programa em função do mecanismo ativo. Quando o *drift* do elemento atinge du , o elemento é eliminado da análise global, sem que a análise seja interrompida. A curva de capacidade global termina quando o corte basal decresce 20% face ao valor máximo (S.T.A. DATA srl (2024)).

3.4 CURVAS DE COMPORTAMENTO E ANÁLISE COMPARATIVA

Para ilustrar as diferenças de comportamento entre os dois programas, foram modelados dois nembos com geometrias distintas: um nembo estreito e alto (esbelto), com razão H/D elevada e mecanismo condicionante de flexão, e um nembo baixo e largo (atarracado), com razão H/D baixa e mecanismo condicionante de corte. As características geométricas de cada nembo são apresentadas na Tabela 3. Para cada nembo foram obtidas três curvas de comportamento: *SeismoStruct* em consola ($\alpha = 1,0$), *SeismoStruct* em bi-encastamento ($\alpha = 0,5$) e *3Muri*.

Tabela 4 - Geometria dos nembos

Parâmetro	Nembo esbelto	Nembo atarracado
l (m)	0,8	6,0
H (m)	5,0	3,0

t (m)	0,3	0,5
H/D	6,25	0,50
Mecanismo	Flexão	Corte

3.4.1 Nembo esbelto — mecanismo de flexão

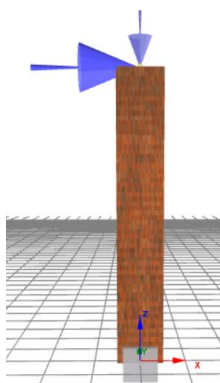


Figura 11 - Nembo esbelto modelado

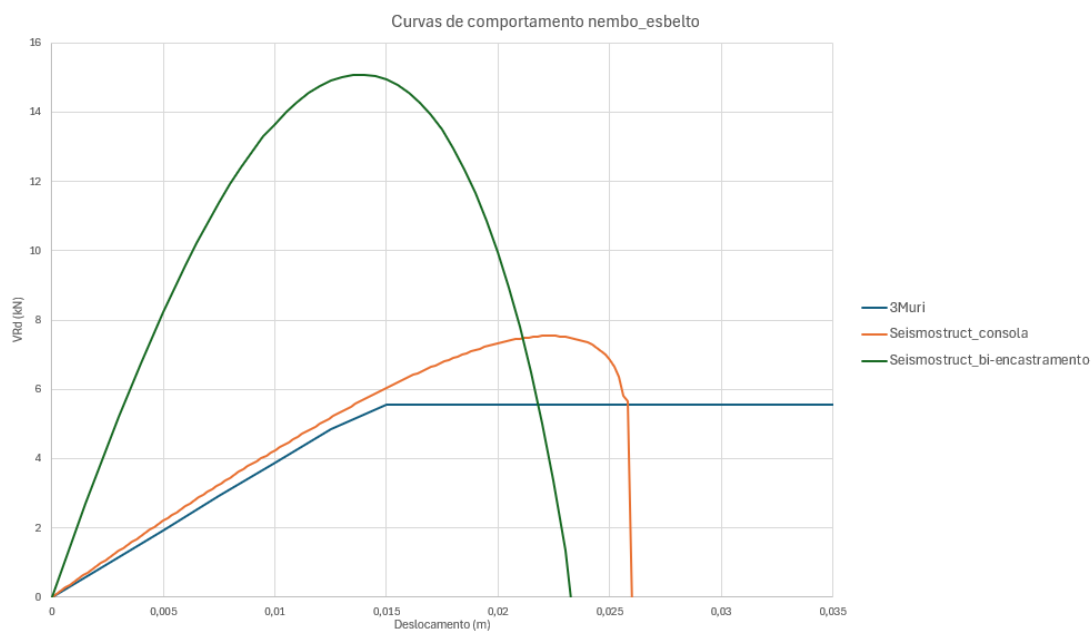


Figura 12 - Curvas de comportamento do nembo esbelto: comparação entre 3Muri e SeismoStruct (bi-encastramento)

As curvas do nembro esbelto evidenciam três diferenças principais. Em primeiro lugar, a resistência do *SeismoStruct* em bi-encastramento é aproximadamente o dobro da resistência em consola, em coerência com $V_f(\text{bi-enc.}) = 2 \times V_f(\text{consola})$ para mecanismo de flexão. Em segundo lugar, as curvas do *SeismoStruct* apresentam pico arredondado e degradação gradual. Esta forma resulta da plastificação progressiva das fibras ao longo da secção e do comprimento do elemento, à medida que as fibras mais solicitadas atingem a sua capacidade; a rigidez global degrada-se continuamente. Em terceiro lugar, a curva do *3Muri* tem forma rectangular, patamar perfeitamente plástico, seguido de queda abrupta. Esta forma resulta diretamente do comportamento bilinear elasto-perfeitamente plástico do macro-elemento: a resistência mantém-se constante até ao *drift* último de $0,8 \times H_0/D$ (EC8-3), momento em que o elemento é eliminado. O *dm* do *3Muri* é calculado automaticamente em função do mecanismo ativo e da geometria do elemento, enquanto no *SeismoStruct* o *dtot* é um parâmetro de input definido pelo utilizador; neste trabalho adotou-se $dtot = 0,40\%$ em conformidade com o EC8-3.

3.4.2 Nembro atarracado — mecanismo de corte

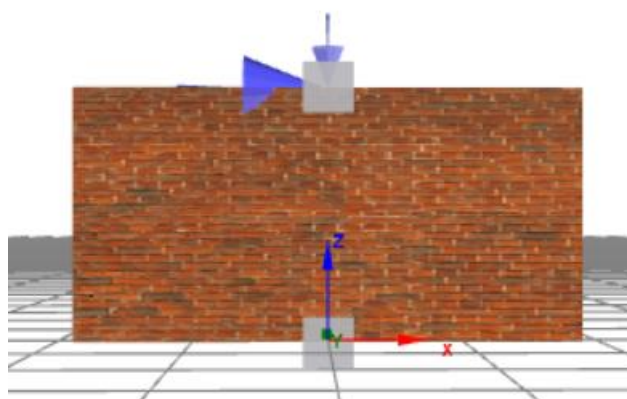


Figura 13 - Nembro atarracado modelado

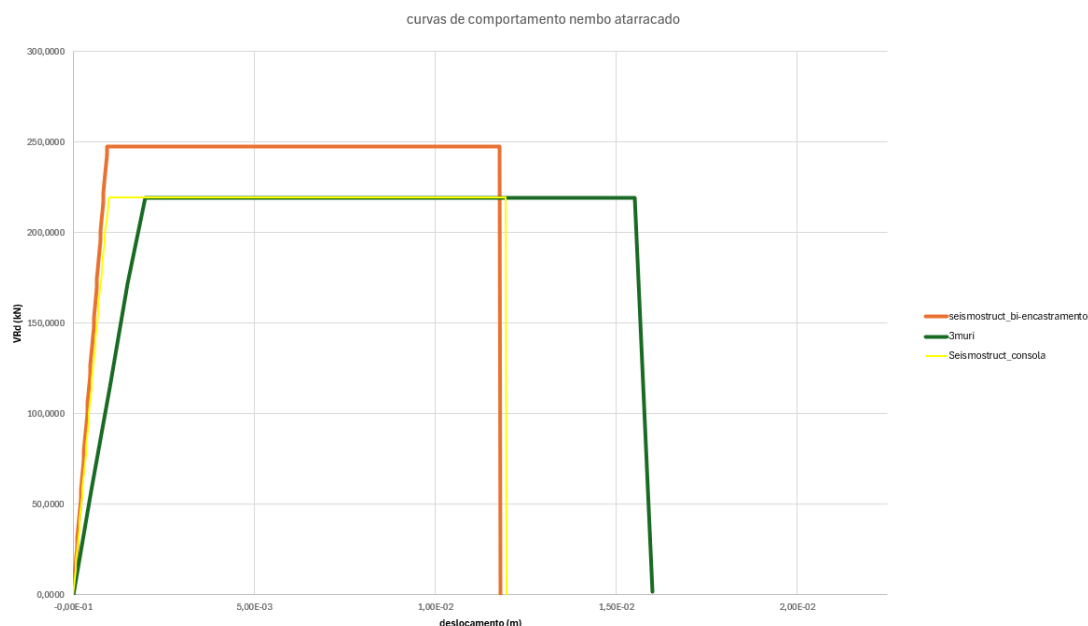


Figura 14 - Curvas de comportamento do nembo atarracado: comparação entre 3Muri e SeismoStruct (bi-encastramento)

As curvas do nembo atarracado evidenciam um comportamento distinto do nembo esbelto. Os patamares de resistência dos três modelos são mais próximos entre si, porque a resistência ao corte é calculada pela mesma fórmula analítica (EC8-3, C.2) nos dois programas, as diferenças de formulação têm menor impacto quando o mecanismo é controlado por uma expressão comum. As três curvas apresentam forma aproximadamente retangular, em contraste com o nembo esbelto: a cedência por corte é brusca nos dois programas, não havendo degradação gradual como na flexão.

No entanto, a inclinação inicial difere entre o modelo em consola e o modelo em bi-encastramento no SeismoStruct, apesar de os inputs serem idênticos. Esta diferença reflete-se no cálculo interno do $d_{yield} = V_{Rd} / K_{shear}$: tanto o V_{Rd} como a rigidez de corte K_{shear} diferem entre as duas condições de fronteira, embora o manual não detalhe explicitamente como K_{shear} é calculado internamente (Seismosoft, 2026). A dependência de ambos os parâmetros face às condições de fronteira foram confirmados pela análise dos resultados obtidos para dois nembos com geometrias distintas, estando em curso esclarecimento junto da Seismosoft. Esta diferença de inclinação não existe no 3Muri, que calcula a rigidez pela fórmula de Timoshenko independentemente da condição de fronteira configurada.

A comparação das curvas de comportamento dos dois nêmbos permite extrair duas conclusões principais. Para mecanismos de corte, os dois programas produzem curvas com patamares de resistência semelhantes, porque ambos utilizam a mesma fórmula analítica normativa (EC8-3 C.2) para calcular VRd. As diferenças residem na inclinação inicial, explicada pelo cálculo interno do d_{yield} em função de H_0 no *SeismoStruct*, e no comprimento do patamar plástico, que no *3Muri* é determinado automaticamente pelo *drift* último normativo. Para mecanismos de flexão, as diferenças são mais pronunciadas: a condição de fronteira tem impacto direto na resistência (fator 2 entre consola e bi-encastramento), e a forma da curva é distinta: degradação gradual das fibras no *SeismoStruct* vs. forma retangular do macro-elemento bilinear no *3Muri*.

4 DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA DE CÁLCULO

O presente capítulo descreve as duas primeiras etapas do trabalho desenvolvido. A primeira etapa consiste na construção e validação de uma folha de cálculo que implementa as expressões analíticas do EC8-3 e do Código Italiano (*NTC 2018/Circolare 2019*) para determinação da capacidade resistente de nembos de alvenaria.

4.1 FOLHA DE CÁLCULO EC8-3 E NTC 18: FUNCIONAMENTO E LÓGICA DE IMPLEMENTAÇÃO

A folha de cálculo desenvolvida no âmbito deste trabalho tem como finalidade determinar a capacidade resistente ao corte de nembos de parede de alvenaria, de acordo com as formulações analíticas estabelecidas pelo Eurocódigo 8 Parte 3 (EC8-3) e pelo Código Italiano (*Circolare 2019*), apresentadas em detalhe no Capítulo 2. A sua conceção privilegiou a transparência do processo de cálculo e a facilidade de adaptação a diferentes geometrias e propriedades de materiais, tornando-a uma ferramenta de uso geral para a avaliação preliminar de fachadas de alvenaria existente.

4.1.1 Estrutura Geral e Dados de Entrada

A folha de cálculo organiza-se em três blocos funcionais distintos: dados de entrada, processamento intermédio e dados de saída. O bloco de dados de entrada é o único que requer intervenção do utilizador, sendo todos os restantes cálculos efetuados automaticamente com base nos valores aí introduzidos.

Os dados de entrada dividem-se em dois grupos. O primeiro grupo diz respeito às propriedades geométricas do nembo: comprimento D , altura H e espessura t da parede, bem como a condição de fronteira (consola ou bi-encastada) e o nível de conhecimento adoptado (KL1, KL2 ou KL3), este último determinando directamente o valor do Fator de Confiança CF_m a aplicar. O segundo grupo engloba as propriedades mecânicas da alvenaria: a resistência média à compressão f_m , a resistência inicial ao corte f_{vk0} , o coeficiente de atrito μ , a resistência à tracção diagonal f_{td} e os módulos de elasticidade E e de distorção G . A carga axial de referência na secção superior do nembo, N_{sup} , é igualmente introduzida neste bloco e constitui o ponto de partida para o cálculo das tensões de compressão ao longo da altura. A figura 15 apresenta o *display* dos dados de entrada.

		Tipo de alvenaria
		Alvenaria Regular
		Tipo de Parede
		Bi-encastada
		Nível de conhecimento
		Conhecimento integral (KL3)
		Dados de Entrada
		Design
		L m
		H m
		t m
		γ_m
		Características
		CF_m
Flexão	f_m	Kpa
C/ Destlizamento	f_b	Kpa
	f_{vk0}	Kpa
	α	
C/ Diagonal	μ	
	τ	Kpa
	γ	kN/m3
	E	kN/m2
	G	kN/m2
	Coef. Seg.	
	N_{sup}	kN

Figura 15 - Esquema dos valores de entrada

4.1.2 Cálculo das Tensões de Compressão ao Longo da Altura

Um dos aspetos centrais da lógica da folha de cálculo é a consideração de que a tensão de compressão σ_0 não é constante ao longo da altura do nembo. A carga axial aumenta da secção superior para a inferior em função do peso próprio da própria parede, calculado com base no volume de alvenaria acima de cada secção e no peso volúmico γ adotado. A folha de cálculo determina automaticamente as tensões nas três secções de verificação: superior, intermédia e inferior, e avalia a capacidade resistente em cada uma delas, identificando a secção condicionante para cada mecanismo.

Esta abordagem por secções é particularmente relevante para o mecanismo de flexão, uma vez que a secção superior, com menor carga axial, apresenta invariavelmente a menor resistência. Para o corte por deslizamento, a situação é mais complexa, pois o aumento de σ_0 que ocorre nas secções inferiores aumenta a resistência de atrito, diminui o comprimento comprimido D' , que é calculado iterativamente em função do momento actuante em cada secção. Para ilustrar a implementação prática desta lógica na ferramenta desenvolvida, a Figura 16 apresenta o respetivo bloco de saída de dados (*outputs*). Como se pode observar, a folha de cálculo extrai e organiza automaticamente os esforços axiais (N_{inf} , N_{mid}) e as correspondentes tensões normais de compressão para as diferentes cotas de verificação (topo, meio e base), permitindo ao utilizador monitorizar a variação da carga ao longo da altura do painel.

Dados de Saída	
N inf	kN
N mid	kN
Tensão sup	kN/m ²
Tensão mid	kN/m ²
Tensão inf	kN/m ²

Figura 16 - Esquema dos valores de saída

4.1.3 Lógica de Cálculo para os Três Mecanismos de Rotura

Para o mecanismo de flexão, a folha de cálculo aplica diretamente a expressão (2) do Capítulo 2, com o coeficiente α correspondente à condição de fronteira introduzida pelo utilizador. A resistência de cálculo à compressão f_d é obtida dividindo f_m pelo produto do coeficiente parcial γ_m e do Fator de Confiança CF_m . O cálculo é realizado para duas secções, a inferior e a meia altura, para se poder ter uma noção geral do desenvolvimento do valor da flexão ao longo do nembro apresentado na Figura 17.

Flexão	
fd	KPa
Vf,mid	KN
Vf,inf	KN

Figura 17 - Esquema dos resultados obtidos para Flexão

Para o mecanismo de corte por deslizamento, o comprimento comprimido D' é determinado de forma analítica a partir da expressão de equilíbrio de momentos deduzida no Capítulo 2.5.2.1, formalmente equivalente à equação 10 de Magenes e Calvi (1997), citada por *Celano et al.* (2021). Esta expressão constitui uma solução fechada que resolve diretamente a dependência mútua entre D' e a força de corte resistente, sem necessidade de qualquer processo iterativo. A tensão de corte resistente f_{vk} é calculada com base na lei de Mohr-Coulomb e limitada por um valor máximo que resulta da combinação das disposições do EC8-3 e do Código Italiano (NTC 2018/*Circolare* 2019). O EC8-3 estabelece o limite:

$$f_{vd,lim} = 0,065 * \frac{f_m}{CF_m \gamma_m} \quad (7)$$

Onde a resistência média à compressão f_m é penalizada pelo fator de confiança CF_m e pelo coeficiente parcial γ_m , e a resistência média à compressão f_m é penalizada pelo fator de confiança CF_m e pelo coeficiente parcial γ_m . A *Circolare italiana*, por sua vez, introduz um fator de 0,7 no denominador aplicável a blocos de forma standard ($f_{v,lim} = 0.065 \frac{f_b}{0.7}$). Como se verifica matematicamente, a introdução deste fator resulta num limite superior de corte mais elevado, adotando uma postura menos conservadora, que permite mobilizar maiores tensões de corte antes de se assumir a rotura dos blocos. Na folha de cálculo desenvolvida, optou-se por uma formulação que integra ambas as disposições, resultando em:

$$f_{v,lim} = 0,065 \frac{f_m}{CF_m \gamma_m 0,7} \quad (8)$$

Esta expressão aplica simultaneamente a penalização normativa do EC8-3 sobre as propriedades mecânicas e o fator de forma da *Circolare* 2019, integrando os dois referenciais normativos na mesma fórmula.

Corte Deslizamento Diagonal	
Meia altura	
$f_{v0}=(f_{vk0}/cf/\gamma_m)$	
f_{lim}	
V corte (sem limite)	
V corte (com f_{vlim})	
V_{ed}	
l_c	

Figura 18 - Esquema dos resultados obtidos para corte de deslizamento

Para o mecanismo de corte diagonal, a folha de cálculo implementa o critério de Turnšek e Čačovič (1980), conforme a expressão (5) do Capítulo 2. O fator de distribuição de tensões b é determinado automaticamente em função da relação de esbelteza $\frac{h}{D}$ do nembro, adotando os valores estabelecidos na *Circolare* 2019. Como na expressão (6.1) do Capítulo 2.

