

ANÁLISE DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE PAREDES ACOPLADAS NO DESEMPENHO SÍSMICO DE EDIFÍCIOS

JOÃO FILIPE BERNARDO

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

Orientador:

Professor Doutor Nelson Saraiva Vila Pouca

Coorientador:

Engenheiro Miguel Pedro Garcia Machado Guimarães

JUNHO DE 2025

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2024/2025

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

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 - 2024/2025 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2025*.

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.

Ao meu pai,
cuja ausência continua a ser presença constante,
e cuja memória me inspira a ser melhor todos os dias.

Não tentes ser bem-sucedido, tenta antes ser um homem de valor.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Nos parágrafos seguintes, deixo uma palavra de gratidão a todos os que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, para o aprofundamento do meu conhecimento e para o meu crescimento enquanto profissional e enquanto pessoa.

Em primeiro lugar, expresso uma especial e respeitosa gratidão ao Professor Doutor Nelson Vila Pouca. Agradeço não só a orientação rigorosa e o conhecimento transmitido, mas também a forma como me guiou ao longo deste percurso, sempre com exigência, proximidade e humanidade. A sua influência ultrapassou o domínio académico, ajudando-me a crescer como engenheiro e também como pessoa. O seu exemplo foi crucial como referência para tudo o que quero construir a partir daqui.

Agradeço aos Engenheiros Eugénio Maia, Alberto Teixeira e Miguel Guimarães, por me receberem, pelo apoio e pela experiência e ensinamentos que me transmitiram diariamente, gostaria de destacar um agradecimento especial ao Engenheiro Eugénio Maia pelo seu acompanhamento contínuo.

Expresso a minha gratidão a todo o restante pessoal da Struconcept, por toda a compreensão, todo o apoio, amizade e companheirismo.

Um agradecimento à equipa do ICS, em particular ao Engenheiro Patrício Rocha, ao Engenheiro Rui Silva, e ao Engenheiro João Valente, pelo acolhimento, pela partilha de conhecimentos ao longo desta etapa, mas acima de tudo pela estima e amizade.

Agradeço ainda a todos os colegas de curso que me acompanharam ao longo destes anos, em especial ao Bruno Pinto, ao Francisco Alves, ao Rafael Sousa, à Beatriz Pereira e à Paola Silva, pessoas que deixaram de ser apenas amigos para se tornarem uma verdadeira família com quem partilhei experiências e vivências que levo comigo para a vida profissional e pessoal.

Aos meus amigos que caminharam ao meu lado desde algum tempo e continuaram nesta etapa, nomeadamente ao Bernardo Vicente, ao Lucas Duarte, ao Lucas Rodrigues e à Susana Loureiro, obrigado pela amizade verdadeira, pela troca de noites de estudo por festas e por fazerem deste percurso algo maior que apenas académico.

Por fim, à minha família, deixo uma palavra especial de gratidão pelo apoio incondicional, pela paciência e pelos valores que sempre me transmitiram. A vossa presença constante foi um alicerce fundamental ao longo de todo este percurso académico.

RESUMO

A ação sísmica constitui uma das solicitações mais imprevisíveis e severas que uma estrutura pode enfrentar ao longo da sua vida útil. Em regiões como Portugal, com histórico sísmico significativo, a consideração adequada dos efeitos induzidos por sismos é essencial para garantir a segurança e funcionalidade dos edifícios. O dimensionamento sismo-resistente deve, assim, assegurar não só a segurança estrutural, mas também a viabilidade construtiva e económica das soluções adotadas.

Com o crescimento demográfico e a consequente necessidade de otimização do espaço urbano, as soluções estruturais passaram a privilegiar edifícios de múltiplos pisos. Para resistir adequadamente à ação sísmica, estes edifícios requerem paredes de elevada rigidez e resistência, o que pode implicar comprimentos excessivos, muitas vezes incompatíveis com as exigências arquitetónicas. Neste contexto, as paredes acopladas surgem como uma alternativa eficaz, conciliando desempenho sísmico com flexibilidade arquitetónica.

Esta dissertação tem como objetivo analisar o desempenho de diferentes configurações de paredes acopladas e compará-las com soluções de parede dúctil, mantendo constante a rigidez lateral global, de modo a isolar o efeito da ligação entre as lâminas e as vigas de acoplamento.

O trabalho inicia-se com a revisão do enquadramento teórico e normativo sobre o comportamento sísmico de paredes acopladas, com base no Eurocódigo 8. Seguidamente, procede-se à caracterização geométrica e à modelação numérica de diferentes configurações, avaliando de que forma a rigidez da viga de ligação influencia a distribuição de esforços e o desempenho global da parede.

Posteriormente, são analisadas, detalhadas e dimensionadas soluções com diferentes graus de ligação entre lâminas, mantendo-se a rigidez lateral total, com o objetivo de avaliar os efeitos nas distribuições de esforços, deslocamentos e exigência de armadura, bem como a influência das condições de apoio.

Por fim, realiza-se a aplicação prática do estudo a um edifício real, comparando três modelos distintos: um com parede dúctil e os restantes com paredes acopladas com diferentes níveis de ligação. Para cada modelo, são avaliados os esforços internos, o desempenho dinâmico e o dimensionamento das armaduras.

A dissertação procura apoiar a aplicação prática de paredes acopladas no dimensionamento sísmico de edifícios em betão armado nomeadamente na fase de conceção da obra, conciliando com rigor normativo, desempenho estrutural e soluções construtivamente viáveis.

PALAVRAS-CHAVE: Desempenho sísmico, Paredes acopladas, Coeficiente de acoplamento, Ductilidade, Vigas de acoplamento; Modelação numérica

ABSTRACT

Seismic action is one of the most unpredictable and severe demands that a structure may face throughout its service life. In regions such as Portugal, which has a significant seismic history, properly accounting for earthquake-induced effects is essential to ensure the safety and functionality of buildings. Seismic-resistant design must therefore ensure not only structural safety, but also the constructive feasibility and economic viability of the adopted solutions.

With urban densification and the growing need to optimize space, structural solutions have increasingly favored multi-storey buildings. To adequately withstand seismic action, these buildings require structural walls with high stiffness and strength, often leading to excessive lengths that may be incompatible with architectural constraints. In this context, coupled walls emerge as an effective alternative, combining seismic performance with architectural flexibility.

This dissertation aims to analyze the seismic performance of different coupled wall configurations and compare them with monolithic ductile wall solutions, while maintaining the same global lateral stiffness to isolate the influence of the connection between wall piers.

The study begins with a review of the theoretical and regulatory framework concerning the seismic behavior of coupled walls, based on Eurocode 8. It then proceeds with the geometric characterization and numerical modelling of various configurations, assessing how the stiffness of the coupling beam influences the force distribution and overall behavior of the wall.

Subsequently, solutions with different degrees of connection between wall piers are analyzed, detailed, and designed while keeping the total lateral stiffness constant. The goal is to evaluate their effects on internal force distribution, lateral displacements, reinforcement demands, and support conditions.

Finally, a practical application is developed based on a real building located in a seismic region. Three distinct structural models are compared: one with a monolithic ductile wall and two with coupled wall solutions of varying connection intensity. For each model, internal forces, dynamic performance, and reinforcement requirements are evaluated.

This dissertation seeks to support the practical application of coupled wall systems in the seismic design of reinforced concrete buildings, combining normative compliance, structural performance, and constructible solutions.

KEYWORDS: Seismic performance, Coupled walls, Coupling ratio, Ductility, Coupling beams, Numerical modelling

ÍNDICE GERAL	
AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABELAS	XV
SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS	XVII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ASPETOS GERAIS	1
1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2. RELEVÂNCIA DE PAREDES ACOPLADAS NA RESPOSTA SÍSMICA DE EDIFÍCIOS	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. AÇÃO DO SISMO NAS ESTRUTURAS	6
2.2.1. DUCTILIDADE	7
2.2.2. COMPORTAMENTO HISTERÉTICO E DISSIPAÇÃO DE ENERGIA	9
2.3. PAREDES DE BETÃO ARMADO	10
2.3.1. PAREDES DÚCTEIS	11
2.3.2. PAREDES ACOPLADAS (COUPLED SHEAR WALLS)	12
2.3.3. COMPORTAMENTO LINEAR ELÁSTICO DAS PAREDES ACOPLADAS	14
2.3.4. TIPOS DE PORMENORIZAÇÃO DE VIGAS DE ACOPLAMENTO	15
2.3.4.1. Vigas de acoplamento armadas na diagonal	15
2.3.4.2. Vigas de acoplamento armadas convencionalmente	16
2.4. COMPORTAMENTO SÍSMICO DE PAREDES ACOPLADAS	17
2.5. RIGIDEZ E COEFICIENTE DE ACOPLAMENTO DE PAREDES ACOPLADAS	18
2.6. ASPETOS FUNDAMENTAIS PARA O DIMENSIONAMENTO SÍSMICO DE PAREDES	21
2.6.1. DISTRIBUIÇÃO DAS ARMADURAS NA PAREDE	21
2.6.2. ZONA DE CONFINAMENTO	23
3. CARACTERÍSTICA GEOMÉTRICAS E ESTRUTURAIS DAS PAREDES ACOPLADAS	25
3.1. INTRODUÇÃO	25

3.2. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA.....	26
3.3. ESTUDO PARAMÉTRICO DO COEFICIENTE DE ACOPLAMENTO	26
3.3.1. VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DA LÂMINA	27
3.3.2. VARIAÇÃO DA ALTURA DA VIGA DE ACOPLAMENTO	28
3.3.3. VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DA VIGA DE ACOPLAMENTO	29
3.4. MODELAÇÃO ESTRUTURAL	31
3.4.1. VIGAS DE ACOPLAMENTO MODELADAS COM ELEMENTOS FINITOS.....	31
3.4.2. VIGAS DE ACOPLAMENTO MODELADAS COM ELEMENTOS BARRA	32
3.4.2.1. Elemento barra ligado a um único nó	32
3.4.2.2. Elemento barra ligado a vários nós	33
3.4.3. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS.....	34
 4. ESTUDO DE PAREDES ACOPLADAS COM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS	 37
4.1. INTRODUÇÃO	37
4.2. METODOLOGIA ADOTADA PARA O ESTUDO	38
4.3. MODELAÇÃO ESTRUTURAL E APLICAÇÃO DAS AÇÕES EQUIVALENTES	40
4.4. CRITÉRIOS DE BASE	43
4.4.1. ESFORÇO AXIAL REDUZIDO	43
4.4.2. COMPRIMENTO DA VIGA DE ACOPLAMENTO.....	43
4.4.3. ESFORÇO DE CORTE ELEVADO	44
4.5. DESCRIÇÃO DA GEOMETRIA.....	45
4.5.1. CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS DO MODELO A – PAREDE DE 7 METROS	47
4.5.2. CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS DO MODELO B – PAREDE DE 5 METROS	49
4.6. ANÁLISE DE RESULTADOS DAS DIFERENTES GEOMETRIAS	51
4.6.1. DESLOCAMENTOS LATERAIS	51
4.6.2. ESFORÇOS DE CORTE NAS VIGAS DE ACOPLAMENTO.....	52
4.6.3. ESFORÇOS DEVIDO À CARGA LATERAL	54
4.6.4. ESFORÇOS NA COMBINAÇÃO CARGA LATERAL E CARGA VERTICAL	56
4.6.5. DIMENSIONAMENTO DAS LÂMINAS	57
4.6.6. DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS DE ACOPLAMENTO.....	60
4.6.7. SOLUÇÃO DE SAPATAS ISOLADAS	63
 5. CASO DE ESTUDO	 67
5.1. INTRODUÇÃO	67

5.2. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO	68
5.2.1. SIMPLIFICAÇÕES ADOTADAS	71
5.3. MODELAÇÃO ESTRUTURAL.....	72
5.3.1. MODELO ESTRUTURAL.....	72
5.3.2. AÇÕES CONSIDERADAS	73
5.3.2.1. Ações verticais.....	73
5.3.2.2. Ação sísmica.....	73
5.4. ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO SÍSMICO	75
5.4.1. COMPORTAMENTO DINÂMICO	75
5.4.2. DISTRIBUIÇÃO DAS FORÇAS DE CORTE	77
5.5. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DA PAREDE EM ESTUDO: PD_6M, PA_60% E PA_75%.....	79
5.6. COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DAS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES	81
5.6.1. ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DE RESULTADOS.....	81
5.6.2. ANÁLISE DOS ESFORÇOS	83
5.7. DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS PD_6M.....	85
5.8. DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS PA_60% E DA PA_75%.....	87
5.8.1. CÁLCULO DAS ARMADURAS DAS LÂMINAS	87
5.8.2. CÁLCULO DAS ARMADURAS NAS VIGAS DE ACOPLAMENTO	90
5.9. COMPARAÇÃO CONSTRUTIVA DAS SOLUÇÕES DE PAREDE.....	94
 6. CONCLUSÕES	 95
6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Representação das forças sísmicas equivalentes ao longo da altura do edifício adaptado de [1].....	6
Figura 2 - Modelo de ductilidade devido à resposta inelástica adaptado de [1]	7
Figura 3 - Rotura de um pilar devido à falta de ductilidade [2]	8
Figura 4 - Fissuração das vigas de acoplamento devido a uma ação cíclica adaptado de [1]	9
Figura 5 - Diagrama histerético:(a) Comportamento elastoplástico idealizado; (b) Comportamento real devido à formação de rotulas plásticas adaptado de [1].....	9
Figura 6 - Deformada de um sistema porticado e de um sistema parede [5]	11
Figura 7 - Configuração de uma parede acoplada.....	12
Figura 8 - Esquematização de um sistema de paredes acopladas	13
Figura 9 - Esforços e deformada imposta na viga de acoplamento.....	13
Figura 10 – Representação de diferentes cenários de acoplamento: (a) Viga infinitamente flexível; (b) Vigas infinitamente rígidas; (c) situações reais.....	14
Figura 11 - Armaduras diagonais na viga de acoplamento[6]	16
Figura 12 – Representação de armaduras diagonais em obra.....	16
Figura 13 - Viga de acoplamento armada convencionalmente adaptado de [7]	16
Figura 14 - Zonas de dissipação de energia	17
Figura 15 - Fluxograma para o cálculo do parâmetro $\kappa\alpha H$	19
Figura 16 - Comparação do valor das forças axiais adicionais nas lâminas para diferentes modelos de cálculo para um carregamento lateral uniforme [11].....	19
Figura 17 - Potenciais efeitos da distribuição de armadura longitudinal da parede adaptado de [5]...	22
Figura 18 - Encurvadura lateral de uma parede [5]	23
Figura 19 - Confinamento do betão pela armadura transversal: (a) Confinamento com armadura circular, (b) Confinamento com estribos retangulares adaptado [1]	24
Figura 20 – Características gerais das paredes acopladas	26
Figura 21 - Variação do coeficiente de acoplamento em função do comprimento da lâmina para diferentes rigidezes da viga de acoplamento para um modelo com 12 pisos	27
Figura 22 - Variação do coeficiente de acoplamento em função do altura da viga para diferentes rigidezes da das lâminas para um modelo com 12 pisos	28
Figura 23 - Variação do coeficiente de acoplamento em função do comprimento da viga para diferentes rigidezes da viga de acoplamento num modelo com 12 pisos	30
Figura 24 - Parede acoplada modelada com elementos finitos.....	32
Figura 25 - Deformada da parede acoplada modelada com elementos finitos	32