Corte Diagonal		
b		KN
ftd		KN
Vcdd		KN

Figura 19 - Esquema dos resultados obtidos para corte diagonal

Para o corte deslizante e para o corte diagonal, a verificação é efetuada a meia altura do elemento, por constituir uma aproximação média entre os valores obtidos no topo e na base e por ser também onde os programas numéricos verificam a segurança. Para a flexão, a secção condicionante é sempre a base, pois é nessa secção que o momento fletor é máximo e, consequentemente, onde a rotura por flexão é identificada. A folha de cálculo inclui também a verificação de flexão a meia altura, uma vez que, como se verá nos capítulos seguintes, os programas numéricos avaliam a resistência nessa secção, permitindo assim uma comparação mais direta entre os três métodos.

	Meia altura	Inferior
Flexão (kN)		
Corte de Deslizamento (kN)		
Corte Diagonal (kN)		

Figura 20 - Esquemas dos valores compilados dos vários mecanismos

4.1.4 Representação Gráfica e Leitura de Resultados

Para além dos cálculos numéricos, a folha de cálculo inclui uma representação gráfica automática das curvas de resistência em função da carga axial aplicada, para os três mecanismos de rotura. Este gráfico permite visualizar, de forma imediata, como a capacidade resistente de cada mecanismo evolui com o nível de compressão vertical, sendo particularmente útil para identificar o mecanismo condicionante em função de N . A Figura 21 apresenta um exemplo ilustrativo com as três curvas, flexão, corte deslizante e corte diagonal.

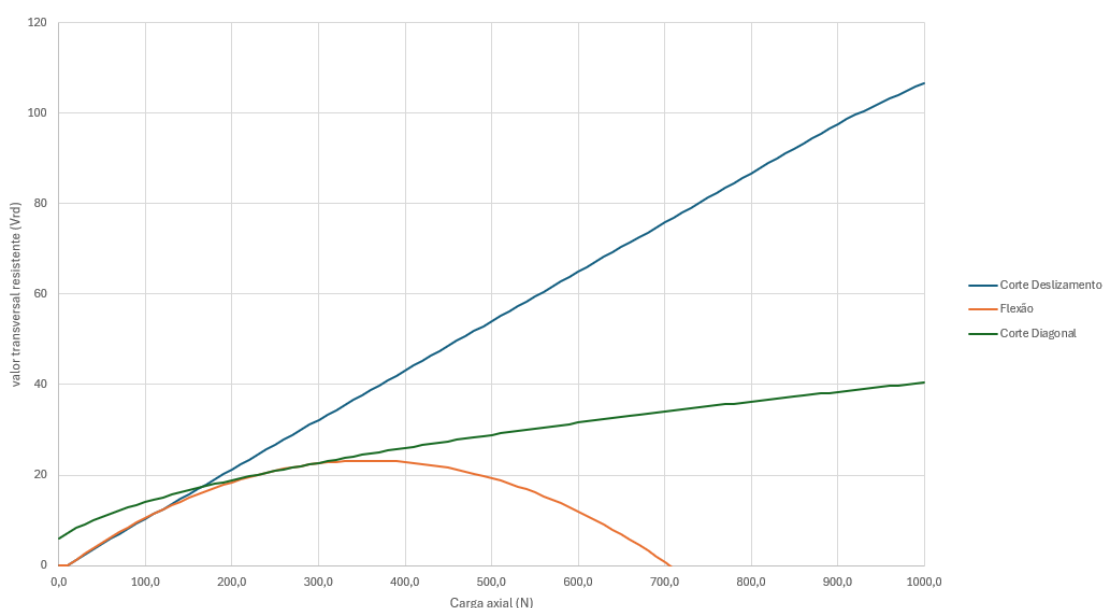


Figura 21 - Curvas de comportamento dos três mecanismos para meia altura

4.1.5 Drift e Parâmetros de Deformabilidade

Para além dos valores de resistência, a folha de cálculo determina os limites de deformação (*drift*) estabelecidos pelo EC8-3 para cada mecanismo de rotura. O *drift* é definido como o deslocamento relativo entre o topo e a base do nêmo, normalizado pela altura H. O Anexo C da NP EN 1998-3:2017 estabelece os seguintes:

- **Para paredes controladas por flexão (elementos sísmicos primários):** $drift = 0,008 \frac{H_0}{D}$, correspondendo ao critério C.4.2.1(2) do EC8-3;
- **Para paredes controladas por corte (elementos sísmicos primários):** $drift = 0,004$, valor constante independente da geometria, critério C.4.3.1(2) do EC8-3.

Estes limites são relevantes para a comparação com os valores de *drift* registados pelas análises *pushover*, como se discutirá no capítulo seguinte.

4.2 VALIDAÇÃO DA FOLHA DE CÁLCULO

A validação da folha de cálculo desenvolvida constitui uma etapa indispensável antes da sua aplicação aos casos de estudo reais. O objetivo desta secção é duplo: em primeiro lugar, demonstrar a equivalência algébrica entre as expressões implementadas e as formulações de referência da literatura; em segundo lugar, comprovar numericamente essa equivalência através da comparação direta com os resultados teóricos publicados por *Celano et al.* (2021), numa revisão bibliográfica abrangente das formulações analíticas para a resistência no plano de paredes de alvenaria não reforçada.

4.2.1 Condições de Cálculo Adotadas na Validação

Para que a comparação com os resultados de *Celano et al.* (2021) seja direta e sem ambiguidade, foram adotadas na folha de cálculo as mesmas condições de cálculo que os autores assumem ao longo do artigo. Estas condições dizem respeito aos fatores de segurança, às condições de fronteira, às secções de verificação e ao tratamento do peso próprio.

Fatores de segurança unitários: O artigo de *Celano et al.* (2021) efetua todas as comparações teóricas com valores médios das propriedades dos materiais, sem aplicação de fatores de redução. Assim, adotaram-se $CFm = 1,0$ e $\gamma m = 1,0$ na folha de cálculo, eliminando qualquer penalização normativa sobre as resistências, e garantindo que as diferenças entre os valores calculados e os publicados refletem exclusivamente eventuais discrepâncias de implementação.

Condições de fronteira: bi-encastamento ($\alpha = 0,5$). Conforme referido na Tabela 1 de *Celano et al.* (2021), todos os ensaios experimentais da base de dados foram realizados em condição de *double-fixed*, ou seja, de bi-encastamento. Esta condição corresponde a $\alpha = 0,5$ e altura de corte efetiva $H_0 = 0,5 H$. A folha de cálculo foi configurada com este valor de α para todos os casos de validação.

Secções de verificação: A folha de cálculo avalia a capacidade resistente nas três secções ao longo da altura do nêmo: superior, intermédia e inferior. Para o mecanismo de flexão, a secção condicionante é a base do nêmo, onde o momento fletor é máximo e a carga axial acumulada é maior. Para o mecanismo de corte por deslizamento, a verificação é efetuada a meia altura, de acordo com o modelo de equilíbrio de *Magenes e Calvi* (1997) que considera o estado de tensão na secção média do painel como referência para o critério de rotura por deslizamento em degrau (DSS). Esta distinção entre secções de verificação é relevante quando existe variação da carga axial ao longo da altura.

Peso próprio da alvenaria igual a zero: Nos ensaios de corte-compressão compilados por Celano et al. (2021), a tensão de compressão média σ_0 é uma carga controlada aplicada no topo do provete durante o ensaio, mantida constante ao longo de todo o carregamento horizontal. Os próprios autores explicitam que *"the self-weight of the wall is generally neglected because it is very low with respect to the average normal stress σ_0 applied during the experimental tests"* (Celano et al., 2021). Uma vez que o peso próprio é nulo, σ_0 é constante ao longo de toda a altura do provete, e consequentemente $N_{sup} = N_{mid} = N_{inf} = \sigma_0 \times t \times D$. Nestas condições, a distinção entre secções de verificação não tem efeito nos resultados numéricos. Na folha de cálculo adotou-se igualmente peso próprio igual a zero para simular com exatidão as condições dos ensaios, e garantir a comparabilidade direta dos valores obtidos.

4.2.2 Equivalência Algébrica das Expressões Implementadas

Estabelecidas as condições de cálculo, mostra-se em seguida que as expressões implementadas na folha de cálculo são algebricamente equivalentes às formulações de referência de Celano et al. (2021), nomeadamente as equações 4, 10 e 13 do artigo, correspondentes aos mecanismos de flexão, corte por deslizamento e corte diagonal, respetivamente.

4.2.3 Mecanismo de Flexão

A expressão do EC8-3 para a resistência à flexão, apresentada na equação (2) do Capítulo 2, é:

$$V_f = \frac{DN}{2 H \alpha} * (1 - 1,15 v_d)$$

Substituindo $v_d = \frac{N}{D t f_d}$, $N = \sigma_0 t D$ e $f_d = \frac{f_b}{C F_m}$, obtém-se a seguinte relação:

$$\begin{aligned} V_f &= \frac{D N}{2 H \alpha} (1 - 1.15 v_d) \\ V_f &= \frac{D (\sigma_0 t D)}{2 \alpha H} (1 - 1.15 v_d) \\ V_f &= \frac{1}{\alpha H} \frac{D^2 t \sigma_0}{2} \left(1 - 1.15 \frac{N}{D t f_d} \right) \\ V_f &= \frac{1}{\alpha H} \frac{D^2 t \sigma_0}{2} \left(1 - 1.15 \frac{\sigma_0}{\frac{f_m}{C F_m}} \right) \end{aligned}$$

Esta expressão é estruturalmente idêntica à equação 4 de Celano et al. (2021), que para o EC8-3 toma a forma, (eq. 4, Celano et al., 2021):

$$V_f = \frac{B s \sigma_o}{2\psi\lambda} \left(1 - \frac{\sigma_o}{0.87 \frac{f_m}{CF_m}} \right)$$

onde $B = D$, $s = t$ e $\psi\lambda = \psi \cdot H/B$ com $\psi = \alpha$. O fator $\frac{1}{0.87} = 1,176$ é a única diferença de notação entre as duas expressões, sendo matematicamente equivalente. A implementação da flexão na folha de cálculo reproduz fielmente a equação 4 do artigo de referência.

4.2.4 Mecanismo de Corte por Deslizamento

O mecanismo de corte por deslizamento é o mais complexo algebricamente. A dedução apresentada parte da expressão base do EC8-3 e mostra a sua convergência para a formulação de Magenes e Calvi (1997), equação 10 de Celano et al. (2021), em dois regimes distintos, consoante o limite superior de resistência ao corte esteja ou não ativo.

4.2.4.1 Expressões de partida.

A resistência ao corte por deslizamento é dada pela equação (4) do Capítulo 2:

$$V_f = f_{vd} D' t$$

onde o comprimento comprimido D' resulta do equilíbrio de momentos na secção de verificação deduzido no Capítulo 2:

$$D' = 3 \left(\frac{D}{2} - \frac{V_{ed} h \alpha}{N_{ed}} \right)$$

e a tensão resistente ao corte f_{vd} é calculada pelo critério de *Mohr-Coulomb*, com limite superior:

$$f_{vd} = \frac{f_{vk0}}{CF_m \gamma_m} + 0.4 \frac{N}{D' t} \leq 0.065 \frac{f_b}{CF_m \gamma_m 0.7} = f_{vdlim}$$

$$f_{v0} = \frac{f_{vk0}}{CF_m \gamma_m}$$

4.2.4.2 Dedução sem limite ativo.

No regime em que $f_{vd} < f_{vdlim}$, o limite superior não está ativo. Partindo de $V_f = f_{vd} \cdot D' \cdot t$ e expandindo f_{vd} pelo critério de *Mohr-Coulomb* com parâmetros globais, $f_{vd} = f_{v0} + \mu \cdot N / (D' \cdot t)$, a expressão de resistência toma a forma:

$$V_f = f_{vd} D' t$$

$$\begin{aligned}
Vf &= (f_{v0} + \mu \frac{N}{D' \cdot t}) D' t \\
Vf &= f_{v0} D' t + \mu N \\
Vf &= f_{v0} t \left(1,5 D - \frac{3 Vf H \alpha}{N} \right) + \mu N \\
Vf &= 1,5 f_{v0} t D - \frac{3 f_{v0} t Vf H \alpha}{N} + \mu N \\
Vf + \frac{3 f_{v0} t H \alpha}{N} \cdot Vf &= 1,5 f_{v0} t D + \mu N \\
Vf \left(1 + \frac{3 f_{v0} t H \alpha}{N} \right) &= 1,5 f_{v0} t D + \mu N \\
Vf &= \frac{1,5 f_{v0} t D + \mu N}{1 + \frac{3 f_{v0} t H \alpha}{N}}
\end{aligned}$$

Esta expressão é matematicamente idêntica à equação 10 de Magenes e Calvi (1997), citada por Celano et al. (2021) como, (eq. 10, Celano et al., 2021):

$$VMC, dss = \frac{B s (1,5 f_{v0} + \mu \sigma_0)}{1 + \frac{3 f_{v0} \psi \lambda}{\sigma_0}}$$

A equivalência é completa: partindo da formulação do EC8-3, e sem ativação do limite superior, chega-se algebricamente à expressão de Magenes e Calvi (1997).

4.2.4.3 Dedução com limite ativo.

No regime em que $f_{vd} \geq f_{vdlim}$, o limite superior é ativado e f_{vd} é substituído por $f_{vdlim} = 0,065 \frac{f_b}{0,7 CFm \gamma m'}$, valor que resulta da combinação do teto normativo do EC8-3 com o fator de forma da *Circolare* 2019, conforme discutido no Capítulo 2. Efetuando a mesma substituição de D' e resolvendo em ordem a Vf com $f_{vd} = f_{vdlim}$:

$$\begin{aligned}
Vf &= f_{vdlim} t \left(1,5 D - \frac{3 Vf H \alpha}{N} \right) \\
Vf &= 1,5 f_{vdlim} t D - \frac{3 f_{vdlim} t Vf H \alpha}{N} \\
Vf + \frac{3 f_{vdlim} t H \alpha}{N} Vf &= 1,5 f_{vdlim} t D \\
Vf \left(1 + \frac{3 f_{vdlim} t H \alpha}{N} \right) &= 1,5 f_{vdlim} t D
\end{aligned}$$

$$Vf = \frac{1,5 f_{vdlim} t D}{1 + \frac{3 f_{vdlim} t H \alpha}{N}}$$

A fórmula é idêntica à do regime sem limite, mas o parâmetro de resistência ao corte é agora o valor teto normativo f_{vdlim} em vez de f_{v0} . Esta substituição introduz uma penalização adicional relativamente à formulação de Magenes e Calvi (1997), refletindo o requisito normativo do EC8-3 de que a tensão de corte não pode exceder 6,5% da resistência à compressão da alvenaria.

A folha de cálculo calcula os dois valores, com e sem limite, e adota o menor como resultado condicionante, garantindo a solução mais conservadora em conformidade simultânea com o EC8-3 e a *Circolare* 2019.

4.2.5 Mecanismo de Corte Diagonal

Para o mecanismo de corte diagonal, a folha de cálculo implementa o critério de *Turnšek e Čačovič* (1970), conforme a expressão (5) do Capítulo 2, formalmente idêntica à equação 13 de Celano et al. (2021), (eq. 13, Celano et al., 2021):

$$Vt = (A \cdot f_{td} / b) \cdot \sqrt{(1 + \sigma_0 / f_{td})}$$

4.2.6 Validação Numérica com Base na Literatura

Estabelecida a equivalência algébrica, procede-se à validação numérica através da comparação directa entre os resultados da folha de cálculo e os valores teóricos publicados por Celano et al. (2021). Foram selecionados quatro casos da base de dados do artigo: três de alvenaria regular (Tabela 5 do artigo) e um de alvenaria irregular (Tabela 8 do artigo), escolhidos de forma a cobrir os três mecanismos de rotura em análise: o Caso 2-R para a flexão, os Casos 13-R e 25-R para o corte por deslizamento em degrau (DSS), e o Caso 114-R para o corte diagonal (DS). Os parâmetros geométricos e mecânicos adotados em cada caso são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros geométricos e mecânicos dos casos de validação (Celano et al., 2021)

Caso	L (m)	H (m)	t (m)	hb/bb (-)	σ_0 (MPa)	f_t (kPa)	f_c (kPa)	f_{v0} (kPa)	f_b (kPa)
2-R	1,00	2,00	0,25	0,42	0,600	250	6200	230	24400
13-R	4,00	2,70	0,102	1,10	0,500	210	5930	140	27400
25-R	1,01	1,42	0,29	0,99	1,670	200	4510	200	14600

114-R	0,90	0,90	0,20	—	0,740	250	10340	—	65600
--------------	------	------	------	---	-------	-----	-------	---	-------

A Tabela 4 apresenta, para cada caso, os três valores de resistência calculados pela folha de cálculo, V_{flex} , V_{DSS} e V_{diag} , e os valores teóricos correspondentes publicados por Celano et al. (2021) para as equações 4, 10 e 13, respetivamente. Os valores são apresentados independentemente de qual é o mecanismo condicionante, com o objetivo de validar cada expressão individualmente. O desvio relativo é calculado entre o valor da folha de cálculo e o valor de referência do artigo para cada mecanismo.

Tabela 6 - Comparação entre os resultados da folha de cálculo e os valores teóricos de Celano et al. (2021)

Caso	V flex. Excel (kN)	V flex. artigo eq.4 (kN)	Desvio flex. (%)	V corte Excel (kN)	V corte artigo eq.10 (kN)	Desvio corte (%)	Mecanismo observado
2-R	66,65	66,7	0,07%	65,69	65,8	0,17%	Flexão (F)
13-R	272,92	272,9	0,01%	77,78	77,9	0,15%	Corte DSS
25-R	199,76	199,8	0,02%	138,68	138,4	0,20%	Corte DSS
114-R	122,30	—	—	—	—	—	Corte diag. (DS)

Tabela 7 - Validação do mecanismo de corte diagonal e verificação de flexão (Caso 114-R, alvenaria irregular)

Caso	V diag. Excel (kN)	V diag. artigo eq.13 (kN)	Desvio diag. (%)	V flex. Excel (kN)	V flex. Excel eq.4 (kN)	Mecanismo observado
114-R	89,56	89,7	0,16%	122,30	—	Corte diag. (DS)

(a) Valor calculado pela folha de cálculo com base na equação 4 do EC8-3, aplicável de igual forma a alvenaria regular e irregular. Celano et al. (2021) não publicam o valor teórico de flexão pela equação 4 para os casos de alvenaria irregular, pelo que não é possível efetuar comparação direta para este mecanismo neste caso.

A análise dos resultados permite tirar conclusões claras sobre a correta implementação da folha de cálculo. Os desvios entre os valores calculados e os publicados por Celano et al. (2021) são sistematicamente inferiores a 0,25% em todos os casos e mecanismos, sendo atribuíveis exclusivamente a diferenças de arredondamento nas ferramentas de cálculo, e não a qualquer discrepância metodológica.