Figura 26 - Elemento barra ligado a um único nó da malha de elementos finitos	33
Figura 27 – Deformada da parede acoplada com o elemento barra ligado a um único nó	33
Figura 28 - Elemento barra ligado a vários nós da malha de elementos finitos	34
Figura 29 - Deformada da parede acoplada com o elemento barra ligado a um único nó	34
Figura 30 - Planta estrutural da solução A	38
Figura 31 - Planta estrutural da solução B	39
Figura 32 – Edifício referência parede dúctil 7 metros	39
Figura 33 - Edifício referencia parede de 5 metros	39
Figura 34 – Modelo estrutural a) da parede dúctil isolada 7 metros; b) da parede dúctil isolada 5 metros; c) da parede acoplada com rigidez semelhante a uma parede de 7 metros	41
Figura 35 - Cargas verticais aplicadas às paredes acopladas.....	42
Figura 36 - Geometria das diferentes configurações das paredes acoplada - Modelo A	47
Figura 37 - Geometria das diferentes configurações das paredes acoplada - Modelo B	49
Figura 38 - Deslocamentos das configurações do modelo A.....	51
Figura 39 - Deslocamentos das configurações do modelo B.....	51
Figura 40 – Variação do esforço de corte nas vigas ao longo da altura da PAA_80%	53
Figura 41 - Variação do esforço de corte nas vigas ao longo da altura da PAA_50%	53
Figura 42 - Representação das dimensões das sapatas para as diferentes configurações – Modelo A	63
Figura 43 –Tensão induzidas na sapata	64
Figura 44 - Perspetiva geral do edifício em estudo.....	68
Figura 45 – Plantas estruturais do piso 2.....	69
Figura 46 - Planta estrutural do piso 6-11	69
Figura 47 - Corte estrutural do edifício	70
Figura 48 - Modelo tridimensional desenvolvido no SAP2000.....	72
Figura 49 - - Parâmetros para a Definição do Espectro.....	74
Figura 50 - Espectro da resposta de cálculo	74
Figura 51 - Deformada do 1º modo (Vista do plano YZ).	76
Figura 52 - Deformada do 2º modo (vista do plano XZ).....	76
Figura 53 - Deformada do 3º modo (Torção).	76
Figura 54 - Forças de corte por pisos na direção Y	77
Figura 55 - Força sísmica por piso na direção Y	77

Figura 56 - Parâmetros geométricos dos modelos estruturais e respectivos coeficientes de acoplamento.	79
Figura 57 – Geometria das três configurações da parede em estudo analisadas: PD_6m (parede dúctil), PA_60% (parede acoplada com CR = 60%) e PA_75% (parede acoplada com CR = 75%).	80
Figura 58 - Deslocamento real médio na direção Y para os diferentes modelos: a) Parede dúctil; b) Parede acoplada CR=60%; c-) Parede acoplada CR= 75%	81
Figura 59 – Drift na direção Y para os diferentes modelos: a) Parede dúctil; b) Parede acoplada CR=60%; c-) Parede acoplada CR= 75%	82
Figura 60 – Força de corte por piso para os diferentes modelos: a) Parede dúctil; b) Parede acoplada CR=60%; c-) Parede acoplada CR= 75%	83
Figura 61 – Momento fletor por piso para os diferentes modelos: a) Parede dúctil; b) Parede acoplada CR=60%; c-) Parede acoplada CR= 75%	84
Figura 62 - Força de corte por piso no modelo de parede dúctil	85
Figura 63 - Momento fletor por piso no modelo de parede dúctil	85
Figura 64 - Secção transversal da parede dúctil.	86
Figura 65 - Gráfico de interação da flexão desviada para a PD_6m	86
Figura 66 - Força de corte na lâmina da parede acoplada PA_60%	87
Figura 67 - Força de corte na lâmina da parede acoplada PA_75%	87
Figura 68 - Momentos fletores por piso na lâmina da parede acoplada PA_60%	88
Figura 69 - Momentos fletores por piso na lâmina da parede acoplada PA_75%	88
Figura 70 - Secção transversal da lâmina na parede acoplada PA_60%	88
Figura 71 - Secção transversal da lâmina na parede acoplada PA_75%	89
Figura 72 - Gráfico de interação da flexão desviada para a PA_60%	89
Figura 73 - Gráfico de interação da flexão desviada para a PA_75%	89
Figura 74 – Força de corte por piso nas vigas de acoplamento para a PA_60%	90
Figura 75 – Força de corte por piso nas vigas de acoplamento para a PA_75%	90
Figura 76 – Momento fletor máximo por piso nas vigas de acoplamento para a PA_60%	90
Figura 77 -Momento fletor máximo por piso nas vigas de acoplamento para a PA_75%	90
Figura 78 – Secção transversal da viga de acoplamento PA_60%	91
Figura 79 - Secção transversal da viga de acoplamento PA_75%	91
Figura 80 - Gráfico de interação da flexão desviada da viga de acoplamento para PA_60%	92
Figura 81 - Gráfico de interação da flexão desviada da viga de acoplamento para PA_75%	92
Figura 82 – Secção longitudinal da viga de acoplamento PA_60%	93
Figura 83 – Secção longitudinal da viga de acoplamento PA_75%	93

Figura 84 - Volume total dos materiais	94
Figura 85 - Percentagem de armadura em cada modelo.....	94

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação de resultados dos vários modelos.....	34
Tabela 2 - Dados geométricos das paredes acopladas comparadas com a parede dúctil de 7 metros – Modelo A	46
Tabela 3 - Dados geométricos das paredes acopladas comparadas com a parede dúctil de 5 metros – Modelo B	46
Tabela 4 - Parâmetros geométricos das diferentes configurações do modelo A	48
Tabela 5 - Parâmetros geométricos das diferentes configurações do modelo B	50
Tabela 6 - Comparação dos esforços devido à ação lateral – Modelo A	54
Tabela 7 - Comparação dos esforços devido à ação lateral – Modelo B	54
Tabela 8 - Comparação dos esforços devido à ação lateral – Modelo A	56
Tabela 9 - Comparação dos esforços devido à ação lateral – Modelo B	56
Tabela 10 - Comparação das armaduras das diferentes lâminas – Modelo A.....	58
Tabela 11 - Comparação das armaduras das diferentes lâminas – Modelo B.....	59
Tabela 12 - Comparação das armaduras das diferentes vigas de acoplamento – Modelo A	61
Tabela 13 - Comparação das armaduras das diferentes vigas de acoplamento – Modelo B	61
Tabela 14 – Cargas verticais aplicadas ao edifício.....	73
Tabela 15 – Coeficiente de redução para as ações variáveis.	73
Tabela 16 - Participação da massa modal em cada direção.	75
Tabela 17 - Resultados da análise modal (períodos, frequências e massas efetivas).....	75
Tabela 18 - Distribuição dos esforços da base por elemento resistente	78

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

A_{sl} - área da secção transversal das armaduras longitudinais
 A_{sw} - área da secção transversal das armaduras de esforço transverso
 bb - Largura da Viga
 bw - Largura da lâmina
 h - Altura entre pisos
 hb - Altura da Viga
 H - Altura do edifício
 I_{PAA} - Soma da inércia das duas lâminas das paredes acopladas
 I_{PD} - Inércia de uma parede dúctil
 k - Rigidez média de flexão das paredes
 Le - Comprimento entre os centros geométricos das lâminas
 Lw - Comprimento da lâmina
 $L0$ - Comprimento da viga (vão livre entre as lâminas)
 M_{Ed} - Momento do efeito das ações
 M_{Rd} - Momento resistente de cálculo
 M_{Global} - Momento global da parede acoplada
 N_{Ed} - esforço axial de cálculo
 q - Carregamento lateral
 V_{Ed} - esforço transverso de cálculo obtido na análise

$K_{\alpha h}$ - Coeficiente global
 α - Relação entre a rigidez da viga de acoplamento e das lâminas
 $\mu\phi$ - Ductilidade em curvatura
 v_{Ed} - Razão do esforço transverso pela altura do elemento em análise
 v_{Rd} - Esforço axial reduzido

CR - Coeficiente de acoplamento
DCM - Classe de ductilidade média

EC2 - Eurocódigo 2

EC8 - Eurocódigo 8

MEF – Método dos elementos finitos

PA - Parede acoplada

PD – Parede dúctil

1

INTRODUÇÃO

1.1. ASPETOS GERAIS

A atividade sísmica em Portugal é uma preocupação fundamental no contexto do dimensionamento de edifícios, dado que o país se localiza numa região de moderada a elevada sismicidade, especialmente nas zonas próximas das falhas ativas do Atlântico e do Mediterrâneo. A ocorrência de eventos sísmicos ao longo da história, como o grande sismo de Lisboa de 1755, evidenciou a vulnerabilidade das construções e a necessidade de desenvolver normas e regulamentos que garantam a segurança das estruturas e a proteção da população.

Neste contexto, o dimensionamento de edifícios em Portugal deve obedecer a critérios rigorosos de engenharia sísmica, integrando princípios de análise dinâmica, seleção de materiais resistentes e técnicas construtivas que minimizem os efeitos da vibração do solo. O Eurocódigo 8, adotado como referência normativa, estabelece diretrizes para o projeto de estruturas sismicamente seguras, impondo a consideração de parâmetros como a aceleração do solo, a ductilidade dos materiais e o comportamento global da construção face às solicitações sísmicas.

Com o elevado aumento da população, as soluções estruturais começaram a incluir edifícios de vários pisos, com o objetivo de otimizar o uso do espaço. Para responder à ação sísmica, são necessárias paredes de elevada rigidez, o que frequentemente resulta em paredes de grandes comprimentos, muitas vezes incompatíveis com a arquitetura existente. Deste modo, torna-se necessário adotar paredes acopladas como solução estrutural.

As paredes acopladas, caracterizadas pela sua interligação através de vigas de acoplamento, desempenham um papel essencial na resposta global de uma estrutura face a ações sísmicas. A sua capacidade de dissipar energia e redistribuir esforços confere-lhes uma relevante importância no comportamento sísmico de edifícios, influenciando diretamente a sua resistência, rigidez e ductilidade. Contudo, a eficácia destes sistemas estruturais depende fortemente da sua configuração geométrica, da disposição das lâminas, das propriedades dos materiais e das características das vigas de acoplamento.

Neste contexto, este trabalho propõe-se a investigar e comparar o desempenho de diferentes configurações geométricas de paredes acopladas, avaliando a sua influência no dimensionamento sísmico de edifícios. Através de uma abordagem que integra análise teórica, modelação numérica e casos de estudo, pretendendo-se identificar as principais limitações de algumas configurações e aquelas que são mais eficazes para a mitigação dos efeitos sísmicos, contribuindo para o desenvolvimento de soluções estruturais.

A compreensão aprofundada deste tema não só enriquece o conhecimento científico na área da engenharia sísmica, mas também fornece ferramentas práticas para a conceção de edifícios mais

resilientes, capazes de enfrentar os desafios impostos pela sismicidade em Portugal e noutras regiões do mundo.

A mais-valia desta dissertação reside também no seu enquadramento técnico na área da engenharia sísmica, uma vez que se desenvolve em ambiente empresarial, no seio da empresa Struconcept, especializada em estruturas de betão armado. O trabalho reforça, assim, a relevância da investigação académica como suporte à decisão estrutural em contexto prático, contribuindo para formar soluções estruturais mais eficazes e aplicáveis à realidade construtiva nacional.

1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação tem como principal objetivo contribuir para a compreensão do comportamento sísmico de paredes acopladas, com vista à sua aplicação fundamentada na conceção e dimensionamento de edifícios. Pretende-se, assim, gerar conhecimento técnico que apoie a definição de soluções estruturais eficazes desde as fases iniciais de projeto.

Os objetivos do trabalho são essencialmente práticos, visando desenvolver uma análise que oriente o dimensionamento dos principais elementos sismo-resistentes, em particular das paredes acopladas, de forma a maximizar a sua eficácia quando comparadas com soluções baseadas em paredes dúcteis isoladas

Mais especificamente, a investigação incide sobre dois objetivos centrais. Por um lado, analisar o comportamento estrutural de diferentes configurações de paredes acopladas sob a ação sísmica, avaliando a eficácia do acoplamento entre lâminas e as suas implicações no desempenho global da estrutura. Por outro, comparar os efeitos estruturais associados a diferentes graus de acoplamento, com o intuito de identificar tendências de resposta e compreender o seu impacto na distribuição de esforços e nas exigências de dimensionamento.

Todos os elementos estruturais foram detalhados em simultâneo com o respetivo dimensionamento, garantindo que não se projetam soluções inviáveis ou desajustadas à realidade da execução em obra.

O estudo procura aproximar o meio académico da prática profissional. As decisões metodológicas adotadas resultam do equilíbrio entre as orientações do orientador, a correta aplicação dos Eurocódigos e as exigências de viabilidade do setor empresarial.

Pretende-se que o procedimento de modelação e as conclusões retiradas tenham aplicabilidade prática no projeto de estruturas com paredes acopladas, servindo ainda de base a futuros desenvolvimentos na avaliação do desempenho sísmico de edifícios de betão armado.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em seis capítulos. O primeiro corresponde ao presente capítulo, onde se apresenta uma introdução ao trabalho, incluindo os seus objetivos e a respetiva estrutura geral da dissertação.

No segundo capítulo é fornecido um enquadramento de carácter mais teórico sobre o comportamento sísmico das estruturas e, em particular, das paredes acopladas. São discutidos conceitos fundamentais como ductilidade, dissipação de energia, coeficiente de acoplamento e critérios normativos segundo o

Eurocódigo 8, culminando na apresentação de expressões analíticas que fundamentam o estudo posterior.

O terceiro capítulo aborda a caracterização estrutural de paredes acopladas, apresentando diferentes abordagens de modelação numérica e uma análise paramétrica, com base em formulações analíticas, da influência de parâmetros geométricos no coeficiente de acoplamento.

No quarto capítulo, desenvolve -se um estudo paramétrico aprofundado, baseado em modelos numéricos no SAP2000, no qual se avalia o impacto do coeficiente de acoplamento em diferentes geometrias. São analisados esforços, deslocamentos, exigência de armadura e condições de apoio, com base em critérios normativos.

O quinto capítulo apresenta um caso de estudo real de um edifício, modelado com diferentes configurações de parede resistente uma com parede dúctil e as outras com paredes acopladas com diferentes graus de acoplamento. É realizada uma análise comparativa do comportamento global, verificação normativa e dimensionamento das armaduras.

Por fim, o sexto e último capítulo expõe as conclusões finais do trabalho, com base nos resultados obtidos, e propõe possíveis desenvolvimentos futuros no âmbito do dimensionamento sísmico de edifícios com paredes acopladas.

2

RELEVÂNCIA DE PAREDES ACOPLADAS NA RESPOSTA SÍSMICA DE EDIFÍCIOS

2.1. INTRODUÇÃO

O projeto de estruturas resistentes à ação sísmica constitui desafios na engenharia civil, exigindo soluções que aliem rigidez, ductilidade e capacidade de dissipação de energia. Entre os sistemas estruturais com maior relevância no contexto do projeto sísmo-resistente destacam-se as paredes acopladas, especialmente em edifícios de média e grande altura.

As paredes acopladas, formadas por dois ou mais elementos verticais ligados por vigas de acoplamento, representam uma evolução significativa face a sistemas tradicionais, ao permitirem o controlo mais eficaz dos deslocamentos laterais e uma distribuição mais favorável dos esforços internos. O seu desempenho está intrinsecamente ligado à interação entre os elementos que as compõem, sendo influenciado por variáveis como o tipo de armadura, o grau de acoplamento, ou a forma como se inserem no conjunto estrutural.

Este capítulo apresenta os princípios fundamentais que regem o comportamento sísmico das paredes acopladas, abordando a sua importância no projeto estrutural, os mecanismos que controlam a sua resposta e os critérios de dimensionamento associados. A análise será progressivamente aprofundada, desde os conceitos gerais e o seu tipo de comportamento, até aos aspetos de dimensionamento.

2.2. AÇÃO DO SISMO NAS ESTRUTURAS

Os sismos são fenómenos naturais de elevada destrutividade, resultantes da libertação súbita de energia ao longo de falhas geológicas, frequentemente situadas nas fronteiras entre placas tectónicas. Esta libertação origina ondas sísmicas que se propagam no solo, induzindo movimentos oscilatórios que, por sua vez, provocam deslocamentos na base das estruturas. Em resposta a esses deslocamentos, surgem forças inerciais nas massas estruturais, que podem atingir níveis significativos e comprometer a integridade das construções.

No contexto do dimensionamento estrutural, esses efeitos sísmicos são frequentemente representados por um sistema de forças horizontais equivalentes, aplicadas ao longo da altura do edifício. Estas forças são proporcionais à massa de cada piso e à sua respetiva altura relativamente à base da estrutura, como ilustrado na Figura 1.

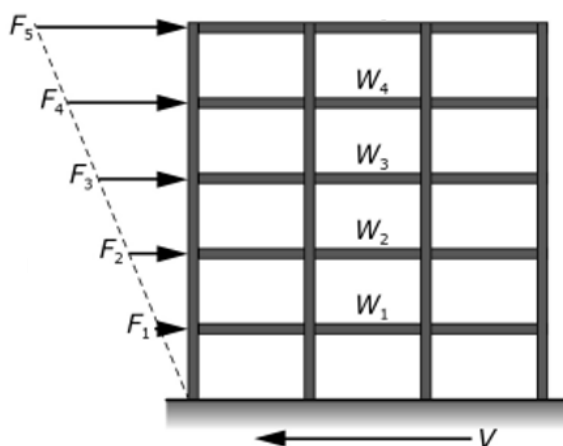


Figura 1 - Representação das forças sísmicas equivalentes ao longo da altura do edifício adaptado de [1]

As forças sísmicas caracterizam-se pela sua natureza alternada e cíclica, produzindo inversões regulares de solicitação nos elementos estruturais. Após o evento principal, é ainda comum a ocorrência de réplicas, sismos secundários de menor magnitude, mas potencialmente críticos em estruturas já fragilizadas. Estas réplicas, embora decrescentes em frequência e intensidade, mantêm a capacidade de comprometer a integridade estrutural, sobretudo quando não existe redundância suficiente no sistema resistente.

Apesar de se atribuir ênfase à componente horizontal da ação sísmica, a componente vertical pode igualmente desempenhar um papel decisivo, especialmente em estruturas com elevado peso próprio ou com elementos comprimidos ao limite da sua capacidade. A combinação de efeitos laterais com variações verticais de carga pode agravar os estados limite de instabilidade ou colapso progressivo, particularmente em edifícios com irregularidades geométricas ou distribuição assimétrica de rigidez [2].

O dimensionamento sísmico exige, portanto, uma abordagem distinta da convencional. Enquanto os métodos tradicionais adotam parâmetros fixos e margens de segurança conservativas, a engenharia sísmica opera num domínio onde a aleatoriedade do fenómeno e a não linearidade do comportamento dos materiais impõem a aceitação de incertezas e a previsão de mecanismos de dissipação de energia. O objetivo não é eliminar o risco de falha, mas assegurar que, em caso de colapso, este ocorra de forma progressiva, previsível e com o máximo de ductilidade possível.

A complexidade inerente à resposta estrutural sísmica que inclui a interação solo-estrutura, o comportamento histerético dos materiais e as incertezas associadas à própria natureza dos sismos transforma esta área da engenharia numa disciplina desafiante, mas altamente formativa. O projeto

sísmico exige do engenheiro não apenas domínio técnico, mas também capacidade de julgamento, visão sistêmica e sensibilidade para trabalhar com incertezas. Mesmo em contextos onde a sismicidade não é predominante, os conhecimentos adquiridos no dimensionamento sísmico revelam-se úteis noutras áreas da engenharia, como o projeto em condições extremas ou a avaliação de segurança estrutural.

Dada a imprevisibilidade e o impacto potencial dos sismos, torna-se fundamental adotar soluções estruturais que combinem rigidez, ductilidade e capacidade de redistribuição de esforços. Neste contexto, as paredes acopladas assumem um papel central, ao oferecerem um equilíbrio eficaz entre resistência e deformabilidade. A análise do seu comportamento, especialmente sob diferentes configurações geométricas é, por isso, essencial para garantir um desempenho sísmico adequado, objetivo principal do presente trabalho.

2.2.1. DUCTILIDADE

A capacidade de uma estrutura resistir de forma eficaz a ações sísmicas depende não apenas da sua resistência, mas da sua aptidão para suportar deformações significativas sem colapso prematuro. Esta propriedade, conhecida como ductilidade, é essencial para permitir a dissipação de energia sísmica através de deformações inelásticas localizadas, assegurando um comportamento estrutural controlado e previsível [3].

Durante um evento sísmico, as solicitações aplicadas à estrutura ocorrem de forma cíclica e com intensidades que frequentemente ultrapassam os limites elásticos dos materiais. Para que a estrutura apresente um comportamento sem falhas frágeis, é necessário que determinadas zonas críticas, como extremidades de paredes ou vigas, entrem em regime plástico de forma controlada, mantendo a sua integridade e capacidade resistente por um número significativo de ciclos [4]. Este comportamento só é possível quando existe um correto detalhamento das armaduras e um nível de confinamento adequado nas zonas comprimidas do betão.

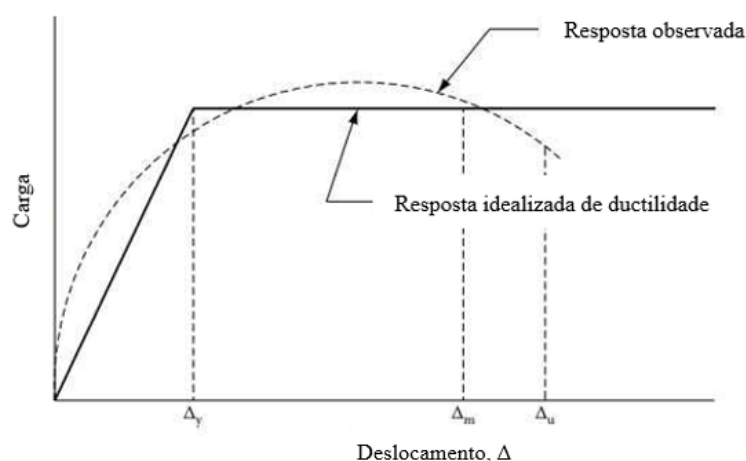


Figura 2 - Modelo de ductilidade devido à resposta inelástica adaptado de [1]

A ductilidade pode ser caracterizada como a razão entre o deslocamento último e o deslocamento de cedência:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} > 1 \quad (2.1)$$

Dependendo do tipo de análise, esta razão pode ser expressa para além de deslocamentos por rotação ou curvatura. Um valor elevado indica maior capacidade da estrutura para suportar deformações sem perda crítica de resistência. Estruturas dúcteis exibem fissuração distribuída e progressiva, permitindo a redistribuição interna de esforços, enquanto estruturas frágeis apresentam ruturas localizadas e súbitas, com potencial colapso parcial ou total.

Nos elementos de betão armado, a ductilidade é fortemente condicionada pelo comportamento da zona comprimida do betão e pela estabilidade das armaduras sob grandes deformações. O betão, por si só, tem uma deformação-limite relativamente reduzida, sendo a sua capacidade de suportar esforços pós-pico grandemente dependente do confinamento lateral promovido por armadura transversal adequadamente dimensionada. A presença de estribos fechados, espaçados com rigor e ancorados corretamente, impede o encurvamento das armaduras longitudinais (Figura 3) e permite que o betão atinja maiores deformações sem perda brusca de resistência [2].



Figura 3 - Rotura de um pilar devido à falta de ductilidade [2]

As normas modernas de dimensionamento sísmico, como o Eurocódigo 8, impõem exigências específicas de ductilidade local e global para diferentes categorias de estruturas. Tais exigências incluem limites para armadura mínima e máxima, taxas de confinamento e controlo do esforço axial, de forma a garantir que os mecanismos de dissipação de energia ocorrem nas zonas mais favoráveis. O conceito de dimensionamento por capacidade real (*capacity design*) amplamente promovido nestas normas visa precisamente assegurar que o colapso se dá por mecanismos dúcteis previamente definidos, evitando falhas frágeis em elementos primários, como pilares ou núcleos estruturais.

Nas paredes acopladas, a configuração estrutural baseia-se na ligação entre dois ou mais elementos verticais, designados por lâminas, por meio de vigas horizontais, denominadas vigas de acoplamento. Estas vigas são projetadas para permitir a formação de rótulas plásticas por flexão e corte, assegurando a dissipação de energia e o controlo de danos localizados sob a ação sísmica.

No caso das paredes acopladas, a ductilidade assume um papel ainda mais relevante. A eficácia do sistema depende da capacidade das vigas de acoplamento em desenvolver deformações significativas por flexão e corte, mantendo simultaneamente a sua função de transferência de esforços entre as lâminas verticais (Figura 4). A ausência de ductilidade nestas vigas compromete não só o binário resistente global, mas também a redistribuição de esforços e o controlo de deslocamentos laterais, colocando em risco o desempenho sísmico da estrutura.

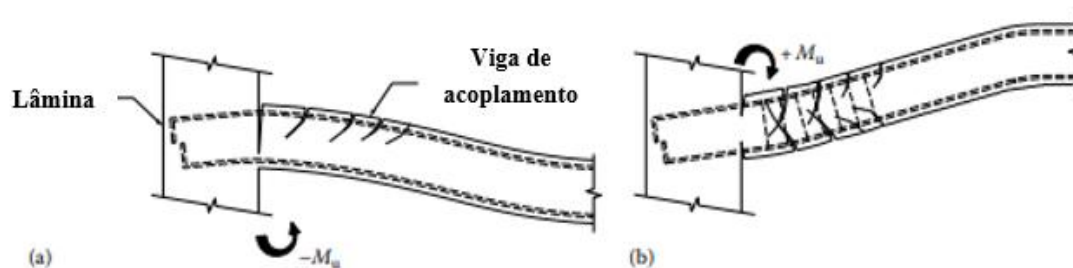


Figura 4 - Fissuração das vigas de acoplamento devido a uma ação cíclica adaptado de [1]

A ductilidade é, assim, um dos pilares fundamentais do projeto estrutural em zonas de elevada sismicidade. Mais do que uma propriedade desejável, representa uma condição necessária para garantir segurança, desempenho e resiliência nas estruturas contemporâneas.