Para o mecanismo de flexão, os três casos em que a expressão é aplicável (2-R, 13-R e 25-R) apresentam desvios de 0,07%, 0,01% e 0,02% respetivamente, confirmando a implementação correta da equação 4 de Celano et al. (2021). Para o mecanismo de corte por deslizamento (DSS), os desvios nos Casos 13-R e 25-R são de 0,15% e 0,20%, confirmando que a dedução algébrica apresentada na secção 3.2.2 reproduz fielmente a equação 10 de Magenes e Calvi (1997). Para o mecanismo de corte diagonal, o desvio no Caso 114-R é de 0,16%, confirmando a implementação correta do critério de *Turnšek e Čačovič* (1970), equação 13 de Celano et al. (2021).

É ainda de salientar que, no Caso 114-R (alvenaria irregular), a folha de cálculo calcula igualmente a resistência à flexão pela equação 4 do EC8-3, obtendo $V_{flex} = 122,30$ kN. A expressão de flexão do EC8-3 aplica-se de forma idêntica independentemente de a alvenaria ser regular ou irregular, uma vez que o mecanismo de flexão depende apenas das propriedades geométricas e da resistência à compressão, não da tipologia de alvenaria. Celano et al. (2021) não disponibilizam, contudo, o valor teórico de flexão pela equação 4 para os casos de alvenaria irregular, pelo que a comparação direta não é possível para este mecanismo neste caso. Em qualquer caso, o valor de $V_{flex} = 122,30$ kN calculado pelo Excel anteriormente validade para flexão é sistematicamente superior ao de corte diagonal (89,56 kN)., confirmando que o mecanismo condicionante é efetivamente o corte diagonal, consistente com o mecanismo experimentalmente observado por Godio et al. (2019) e reportado por Celano et al. (2021).

Concluída esta fase de validação, a ferramenta de cálculo analítico encontra-se devidamente aferida para aplicação aos casos de estudo reais apresentados nos capítulos seguintes, com a garantia de que os resultados produzidos constituem uma estimativa fiável da capacidade resistente de cada nembro, em conformidade com o EC8-3, a NTC 2018 e a *Circolare* 2019.

4.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

O presente capítulo documentou o desenvolvimento e a validação da ferramenta de cálculo analítico que serve de referência para todas as comparações efetuadas nos capítulos seguintes.

Na primeira parte, descreveu-se a estrutura e a lógica de implementação da folha de cálculo, que determina a capacidade resistente de nembos de alvenaria de acordo com as expressões do EC8-3 e do Código Italiano (*NTC 2018/Circolare* 2019). A ferramenta organiza-se em três blocos funcionais dados de entrada, processamento intermédio e dados de saída e considera a variação da tensão de compressão σ_0 ao longo da altura do nemo, verificando a capacidade resistente nas secções superior, intermédia e inferior. Para o mecanismo de corte por deslizamento, o comprimento comprimido D' é determinado por uma expressão fechada obtida por equilíbrio de momentos, formalmente equivalente à equação 10 de Magenes e Calvi (1997), citada por *Celano et al.* (2021), que resolve analiticamente a dependência mútua entre D' e a força de corte resistente, sem necessidade de processo iterativo. A capacidade resistente global do nemo é determinada pelo mínimo dos três mecanismos, identificando simultaneamente o mecanismo condicionante. Mostrou-se ainda que a secção condicionante para o corte por deslizamento e para o corte diagonal é invariavelmente a de meia altura, onde a tensão de compressão é menor; para a flexão, a secção condicionante depende da condição de fronteira adotada.

Na segunda parte, procedeu-se à validação da ferramenta em dois níveis complementares. Primeiro, mostrou-se algebricamente que as expressões implementadas são matematicamente equivalentes às formulações de referência de *Celano et al.* (2021), nomeadamente as equações 4, 10 e 13 do artigo, correspondentes aos mecanismos de flexão, corte por deslizamento diagonal (DSS) e corte diagonal, respetivamente. Segundo, confirmou-se numericamente essa equivalência através da comparação direta com os valores teóricos publicados por *Celano et al.* (2021) para quatro casos selecionados da sua base de dados experimental, três de alvenaria regular e um de alvenaria irregular. Os desvios obtidos são sistematicamente inferiores a 0,25% em todos os casos e mecanismos, atribuíveis exclusivamente a diferenças de arredondamento, confirmando a correta implementação das expressões analíticas.

A ferramenta encontra-se assim devidamente aferida e pronta para ser aplicada nos capítulos seguintes, constituindo a referência analítica relativamente à qual os resultados do *SeismoStruct* e do *3Muri* serão comparados e interpretados.

5 NEMBOS FICTÍCIOS: CALIBRAÇÃO E ANÁLISE COMPARATIVA

5.1 MOTIVAÇÃO E ESTRATÉGIA

Antes de avançar para a análise das fachadas reais do Porto, foi necessário calibrar e validar os modelos numéricos de forma controlada, utilizando nembos com geometria simples e resultados analíticos previsíveis. Para esse efeito, foram definidos quatro nembos fictícios com características geometricamente distintas, escolhidas de modo que dois deles fossem governados pelo mecanismo de flexão, e os outros dois pelo mecanismo de corte, de acordo com o cálculo manual. Esta seleção deliberada permitiu testar a capacidade dos programas para identificar o modo de rotura correto e comparar os valores numéricos de capacidade e *drift* com os calculados analíticos.

Cada nembo foi calculado manualmente pela folha de cálculo EC8-3 para as duas condições de fronteira consola ($\alpha = 1,0$) e bi-encastada ($\alpha = 0,5$) e modelado nos programas *SeismoStruct* e *3Muri*, também para ambas as condições. Esta abordagem sistemática permitiu validar os valores de capacidade, mas sobretudo compreender como cada programa interpreta e implementa as condições de fronteira, uma questão que se revelou central nas conclusões deste trabalho. Salvo indicação em contrário, todos os elementos modelados a partir deste capítulo adotam as mesmas características mecânicas: $\gamma_m = 1,0$; $CF_m = 1,0$; $f_m = 2000$ kPa; $f_b = 10000$ kPa e $f_{vk0} = 30$ kPa.

5.1.1 Caracterização Geométrica dos Quatro Nembos

O critério de seleção da geometria de cada nembo baseou-se na relação de esbelteza $\frac{h}{D}$ (razão entre a altura H e o comprimento D do painel). Em particular, nembos com $\frac{h}{D}$ reduzido (painel largo e baixo) tendem a ser governados pelo corte, uma vez que a pequena altura resulta em momentos fletores reduzidos e a grande dimensão da base confere ao painel uma elevada resistência à flexão, forçando a rotura pelo mecanismo de corte.

A carga axial de referência foi fixada em $N = 300\text{kN}$ para todos os elementos, garantindo comparabilidade direta entre casos.

Tabela 8 - Caracterização geométrica dos quatro nembos fictícios

Elemento	H (m)	D (m)	t (m)	N (kN)	h/D	Fator b	Mecanismo previsto
Elemento 1	3.645	0.8	0.3	300	4.56	1,5	Flexão
Elemento 2	5	0.8	0.3	300	6.25	1,5	Flexão
Elemento 3	3	4	0.5	300	0.75	1,0	Corte
Elemento 4	3	6	0.5	300	0.50	1,0	Corte

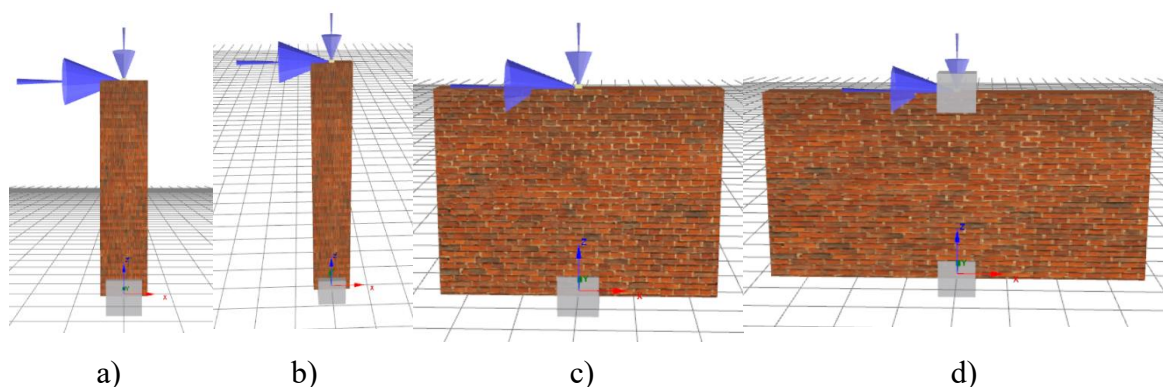


Figura 22 - Nembos fictícios

Os Elementos 1 e 2 apresentam razões $\frac{h}{D}$ de 4,56 e 6,25, respetivamente. Estes valores elevados, muito superiores a 1,5, implicam que o fator de forma atinja o seu limite máximo ($b = 1,5$) e indicam claramente que o comportamento da parede será governado pela flexão, e não pelo corte diagonal. Para a carga axial de 300kN e as propriedades mecânicas adotadas, o cálculo analítico confirma que o mecanismo condicionante é a flexão para ambas as condições de fronteira.

Em contrapartida, os Elementos 3 e 4 apresentam razões $\frac{h}{D}$ de 0,75 e 0,50, respetivamente. Tratando-se de painéis largos e baixos (rácio inferior a 1,0), adota-se o limite inferior normativo para o fator de forma ($b = 1$). Embora a grande dimensão da base confira aos painéis uma expressiva resistência ao corte, o também aumento da resistência à flexão faz com que a rotura ocorra por corte.

5.1.2 Resultados da folha de Cálculo EC8-3

A Tabela 9 apresenta os resultados do cálculo analítico para cada elemento e cada condição de fronteira, indicando a resistência à flexão $V_{R,flex}$ e ao corte $V_{R,corte}$ para a secção de meia altura (condicionante para o corte) e para a secção inferior (condicionante para a flexão), o valor mínimo condicionante V_R com o respetivo mecanismo condicionante e o limite de *drift* do EC8-3. Os coeficientes de confiança e parciais de segurança foram adotados unitários ($CF_m = \gamma_m = 1,0$), para garantir comparabilidade direta com os resultados dos programas.

Tabela 9 - Resultados do cálculo analítico (EC8-3) para os quatro nêmbos — secção intermédia para corte e secção inferior para flexão

Folha de Cálculo (EC8-3)						
Elemento	Fronteira	V_{flex} (kN)	V_{corte} (kN)	V_R cond. (kN)	Mecanismo	Drift EC8-3
Elem. 1	Consola	8,8	30,8	8,8	Flexão	0,036
Elem. 1	Bi-enc.	17,6	56,4	17,6	Flexão	0,018
Elem. 2	Consola	6,3	23,3	6,3	Flexão	0,050
Elem. 2	Bi-enc.	12,6	43,5	12,6	Flexão	0,025
Elem. 3	Consola	216,7	171,4	171,4	Corte	0,004
Elem. 3	Bi-enc.	433,4	198,3	198,3	Corte	0,004
Elem. 4	Consola	364,6	218,1	218,1	Corte	0,004
Elem. 4	Bi-enc.	729,3	250,0	250,0	Corte	0,004

A análise da Tabela 9 evidencia de forma clara o efeito das condições de fronteira na capacidade resistente calculada pelo método analítico. Para os Elementos 1 e 2, governados pela flexão, a passagem de consola para bi-encastramento duplica a resistência: o Elemento 1 passa de 8,79 kN para 17,6 kN e o Elemento 2 de 6,3 kN para 12,6 kN. Este comportamento é o esperado, uma vez que $\alpha = 0,5$ reduz a altura de corte efetiva a metade, duplicando a resistência por flexão para a mesma carga axial.

Para os Elementos 3 e 4, governados pelo corte por deslizamento, a influência das condições de fronteira é igualmente significativa, mas o rácio não é exatamente dois, dado que o comprimento comprimido D' depende do momento atuante e, portanto, de α . O Elemento 3 apresenta 171,4 kN em consola e 198,3 kN em bi-encastamento; o Elemento 4 regista 218,1 kN e 250,0 kN, respetivamente. No que respeita ao *drift*, o EC8-3 prescreve valores fixos de 0,004 para o corte, enquanto para a flexão o *drift* é função de H_0/D e por isso difere entre as duas condições de fronteira; em consola (maior H_0) o limite é superior ao de bi-encastamento, tornando os nembos em consola mais dúcteis em termos de deformação admissível.

5.2 MODELAÇÃO NO *SEISMOSTRUCT*

Os quatro nembos foram modelados no *SeismoStruct* para as duas condições de fronteira, consola e bi-encastamento, configuradas através das restrições nodais do modelo. Os resultados revelaram um comportamento interno do programa mais complexo do que o inicialmente esperado, com implicações diretas na forma como os valores de *Capacity* devem ser lidos e interpretados.

O *SeismoStruct* reporta dois *outputs* de verificação de segurança para cada nembo ao longo de cada passo da análise *pushover*: o *Shear Capacity*, que corresponde ao mínimo entre a resistência ao corte e a resistência à flexão, conforme indicado no manual do programa, e o *Bending Capacity*, que reporta o momento de colapso em kN·m, a partir do qual a resistência à flexão pode ser calculada pela expressão $V_f = M \cdot 2/H$. A identificação do mecanismo condicionante, corte ou flexão, é efetuada com base no *drift* reportado: *drift* = 0,004 indica rotura por corte; qualquer outro valor indica rotura por flexão, calculado em função da geometria do nembo pela expressão $0,008 \times H_0/D$.

A análise dos resultados permitiu identificar um comportamento diferenciado do programa, consoante o mecanismo condicionante e a condição de fronteira modelada, confirmado posteriormente junto da *Seismosoft*:

- Para o mecanismo de flexão, o *SeismoStruct* verifica sempre em condição de bi-encastamento ($\alpha = 0,5$), independentemente da condição de fronteira configurada pelo utilizador no modelo. Esta conclusão foi confirmada pela *Seismosoft*: a verificação da flexão é efetuada com base nas expressões do Anexo C da EN 1998-3, que assumem de forma simplificada bi-encastamento. Os valores de *Shear Capacity* e de *Bending Capacity* são iguais em ambas as configurações de modelação, correspondendo sempre aos valores analíticos de bi-encastamento.

Para o mecanismo de corte, o comportamento depende da condição de fronteira modelada. Quando se modela em bi-encastamento, os valores da Secção A (base) e da Secção B (topo) são iguais entre si e coincidem com os valores analíticos de bi-encastamento. Quando se modela em consola, observa-se um comportamento distinto entre as duas secções: o valor da capacidade da Secção A (base) calculado pelo programa vai diminuindo progressivamente ao longo dos passos da análise até que a razão entre o esforço atuante e a capacidade resistente (demand/capacity) atinja a unidade, momento que o SeismoStruct assinala como reach, aproximando-se do valor analítico de consola. Já o valor da capacidade da Secção B (topo) mantém-se sensivelmente constante e próximo do valor analítico correspondente ao bi-encastamento. A verificação de flexão é sempre efetuada com a condição de bi-encastamento ($\alpha = 0,5$), independentemente da condição de fronteira modelada. A verificação de corte depende da condição configurada pelo utilizador: para bi-encastamento, ambos os links (topo e base) usam $\alpha = 0,5$; para consola, o link reflete a condição de consola ($\alpha = 1,0$). A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos pelo SeismoStruct para os quatro nêmbos nas duas condições de fronteira, com indicação do Shear Capacity, do Bending Capacity (convertido em $V_f = M \cdot 2/H$) e do drift, em comparação com os valores analíticos da folha de cálculo. As células com sombreado mais escuro assinalam os casos em que se modelou em consola com mecanismo de corte

Tabela 10 - Comparação entre os valores analíticos (EC8-3) e os resultados do SeismoStruct para os quatro nêmbos

Cálculo (Excel)				SeismoStruct			
Elem.	Fronteira	VR, flex (kN)	VR, corte (kN)	Shear (kN)	Bending_Vf (kN)	Drift	Modo
Elem. 1	Consola	8,8	30,8	17,6	17,6	0,018225	Flexão
Elem. 1	Bi-enc.	17,6	56,4	17,6	17,6	0,018225	Flexão
Elem. 2	Consola	6,3	23,3	12,6	12,6	0,025	Flexão
Elem. 2	Bi-enc.	12,6	43,5	12,6	12,6	0,025	Flexão
Elem. 3	Consola	216,7	171,4	172	433,3	0,004	Corte
Elem. 3	Bi-enc.	433,4	198,3	199,5	433,3	0,004	Corte
Elem. 4	Consola	364,6	218,1	216,7	729,3	0,004	Corte
Elem. 4	Bi-enc.	729,3	250,0	247,8	729,3	0,004	Corte

A análise da Tabela 10 confirma as conclusões acima descritas. Para os Elementos 1 e 2 (mecanismo de flexão), o *SeismoStruct* produz valores idênticos em ambas as configurações de modelação, 17,6 kN e 12,55 kN, respetivamente, correspondendo aos valores analíticos de bi-encastamento. O *drift* confirma flexão em ambos os casos (0,018225 e 0,025), e o *Bending Capacity* convertido por $V_f = M \cdot 2/H$ coincide com o *Shear Capacity*, o que é consistente com o facto de o *Shear* ser o mínimo entre corte e flexão e, neste caso, a flexão ser condicionante.

Para os Elementos 3 e 4 (mecanismo de corte), o comportamento diferenciado entre as duas configurações é evidente. Quando modelado em bi-encastamento, o *SeismoStruct* produz 199,5 kN e 247,8 kN, correspondendo aos valores analíticos de bi-encastamento (198,3 kN e 250,0 kN), com desvios inferiores a 1%. Quando modelado em consola, os valores de *Shear Capacity* são 172 kN e 216,67 kN, assinalados a sombreado na tabela, que coincidem com os valores analíticos de consola (171,4 kN e 218,1 kN). O *Bending Capacity* mantém-se em ambos os casos em 433,3 kN para o Elemento 3 ($V_f = 729,33$ kN para o Elemento 4), valor muito superior ao *Shear*, confirmando que o corte é condicionante (*drift* = 0,004 em todos os casos de corte).

A identificação do mecanismo condicionante pode ser verificada através do *drift* reportado pelo programa. Para corte, o *drift* assume sempre o valor fixo de 0,004, independentemente da geometria, de acordo com o critério C.4.3.1(2) do EC8-3. Para flexão, o *drift* é calculado pela expressão $0,008 H_0/D$, produzindo um valor variável consoante a esbelteza do nembro e a condição de fronteira assumida, $H_0 = 0,5H$ para bi-encastamento, $H_0 = H$ para consola.

Esta distinção permite verificar, de forma independente, qual a condição de fronteira que o programa está efetivamente a assumir. Para o Elemento 1 ($H = 3,645$ m, $D = 0,8$ m), o *drift* esperado para bi-encastamento é $0,008 \times (0,5 \times 3,645) / 0,8 = 0,01823$, e para consola seria 0,03645, exatamente o dobro. O *SeismoStruct* produz 0,01823 em ambas as configurações, correspondendo inequivocamente ao bi-encastamento. O mesmo padrão confirma-se no Elemento 2: *drift* esperado para bi-encastamento = 0,025, para consola = 0,050, e o programa produz 0,025 em ambos os casos. Para os Elementos 3 e 4, governados pelo corte, o *drift* é fixo em 0,004 por definição normativa, e não permite distinguir as condições de fronteira por esta via; a distinção é confirmada nestes casos pelos valores de *Shear Capacity*, conforme analisado no parágrafo anterior.

5.3 MODELAÇÃO NO 3MURI

Os mesmos quatro nembos foram modelados no *3Muri*. Ao contrário do *SeismoStruct*, o *3Muri* não permite configurar explicitamente a condição de fronteira de um nembro isolado. Os resultados obtidos foram comparados com os valores analíticos para as duas condições de fronteira, com o objetivo de determinar qual das condições o programa assume internamente.

A comparação direta dos valores numéricos revelou que os resultados do *3Muri* coincidem com os calculados pelo EC8-3 para a condição de consola ($\alpha = 1,0$) em todos os quatro elementos, com desvios inferiores a 3%. Esta concordância é consistente para ambos os mecanismos, flexão e corte, confirmando que o programa assume internamente a condição de consola na modelação de nembos isolados.

Tabela 11 - Comparação entre os valores analíticos (EC8-3) e os resultados do *3Muri* para os quatro nembos

Elem.	Fronteira	Cálculo (Excel)		3Muri		
		VR flexão (kN)	VR corte (kN)	V (kN)	Modo	Conclusão
Elem. 1	Consola	8,8	30,8	7,7	Flexão	Consola
Elem. 1	Bi-enc.	17,6	56,4	7,7	Flexão	Consola
Elem. 2	Consola	6,3	23,3	5,6	Flexão	Consola
Elem. 2	Bi-enc.	12,6	43,5	5,6	Flexão	Consola
Elem. 3	Consola	216,7	171,4	173,0	Corte	Consola
Elem. 3	Bi-enc.	433,4	198,3	173,0	Corte	Consola
Elem. 4	Consola	364,6	218,1	219,2	Corte	Consola
Elem. 4	Bi-enc.	729,3	250,0	219,2	Corte	Consola

Os resultados da Tabela 11 confirmam a concordância sistemática com a condição de consola. Para os Elementos 1 e 2, o *3Muri* obtém 7,7 kN e 5,6 kN, face aos valores analíticos de consola de 8,8 kN e 6,3 kN (desvios de 12,4% e 11,2%). Para os Elementos 3 e 4, governados pelo corte, os valores do *3Muri* são 173,0 kN e 219,2 kN, face aos analíticos de consola de 171,4 kN e 218,1 kN (desvios de 0,9% e 0,5%). Os desvios mais elevados nos elementos de flexão são atribuíveis às aproximações internas do modelo de pórtico equivalente, que interpreta de forma diferente a distribuição de rigidez em nembos muito esbeltos. A identificação do mecanismo condicionante é correta em todos os casos.

5.4 SÍNTESE COMPARATIVA: EC8-3, *SEISMOSTRUCT* E *3MURI*

A Tabela 12 apresenta a síntese final dos resultados dos três métodos para os quatro nembos fictícios, com os valores analíticos de ambas as condições de fronteira como referência.

Tabela 12 - Síntese comparativa: EC8-3, *SeismoStruct* e *3Muri* para os quatro nembos (*V* em kN)

Elem.	Cálculo (Excel) Consola		Cálculo (Excel) Bi-enc.		<i>SeismoStruct</i>		<i>3Muri</i>	
	<i>VR (kN)</i>	Modo	<i>VR (kN)</i>	Modo	<i>V (kN)</i>	Modo	<i>V (kN)</i>	Modo
Elem. 1	8,79	Flexão	17,60	Flexão	17,6	Flexão	7,70	Flexão
Elem. 2	6,27	Flexão	12,55	Flexão	12,55	Flexão	5,57	Flexão
Elem. 3	171,40	Corte	198,30	Corte	199,5	Corte	173,00	Corte
Elem. 4	218,14	Corte	250,02	Corte	247,8	Corte	219,24	Corte

Da análise da Tabela 12 consolidam-se as seguintes conclusões:

- **Identificação correta do mecanismo condicionante:** os três métodos identificam o mesmo mecanismo em todos os quatro nembos: flexão nos Elementos 1 e 2, corte nos Elementos 3 e 4, confirmando que a geometria selecionada detetou de forma eficaz os dois regimes de comportamento.
- **Comportamento diferenciado do *SeismoStruct*:** o programa verifica a flexão sempre em bi-encastramento, independentemente da condição de fronteira modelada. Para o corte, o valor da Secção A (base) reflete a condição de fronteira configurada, coincidindo com consola quando assim modelado, enquanto a Secção B se mantém em condição de encastramento. O *Shear Capacity* reportado corresponde sempre ao mínimo entre corte e flexão, sendo a leitura do *drift* o critério correto para identificar o mecanismo condicionante (*drift* = 0,004 implica corte; outro valor implica flexão).

- **3Muri assume consola de forma sistemática:** os valores do *3Muri* coincidem com os analíticos de consola ($\alpha = 1,0$) em todos os elementos e mecanismos, com desvios inferiores a 13%. Esta conclusão é robusta e constitui a chave de interpretação dos resultados do *3Muri* nas etapas seguintes.
- **Chave de leitura para os capítulos seguintes:** os resultados do *SeismoStruct* devem ser interpretados tendo em conta o mecanismo condicionante identificado pelo *drift*: para flexão, o valor corresponde sempre a bi-encastamento; para corte, o valor de *Shear Capacity* depende da condição modelada. Os resultados do *3Muri* devem ser comparados com os analíticos de consola. Esta distinção é fundamental para uma interpretação correta dos resultados apresentados neste capítulo.

5.5 ANÁLISE DE NEMBOS DE FACHADAS REAIS DO PORTO

Estabelecidas as conclusões sobre o comportamento interno dos programas a partir dos nembos fictícios, a metodologia foi aplicada a sete fachadas reais de alvenaria não reforçada do centro histórico do Porto. O objetivo desta etapa é duplo: verificar se as conclusões obtidas em contexto controlado se mantêm válidas em condições reais, com geometrias e cargas heterogéneas, e introduzir uma variável adicional que os nembos fictícios não permitiam explorar: a identificação da condição de fronteira real de cada nembo a partir do comportamento estrutural observado.

5.5.1 Apresentação das Fachadas e Caracterização Geométrica

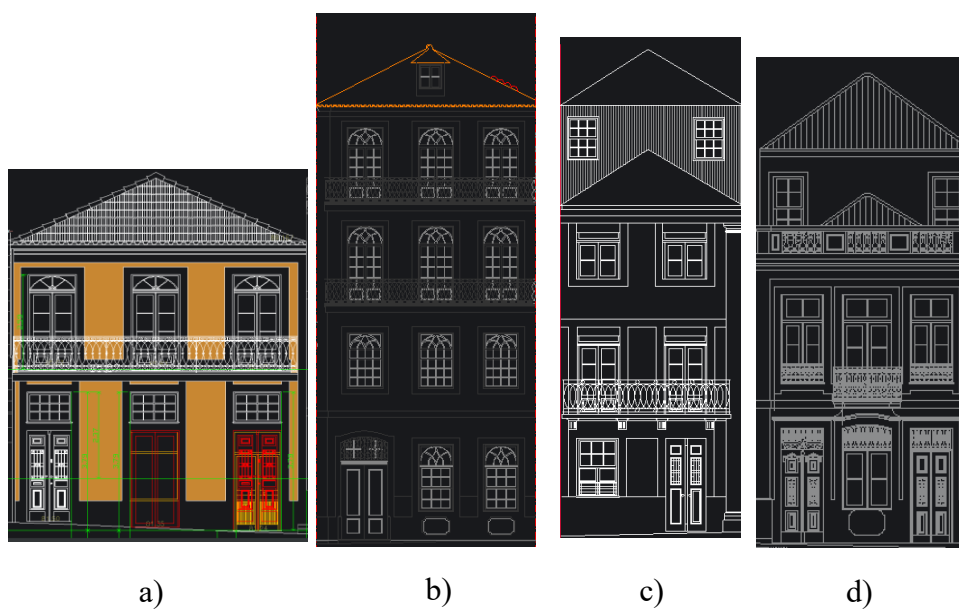
As sete fachadas selecionadas abrangem edifícios de dois a quatro pisos, com diferentes espessuras de parede, pés-direitos e configurações de vãos, garantindo a representatividade tipológica do edificado histórico portuense. Todas são construídas em alvenaria não reforçada, com peso volúmico adotado de $\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$. Em cada fachada foi identificado e analisado o nembo mais central. A geometria e as cargas axiais de cada nembo são apresentadas na Tabela seguinte.

Tabela 13 - Caracterização geométrica dos nembos e cargas axiais calculadas para as sete fachadas

Fachada	Pisos	L Nem. (m)	H nem. (m)	t (m)	Área (m ²)	N (kN)
R. São Bento da Vitória	2	1,330	3,649	0,665	7,36	102,84
R. do Rosário	4	1,201	3,960	0,660	20,08	278,32

R. do Pinheiro	3	1,260	1,494	0,560	9,36	110,07
R. Barão São Cosme	2	0,558	2,420	0,535	5,25	58,98
Praça Coronel Pacheco	4	0,830	3,720	0,575	19,60	236,67
R. Alexandre Braga	3	1,110	4,487	0,350	24,08	176,99
R. do Almada	4	1,070	2,058	0,750	15,99	251,84

A Figura 23 apresenta as sete fachadas do Porto consideradas.



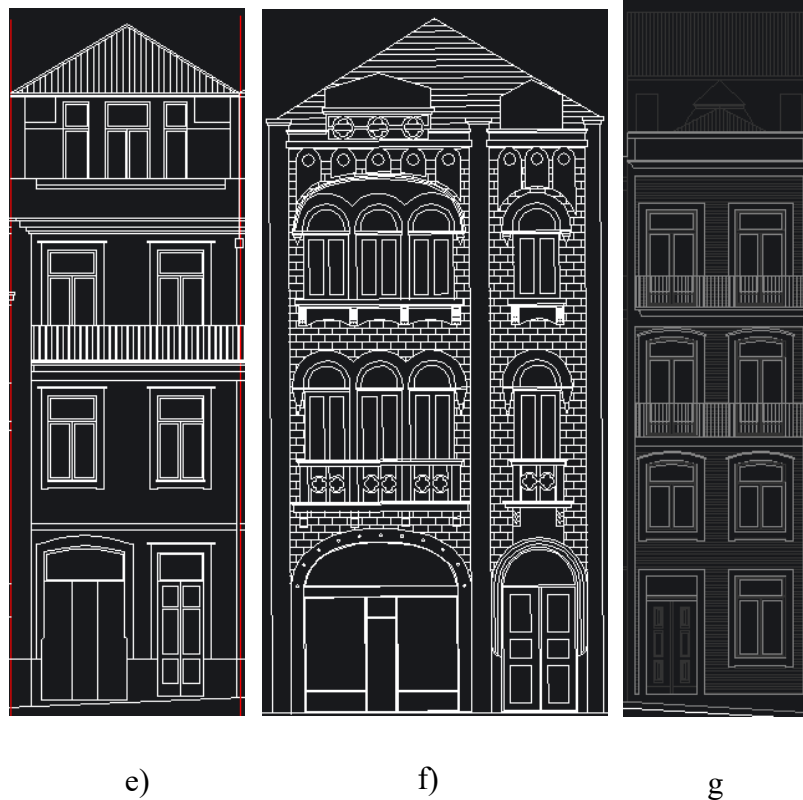


Figura 23 - 7 fachadas de estudo

5.5.2 Identificação das Condições de Fronteira por Análise Modal no SAP2000

Ao contrário dos nembos fictícios, onde as condições de fronteira foram impostas explicitamente, nas fachadas reais a condição de fronteira de cada nembo depende da rigidez relativa dos elementos adjacentes, pavimentos, lintéis e paredes contíguas, e não pode ser determinada a priori de forma inequívoca. Para resolver esta questão, cada fachada foi modelada no *SAP2000* e submetida a uma análise modal, com o objetivo de observar a deformada do modo fundamental e identificar o comportamento de cada nembo.

A deformada modal permite identificar visualmente a condição de fronteira efetiva de cada nembo com base nas deformadas apresentadas na figura 4: quando o topo do nembo apresenta rotação livre, deformada de forma triangular sem inflexão, o comportamento aproxima-se de uma consola ($\alpha = 1,0$); quando existe restrição de rotação em ambas as extremidades e se observa um ponto de inflexão a meia altura, o comportamento aproxima-se do bi-encastramento ($\alpha = 0,5$). A Tabela 14 sintetiza as conclusões obtidas para cada fachada, com base na observação da deformada modal.

Tabela 14 - Condições de fronteira identificadas por análise modal no SAP2000 para as sete fachadas

Fachada	Condição (SAP2000)
a) R. São Bento da Vitória	Consola
b) R. do Rosário	Bi-enc.
c) R. do Pinheiro	Consola
d) R. Barão São Cosme	Bi-enc.
e) Praça Coronel Pacheco	Bi-enc.
f) R. Alexandre Braga	Bi-enc.
g) R. do Almada	Consola

A Figura 24 apresenta exemplos das deformadas modais obtidas no *SAP2000* para os sete casos e respetivos nêmbos analisados.

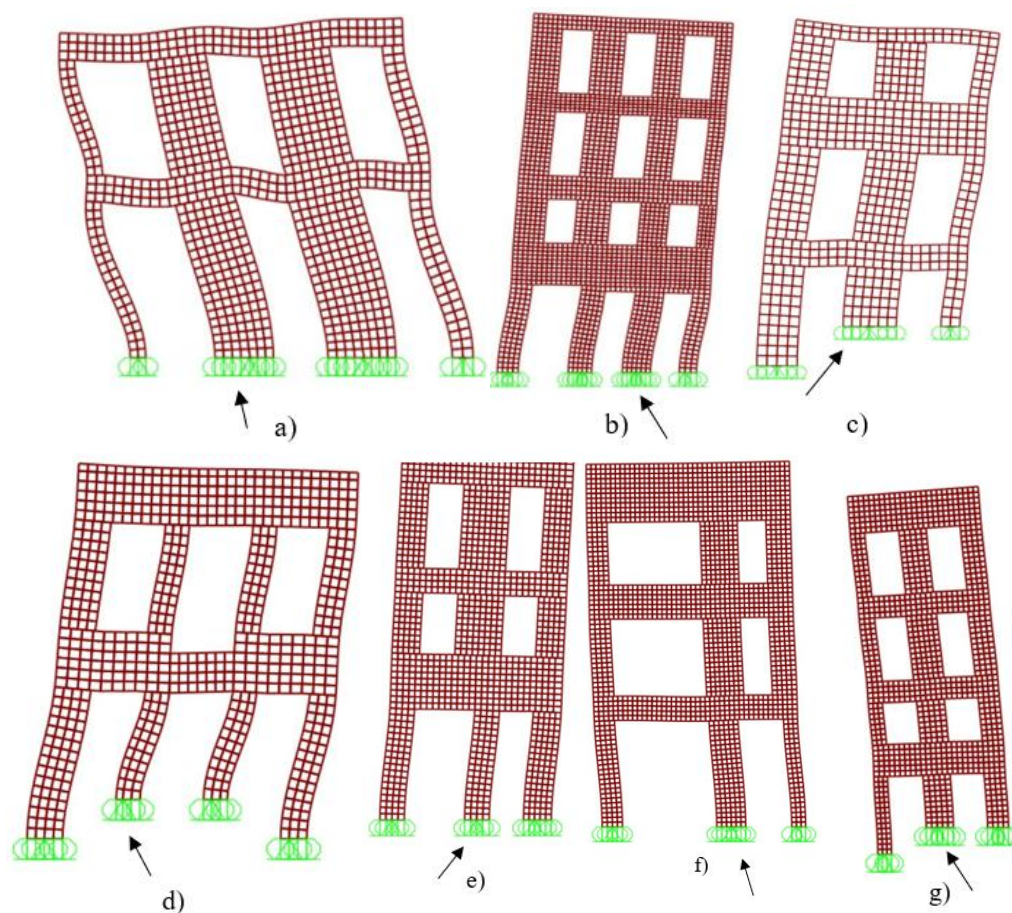


Figura 24 - Deformadas modais das 7 fachadas

Os resultados mostram que três fachadas apresentam, tendencialmente, comportamento de consola (Rua São Bento da Vitória, Rua do Pinheiro e Rua do Almada) e quatro de bi-encastamento (Rua do Rosário, Rua Barão São Cosme, Praça Coronel Pacheco e Rua Alexandre Braga). Esta classificação foi utilizada como referência para o cálculo analítico e para a interpretação dos resultados dos programas nas secções seguintes.

5.6 RESULTADOS: FOLHA DE CÁLCULO, *SEISMOSTRUCT* E *3MURI*

5.6.1 Folha de Cálculo EC8-3

A folha de cálculo foi aplicada a cada nembo com a condição de fronteira identificada pelo *SAP2000*, consola ($\alpha = 1,0$) para três fachadas e bi-encastamento ($\alpha = 0,5$) para quatro. Os coeficientes de confiança e parciais de segurança foram mantidos unitários.

A folha de cálculo EC8-3 foi aplicada a cada nembo para a condição de fronteira identificada na análise modal, com $CF_m = \gamma_m = 1,0$ para garantir comparabilidade direta com os programas. A Tabela 14 apresenta os resultados.