2.2.2. COMPORTAMENTO HISTERÉTICO E DISSIPAÇÃO DE ENERGIA

Este comportamento é representado por meio de diagramas força–deslocamento, conhecidos como laços de histerese, que descrevem a resposta cíclica de um elemento ou sistema estrutural sob carregamento alternado. O modelo idealizado, uma simplificação usada para efeitos de conceito, é um modelo elastoplástico perfeito no qual o elemento apresenta rigidez constante até ao limite elástico, seguido por um patamar horizontal de resistência constante, (Figura 5 a)).

Nos sistemas reais de betão armado, os laços de histerese tendem a apresentar degradação de rigidez, verificando-se a ocorrência de estrangulamento histerético, caracterizado pela redução progressiva da área do laço (Figura 5 b)), fenómeno normalmente associado à abertura e fecho de fissuras ou à fricção entre interfaces estruturais, e uma menor área total dissipada por ciclo. No entanto, desde que a resistência residual se mantenha estável ao longo de múltiplos ciclos e o colapso não ocorra de forma abrupta, o comportamento é considerado suficientemente dúctil e energeticamente eficiente [4].

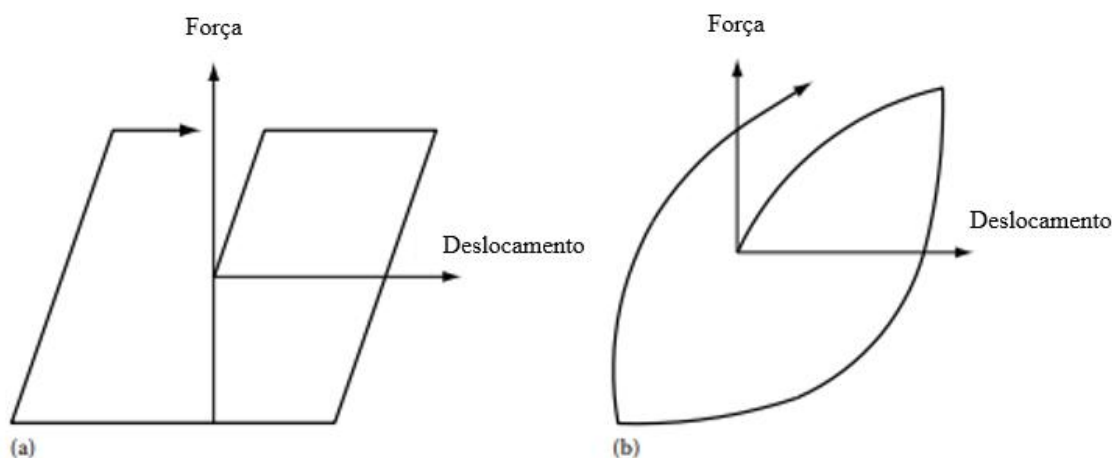


Figura 5 - Diagrama histerético:(a) Comportamento elastoplástico idealizado; (b) Comportamento real devido à formação de rotulas plásticas adaptado de [1]

A área interna ao laço de histerese corresponde à energia dissipada durante cada ciclo de deformação. Esta capacidade de dissipação é relevante para a redução da resposta dinâmica global da estrutura e para o controlo dos deslocamentos induzidos por excitações sísmicas. Rótulas plásticas bem detalhadas, geralmente localizadas nas extremidades das vigas, são zonas privilegiadas para este tipo de dissipação, desde que o confinamento, a amarração das armaduras e a limitação das deformações permitam dotar a estrutura de uma boa capacidade de deformação.

Estudos experimentais e modelos teóricos indicam que vigas de betão armado, quando devidamente detalhadas para um bom desempenho sísmico, são capazes de dissipar cerca de 70% a 80% da energia fornecida por um laço elasto-plástico ideal, valor considerado satisfatório para estruturas dimensionadas com base em critérios de ductilidade [1]. Pelo contrário, quando os mecanismos de dissipação ocorrem em pilares ou em zonas mal confinadas, os laços apresentam grande degradação de resistência e deformações irregulares, o que reduz drasticamente a confiabilidade do sistema.

É importante referir que a curva histerética revela uma relação direta entre a ductilidade e a capacidade de dissipação de energia. Curvas histeréticas com menor dissipação de energia e consequentemente menor ductilidade, devem ser evitados em componentes críticos como pilares. Assim, os mecanismos dissipativos devem ser estrategicamente conduzidos para as vigas de acoplamento, de forma a concentrar as rótulas nestes elementos e evitar modos de colapso associados a soft-storey.

O comportamento histerético é, portanto, uma ferramenta não apenas de descrição do desempenho cíclico, mas também de avaliação da eficiência sísmica dos sistemas estruturais. No contexto das paredes acopladas, com a relação vão/altura da viga de acoplamento que conduz à formação de rótulas nas suas extremidades é fundamental garantir ductilidade e dissipação nestas rótulas. Neste caso é necessário garantir-se que está prevenida a rotura por corte para que se consiga explorar a ductilidade das rótulas.

2.3. PAREDES DE BETÃO ARMADO

Historicamente, a estabilidade lateral dos edifícios era frequentemente assegurada por pórticos com pequenos vãos, que proporcionavam rigidez suficiente para resistir a ações horizontais, como o vento ou pequenos sismos. Contudo, com a evolução das exigências urbanas e a necessidade de construir edifícios mais altos e esbeltos, tornou-se essencial adotar sistemas estruturais mais eficientes, capazes de suportar solicitações horizontais crescentes, especialmente em zonas de elevada perigosidade sísmica.

Neste contexto, os sistemas de paredes resistentes em betão armado tornaram-se uma solução amplamente utilizada. Estes elementos verticais oferecem elevada rigidez e resistência, contribuindo de forma significativa para o controlo dos deslocamentos laterais e para a segurança estrutural global, especialmente quando conjugados com outros sistemas resistentes.

Tendo em conta a diversidade de requisitos estruturais e arquitetónicos, apresentam-se de seguida duas soluções distintas de paredes verticais em betão armado, paredes dúcteis e paredes acopladas destacando-se as suas características e mecanismos resistentes.

2.3.1. PAREDES DÚCTEIS

As paredes estruturais dúcteis são elementos verticais em betão armado que proporcionam elevada rigidez e resistência lateral aos edifícios. A sua principal função é limitar os deslocamentos horizontais induzidos por forças laterais garantindo estabilidade global e evitando danos estruturais.

Comparadas a sistemas porticados, as paredes conferem maior rigidez lateral, reduzindo a possibilidade de deformações excessivas e, por conseguinte, o risco de colapso ou perda de funcionalidade. Esta rigidez torna-as particularmente eficazes em edifícios de média e grande altura, onde o controlo de deslocamentos laterais é uma exigência crítica de desempenho sísmico.

Sob a ação de forças horizontais, as paredes desenvolvem esforços de corte e momentos fletores, que resultam em deformações típicas de flexão. Estes mecanismos provocam fissuração diagonal nas zonas centrais da parede e tensões elevadas nas extremidades, exigindo armadura longitudinal e transversal suficiente para resistir às sollicitações alternadas [5].

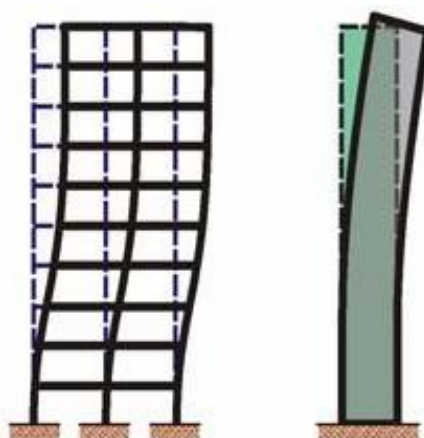


Figura 6 - Deformada de um sistema porticado e de um sistema parede [5]

Para resistir a estas ações, o detalhamento das armaduras nas zonas críticas da parede, especialmente junto à base, onde os momentos são mais elevados, deve assegurar o desenvolvimento de rótulas plásticas dúcteis. Tal como estabelecido no Eurocódigo 8, este comportamento requer o confinamento adequado do betão nas extremidades comprimidas, o controlo das relações de armadura, e a limitação das tensões axiais de serviço.

Nos edifícios em betão armado, os próprios pavimentos atuam como diafragmas horizontais, assegurando a ligação entre as paredes verticais e permitindo o funcionamento conjunto da estrutura. Estes elementos permitem transmitir as forças de inércia horizontais, resultantes da massa dos pisos, para os elementos verticais de contraventamento, assegurando simultaneamente a compatibilidade dos deslocamentos entre os diversos componentes estruturais [5].

O posicionamento, simetria e continuidade das paredes ao longo da planta e da altura do edifício são determinantes para garantir um comportamento sísmico equilibrado. Irregularidades na distribuição das paredes, como interrupções abruptas, assimetrias acentuadas ou variações locais de rigidez, podem induzir efeitos indesejados, como amplificação de deslocamentos, concentração de esforços ou rotação da estrutura em planta. Assim, a identificação precoce de irregularidades estruturais e a adoção de medidas corretivas no projeto são passos cruciais para o bom desempenho sísmico.

Nos edifícios de média altura, a utilização de paredes dúcteis pode representar uma opção técnica vantajosa. No entanto, para maiores alturas as paredes de betão armado tornam-se praticamente

indispensáveis, tanto do ponto de vista da resistência como do controlo de deslocamentos laterais e da viabilidade económica.

Por fim, os núcleos de elevadores e escadas, são tradicionalmente utilizados como sistemas principais de resistência lateral. Quando bem dimensionados, oferecem não apenas rigidez translacional, mas também resistência torsional, podendo, se necessário, ser complementados por quadros perimetrais.

2.3.2. PAREDES ACOPLADAS (COUPLED SHEAR WALLS)

As paredes acopladas (*coupled shear walls*) constituem uma solução eficiente para o reforço da rigidez e da capacidade de dissipação de energia em edifícios sujeitos a ações sísmicas. São compostas por duas ou mais lâminas verticais ligadas por vigas de acoplamento, permitindo a redistribuição de esforços e a formação de um mecanismo resistente composto, com melhor controlo de deformações, um desempenho global da estrutura e uma maior flexibilidade arquitetónica.

Estas paredes consistem em duas ou mais lâminas verticais ligadas entre si por vigas de acoplamento, dispostas horizontalmente entre os vãos. A presença destas vigas permite uma redistribuição dos esforços entre as paredes e a formação de um sistema estrutural composto com maior capacidade de dissipação de energia e controlo de deformações. Um exemplo típico de configuração de paredes acopladas é apresentado na Figura 7.

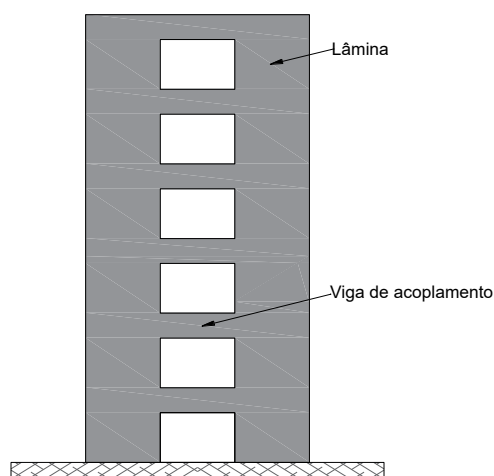


Figura 7 - Configuração de uma parede acoplada

O mecanismo resistente das paredes acopladas difere substancialmente do observado em paredes isoladas. Numa parede sem aberturas, o momento total derrubador é equilibrado pelo momento fletor da base. No entanto, nas paredes acopladas, esse momento é partilhado entre os momentos fletores nas lâminas individuais e um binário gerado pelas forças axiais induzidas nas lâminas através das vigas de ligação (Figura 8). Este equilíbrio pode ser descrito pela seguinte expressão:

$$M_{\text{global}} = M1 + M2 + Nl \quad (2.2)$$

onde:

- M1 e M2 representam os momentos fletores nas lâminas,
- N é a força axial induzida pelas vigas de acoplamento,
- l é a distância entre os centros das lâminas verticais.

A força axial (N) é resultante da soma das forças de corte desenvolvidas nas vigas de acoplamento situadas acima do nível de análise. Em situações em que estas vigas apresentam elevada rigidez, a contribuição do binário axial torna-se dominante, conferindo ao sistema uma resistência adicional significativa ao momento de derrubamento. Em contrapartida, quando o acoplamento é mais flexível como ocorre frequentemente em edifícios residenciais, devido à limitação da altura das vigas a resistência é maioritariamente fornecida pelos momentos nas paredes individuais [7].

As vigas de acoplamento estão sujeitas a grandes deformações reversíveis e elevadas forças de corte. O seu comportamento influencia fortemente a resposta global do sistema, especialmente sob ações sísmicas. A deformação imposta nas vigas resulta em esforços de corte significativos e em momentos fletores opostos nas suas extremidades (Figura 9). Adicionalmente, desenvolvem-se esforços axiais nas lâminas, tração numa e compressão noutra conforme ilustrado esquematicamente nas Figura 8.