Tabela 15 - Resultados da folha de cálculo EC8-3 para os sete nembos, com a condição de fronteira identificada pelo *SAP2000*

Fachada	Fronteira	VR,corte (kN)	VR,flex (kN)	VR cond. (kN)	Mecanismo	Drift EC8-3
R. São Bento da Vitória	Consola	24,4	22,7	22,7	Flexão	0,036
R. do Rosário	Bi-enc.	86,90	73,08	73,08	Flexão	0,013
R. do Pinheiro	Consola	48,74	46,19	46,19	Flexão	0,006
R. Barão São Cosme	Bi-enc.	15,07	13,61	13,61	Flexão	0,016
Praça Coronel Pacheco	Bi-enc.	52,46	34,10	34,10	Flexão	0,018
R. Alexandre Braga	Bi-enc.	44,35	34,30	34,30	Flexão	0,016
R. do Almada	Consola	65,85	58,84	58,84	Flexão	0,006

Os resultados evidenciam que todos os sete nembos são condicionados pelo mecanismo de flexão para a condição de fronteira identificada. Esta predominância da flexão é coerente com as características geométricas dos nembos, devido a alturas significativas, que resultam em razões h/D elevadas, favorecendo o mecanismo de flexão sobre o corte. Os valores de *drift* variam entre 0,006 (nembos mais esbeltos das fachadas em consola) e 0,036 (Rua São Bento da Vitória), refletindo a influência combinada da esbelteza e da condição de fronteira na deformabilidade admissível.

5.6.2 SeismoStruct

Os sete nembos foram modelados no *SeismoStruct* com a condição de fronteira identificada pelo *SAP2000*. Os resultados foram interpretados à luz do comportamento do programa estabelecido nos nembos fictícios: verificação da flexão sempre em bi-encastramento, verificação do corte dependente da condição modelada. A Tabela 16 apresenta os resultados.

Tabela 16 - Resultados do *SeismoStruct* para os sete nembos

Fachada	Fronteira	Shear (kN)	Bending Vf (kN)	Drift	Tipo	VR Excel (kN)
R. São Bento da Vitória	Consola	45,47	45,47	—	Flexão	22,70
R. do Rosário	Bi-enc.	73,08	73,08	—	Flexão	73,08
R. do Pinheiro	Consola	51,26	91,95	0,004	Corte	46,19
R. Barão São Cosme	Bi-enc.	13,38	13,38	—	Flexão	13,61
Praça Coronel Pacheco	Bi-enc.	39,43	39,43	—	Flexão	34,10
R. Alexandre Braga	Bi-enc.	34,34	34,34	—	Flexão	34,30
R. do Almada	Consola	113,00	113,00	—	Flexão	58,84

Para as quatro fachadas em bi-encastramento (Rua do Rosário, Rua Barão São Cosme, Praça Coronel Pacheco e Rua Alexandre Braga), o *SeismoStruct* identifica flexão em todos os casos e os valores de *Shear Capacity* são próximos dos analíticos, com desvios inferiores a 16%. A coincidência entre *Shear* e *Bending* ($V_f = M \cdot 2/H$) confirma que a flexão é condicionante, o que é consistente com o facto de o *Shear* ser o mínimo entre corte e flexão e, neste caso, a flexão governar.

Para as três fachadas em consola (Rua São Bento da Vitória, Rua do Pinheiro e Rua do Almada), o comportamento é mais complexo. A Rua São Bento da Vitória e a Rua do Almada apresentam *Shear* igual ao *Bending*, identificando flexão. No entanto, os valores de *Shear Capacity* são significativamente superiores aos analíticos de consola, 45,47 kN vs. 24,90 kN e 113,00 kN vs. 58,84 kN, respetivamente, refletindo a já documentada assunção de bi-encastamento na verificação da flexão pelo *SeismoStruct*: mesmo modelando em consola, o programa verifica a flexão com $\alpha = 0,5$, produzindo um valor de resistência correspondente ao bi-encastamento.

A Rua do Pinheiro constitui o caso mais relevante desta análise, assinalado a sombreado na Tabela 16. O *SeismoStruct* identifica corte como mecanismo condicionante ($drift = 0,004$) com um *Shear Capacity* de 51,26 kN, enquanto a folha de cálculo indica flexão com 46,19 kN. Esta aparente contradição tem uma explicação direta no comportamento do programa: como o nembro foi analisado e modelado em consola e o *SeismoStruct* não verifica a flexão para a condição de consola, efetuando sempre esta verificação para bi-encastamento, o valor de flexão calculado pelo programa (correspondente a bi-encastamento) não é atingido antes do limite de corte. O rácio entre o esforço atuante e a capacidade resistente (performance ratio) ao nível do corte atingiu um valor máximo de 0,91 ao longo de toda a análise, sem nunca atingir a unidade, isto é, sem reach, o que significa que nenhuma das duas verificações (corte ou flexão) foi efetivamente violada durante o *pushover*. Ainda assim, o programa identifica o corte como mecanismo condicionante, por corresponder ao rácio mais elevado dos dois avaliados. Esta identificação não corresponde, no entanto, ao mecanismo real, uma vez que a capacidade à flexão usada nesse cálculo foi obtida para a condição de bi-encastamento e não de consola, subestimando a proximidade real do nembro à rotura por flexão. Este resultado evidencia uma limitação importante do programa quando aplicado a nembros em consola com mecanismo de flexão condicionante: a verificação produzida não é fiável nesta configuração específica.

5.6.3 3Muri

Os mesmos sete nembros foram modelados no *3Muri*. Os resultados foram comparados com os analíticos tendo em conta que, como estabelecido nos nembros fictícios, o *3Muri* assume internamente a condição de consola ($\alpha = 1,0$). A Tabela 17 apresenta os resultados.

Tabela 17 - Resultados do *3Muri* para os sete nembros

Fachada	V <i>3Muri</i> (kN)	Tipo	VR Excel (kN)	Fronteira Excel
R. São Bento da Vitória	22,44	Flexão	22,7	Consola
R. do Rosário	36,50	Flexão	73,08	Bi-enc.
R. do Pinheiro	46,83	Flexão	46,19	Consola
R. Barão São Cosme	6,93	Flexão	13,61	Bi-enc.

Praça Coronel Pacheco	20,70	Flexão	34,10	Bi-enc.
R. Alexandre Braga	17,10	Flexão	34,30	Bi-enc.
R. do Almada	58,46	Flexão	58,84	Consola

Os resultados do *3Muri* revelam um padrão consistente com o estabelecido nos nembos fictícios para as fachadas em consola: a Rua do Pinheiro e a Rua do Almada apresentam desvios inferiores a 2% face aos analíticos de consola, e a Rua São Bento da Vitória um desvio de 10%. O *3Muri* identifica corretamente flexão como mecanismo condicionante nas três fachadas em consola, em concordância com a folha de cálculo.

Para as quatro fachadas em bi-encastamento, os desvios face aos analíticos são mais expressivos, entre 39% e 50%, porque o *3Muri* continua a assumir consola internamente, produzindo valores inferiores aos esperados para a condição de bi-encastamento real. Este comportamento é coerente com o que foi observado nos nembos fictícios e não representa um erro de implementação, é antes uma consequência da assunção sistemática de consola pelo programa, que subestima a resistência quando a condição real é bi-encastamento.

5.7 SÍNTESE COMPARATIVA

A Tabela 18 apresenta a síntese comparativa dos três métodos para os sete nembos.

Tabela 18 - Síntese comparativa: Excel, SeismoStruct e 3Muri para os sete nembos

Fachada	Fronteira (SAP)	Excel VR (kN)	Seismo Shear (kN)	Seismo Tipo	3Muri V (kN)	3Muri Tipo
R. São Bento da Vitória	Consola	22,7	45,47	Flexão	22,44	Flexão
R. do Rosário	Bi-enc.	73,08	73,08	Flexão	36,50	Flexão
R. do Pinheiro	Consola	46,19	51,26	Corte	46,83	Flexão
R. Barão São Cosme	Bi-enc.	13,61	13,38	Flexão	6,93	Flexão
Praça Coronel Pacheco	Bi-enc.	34,10	39,43	Flexão	20,70	Flexão
R. Alexandre Braga	Bi-enc.	34,30	34,34	Flexão	17,10	Flexão
R. do Almada	Consola	58,84	113,00	Flexão	58,46	Flexão

Da análise da Tabela 18 consolidam-se as seguintes conclusões:

- O *3Muri* é consistente para fachadas em consola e subestima para *bi-encastramento*. Para as três fachadas em consola, os valores do *3Muri* concordam com os analíticos de consola com desvios inferiores a 10%, confirmando a assunção interna de $\alpha = 1,0$. Para as quatro fachadas em bi-encastramento, os desvios são entre 39% e 50%, porque o programa continua a assumir consola independentemente da condição real.
- O *SeismoStruct* verifica a flexão sempre em bi-encastramento. Para as fachadas em bi-encastramento, os valores do *SeismoStruct* concordam com os analíticos de bi-encastramento. Para as fachadas em consola, o programa produz valores de flexão correspondentes ao bi-encastramento, sobrestimando a resistência quando a condição real é consola. Este comportamento, já documentado nos nembos fictícios, confirma-se aqui em condições reais.
- A Rua do Pinheiro evidencia uma limitação do *SeismoStruct* em consola. Quando a condição real é consola e o mecanismo condicionante é flexão, o *SeismoStruct* pode identificar corte incorretamente, porque não verifica a flexão para a condição modelada. Nestes casos, o *performance ratio* inferior a 1,0 não sinaliza *reach*, mas o mecanismo reportado não corresponde ao real. O utilizador deve interpretar estes resultados com cautela, sendo recomendável confirmar com a modelação em bi-encastramento.

5.8 SÍNTESE DO CAPÍTULO

O presente capítulo desenvolveu-se em duas etapas complementares. Na primeira, quatro nembos fictícios foram utilizados para calibrar os modelos numéricos e compreender o comportamento interno do *SeismoStruct* e do *3Muri* na verificação de segurança sísmica. Na segunda, a metodologia foi aplicada a sete fachadas reais do centro histórico do Porto, com a condição de fronteira de cada nembo identificada por análise modal no *SAP2000*.

As conclusões das duas etapas são coerentes entre si e reforçam-se mutuamente. O *SeismoStruct* verifica a flexão sempre em bi-encastramento, independentemente da condição modelada, facto confirmado pela *Seismosoft*. Para o corte, o valor da Secção A (base) reflecte a condição configurada quando modelado em consola, convergindo para o valor analítico de consola, enquanto a Secção B se mantém em bi-encastramento. Esta distinção foi observada nos nembos fictícios e confirmada nas fachadas reais, onde o caso da Rua do Pinheiro ilustra a limitação do programa quando aplicado a nembos em consola com mecanismo de flexão condicionante. O *3Muri* assume internamente a condição de consola de forma sistemática, produzindo valores concordantes com os analíticos de consola para as fachadas em consola, mas subestimando a resistência nas fachadas em bi-encastramento.

Estas conclusões estabelecem a chave de interpretação para o Capítulo 6, onde o mecanismo de corte diagonal é analisado em nembos fictícios de alvenaria irregular, e para o Capítulo 7, onde a análise é estendida à escala de uma fachada completa.

6 ANÁLISE DO MECANISMO DE CORTE DIAGONAL

Os capítulos anteriores focaram-se na análise de nembos de alvenaria mais regular, em particular mais estratificada, como tende a ser a tipologia dominante no edificado histórico Português, onde os mecanismos condicionantes são o corte por deslizamento e a flexão. No entanto, existe um terceiro mecanismo de rotura relevante em estruturas de alvenaria: o corte diagonal, que ocorre por fendilhação inclinada no interior do painel quando a tensão de tração diagonal excede a resistência característica do material nessa direção. Este mecanismo é mais frequente em alvenaria irregular, tipologia predominante na região de Lisboa e no sul do país, caracterizada por menor regularidade das juntas e maior heterogeneidade das unidades.

Com o objetivo de compreender o comportamento dos três métodos de análise face ao mecanismo de corte diagonal, folha de cálculo *NTC18*, *3Muri* e *SeismoStruct*, foram definidos quatro nembos fictícios adicionais. Dois deles foram concebidos para serem governados pelo corte diagonal e os outros dois pelo mecanismo de flexão, servindo estes últimos como casos de controlo para verificar se os programas identificam corretamente a transição entre mecanismos quando o corte diagonal está ativo.

6.1 O MECANISMO DE CORTE DIAGONAL E A SUA FORMULAÇÃO

O mecanismo de corte diagonal distingue-se do corte por deslizamento na sua natureza física: enquanto o deslizamento ocorre ao longo das juntas horizontais de argamassa, o corte diagonal resulta da fendilhação que atravessa tanto as unidades como as juntas, propagando-se de forma inclinada no painel. A resistência a este mecanismo é governada pela resistência à tração diagonal do material, parâmetro que reflete a coesão interna da alvenaria.

A formulação adotada é o critério de Turnšek e Čačovič (1980), implementado na folha de cálculo e adotado pelo Código Italiano (NTC 2018/Circolare 2019) para alvenaria irregular, como foi apresentado no capítulo 2.5.3.

Uma característica fundamental desta expressão, com implicações diretas na metodologia de análise, é a ausência do coeficiente α : ao contrário dos mecanismos de flexão e de corte por deslizamento, a resistência ao corte diagonal não depende das condições de fronteira do nembro. Isto significa que, para este mecanismo, os resultados são independentes de se considerar consola ou bi-encastamento, o que simplifica a análise e elimina a ambiguidade identificada nos capítulos anteriores relativamente à assunção interna de cada programa.

Para que o corte diagonal seja o mecanismo condicionante, o valor de V_t calculado pela expressão (6) deve ser inferior tanto à resistência à flexão como à resistência ao corte por deslizamento. Isto ocorre tipicamente em painéis com relação de esbelteza $\frac{h}{D}$ moderada, nem muito esbeltos (que favoreceriam a flexão) nem muito largos (que favoreceriam o deslizamento), e com valores de τ_0 suficientemente baixos para que a fendilhação diagonal seja atingida antes dos outros mecanismos. Importa notar que o parâmetro de resistência introduzido no *3Muri* é a tensão de corte de referência τ_0 (também designada por coesão), e não directamente a resistência à tracção diagonal f_{td} . A relação entre os dois parâmetros, assumida pela norma italiana, é $f_{td} = 1,5 \tau_0$, pelo que os valores de $\tau_0 = 20 \text{ kPa}$ adoptados nesta análise correspondem a $f_{td} = 30 \text{ kPa}$. Esta distinção é relevante para garantir a coerência entre o valor introduzido no programa e o utilizado no cálculo analítico.

6.2 DEFINIÇÃO DOS QUATRO NEMBOS

Os quatro Nembos foram definidos com geometrias distintas, seleccionadas de modo que os Nembos 1 e 2 sejam governados pelo corte diagonal e os Nembos 3 e 4 pela flexão, constituindo estes últimos casos de controlo. Para todos os nembos foi adotada a mesma carga axial de referência $N = 300 \text{ kN}$ e a mesma resistência à tracção diagonal $f_{td} = 20 \text{ kPa}$, valor representativo de alvenaria irregular segundo o Código Italiano.

A alvenaria irregular é a tipologia considerada nesta análise, por ser aquela em que o mecanismo de corte diagonal é mais relevante e onde o critério de Turnšek e Čačovič se aplica directamente. Em alvenaria mais regular, como a analisada nas fachadas do Porto nos capítulos anteriores, o corte por deslizamento tende a ser condicionante antes do corte diagonal ser atingido, razão pela qual este mecanismo não foi observado nessa análise.

Tabela 19 -Caracterização geométrica dos quatro nembos para análise do corte diagonal

Nembo	H (m)	D (m)	t (m)	N (kN)	h/D	Fator b	Mecanismo previsto
Nembo 1	3,0	1,5	0,5	300	2,00	1,5	Corte Diagonal
Nembo 2	2,5	2,5	0,3	300	1,00	1,0	Corte Diagonal
Nembo 3	3,0	0,8	0,5	300	3,75	1,5	Flexão

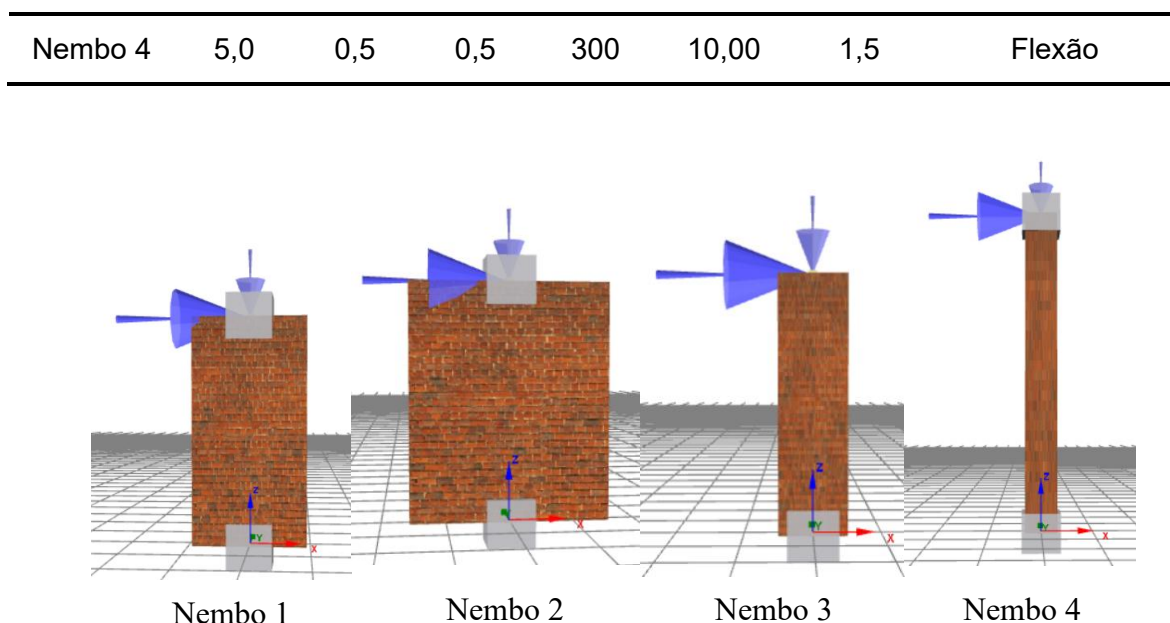


Figura 25 - Caracterização dos nembos

Os Nembos 1 e 2 têm geometrias com $\frac{h}{d}$ moderado (2,00 e 1,00 respectivamente), favoráveis ao desenvolvimento do mecanismo diagonal. O fator b explicado no capítulo 2.5.3 assume o valor máximo de 1,5 para o Nembo 1 ($\frac{h}{d} \geq 1,5$) e o valor de 1,0 para o Nembo 2 ($\frac{h}{d} = 1,0$), reflectindo a diferença na distribuição de tensões de corte. Os Nembos 3 e 4 têm $\frac{h}{d}$ elevado (3,75 e 10,00), típico de nembos esbeltos onde a flexão condiciona antes do corte diagonal ser atingido.

6.3 RESULTADOS DO CÁLCULO ANALÍTICO E DO 3MURI

A Tabela 20 apresenta os resultados do cálculo analítico pela folha de cálculo e do 3Muri para os quatro nembos. A tensão de corte diagonal $\tau = 20$ kPa é a mesma em todos os casos, dado que para o mecanismo diagonal este valor é o parâmetro de resistência de referência, independente das condições de fronteira. Os valores de força de corte resistente V resultam da aplicação direta da expressão (6), com variação apenas em função da geometria do painel.

Tabela 20 - Resultados do cálculo analítico (Excel) e do 3Muri para os quatro nembos

Nembo	τ Excel (kPa)	V Excel (kN)	Excel mecanismo	τ 3Muri (kPa)	V 3Muri (kN)	3Muri mecanismo
Nembo 1	20	56,7	Corte diagonal	20	57,6	Corte diagonal

Nembo 2	20	70,9	Corte diagonal	20	71,6	Corte diagonal
Nembo 3	20	22,8	Flexão	20	22,5	Flexão
Nembo 4	20	4,7	Flexão	20	3,7	Flexão

A concordância entre a folha de cálculo e o *3Muri* é excelente em todos os quatro nembos, com desvios inferiores a 2% nos Nembos 1 e 2 (corte diagonal) e inferiores a 8% nos Nembos 3 e 4 (flexão). Nos Nembos 1 e 2, o *3Muri* identifica corretamente o corte diagonal como mecanismo condicionante, com valores de *V* praticamente coincidentes com os analíticos (57,60 kN vs 56,70 kN e 71,60 kN vs 70,90 kN). Nos Nembos 3 e 4, ambos os métodos identificam a flexão como condicionante, confirmando que a geometria foi corretamente selecionada para separar os dois regimes.

A excelente concordância entre os dois métodos para o corte diagonal confirma que o *3Muri* implementa corretamente o critério de Turnšek e Čačovič quando configurado com o Código Italiano e alvenaria irregular, produzindo resultados fiáveis e diretamente comparáveis com o cálculo analítico.

6.4 RESULTADOS DO SEISMOSTRUCT E ANÁLISE DE COERÊNCIA

A Tabela 20 apresenta os resultados do *SeismoStruct* em comparação com os valores da folha de cálculo para ambas as condições de fronteira, permitindo identificar com qual delas o programa se alinha em cada nembo.

Tabela 21 - Comparação entre a folha de cálculo e o *SeismoStruct* (NTC 2018) para os quatro nembos (*V* em kN). Co. = consola; Bi. = bi-encastamento; C. diagonal = corte diagonal.

Nembo	Folha de Cálculo (Excel)			SeismoStruct (NTC-18)		
	Vcd (kN)	Vf consola (kN)	Vf bi-enc. (kN)	V (kN)	Drift	Mecanismo
1	58,83	60,83	121,66	58,83	0,005	C. diagonal
2	73,54	101,30	202,70	73,54	0,005	C. diagonal
3	41,60	22,95	45,90	41,60	0,005	C. diagonal (Bi-encastamento)
4	32,69	4,38	8,76	8,24	0,010	Flexão (bi-enc.)

Para os Nembos 1 e 2, o *SeismoStruct* reporta um *drift* limite de 0,005, sinalizando rotura por corte diagonal, e os valores de *Shear Capacity*, 58,83 kN e 73,54 kN, respetivamente, coincidem exatamente com os valores de *Vcd* da folha de cálculo. Esta concordância era esperada: como o corte diagonal é condicionante em ambas as condições de fronteira para estes nembos, a assunção interna do programa não altera o mecanismo identificado nem o valor obtido, uma vez que *Vcd* é independente de α .

O Nembo 3 é o caso mais revelador. O *SeismoStruct* reporta um *drift* limite de 0,005 e um valor de 41,60 kN, identificando corte diagonal como mecanismo condicionante. Confrontando com a folha de cálculo, este valor corresponde exatamente a *Vcd* e coincide com o resultado em bi-encastramento, condição em que o corte diagonal governa porque $V_f = 45,90 \text{ kN} > V_{cd} = 41,60 \text{ kN}$. Em consola, pelo contrário, seria a flexão a governar com $V_f = 22,95 \text{ kN} < V_{cd} = 41,60 \text{ kN}$. Mas como o *SeismoStruct* assume, portanto, bi-encastramento, em coerência com o que foi concluído no capítulo 5 o nembo para o *SeismoStruct* é governado por corte diagonal.

Para o Nembo 4, o *SeismoStruct* reporta um *drift* limite de 0,010, sinalizando rotura por flexão. Na verificação pela NTC 2018, ao contrário do que sucede pelo EC8-3, o programa não garante que o valor de *Shear Capacity* corresponde ao mecanismo condicionante quando o *drift* é 0,010. Neste caso, o valor resistente é obtido a partir do momento de colapso reportado pelo programa através da expressão $V_f = M \cdot 2/H$, obtendo-se 8,24 kN. Este valor corresponde à resistência à flexão em bi-encastramento da folha de cálculo (8,76 kN), com um desvio de 6,0%, confirmando uma vez mais a assunção interna de bi-encastramento pelo *SeismoStruct*.

6.5 SÍNTESE COMPARATIVA

A Tabela 21 sintetiza os resultados dos três métodos para os quatro nembos, apresentando os valores da folha de cálculo para ambas as condições de fronteira, permitindo uma visão completa de todos os resultados.

Tabela 22 - Síntese comparativa: folha de cálculo, 3Muri e *SeismoStruct* para os quatro nembos (*V* em kN). Co. = consola; Bi. = bi-encastramento; C. diag. = corte diagonal.

Nembo	Folha de Cálculo (Excel)					3Muri		SeismoStruct	
	Vcd (kN)	Vf consola (kN)	Vf Bi (kN)	Tipo consola	Tipo bi-.	V (kN)	Tipo	V (kN)	Tipo
1	58,83	60,83	121,66	C. diag.	C. diag.	57,60	C. diag.	58,83	C. diag.
2	73,54	101,30	202,70	C. diag.	C. diag.	71,60	C. diag.	73,54	C. diag.
3	41,60	22,95	45,90	Flexão	C. diag.	22,50	Flexão	41,60	C. diag.

4	32,69	4,38	8,76	Flexão	Flexão	3,68	Flexão	8,24	Flexão
---	-------	------	------	--------	--------	------	--------	------	--------

A análise comparativa permite formular três conclusões principais.

- Primeira: a resistência ao corte diagonal é independente das condições de fronteira. O valor de V_{cd} é idêntico para as condições de consola e de bi-encastramento em todos os nembos, porque a formulação não envolve o coeficiente α . Esta independência contrasta com a flexão, cujo valor resistente duplica ao passar de consola para bi-encastramento, conforme visível na tabela para todos os nembos.
- Segunda: o *3Muri* assume consola e o *SeismoStruct* assume bi-encastramento, em coerência com os capítulos anteriores. Nos Nembos 1 e 2, em que o corte diagonal é condicionante em ambas as condições, os três métodos convergem para o mesmo mecanismo e os valores são próximos. A divergência manifesta-se no Nembo 3 (sombreado na tabela), onde o mecanismo condicionante muda com a condição de fronteira: o *3Muri* identifica flexão (22,50 kN, consola) e o *SeismoStruct* identifica corte diagonal (41,60 kN, bi-encastramento). Esta diferença não é um erro, é a consequência direta e sistemática das hipóteses internas de cada programa, confirmada em todos os capítulos deste trabalho.
- Terceira: a leitura correta dos resultados do *SeismoStruct* em contexto *NTC 2018* requer a análise do *drift*. Ao contrário da verificação pelo EC8-3, em que o *Shear Capacity* corresponde diretamente ao mínimo entre flexão e corte, na verificação pelo *NTC 2018* é necessário identificar o mecanismo através do *drift* limite reportado, 0,005 para corte (valor retirado do *Shear Capacity*) e 0,010 para flexão (valor calculado por $V_f = M \cdot 2/H$ a partir do momento de colapso). Esta distinção metodológica é essencial para uma interpretação correta dos resultados do programa.

6.6 Síntese do Capítulo

O presente capítulo analisou o mecanismo de corte diagonal em quatro nembos fictícios de alvenaria irregular, comparando os resultados da folha de cálculo analítica baseada na *Circolare 2019*, do *3Muri* e do *SeismoStruct* com verificação pelo *NTC 2018*.

A observação mais relevante é que a resistência ao corte diagonal é independente das condições de fronteira assumidas para o nembo, uma vez que a sua formulação não envolve o coeficiente α . Esta independência contrasta com a flexão, cujo valor resistente varia de forma diretamente proporcional a α , e tem como consequência que os três métodos convergem para o mesmo valor de V_{cd} nos Nembos 1 e 2, onde o corte diagonal é condicionante em qualquer condição de fronteira.

Quando o mecanismo condicionante depende da condição de fronteira, como no Nembo 3, as diferenças entre os programas refletem as mesmas hipóteses internas identificadas nos capítulos anteriores: o 3Muri assume consola ($\alpha = 1,0$) e o *SeismoStruct* assume bi-encastamento ($\alpha = 0,5$). Esta coerência confirma que as condições de fronteira internas de cada programa são uma característica sistemática do seu comportamento.

Por fim, documentou-se que a leitura dos resultados do *SeismoStruct* em contexto *NTC 2018* requer a análise do drift limite reportado para identificar o mecanismo condicionante e, no caso de flexão, o cálculo indireto de $V_f = M_{2/H}$ a partir do momento de colapso, procedimento distinto do utilizado na verificação pelo EC8-3 e que deve ser tido em conta na interpretação dos resultados.

7 ANÁLISE DE UMA FACHADA

7.1 ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

Os capítulos anteriores centram-se na análise de nembos isolados, com o objetivo de identificar as hipóteses internas de cada programa e compreender as diferenças de comportamento entre o *SeismoStruct* e o *3Muri*. Este capítulo estende a análise à escala da fachada completa, tomando como caso de estudo a fachada da Rua São Bento da Vitória, identificada no Capítulo 5.

A análise desenvolve-se em dois modelos: um modelo de 1 piso e um modelo de 2 pisos (fachada completa). Para cada modelo, comparam-se as curvas de capacidade obtidas pelo *SeismoStruct* e pelo *3Muri*, analisando as diferenças observadas à luz das formulações descritas no Capítulo 3. O objetivo central é verificar se o padrão de diferenças entre os dois programas se mantém coerente entre os dois modelos, ou se o número de pisos introduz variáveis adicionais.

7.2 MODELOS DA FACHADA

A fachada da Rua São Bento da Vitória apresenta dois pisos com três aberturas entre quatro nembos verticais. A distribuição de forças horizontais aplicada nas fachadas é uniforme em ambos os programas. Os lintéis são modelados com as mesmas propriedades de material dos nembos (material *av_rd*, *mas_par*), com peso próprio de 21 kN/m³. As figuras seguintes apresentam os modelos nos dois programas para cada configuração.

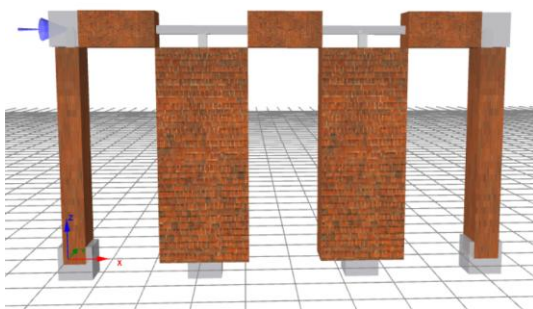


Figura 26 - Modelo de 1 piso no *SeismoStruct* com carregamento lateral

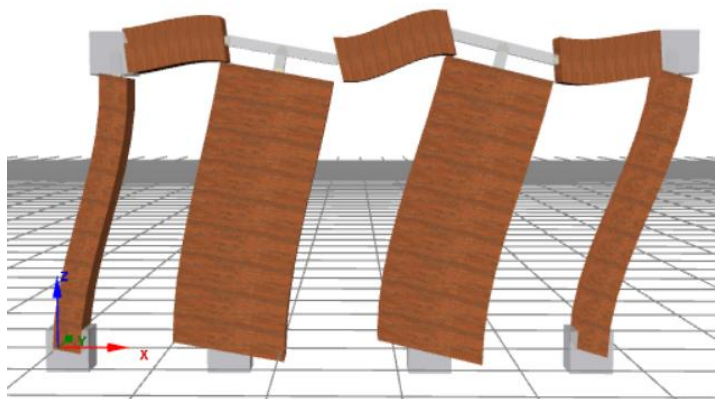


Figura 27 - Deformada do modelo de 1 piso em *SeismoStruct*

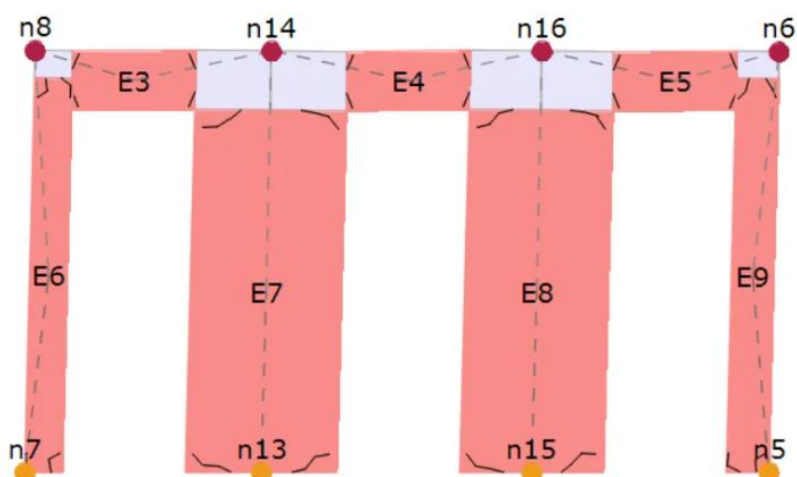


Figura 28 - Modelo de 1 piso no *3Muri*: deformada com mecanismo de dano

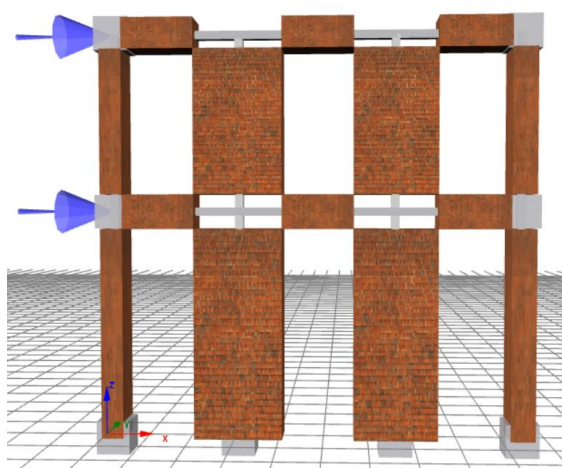


Figura 29 - Modelo de 2 pisos no *SeismoStruct*: fachada completa com carregamento lateral

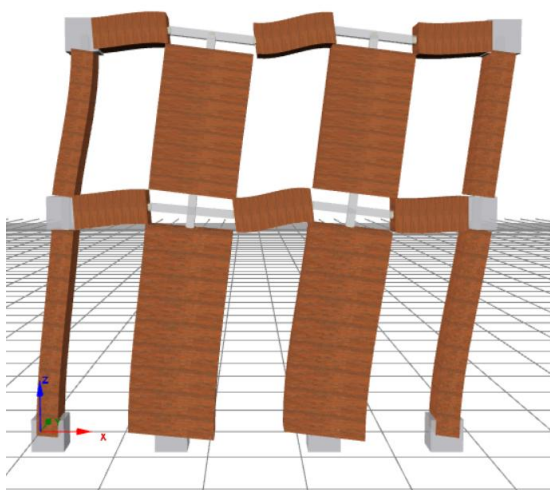


Figura 30 - Deformada do modelo de 2 pisos em SeismoStruct

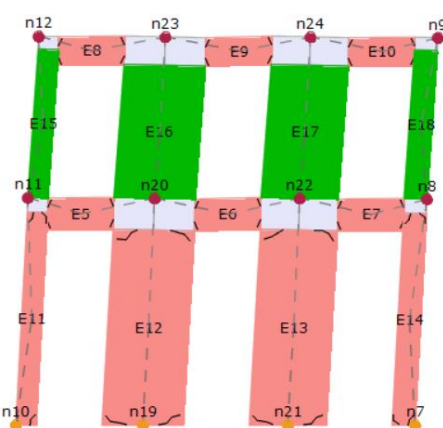


Figura 31 - Modelo de 2 pisos no 3Muri: piso 1 plastificado, piso 2 elástico

7.3 ANÁLISE DAS CURVAS DE CAPACIDADE

A seguir analisam-se as curvas de capacidade dos modelos anteriores, obtidas através de análises *pushover* utilizando os dois programas de cálculo: *Seismostruct* e *3Muri*.

7.3.1 Modelo de 1 piso

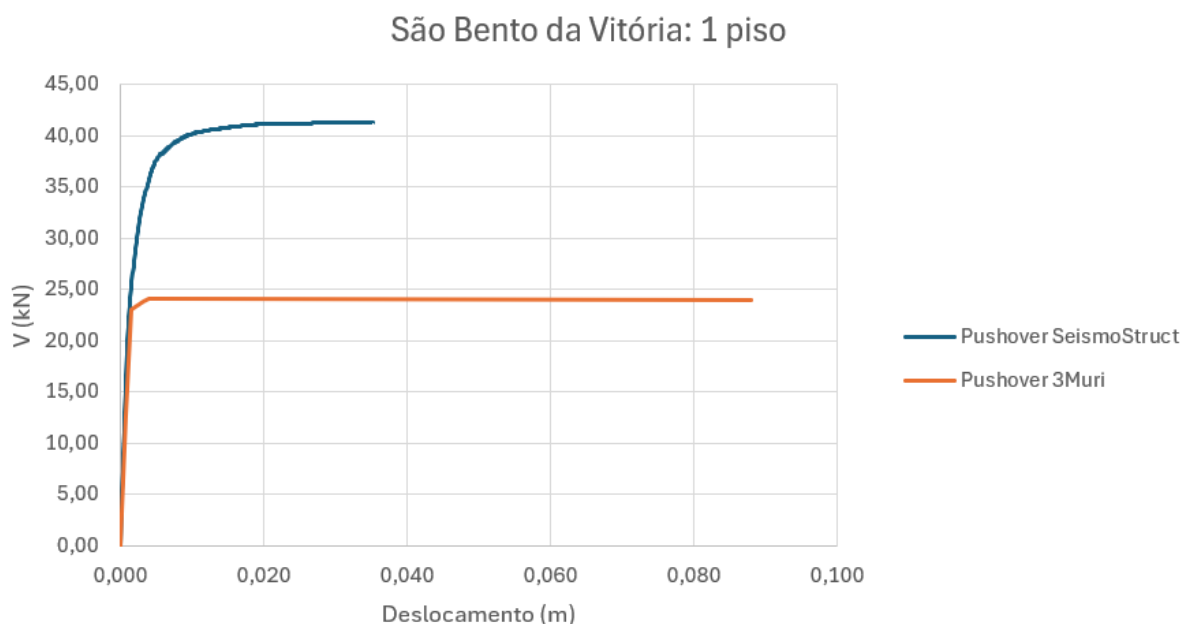


Figura 32 - Curvas de capacidade do modelo de 1 piso: *SeismoStruct* (41kN) vs *3Muri* (kN),

O *SeismoStruct* obtém um patamar de resistência de 41,4 kN com deslocamento de cedência de 0,0042 m. O *3Muri* obtém um patamar de 24,0 kN com deslocamento de cedência de 0,0003 m, respondendo de forma menos rígida e com resistência inferior. O rácio entre os dois patamares é de 1,72.