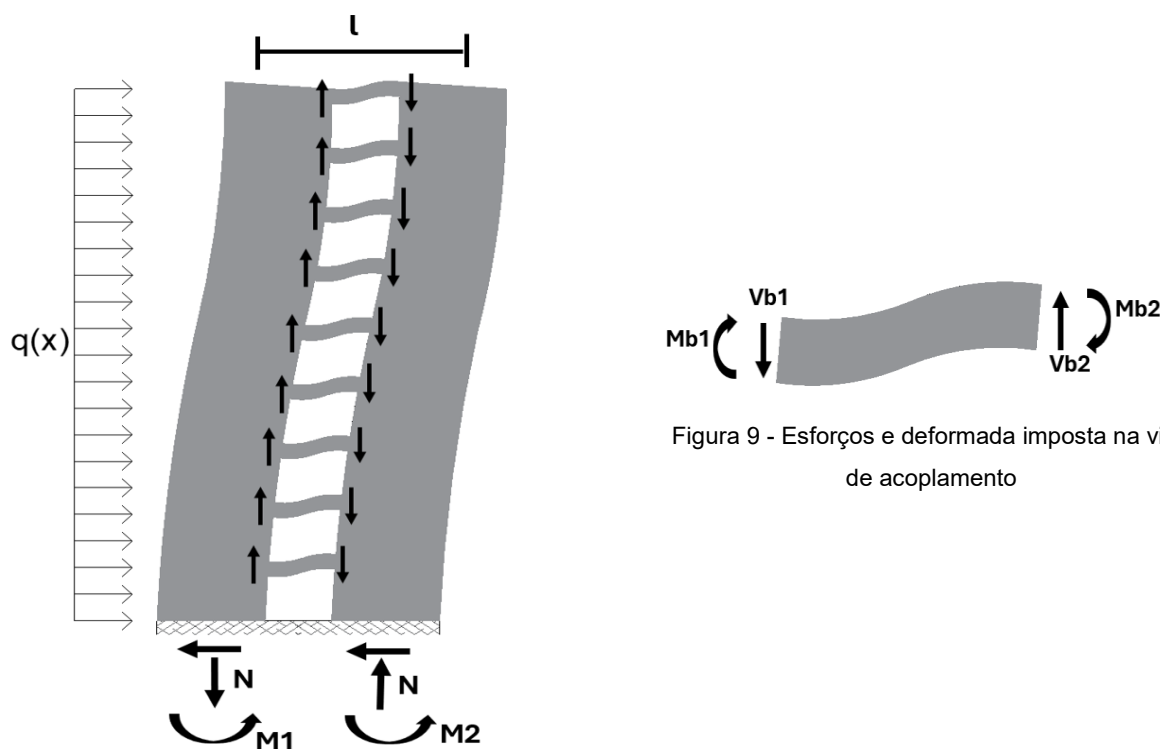


Figura 9 - Esforços e deformada imposta na viga de acoplamento

Figura 8 - Esquematisação de um sistema de paredes acopladas

Para quantificar a eficácia das ligações entre paredes, é comum introduzir o conceito de Coeficiente de Acoplamento (CR), ou rácio de acoplamento (coupling ratio, em inglês), que quantifica a fração do momento global resistido pelo momento do binário resultante das forças axiais das lâminas. Valores elevados de CR indicam um sistema fortemente acoplado [8].

$$CR = \frac{Nl}{M_{global}} \quad (2.3)$$

O uso de paredes acopladas, quando bem concebido e detalhado, permite aumentar substancialmente a rigidez lateral e a capacidade de dissipação de energia da estrutura. Esta solução é especialmente eficaz em edifícios de altura intermédia, como o sistema estrutural com 12 pisos analisado nesta dissertação, onde o equilíbrio entre rigidez, ductilidade e redistribuição de esforços é determinante para o desempenho sísmico global.

2.3.3. COMPORTAMENTO LINEAR ELÁSTICO DAS PAREDES ACOPLADAS

O comportamento estrutural das paredes acopladas pode ser inicialmente interpretado através de uma análise elástica, assumindo-se o comportamento linear dos materiais e ligações monolíticas. Esta abordagem simplificada permite compreender o papel das vigas de acoplamento na redistribuição de esforços na viga e na parede e na modificação da rigidez global do sistema.

Considerando num cenário hipotético em que as vigas de acoplamento são infinitamente flexíveis, estas comportam-se como bielas, transferindo apenas os esforços axiais. Neste caso, qualquer momento aplicado será resistido pela soma da rigidez à flexão das duas lâminas. Esta situação corresponde a um coeficiente de acoplamento (CR) igual a 0%, pois não existe transmissão de momentos fletores entre as paredes. A distribuição de tensões ao longo da altura de cada lâmina será linear, com máximos de tração e compressão nas extremidades opostas (Figura 10 a)).

No extremo oposto, quando as paredes são ligadas por vigas de acoplamento de rigidez infinita, estas compatibilizam quer os deslocamentos horizontais quer as rotações ao nível de cada piso, o que se traduz num comportamento equiparado ao de uma parede isolada, com um comprimento igual ao comprimento das duas lâminas mais a viga de acoplamento. O momento aplicado à estrutura será resistido de forma conjunta pelas duas paredes, que atuam como uma consola composta, com flexão em torno de um eixo neutro comum (Figura 10 b)) [9]. Neste caso, o coeficiente de acoplamento aproxima-se de 100%, indicando que a totalidade do momento é transmitida através das vigas.

Na realidade, o comportamento estrutural situa-se entre estes dois extremos teóricos. As vigas de acoplamento possuem rigidez finita, e a sua capacidade de transmitir momentos fletores e esforços de corte define a eficiência do acoplamento. À medida que a rigidez das vigas aumenta, o sistema aproxima-se do comportamento monolítico idealizado. A (Figura 10 c)) ilustra este caso intermédio, representativo da realidade estrutural deste tipo de paredes.

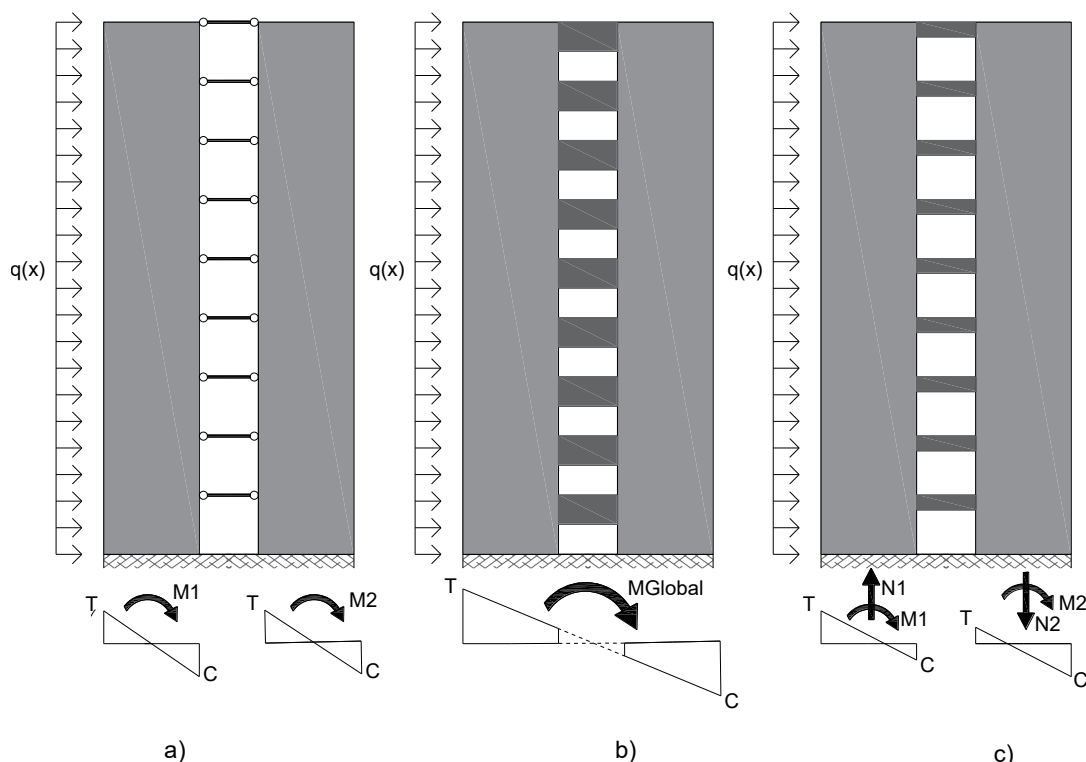


Figura 10 – Representação de diferentes cenários de acoplamento: (a) Viga infinitamente flexível; (b) Vigas infinitamente rígidas; (c) situações reais

A principal função das vigas de acoplamento consiste em reduzir os momentos fletores máximos nas bases das paredes, transferindo parte desses esforços para forças axiais (tração e compressão) nas lâminas. O momento derrubador é assim equilibrado pelo momento das rótulas das lâminas e os momentos das rotulas na extremidade das vigas de acoplamento, o que conduz a uma distribuição de dissipação de energia em altura.

Contudo, importa sublinhar que este modelo é válido apenas em análises lineares e sob ações estáticas. Em condições reais, nomeadamente sob ações sísmicas, o comportamento das paredes acopladas é fortemente influenciado por fenómenos não lineares, como a fissuração progressiva do betão, a degradação da rigidez das vigas de ligação e os efeitos histeréticos cíclicos associados à dissipação de energia. Nessas situações, a eficiência do acoplamento pode degradar-se com o tempo e com o número de ciclos de carga, tornando indispensável uma análise mais avançada, frequentemente baseada em modelos numéricos não lineares.

Por fim, importa referir que valores extremos do coeficiente de acoplamento (0% ou 100%) são puramente teóricos. Na prática, qualquer sistema apresenta sempre um certo grau de flexibilidade nas vigas de acoplamento, o que resulta em comportamentos intermédios, cuja avaliação é essencial para o correto dimensionamento e previsão do desempenho sísmico da estrutura.

Apesar de o foco desta dissertação residir na análise dinâmica do comportamento das paredes acopladas, esta análise estática constitui uma base fundamental para a compreensão dos mecanismos de transferência de esforços, da função das vigas de acoplamento e da distribuição de rigidez no sistema. Esta abordagem simplificada permite, ainda, validar intuições iniciais e servir de referência para a calibração de modelos mais avançados, como será explorado nos capítulos seguintes.

2.3.4. TIPOS DE PORMENORIZAÇÃO DE VIGAS DE ACOPLAMENTO

2.3.4.1. Vigas de acoplamento armadas na diagonal

Quando a relação comprimento-altura (l/h) da viga é inferior a 3, esta é classificada como curta, e o seu comportamento estrutural é governado principalmente por um mecanismo direto de escora e tirante. Nestes casos, a transferência de forças entre as paredes ocorre por meio de diagonais internas comprimidas e tracionadas.

Este tipo de comportamento exige um dimensionamento específico, conforme estabelecido pelo Eurocódigo 8, com a introdução de armaduras diagonais devidamente ancoradas nas zonas de ligação às paredes [6]. Estas armaduras diagonais cruzadas permitem resistir à formação de tirantes tracionadas, no caso das escoras comprimidas a resistência é obtida através do confinamento das armaduras diagonais de forma a evitar encurvadura e garantir a ductilidade das escoras [10].

No entanto, a capacidade de dissipação de energia desta solução fica limitada pois não existe a formação de rotulas nas extremidades das vigas de acoplamento, ficando a dissipação associada às rótulas nas bases das lâminas e à dissipação inerente aos mecanismos de escoras e tirantes das travessas. Esta solução de vigas armadas na diagonal torna-se muitas vezes de difícil execução pelo facto de a armadura diagonal exigir significativa quantidade de armaduras transversais de confinamento conduzindo a fortes densidades de armadura que se traduzem em dificuldades para a betonagem em obra (Figura 12).

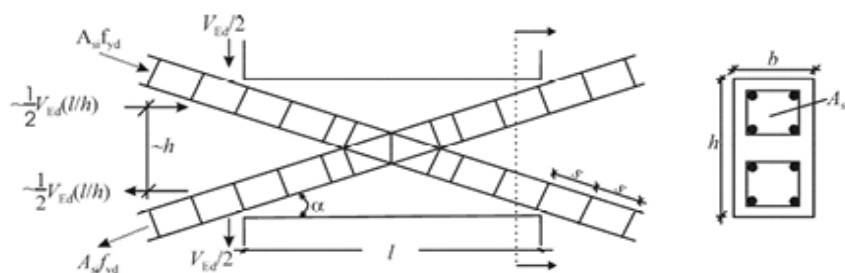


Figura 11 - Armaduras diagonais na viga de acoplamento[6]



Figura 12 – Representação de armaduras diagonais em obra

2.3.4.2. Vigas de acoplamento armadas convencionalmente

No caso da relação l/h da viga ultrapassa o valor de 3, a viga é classificada como comprida, e o seu comportamento passa a ser dominado pela flexão [7]. Ao contrário das vigas curtas, a transferência de esforços entre as lâminas não ocorre através de escoras diagonais diretas, mas sim por flexão da viga.

O dimensionamento deste tipo de viga exige especial atenção às armaduras longitudinais, que resistem aos momentos fletores, e às armaduras transversais, que asseguram a resistência ao esforço de corte (Figura 13). O Eurocódigo 8 reforça a importância de garantir o desenvolvimento das armaduras nas zonas de ancoragem junto às paredes, assegurando a continuidade estrutural e evitando mecanismos de rotura prematuros nas extremidades [6]. As formações de rótulas nas extremidades das vigas de acoplamento permitem uma dissipação de energia associado ao comportamento histerético.

Após esta breve comparação entre os dois tipos de disposição de armadura, salienta-se que o estudo desenvolvido nesta dissertação incide exclusivamente sobre vigas de acoplamento armadas convencionalmente, apresentando as vigas de acoplamento em estudo um comprimento igual a 5 vezes a altura da viga de acoplamento.

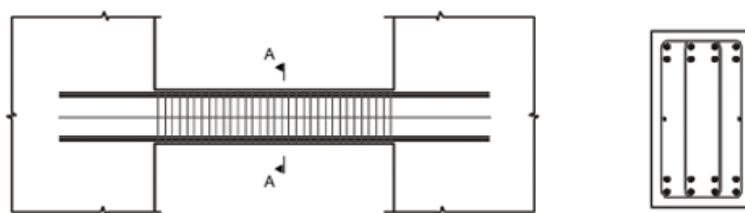


Figura 13 - Viga de acoplamento armada convencionalmente adaptado de [7]

2.4. COMPORTAMENTO SÍSMICO DE PAREDES ACOPLADAS

As paredes acopladas assumem um papel determinante na resposta sísmica de edifícios em zonas de elevada sismicidade, não apenas pela rigidez lateral proporcionada, mas sobretudo pela sua capacidade de dissipação de energia. Esta dissipa-se essencialmente através da formação de rótulas plásticas nas extremidades das vigas de acoplamento, mecanismo que permite absorver parte significativa da energia sísmica, evitando a concentração de danos em zonas frágeis da estrutura (Figura 14).

Tal como abordado na secção anterior, o comportamento dissipativo depende da mobilização eficiente das vigas, sendo fundamental que estas desenvolvam deformações inelásticas controladas nas suas extremidades. Para que este mecanismo seja eficaz, é indispensável um dimensionamento adequado das armaduras longitudinais e transversais, assegurando a formação das rótulas e evitando roturas prematuras por corte.

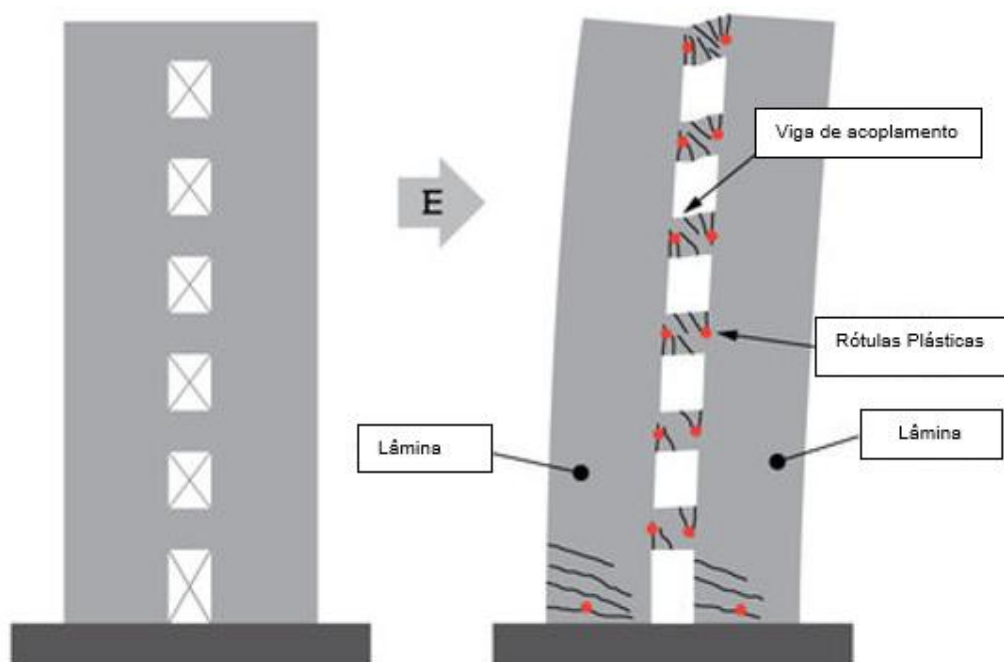


Figura 14 - Zonas de dissipação de energia

A eficiência energética do sistema depende, assim, da ativação destas rótulas. A distribuição da dissipação ao longo da altura da parede está relacionada com a intensidade do acoplamento: sistemas fortemente acoplados promovem uma dissipação mais distribuída, enquanto sistemas fracamente acoplados concentram a energia nas bases das lâminas. Este último comportamento está associado a maiores danos locais e menor redundância [7].

Para valores intermédios do coeficiente de acoplamento (CR entre 0.4 e 0.8) tendem a proporcionar um equilíbrio eficaz entre rigidez, ductilidade e capacidade de dissipação [4]. Este compromisso é essencial para garantir uma resposta global estável, com atraso na formação de mecanismos de colapso e maior capacidade de resistência sob múltiplos ciclos sísmicos.

Em síntese, a formação controlada de rótulas nas vigas de acoplamento representa o mecanismo central de dissipação de energia em sistemas de paredes acopladas. A sua correta ativação é determinante para alcançar os níveis de ductilidade e desempenho exigidos em zonas de elevada sismicidade.

2.5. RIGIDEZ E COEFICIENTE DE ACOPLAMENTO DE PAREDES ACOPLADAS

Ao longo dos subcapítulos anteriores foram discutidos os mecanismos fundamentais que caracterizam o comportamento das paredes acopladas. Foi ainda introduzido o conceito de coeficiente de acoplamento (CR), que constitui uma medida quantitativa da influência das vigas de acoplamento no comportamento das paredes acopladas.

Este parâmetro permite avaliar até que ponto os esforços e deformações gerados por ações horizontais são partilhados entre as lâminas através da ação das vigas de ligação. Em termos gerais, um CR elevado traduz um comportamento fortemente acoplado, com significativa participação das vigas na redistribuição de esforços, enquanto valores reduzidos indicam um comportamento próximo ao de paredes isoladas.

A deformada típica de uma parede acoplada sujeita a ações laterais revela que as vigas induzem compatibilidade de deslocamentos entre as lâminas, originando um mecanismo resistente composto. Este mecanismo melhora o controlo de deformações laterais e contribui significativamente para a rigidez e a capacidade de dissipação de energia do conjunto estrutural.

A obtenção das expressões analíticas que permitem calcular o deslocamento lateral do topo, bem como o valor do CR, baseia-se num modelo de comportamento linear elástico dos materiais e em pressupostos da resistência dos materiais aplicados ao sistema viga-coluna. Adotando-se esta abordagem, é possível representar a parede acoplada como um sistema composto por duas lâminas verticais interligadas por uma sequência de vigas horizontais, modeladas como elementos flexíveis. A compatibilidade de deformações entre os elementos, a partir de uma análise elástica, permite a formulação de coeficientes intermédios nomeadamente a rigidez média de flexão das lâminas (k), a relação entre as vigas de acoplamento (α), resultando num parâmetro global ($k\alpha H$), que integra o processo de cálculo.

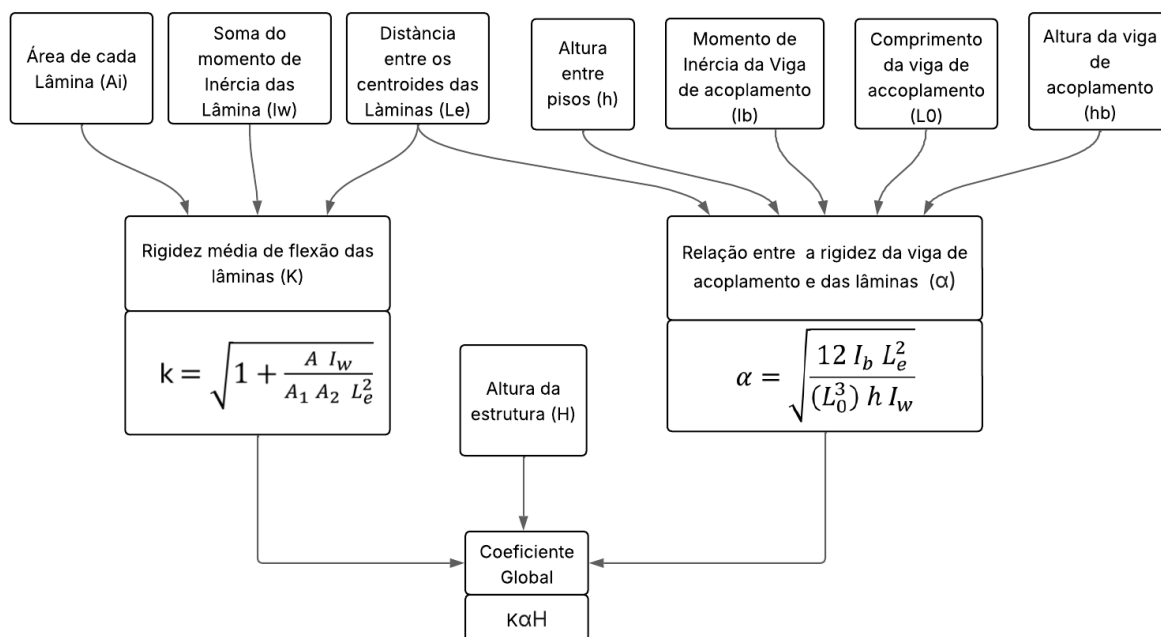
A partir destes parâmetros, obtêm-se expressões que permitem estimar o deslocamento horizontal da parede para uma dada força lateral desenvolvidas no livro de Stafford Smith & Cowan (1986) [9]. e por consequência, o valor do coeficiente de acoplamento com base no trabalho de Zhang et al. (2023) [11]. Estas expressões constituem uma ferramenta útil na fase de conceção de um projeto.

A Figura 15 apresenta o fluxograma de cálculo desenvolvido de forma a integrar as características geométricas na formulação do coeficiente de acoplamento. Neste diagrama, integram-se os parâmetros geométricos do sistema estes que são os únicos que influenciam na determinação do CR, dado que os momentos de inércia estão dependentes da geometria das diferentes secções.

A partir destes dados, define-se um parâmetro global ($k\alpha H$) que quantifica a rigidez relativa entre vigas e paredes. Estes parâmetros servem de entrada ao modelo analítico que permite estimar, com elevada precisão, o deslocamento lateral máximo e a força axial adicional em cada lâmina que irá resultar no cálculo do coeficiente de acoplamento.

De notar que o (l_0^3) corresponde ao comprimento efetivo da viga em flexão, ou seja, à soma do comprimento da viga de acoplamento mais metade da altura da viga de acoplamento, de modo a considerar parte do momento fletor e da deformação ocorre dentro da zona confinada, e não apenas no vão livre.

Para um bom desempenho sísmico este parâmetro deve estar entre o valor de 4 e 10, sendo que para valores baixos corresponde a baixo coeficiente de acoplamento e para valores altos elevados valores do coeficiente de acoplamento [7].

Figura 15 - Fluxograma para o cálculo do parâmetro $k\alpha H$

Com base no fluxograma de cálculo anteriormente apresentado, obtém-se a expressão analítica do coeficiente de acoplamento (CR), que traduz a fração da rigidez lateral total assegurada pelas vigas de acoplamento. Esta expressão assume a forma:

$$CR = \frac{2}{(k\alpha H)^2} \left[1 + \frac{\sinh(k\alpha H) - (k\alpha H)}{\cosh(k\alpha H)} \sinh(k\alpha H) - \cosh(k\alpha H) + \frac{(k\alpha H)^2}{2} \right] \quad (2.4)$$

No estudo de Zhang et al. (2023) [11], foram realizados testes entre esta formulação analítica e o resultado de programas de cálculo numérico: o ABAQUS, um sofisticado software de elementos finitos e o OpenSees, no qual desenvolveu um modelo numérico bidimensional que permitiu modelar múltiplos elementos de barra verticais com interação corte-flexão. Concluindo que o resultado da expressão analítica está em boa concordância com os resultados dos programas de cálculo (Figura 16).

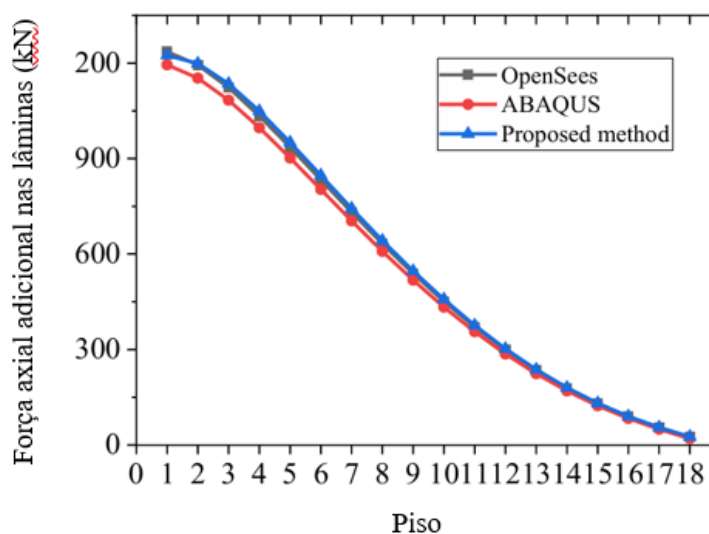


Figura 16 - Comparação do valor das forças axiais adicionais nas lâminas para diferentes modelos de cálculo para um carregamento lateral uniforme [11]

A Figura 16 não representa diretamente o CR, no entanto este está diretamente relacionado com o coeficiente de acoplamento, na perspetiva de que é o incremento de esforço axial nas lâminas que representa a influência das vigas de acoplamento no coeficiente de acoplamento.

Antes de avançar, importa esclarecer que a Equação 2.4, utilizada para o cálculo do coeficiente de acoplamento, está formulada sob a premissa de uma carga distribuída uniformemente ao longo da altura da parede acoplada. Esta abordagem será adotada nesta dissertação por constituir um caso comum e representativo do comportamento estrutural global. No entanto, importa salientar que Zhang (2003) [11] apresenta um conjunto mais alargado de expressões analíticas, adaptadas a diferentes tipos de carregamento, incluindo cargas triangulares, e cargas concentradas no topo.