A diferença de rigidez inicial, que é pronunciada, reflete as diferentes abordagens para a rigidez inicial: no *SeismoStruct* a rigidez resulta da composição em série das fibras e do *link* com $\beta = 0,50$; no *3Muri* a rigidez é calculada diretamente pela fórmula de Timoshenko com as propriedades fendilhadas do material.

A forma das curvas pós-cedência é também distinta. O *SeismoStruct* apresenta um patamar até $\Delta m = 0,035$ m, e o *3Muri* um patamar com desenvolvimento mais prolongado.

7.3.2 Modelo de 2 pisos

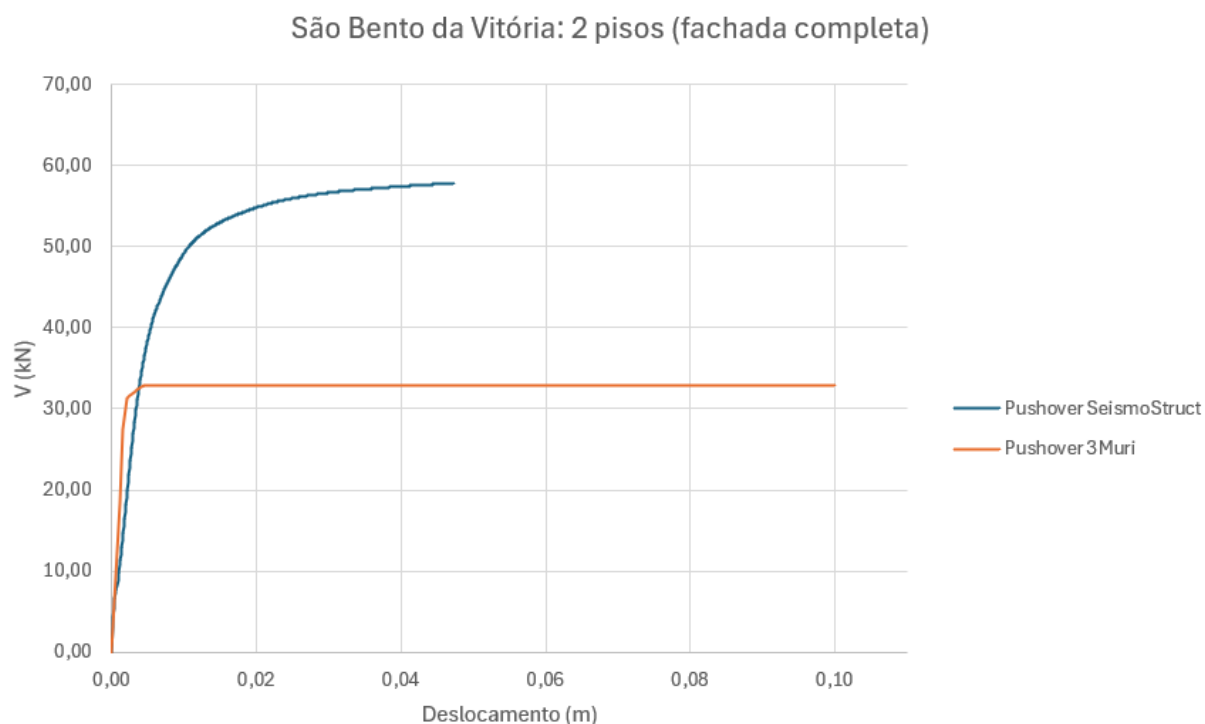


Figura 33 - Curvas de capacidade do modelo de 2 pisos: SeismoStruct (58 kN) vs 3Muri (33,87 kN)

No modelo de 2 pisos, o *SeismoStruct* obtém um patamar de aproximadamente 58 kN com deslocamento de cedência de 0,0023 m. O *3Muri* obtém aproximadamente 33,87 kN com deslocamento de cedência de 0,0014 m. O rácio entre o valor dos dois patamares é de aproximadamente 1,72.

A deformada do *3Muri* (Figura 31) mostra os nêmbos do piso inferior totalmente plastificados enquanto os elementos do piso superior se mantêm em regime elástico, refletindo um mecanismo de piso característico de fachadas de alvenaria de 2 pisos. O rácio de 1,72 do valor dos dois patamares é coerente com o padrão documentado no Capítulo 3: o *SeismoStruct* modela os lintéis com a rigidez total do modelo de fibras, criando condições próximas do bi-encastramento; o *3Muri* utiliza a formulação de pórtico equivalente com rigidez efetiva reduzida nos lintéis.

7.3.3 Análise complementar em condições controladas

As diferenças identificadas nas secções anteriores podem ter origem em vários fatores em simultâneo: a formulação dos lintéis, a distribuição do peso próprio ao longo dos nembos e as restantes diferenças de formulação interna de cada programa. Para isolar estes efeitos, realizou-se uma análise complementar sobre o modelo de 1 piso, na qual as condições de fronteira e o esforço axial de cada nembo foram tornados explicitamente equivalentes nos três métodos.

No *SeismoStruct*, os lintéis foram substituídos por uma barra infinitamente rígida, de módulo de elasticidade muito elevado e peso próprio nulo, ligada ao topo dos nembos por rótulas. Esta configuração iguala os deslocamentos horizontais no topo dos nembos sem lhes restringir a rotação, reproduzindo assim uma condição de consola.

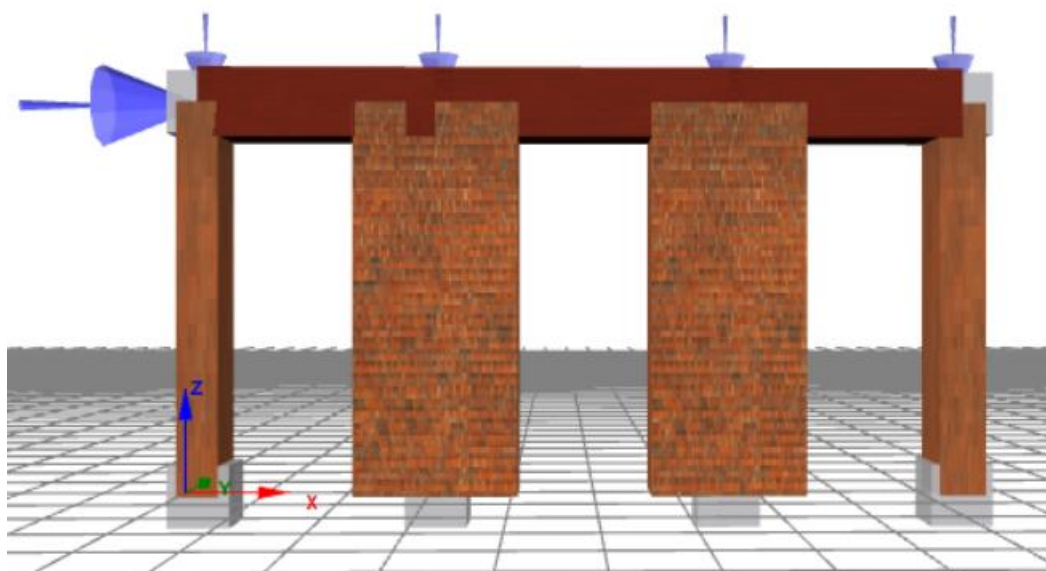


Figura 34 - Modelo de 1 piso no SeismoStruct com barra rígida no topo em substituição dos lintéis

Do modelo de 1 piso do *3Muri* extraiu-se o esforço axial instalado em cada um dos quatro nembos. Em seguida, em ambos os programas, anulou-se o peso próprio da alvenaria e aplicaram-se diretamente esses esforços axiais como cargas concentradas nos nembos. Deste modo, os dois modelos passam a operar exatamente com o mesmo esforço axial em cada elemento, eliminando as diferenças resultantes da forma como cada programa distribui as massas ao longo dos nembos. Por fim, na folha de cálculo, determinou-se a resistência de cada nembo isoladamente, em consola, com o respetivo esforço axial e peso próprio nulo, somando-se os quatro valores obtidos.

Importa notar que, nesta análise, os nembos rompem por flexão nos três métodos. A comparação incide, por isso, exclusivamente sobre a forma como cada método formula o mecanismo de flexão, com igual esforço axial e igual condição de fronteira — o que torna a comparação direta e livre da influência dos lintéis, das massas ou de mecanismos de rotura distintos.

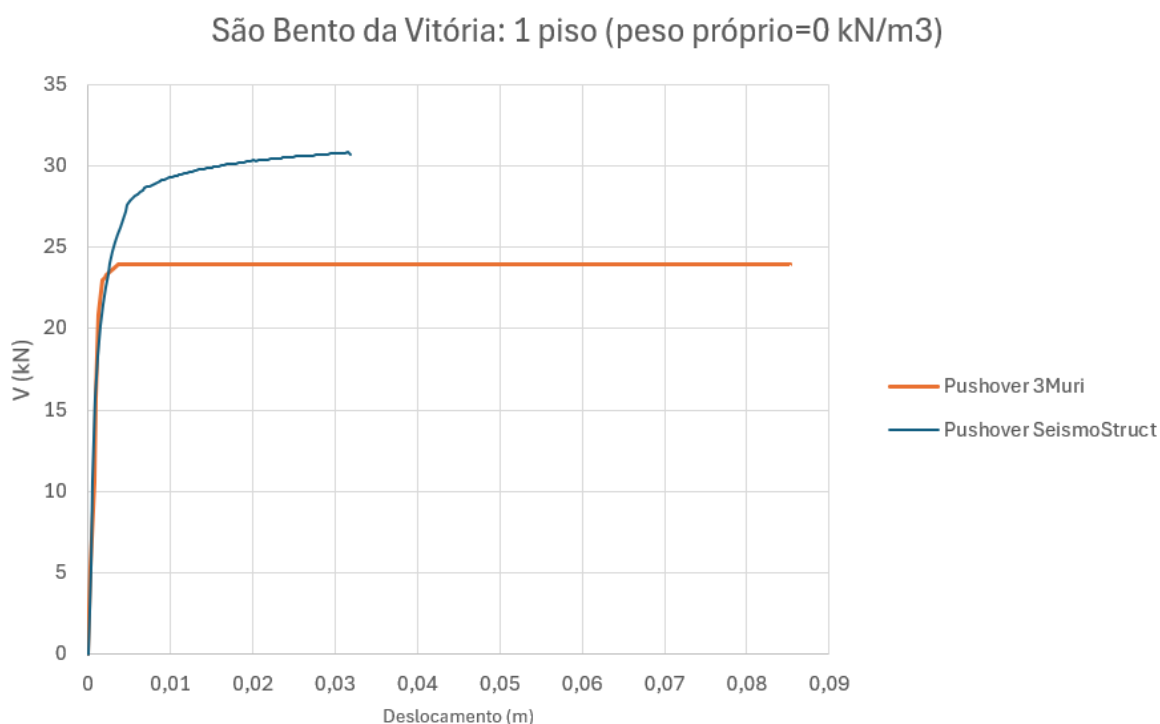


Figura 35 - Curvas de capacidade do modelo de 1 piso em condições controladas (peso próprio nulo):
SeismoStruct (30,8 kN) vs 3Muri (24,0 kN)

Os patamares de resistência obtidos foram de 30,8 kN no *SeismoStruct*, 27,6 kN na folha de cálculo e 24,0 kN no *3Muri*. Deste resultado retiram-se três observações. Em primeiro lugar, o valor analítico fica compreendido entre os dois programas, o que confere confiança à formulação da folha de cálculo. Em segundo lugar, o rácio entre o *SeismoStruct* e o *3Muri* reduz-se de 1,72 para 1,29 quando as condições de fronteira e os esforços axiais são tornados equivalentes, o que demonstra que uma parte substancial da divergência identificada nas secções anteriores tem origem no tratamento dos lintéis e na distribuição das massas.

Em terceiro lugar, subsiste uma divergência residual: o *SeismoStruct* situa-se cerca de 12% acima e o *3Muri* cerca de 13% abaixo do valor analítico. Uma vez que todos os métodos avaliam o mesmo mecanismo (flexão em consola, com igual esforço axial), esta diferença residual reflete apenas a forma como cada um formula a resistência à flexão do nembro. Estas diferenças residuais são coerentes com as hipóteses discutidas na secção seguinte, que procuram identificar as causas específicas por trás da divergência que subsiste após o isolamento das principais variáveis de confusão.

7.3.4 Hipóteses Explicativas para a Divergência entre Curvas de Capacidade

Os resultados apresentados nas secções anteriores evidenciam uma divergência sistemática entre as curvas de capacidade obtidas pelo *SeismoStruct* e pelo *3Muri* para os mesmos modelos de fachada: para o modelo de 1 piso, os patamares de resistência são de 41,4 kN e 24,0 kN, respetivamente (rácio de 1,72); para o modelo de 2 pisos, de 58,4 kN e 33,9 kN (rácio de 1,72). O facto central que exige explicação é a constância deste rácio independentemente do número de pisos, o *SeismoStruct* produz sistematicamente um patamar 1,72 vezes superior ao do *3Muri*. Adicionalmente, ambos os programas escalam de forma idêntica com a adição do segundo piso (fator de 1,41), o que confirma que a diferença entre eles é estrutural e independente da complexidade do modelo.

Ao contrário do estudo de nembos isolados (Capítulos 5 e 6), onde as condições de fronteira eram um dado imposto pelo utilizador, na fachada completa a condição de fronteira de cada nembro é um resultado emergente: depende da rigidez e da resistência dos lintéis e dos nós que o rodeiam, e evolui ao longo da análise à medida que estes elementos plastificam. A análise complementar apresentada na secção 7.3.3 mostrou que uma parte substancial dessa divergência tem origem no tratamento dos lintéis e das massas, mas subsiste uma diferença residual entre os programas mesmo em condições controladas, que se enquadra no âmbito das hipóteses seguintes. Com base na análise dos manuais técnicos de ambos os programas (S.T.A. DATA, 2024; Seismosoft, 2026), formulam-se de seguida as hipóteses consideradas.

Hipótese 1 — Influência do coeficiente de condição de fronteira α

A primeira explicação candidata seria a mais direta: a diferença de patamares resultaria de os programas assumirem valores distintos do coeficiente α , à semelhança do fator de aproximadamente 2 identificado no estudo de nembos isolados.

Em nenhum dos dois programas o α é um dado de entrada. No *3Muri*, o manual é explícito quanto à forma como o coeficiente é obtido: emerge do equilíbrio real do painel em cada passo da análise, calculado a partir dos momentos atuantes nas extremidades, segundo a expressão $\alpha = |M_{\max}| / (|M_{\max}| + |M_{\min}|)$, equivalente a $\alpha = M_{\max}/(V \cdot H)$ por equilíbrio (S.T.A. DATA, 2024). Este esclarecimento, confirmado diretamente pelo fabricante em resposta a uma consulta técnica submetida no âmbito deste trabalho, precisa também um aspeto que exige revisão face à formulação inicial desta hipótese: o α entra diretamente no cálculo da resistência do nembro, através da expressão $V_{Rd,p} = Mu/(\alpha \cdot H)$. Não é, portanto, um parâmetro que intervenha apenas nas verificações a posteriori, condiciona diretamente a capacidade que o macro-elemento pode desenvolver.

No *SeismoStruct*, o ponto de momento nulo de cada nembro resulta implicitamente da distribuição de momentos no elemento de fibras, sem que exista qualquer parâmetro α introduzido na formulação do elemento (Seismosoft, 2026). O equilíbrio interno das fibras determina naturalmente a resposta ao momento e ao corte, sem passar por uma expressão explícita da forma $Mu/(\alpha \cdot H)$.

Consequentemente, se os dois programas exibem coeficientes α efetivos diferentes para os mesmos nembos, tal reflete diferenças nas condições de fronteira que cada formulação gera, sobretudo através do tratamento dos lintéis e dos nós, e propaga-se diretamente à resistência calculada por cada um. Neste sentido, a resposta da S.T.A. DATA reforça a linha de raciocínio adotada neste capítulo: a divergência entre os programas não decorre de uma escolha arbitrária de α , mas das formulações internas que geram, em cada análise, condições de fronteira distintas para os mesmos nembos. A investigação sistemática da evolução do α efetivo ao longo do pushover em ambos os programas constitui um desenvolvimento futuro relevante.

Hipótese 2 — Formulação estruturalmente distinta dos lintéis

Os dois programas tratam os lintéis de forma diferente. No *3Muri*, o manual reconhece que a compressão axial no lintel não pode, em geral, ser avaliada de forma fiável, e adota por isso um critério conservador: a resistência ao corte é calculada apenas com a coesão, $V_t = h \cdot t \cdot f_{v0}$, sem o termo de atrito, e o momento resistente é limitado pelo mínimo entre a resistência do elemento tracionado interposto (tirante ou cinta, inexistente nos modelos deste trabalho) e o valor $0,4 \cdot f_h \cdot h \cdot t$ (S.T.A. DATA, 2024, 2.2.4). Adicionalmente, o *3Muri* atribui aos lintéis uma lei constitutiva multilinear com degradação para resistência residual, conforme o C8.7.1.3.1 da Circolare 2019.

No *SeismoStruct*, pelo contrário, o lintel (secção mss) partilha integralmente a arquitetura do nembro, sub-elemento de fibras acoplado a um link de corte, com resistências calculadas em função do esforço axial real que o equilíbrio do pórtico lhe atribui (Seismosoft, 2026). O lintel do *SeismoStruct* aparenta dispor de rigidez de flexão e corte superiores aos do *3Muri*, induzindo nos nembos adjacentes condições de fronteira mais próximas de bi-encastramento; os lintéis do *3Muri*, mais flexíveis, induzem nos nembos condições de fronteira mais próximas de consola.

Realizaram-se testes de sensibilidade no *SeismoStruct* para quantificar o efeito da rigidez dos lintéis. No entanto, a redução do módulo de elasticidade dos lintéis para 80% e 40% do módulo de elasticidade face aos nembos não produziu alteração mensurável do patamar. A redução da resistência à compressão para 50%, também foi verificada e não alterou a forma da curva, nem reduziu o patamar de cedência. Estes resultados levantam algumas dúvidas relativamente à influência que os lintéis têm no comportamento dos nembos, e que terá de ser futuramente analisado.

Hipótese 3 — Hipótese de material sem resistência à tração no 3Muri

O critério de flexão do *3Muri* assume explicitamente material sem resistência à tração, com redistribuição não linear das tensões segundo um bloco retangular com fator 0,85 (S.T.A. DATA, 2024, 2.2.1). No *SeismoStruct*, o modelo de material, *mas_par* atribui às fibras uma resistência à tração não nula, que contribui para o momento resistente das secções, contribuição proporcionalmente mais relevante em elementos com baixo esforço axial, como os nembos superiores e os lintéis de fachadas de pequeno porte. Esta diferença de hipótese constitutiva atua sempre no mesmo sentido: majora a capacidade de flexão dos elementos no *SeismoStruct* face ao *3Muri*.

Para verificar a influência da resistência à tração da alvenaria, foi alterado este valor no *SeismoStruct* de 30 kPa (valor inicialmente adotado) para 20 kPa tendo-se constatado que o valor do patamar da curva de capacidade não se alterou. Não foi possível reduzir este valor abaixo dos 20 kPa porque o programa não foi capaz de determinar a curva de capacidade nessas condições. Deste modo, embora se considere que este fator não tenha influência significativa na curva final de comportamento dos pórticos/nembos, a contribuição da resistência à tração da alvenaria para a curva de capacidade deve ser futuramente analisada.

Hipótese 4 — Atualização do esforço axial na resistência ao corte

No *SeismoStruct*, a resistência ao corte do link de cada elemento, dependente da tensão normal média σ_0 através dos critérios de Mohr-Coulomb e Turnšek-Čačovič, e é recalculada em cada incremento da análise até à cedência, a partir do esforço axial real resultante do equilíbrio (Seismosoft, 2026). No *3Muri*, o manual indica que os critérios de resistência são avaliados com os esforços atuantes no elemento, mas não documenta com o mesmo detalhe em que momento o esforço axial é atualizado nesses critérios ao longo da análise, nem qual a política adotada após a cedência dos elementos (S.T.A. DATA, 2024, 2.2.1). Durante o *pushover*, o derrubamento global e a redistribuição de esforços alteram o esforço de compressão dos nembos, que só é considerada no *SeismoStruct*. Será importante analisar também a influência deste efeito na curva de capacidade da estrutura.

Nota sobre a verificação das hipóteses

A Hipótese 1 mostra que o coeficiente α não é um dado de entrada na construção da curva, mas antes um resultado da própria análise, a sua influência na resposta final dos pórticos merece, ainda assim, ser considerada. As Hipóteses 2 a 4 apresentam-se como explicações plausíveis e atuam todas no mesmo sentido, majorando a resposta do *SeismoStruct* face à do *3Muri*, o que é coerente com a diferença sistemática de patamares observada. São também consistentes com a redução do rácio à medida que o número de pisos aumenta, uma vez que a maior quantidade de elementos dilui o peso das diferenças de formulação de cada elemento individual.

A sua verificação quantitativa exigiria, contudo, acesso à implementação interna dos códigos de cálculo, que não é pública. Neste âmbito, foram submetidas questões técnicas à *Seismosoft* e à S.T.A. DATA sobre os aspetos específicos aqui identificados, não tendo sido recebida resposta até à data de conclusão desta dissertação.

7.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo estendeu à escala da fachada completa a comparação entre o *SeismoStruct* e o *3Muri*, tomando como caso de estudo a fachada da Rua São Bento da Vitória em dois modelos: 1 piso e 2 pisos. Para cada modelo, compararam-se as curvas de capacidade obtidas por análise *pushover*, com o objetivo de verificar se o padrão de diferenças identificado no estudo de nembos isolados se mantém quando os elementos passam a interagir numa estrutura completa.

Os resultados confirmam uma divergência sistemática entre os dois programas: o *SeismoStruct* obtém patamares de resistência superiores aos do *3Muri* em ambos os modelos (41,4 kN contra 24,0 kN no modelo de 1 piso; 58,4 kN contra 33,9 kN no de 2 pisos). O rácio entre os dois patamares é constante e igual a 1,72 em ambos os modelos, e ambos os programas escalam de forma idêntica com a adição do segundo piso (fator 1,41). Esta proporcionalidade confirma que a diferença entre os programas é estrutural e independente da complexidade do modelo.

A análise complementar realizada em condições controladas permitiu isolar o efeito dos lintéis e das massas. Para isso, substituíram-se os lintéis do *SeismoStruct* por uma barra rígida rotulada, aplicaram-se os mesmos esforços axiais em ambos os programas, e suprimiu-se o peso próprio. Nestas condições, o rácio entre os dois programas reduziu-se de 1,72 para 1,29. Este resultado mostra que a maior parte da divergência inicial se deve ao tratamento dos lintéis e das massas e não a uma diferença intrínseca na formulação da flexão dos nembos. A diferença residual que subsiste enquadra-se no âmbito das hipóteses formuladas na secção seguinte.

A principal diferença face ao estudo de nembos isolados reside na natureza das condições de fronteira. Enquanto no nembo isolado estas eram impostas pelo utilizador, na fachada completa emergem do equilíbrio da estrutura e evoluem ao longo da análise, à medida que os lintéis e os nós plastificam. A divergência entre programas resulta da combinação de diferenças de formulação interna dos elementos. Formularam-se quatro hipóteses explicativas, coerentes com a documentação técnica de ambos os programas: a influência do coeficiente α como resultado emergente da análise, a formulação estruturalmente distinta dos lintéis, a hipótese de material sem resistência à tração no $3Muri$, e a política de atualização do esforço axial na resistência ao corte. Estas hipóteses atuam predominantemente no mesmo sentido e são consistentes com o rácio constante de 1,72 observado entre os dois programas.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

8.1 CONCLUSÕES

A presente dissertação desenvolveu e aplicou uma metodologia de avaliação sísmica de nembos de alvenaria não reforçada, comparando sistematicamente três ferramentas de cálculo, a folha de cálculo analítica baseada no EC8-3 e no Código Italiano, o *SeismoStruct* e o *3Muri*, em diferentes tipologias de nembos e escalas de análise. As conclusões que se seguem sintetizam os principais resultados obtidos ao longo do trabalho.

A folha de cálculo desenvolvida demonstrou ser uma ferramenta analítica robusta e rigorosa. A validação algébrica confirmou a equivalência matemática entre as expressões implementadas e as formulações de referência de Celano et al. (2021), e a validação numérica produziu desvios sistematicamente inferiores a 0,25% face aos valores teóricos publicados, atribuíveis exclusivamente a diferenças de arredondamento. Em particular, demonstrou-se que o comprimento comprimido D' pode ser determinado por uma expressão fechada, formalmente equivalente à equação de Magenes e Calvi (1997), que resolve analiticamente a dependência mútua entre D' e a força de corte resistente, sem necessidade de processo iterativo. A ferramenta constitui assim uma referência analítica fiável para a comparação com os programas numéricos.

A análise dos nembos fictícios permitiu identificar o comportamento interno de cada programa de forma controlada. O *SeismoStruct* revelou um comportamento diferenciado consoante o mecanismo condicionante, confirmado junto da *Seismosoft*: a verificação da flexão é efetuada sempre em condição de bi-encastamento ($\alpha = 0,5$), independentemente da condição de fronteira configurada pelo utilizador; a verificação do corte por deslizamento depende da condição modelada, com o valor da Secção A (base) a reflectir a condição configurada e a Secção B a manter a referência de bi-encastamento. O *Shear Capacity* reportado pelo programa corresponde sempre ao mínimo entre corte e flexão, e o *drift* constitui o critério inequívoco para identificar o mecanismo condicionante: um valor fixo de 0,004 sinaliza corte; um valor calculado pela expressão $0,008 \times H_0/D$ sinaliza flexão, podendo ainda confirmar a condição de fronteira assumida internamente pelo programa. O *3Muri* assume a condição de consola ($\alpha = 1,0$) de forma sistemática na modelação de nembos isolados, produzindo valores consistentemente próximos dos analíticos de consola, com desvios inferiores a 3% em todos os elementos e mecanismos estudados.

A aplicação da metodologia a sete fachadas reais do centro histórico do Porto confirmou as conclusões obtidas na simulação do comportamento dos nembos fictícios, agora em condições heterogéneas. As condições de fronteira de cada nembo foram identificadas por análise modal no *SAP2000*, revelando que três fachadas apresentam comportamento de consola e quatro de bi-encastamento. Para as fachadas em bi-encastamento, o *SeismoStruct* produziu valores concordantes com os analíticos, enquanto o *3Muri* subestimou a resistência em 39% a 50%, por continuar a assumir consola independentemente da condição real. Para as fachadas em consola, o *3Muri* concordou com os analíticos de consola com desvios inferiores a 10%, enquanto o *SeismoStruct* produziu valores correspondentes ao bi-encastamento, sobrestimando a resistência. O caso da Rua do Pinheiro evidenciou uma limitação específica do *SeismoStruct*: quando modelado em consola com mecanismo de flexão condicionante, o programa identificou incorretamente corte como mecanismo, com um *performance ratio* de 0,91 sem *reach*. A modelação em bi-encastamento restabeleceu a concordância com as expressões analíticas, confirmando que, nesta configuração específica, os resultados do programa não são confiáveis.

O mecanismo de corte diagonal em nembos de alvenaria irregular aponta para que a resistência V_{cd} seja independente das condições de fronteira, uma vez que a formulação da *Circolare* 2019 não envolve o coeficiente α . Esta independência tem como consequência que os três métodos convergem para o mesmo valor de V_{cd} , quando o mecanismo é condicionante em qualquer condição de fronteira. A divergência entre métodos surge apenas quando o mecanismo condicionante depende do valor de α , como demonstrado no Nembo 3 do Capítulo 5, onde o *3Muri* identificou flexão ($\alpha = 1,0$) e o *SeismoStruct* identificou corte diagonal ($\alpha = 0,5$). Documentou-se ainda que a leitura dos resultados do *SeismoStruct* em contexto NTC 2018 requer a análise do *drift* limite reportado para identificar o mecanismo condicionante e, no caso de flexão, o cálculo de $V_f = M \times 2/H$ a partir do momento de colapso.

A extensão da análise à escala da fachada completa comparou as curvas de capacidade do *SeismoStruct* e do *3Muri* para a fachada da Rua São Bento da Vitória em dois modelos, 1 piso e 2 pisos. A principal conclusão é que o rácio entre os patamares dos dois programas é constante e igual a 1,72 em ambos os modelos, com escala idêntica na passagem de 1 para 2 pisos (fator de 1,41), evidenciando uma divergência estrutural e proporcional entre os programas. Uma análise complementar em condições controladas, com substituição dos lintéis por uma barra rígida rotulada, aplicação de esforços axiais equivalentes e supressão do peso próprio, reduziu esse rácio para 1,29, mostrando que a maior parte da divergência inicial tem origem no tratamento dos lintéis e das massas. A divergência residual que subsiste é enquadrada por um conjunto de hipóteses coerentes com a documentação técnica dos programas, nomeadamente a formulação distinta dos lintéis, a hipótese de material sem resistência à tração no *3Muri* e as políticas de atualização do esforço axial na resistência ao corte, e beneficiou, no caso do coeficiente α , de uma resposta técnica direta da S.T.A. DATA que veio confirmar o seu papel na formulação do *3Muri*. Ambos os programas verificam a segurança ao estado limite SD com margem.

Em síntese, o trabalho desenvolvido permitiu estabelecer uma chave de interpretação clara para a utilização prática de cada ferramenta. O *3Muri* é consistente para nembos em consola e subestima a resistência para nembos em bi-encastramento, por assumir sistematicamente consola na modelação de nembos isolados. O *SeismoStruct* verifica a flexão sempre em bi-encastramento nas verificações normativas EC8-3, independentemente da condição de fronteira modelada, e o corte de acordo com a condição configurada, requerendo uma leitura cuidadosa dos resultados através do *drift* limite para identificar o mecanismo condicionante. À escala da fachada completa, as diferenças de resistência global entre os dois programas refletem as distintas formulações internas dos elementos e não são atribuíveis a uma única causa, sublinhando a importância de compreender os pressupostos internos de cada programa antes de interpretar os seus resultados. A correta identificação das condições de fronteira efetivas de cada nembo, por análise modal ou outro método fundamentado, é determinante para a fiabilidade de qualquer uma das abordagens.

8.2 TRABALHOS FUTUROS

O trabalho desenvolvido sugere várias linhas de investigação futura.

Em primeiro lugar, o alargamento da comparação entre programas a um número maior de fachadas, cobrindo diferentes tipologias construtivas, configurações geométricas e números de pisos, permitiria verificar se a proporcionalidade identificada neste trabalho constitui uma característica intrínseca dos dois programas ou depende do caso analisado. A extensão da verificação a outros níveis de sismicidade complementaria esta linha.

Em segundo lugar, as hipóteses formuladas para explicar a divergência residual entre os programas beneficiariam de verificação complementar: o estudo do coeficiente α ao longo do *pushover*, a verificação completa da influência da resistência à tração (que ficou limitada por questões de convergência numérica) e o esclarecimento da política de atualização do esforço axial no *3Muri*.

Por último, a verificação da curva bilinear equivalente gerada pelos dois programas constitui uma linha de investigação distinta. O método N2 do EC8-3 (Anexo B da EN 1998-1) idealiza a curva de capacidade real numa curva bilinear pela condição de equivalência de energia ($E1 = E2$), garantindo que a bilinear representa corretamente a rigidez efetiva e a força de cedência F^*y do sistema equivalente de 1 grau de liberdade. A verificação de que esta condição é respeitada pelas bilineares geradas internamente pelo *SeismoStruct* e pelo *3Muri*, e a comparação das metodologias de idealização adotadas por cada programa, constituiria uma contribuição relevante para a interpretação do deslocamento objetivo e a fiabilidade da verificação de segurança.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F.M.F. de (2022) *Avaliação da Segurança Sísmica de Edifícios Antigos de Alvenaria*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, Universidade do Minho.
- Branco, D. de A.G.F. (2019) *Verificação da Segurança de Estruturas de Alvenaria Não Armada de Acordo com os Eurocódigos 6 e 8*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Calderini, C., Cattari, S. e Lagomarsino, S. (2009) «In-plane strength of unreinforced masonry piers», *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 38(2), pp. 243–267. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/eqe.860>.
- Candeias, P.X. *et al.* (2020) «Aspetos gerais da aplicação em Portugal do Eurocódigo 8 – Parte 3 – Anexo C (Informativo) – Edifícios de alvenaria», *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, (12), pp. 99–120.
- Celano, T. *et al.* (2021) «Literature Review of the In-Plane Behavior of Masonry Walls: Theoretical vs. Experimental Results», *Materials*, 14(11), p. 3063. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma14113063>.
- Fajfar, P. (2000) «A Nonlinear Analysis Method for Performance-Based Seismic Design», *Earthquake Spectra*, 16(3), pp. 573–592. Disponível em: <https://doi.org/10.1193/1.1586128>.
- Fajfar, P. (2018) «Analysis in Seismic Provisions for Buildings: Past, Present and Future», *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16, pp. 2567–2608. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0290-8>.
- Ferreira, A.M.O.L. (2014) *Modelação de Paredes em Alvenaria Estrutural de Tijolo*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.
- Instituto Português da Qualidade (2017) *NP EN 1998-3:2017 — Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 3: Avaliação e reabilitação de edifícios*. Norma Portuguesa NP EN 1998-3:2017. Caparica: Instituto Português da Qualidade.
- Lagomarsino, S. *et al.* (2013) «TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings», *Engineering Structures*, 56, pp. 1787–1799. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.08.002>.

Magenes, G. e Calvi, G.M. (1997) «In-plane seismic response of brick masonry walls», *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 26(11), pp. 1091–1112. Disponível em: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199711\)26:11%253C1091::AID-EQE693%253E3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199711)26:11%253C1091::AID-EQE693%253E3.0.CO;2-6).

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2018) *Decreto 17 gennaio 2018: Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»*. Decreto Ministeriale NTC 2018. Roma: Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Disponível em: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/gu/2018/02/20/42/so/8/sg/pdf>.

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2019) *Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP.: Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018*. Circolare 7 C.S.LL.PP. Roma: Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Disponível em: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/gu/2019/02/11/35/so/5/sg/pdf>.

Portugal (2019a) *Decreto-Lei n.º 95/2019, de 18 de julho*. Decreto-Lei ° 95/2019. Lisboa: Diário da República. Disponível em: <https://files.dre.pt/1s/2019/07/13600/0003500045.pdf>.

Portugal (2019b) *Portaria n.º 302/2019, de 11 de setembro*. Portaria ° 302/2019. Lisboa: Diário da República. Disponível em: <https://files.dre.pt/1s/2019/09/17500/0012800133.pdf>.

Seismosoft Ltd. (2026) *SeismoStruct — A Computer Program for Static and Dynamic Nonlinear Analysis of Framed Structures*. Pavia, Italy: Seismosoft Ltd. Disponível em: <https://seismosoft.com/product/seismostruct/>.

S.T.A. DATA srl (2024) *3Muri Project — Software per la Progettazione e la Verifica Sismica di Edifici in Muratura: Manuale d'Uso*. Torino, Italy: S.T.A. DATA srl. Disponível em: <https://stadata.com/en/3-muri-project/>.

Tomažević, M. (2009) «Shear resistance of masonry walls and Eurocode 6: Shear versus tensile strength of masonry», *Materials and Structures*, 42, pp. 889–907. Disponível em: <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9430-6>.

Turnšek, V. e Čačovič, F. (1971) «Some experimental results on the strength of brick masonry walls», *Proceedings of the 2nd International Brick Masonry Conference*. Stoke-on-Trent, United Kingdom: British Ceramic Research Association, pp. 149–156.

Turnšek, V. e Sheppard, P. (1980) «The shear and flexural resistance of masonry walls», *Proceedings of the International Research Conference on Earthquake Engineering*. Skopje, Yugoslavia, pp. 517–573.

Vaz, M.S.R.A. (2022) *Caracterização de Paredes de Alvenaria de Tijolo Maciço de Edifícios «De Placa»*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.