Enquanto a Equação 2.4 permite avaliar a rigidez relativa das ligações (vigas), a Equação 2.5 de Stafford Smith & Cowan (1986) [9] fornece uma estimativa da deformação lateral global da estrutura.

$$\delta(topo) = \frac{qH^4}{8EI} F_3(k\alpha H) \quad (2.5)$$

em que a função F_3 é dada por:

$$F_3(k\alpha H) = 1 - \frac{1}{k^2} \left[1 - \frac{4}{(k\alpha H)^2} + \frac{8}{(k\alpha H)^4 \cosh(k\alpha H)} (1 + k\alpha H * \sinh(k\alpha H) - \cosh(k\alpha H)) \right] \quad (2.6)$$

No que diz respeito à Equação 2.5, que permite a obtenção do deslocamento lateral no topo da parede acoplada, é importante referir que esta constitui uma expressão simplificada, válida apenas para a altura total H do edifício. Esta limitação pode restringir a compreensão do comportamento da estrutura ao longo da sua altura. Para uma análise mais rigorosa e distribuída da deformada lateral, o livro de Stafford Smith & Cowan (1986) [9] oferece uma formulação mais geral, que considera o deslocamento em qualquer ponto ao longo da altura da parede.

Para finalizar, enquanto o coeficiente de acoplamento (CR) quantifica a proporção de rigidez lateral assegurada pelas vigas, o deslocamento no topo fornece uma estimativa direta da deformabilidade global da estrutura. Juntas, estas duas expressões permitem uma leitura integrada da resposta estrutural:

- Facilitam a escolha de dimensões iniciais para as lâminas e para as vigas de acoplamento, assegurando que o sistema cumpre os requisitos de rigidez e deslocamento impostos por regulamentos.
- Verificação de hipóteses de projeto permitindo antecipar o comportamento estrutural com base em parâmetros simples antes de recorrer a modelos avançados.

A integração destas duas formulações constrói, assim, uma base analítica robusta, essencial não apenas para o entendimento do comportamento das paredes acopladas, mas também para o desenvolvimento de soluções eficazes em projetos situados em zonas de elevada sismicidade.

2.6. ASPETOS FUNDAMENTAIS PARA O DIMENSIONAMENTO SÍSMICO DE PAREDES

2.6.1. DISTRIBUIÇÃO DAS ARMADURAS NA PAREDE

Em paredes relativamente delgadas, tipicamente definidas por uma relação altura-comprimento superior a 2,0 e sem aberturas significativas a hipótese de variação linear das tensões de flexão ao longo da profundidade constitui uma aproximação razoável, salvo nos casos em que aberturas substanciais alteram significativamente o padrão de tensões [5].

A resistência à flexão de uma parede simétrica revela-se pouco sensível à distribuição da armadura longitudinal. Assim, sob o ponto de vista da resistência à flexão, são geralmente aceitáveis duas estratégias distintas:

- a) colocação do reforço mínimo exigido de forma distribuída, concentrando o restante nos extremos da parede.
- b) distribuição uniforme de toda a armadura longitudinal ao longo do comprimento da parede.

A segunda abordagem tende a ser mais adequada em paredes de menor altura, onde os requisitos de deslocamento são reduzidos e a presença de armadura distribuída favorece a resistência aos esforços cortantes, incluindo o deslizamento ao longo das juntas de construção.

Em paredes delgadas, ambas as soluções são viáveis, mas a concentração do reforço nas extremidades apresenta vantagens relevantes, entre as quais se destacam:

- A existência de elementos extremos reforçados facilita a inserção de armadura transversal para efeitos de confinamento, o que se torna particularmente importante nas zonas de extremidade das paredes, onde as tensões de compressão atingem os seus valores máximos (Figura 17 a)).
- A capacidade de rotação (curvatura) da parede é moderadamente aumentada quando o reforço longitudinal está concentrado nas extremidades (Figura 17c)), uma vez que essas armaduras contribuem significativamente para resistir às forças de compressão. Isto reduz a profundidade do eixo neutro, aumentando a ductilidade da parede em comparação com soluções de reforço uniformemente distribuído e atenuando as exigências aplicadas ao betão [5].
- Quando a armadura é distribuída uniformemente, a taxa de reforço local nas extremidades tende a ser reduzida. Em casos extremos, a resistência à tração da armadura numa secção fissurada pode ser inferior à do betão em secções adjacentes, o que favorece a formação localizada de fissuras, originando deformações concentradas (Figura 17 b)). Ao concentrar a armadura nas extremidades, a taxa de reforço local aumenta, promovendo uma fissuração mais bem distribuída ao longo da altura da parede, o que melhora a capacidade de deslocamento.

Importa referir que a fissuração ilustrada na Figura 16(b) assume uma distribuição uniforme, o que pode ser irrealista quando existe uma diferença acentuada entre a armadura colocada nas extremidades e na alma da parede. Nestes casos, observa-se frequentemente uma fissuração concentrada por arborização, com várias fissuras a convergir para uma zona crítica, o que compromete a distribuição da deformação ao longo da altura da parede.

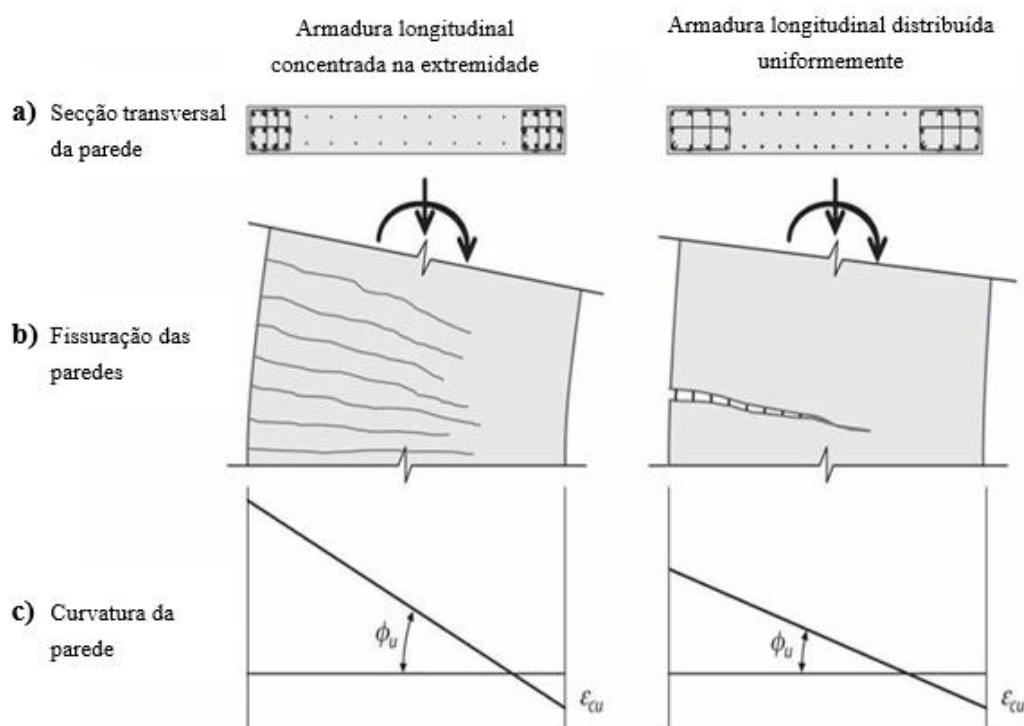


Figura 17 - Potenciais efeitos da distribuição de armadura longitudinal da parede adaptado de [5]

Quando analisadas sob a ação sísmica, as paredes acopladas apresentam um comportamento significativamente distinto das paredes isoladas. A presença das vigas de acoplamento promove uma redistribuição dos esforços internos ao longo da altura do sistema, conduzindo a uma certa uniformização dos momentos fletores e esforços transversos nas lâminas das paredes. Como referido anteriormente, a resistência sísmica deixa de estar concentrada apenas na base das paredes, passando a ser fortemente influenciada pelo efeito do binário gerado pelo sistema viga-parede, característico de um pórtico interno.

Este efeito de pórtico interno gera um comportamento assimétrico nas lâminas verticais: uma delas é submetida a um elevado esforço axial de compressão, enquanto a outra pode experienciar esforços axiais muito reduzidos ou mesmo tração. Esta diferença nos níveis de esforço axial tem implicações diretas no dimensionamento: a armadura longitudinal deve ser dimensionada com base na lâmina com menor esforço axial, garantindo a capacidade resistente em condições críticas de tração, enquanto o confinamento da secção deve ser dimensionado considerando o esforço axial máximo, por forma a garantir ductilidade e resistência ao colapso local.

Esta variação significativa do esforço axial ao longo do tempo e da altura da parede leva, inevitavelmente, a alterações na capacidade resistente ao momento fletor. O momento resistente M_{rd} calculado com base nas armaduras longitudinais frequentemente excede de forma significativa o momento atuante M_{ed} para determinados níveis de esforço axial, conduzindo a uma situação de sobrerresistência [2]. Esta relação $\frac{M_{rd}}{M_{ed}}$ reflete-se, por sua vez, na magnitude do esforço transversal atuante quando a capacidade resistente à flexão é mobilizada, afetando o desempenho global da parede em regime sísmico.

2.6.2. ZONA DE CONFINAMENTO

As práticas de dimensionamento anteriores à década de 1990 privilegiavam paredes retangulares com elementos de extremidade alargados, o que contribuía para a estabilidade da zona comprimida à flexão. Contudo, práticas mais recentes têm promovido, em muitos países, o uso de secções retangulares sem alargamento nas extremidades. Este tipo de geometria, embora mais eficiente do ponto de vista construtivo, pode originar paredes mais esbeltas e, por isso, mais suscetíveis à encurvadura lateral inelástica nas zonas sujeitas a compressão (Figura 18).



Figura 18 - Encurvadura lateral de uma parede [5]

Embora a encurvadura global ocorra geralmente após o limite de resistência da parede, esta pode ser acelerada por deformações residuais de tração provocadas por ações cíclicas anteriores, como acontece durante sismos. Nestas condições, o confinamento do betão torna-se um mecanismo essencial para preservar a integridade estrutural, sobretudo nas zonas críticas sob compressão elevada.

O termo “betão confinado” refere-se ao betão que se encontra envolvido por armadura transversal suficientemente densa, como estribos fechados, capazes de limitar a expansão lateral do material. Este confinamento melhora significativamente a resistência à compressão e a ductilidade do betão comparativamente ao seu estado não confinado.

Nos pilares com armadura transversal circular, o confinamento é particularmente eficaz. À medida que o betão tenta expandir lateralmente sob compressão, a armadura helicoidal é tracionada, gerando uma pressão radial de compressão sobre o núcleo (Figura 19 a)). Em secções retangulares com estribos, o confinamento tende a ser menos eficaz, pois o betão expande-se principalmente para o exterior da face plana, reduzindo a atuação da armadura (Figura 19 b)) [1].

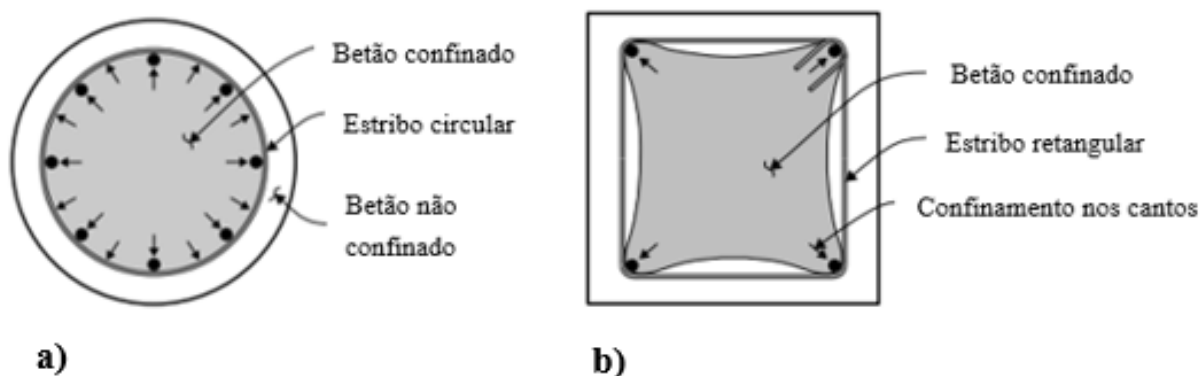


Figura 19 - Confinamento do betão pela armadura transversal: (a) Confinamento com armadura circular, (b) Confinamento com estribos retangulares adaptado [1]

Dado que nem todo o betão envolvido por armadura se encontra efetivamente confinado, o Eurocódigo 8 estabelece requisitos rigorosos para o confinamento em zonas de extremidade das paredes sujeitas a compressão durante ações sísmicas. Estes requisitos incluem o uso de estribos fechados com espaçamento reduzido, especialmente nas zonas de rótula plástica, e o envolvimento integral das armaduras longitudinais comprimidas, mesmo em elementos de pequena secção.

A presença adequada de armadura de confinamento é determinante para alcançar os níveis de ductilidade desejáveis nas estruturas. Ensaaios experimentais e simulações demonstram que, com um confinamento eficaz, paredes dúcteis podem atingir fatores de ductilidade próximos de 4, enquanto sistemas sem confinamento adequado apresentam valores inferiores a 2 [1].

Em paredes acopladas, o efeito do confinamento adquire um papel ainda mais crítico devido à assimetria dos esforços axiais entre as lâminas durante ações sísmicas. A presença de elevados esforços axiais reduz a capacidade deformacional do betão armado, sobretudo em zonas de rótula plástica, tornando o confinamento essencial para garantir a ductilidade local e o controlo das deformações inelásticas.

Nas regiões comprimidas de paredes acopladas, o confinamento permite evitar falhas prematuras por encurvadura lateral ou esmagamento do núcleo de betão. O confinamento adequado através de estribos fechados, densamente espaçados e com ligação completa às armaduras longitudinais permite que a parede mantenha a capacidade de dissipação de energia mesmo sob níveis elevados de compressão axial, garantindo a integridade das zonas críticas durante múltiplos ciclos de carregamento sísmico[3].

Em síntese, numa parede acoplada, a lâmina mais solicitada axialmente atua como o ponto crítico do sistema, e deve ser cuidadosamente confinada para evitar mecanismos frágeis de colapso. O dimensionamento por capacidade nestas zonas exige não só o controlo do nível de esforço axial máximo, mas também a adoção de detalhes construtivos que garantam a eficácia do confinamento transversal, conforme preconizado no Eurocódigo 8.

3

CARACTERÍSTICA GEOMÉTRICAS E ESTRUTURAIS DAS PAREDES ACOPLADAS

3.1. INTRODUÇÃO

O comportamento estrutural de paredes acopladas é fortemente influenciado pelas características geométricas, como o comprimento, a altura e a espessura das lâminas, bem como pelas dimensões e proporções das vigas de acoplamento. Estas variáveis condicionam a rigidez lateral do sistema e o modo como os esforços são redistribuídos entre os seus elementos constituintes, afetando diretamente a capacidade da parede em controlar deslocamentos e dissipar energia sob ações sísmicas.

Por outro lado, a forma como o sistema é representado numericamente tem um papel determinante na fiabilidade dos resultados obtidos. Estratégias de modelação distintas, como a utilização de elementos finitos de casca ou de elementos de barra para representação das vigas de acoplamento, conduzem a representações distintas dos mecanismos resistentes. Estas diferenças refletem-se na simulação do binário resistente, na coerência da interface entre vigas e lâminas, e na previsão da deformada estrutural.

Neste contexto, o presente capítulo tem como objetivo avaliar a influência dos principais parâmetros geométricos no desempenho global de paredes acopladas, bem como identificar as abordagens de modelação mais adequadas para a sua representação numérica. Para isso, considera-se uma parede acoplada com 12 pisos, valor que será também adotado no capítulo seguinte, assegurando continuidade e coerência na análise.

3.2. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA

Para garantir consistência na leitura e interpretação dos modelos analisados ao longo da dissertação, adota-se a convenção gráfica representada na Figura 20. Esta ilustração define a simbologia das principais componentes estruturais, que integram os sistemas de paredes acopladas.

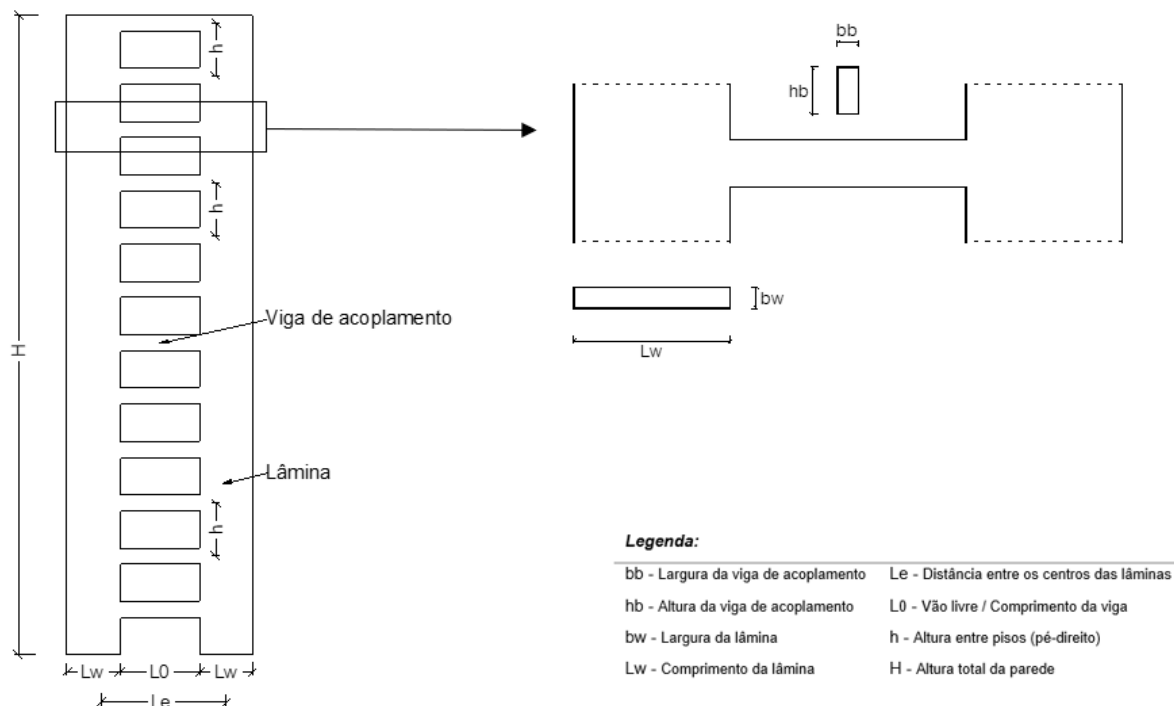


Figura 20 – Características gerais das paredes acopladas

A uniformização desta nomenclatura gráfica é essencial para interpretar os esquemas, tabelas e resultados, sobretudo quando se pretende compreender a influência de diferentes geometrias na redistribuição de esforços entre as lâminas e as vigas de acoplamento.

Este enquadramento gráfico será mantido de forma coerente em todas as figuras e análises, garantindo uma leitura técnica e facilitando a comparação entre diferentes configurações estudadas.

3.3. ESTUDO PARAMÉTRICO DO COEFICIENTE DE ACOPLAMENTO

Esta secção corresponde a um estudo paramétrico de três parâmetros geométricos fundamentais no valor do coeficiente de acoplamento (CR): o comprimento da lâmina (L_w), a altura da viga de acoplamento (h_b) e o comprimento da viga de acoplamento (L_0).

Pretende-se avaliar o impacto individual de cada um destes parâmetros, assumindo os restantes como constantes, de modo a clarificar o seu contributo isolado para o grau de acoplamento entre as paredes. Para cada parâmetro, é considerada uma variação dentro de intervalos coerentes com a prática de projeto, o que permite avaliar o seu efeito no CR em cenários representativos. Esta abordagem facilita a interpretação dos resultados e evita ambiguidades.

O estudo baseia-se na formulação analítica apresentada no Capítulo 2.4, que permite obter resultados consistentes com baixo custo computacional. A avaliação numérica exigiria um número elevado de modelos e configurações, muito tempo e sem ganhos significativos em termos de resultados.

3.3.1. VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DA LÂMINA

Para avaliar a influência da variação do comprimento da lâmina (L_w) no valor do coeficiente de acoplamento (CR), fixaram-se todos os restantes parâmetros geométricos, incluindo o comprimento da viga de acoplamento, que foi mantido constante em 3 metros., variando apenas o parâmetro em estudo.

Foram avaliados diferentes cenários de rigidez da viga de ligação através da variação da sua altura ($h_b=0.5$; $h_b=0.8$ m e $h_b=1.2$ m), aumentando a rigidez de aproximadamente 3 vezes em cada solução da viga. O intervalo de comprimento da lâmina varia entre 2 e 8 metros, cobrindo soluções típicas para aplicação prática.

Esta abordagem permite avaliar de forma sistemática a influência do comprimento da lâmina e a sua interação com diferentes rigidezes de viga, fornecendo uma base comparativa para a leitura do CR. A Figura 21 apresenta os resultados obtidos.

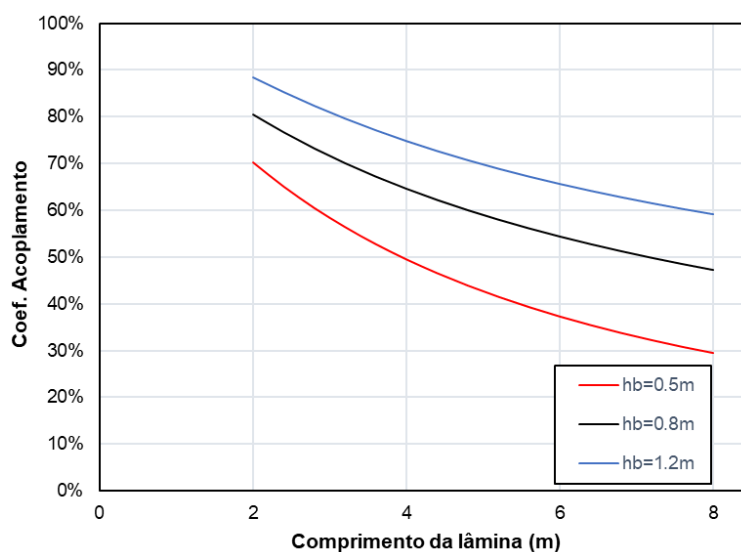


Figura 21 - Variação do coeficiente de acoplamento em função do comprimento da lâmina para diferentes rigidezes da viga de acoplamento para um modelo com 12 pisos

Esta variação pode ser compreendida à luz do comportamento da parede como uma consola encastrada, cuja rigidez à flexão é proporcional a:

$$K_w = \frac{E I_w}{H} \quad (3.1)$$

Sendo I_w a inércia da secção da lâmina e H_w a altura total da parede. A inércia I_w , depende diretamente do cubo do comprimento da base lâmina:

$$I_w = \frac{b_w \times l_w^3}{12} \quad (3.2)$$

Com o aumento do comprimento da lâmina, a rigidez à flexão da parede cresce significativamente, tornando-a menos deformável. Esta menor deformabilidade reduz a necessidade de compatibilização de deslocamentos entre lâminas, diminuindo o esforço cortante transmitido pelas vigas de acoplamento. Como consequência, a força axial induzida nas lâminas é também reduzida, o que leva a uma menor contribuição do binário gerado pelas vigas no momento total resistente do sistema, refletindo-se na diminuição do coeficiente de acoplamento (CR).

Adicionalmente, observa-se que o efeito da variação da lâmina é mais acentuado para vigas mais flexíveis ($h_b = 0,5$ m), onde o CR desce de 70% para 30%. Para vigas mais rígidas ($h_b = 1,2$ m), a descida é menos pronunciada (de 88% para 60%), revelando que o impacto da variação de L_w depende fortemente da rigidez da viga.

Por fim, importa destacar que, para comprimentos elevados de lâmina, a rigidez das paredes torna-se tão dominante face à das vigas que a variação do coeficiente de acoplamento com o comprimento da parede deixa de ser significativa. Nestas condições, o CR evidencia variações muito reduzidas mesmo para incrementos adicionais de L_w , uma vez que as lâminas passam a resistir à maior parte do momento aplicado, diminuindo o contributo necessário das forças axiais induzidas pelas vigas.

3.3.2. VARIAÇÃO DA ALTURA DA VIGA DE ACOPLAMENTO

Para avaliar a influência da altura da viga (h_b) no coeficiente de acoplamento (CR), adotou-se uma abordagem semelhante à anterior, mantendo constantes todos os parâmetros geométricos, mantendo-se igualmente constante o comprimento da viga (3 metros), variando apenas a altura da viga de acoplamento entre 0.20m e 1.20m, soluções exequíveis de aplicar em contexto real.

Adicionalmente, para avaliar a influência combinada da geometria da parede, a análise foi realizada para três configurações distintas de comprimento de lâmina ($L_w = 2.5$ m, 3.5 m e 5.0 m), representando diferentes níveis de rigidez das paredes verticais. Esta estratégia possibilita uma comparação direta entre soluções com diferentes níveis de flexibilidade das lâminas, isolando o efeito da viga.

A Figura 22 ilustra a influência da altura da viga de acoplamento no valor do coeficiente de acoplamento, considerando as três configurações distintas de rigidez das lâminas.

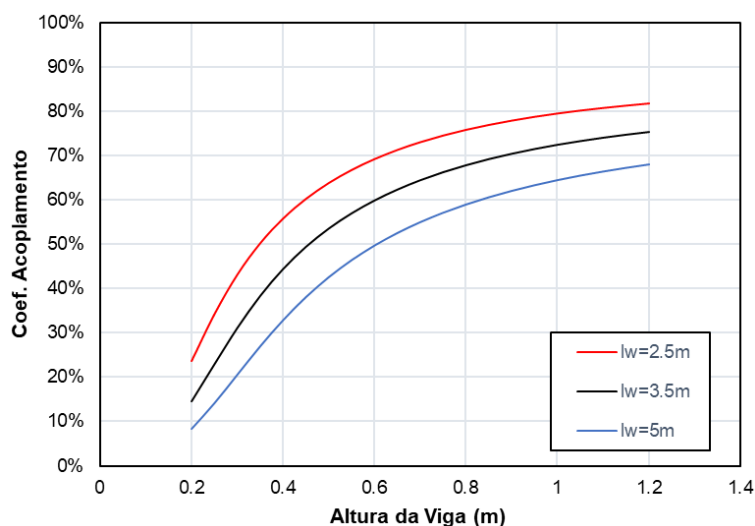


Figura 22 - Variação do coeficiente de acoplamento em função do altura da viga para diferentes rigidezes da das lâminas para um modelo com 12 pisos

Esta evolução crescente das curvas pode ser explicada pela rigidez flexional da viga, modelada, de forma simplificada, como uma viga bi-encastada, cuja rigidez é proporcional a:

$$K_h = \frac{4E I_b}{L_0} \quad (3.3)$$

sendo a inércia I_b dada por:

$$I_b = \frac{b_b \times h_b^3}{12} \quad (3.4)$$

A relação cúbica com a altura da viga h_b evidencia que mesmo pequenos aumentos nesta dimensão resultam num acréscimo significativo da sua rigidez, justificando o aumento acentuado do coeficiente de acoplamento. Dando elevada relevância aos esforços de corte e consecutivamente ao momento representado pelo binário.

Importa ainda referir que este estudo foi realizado para um edifício de 12 pisos, caso o número de pisos fosse inferior, e consequentemente o número de vigas fosse menor, o efeito da viga seria no coeficiente de acoplamento seria menor. Inversamente, com maior número de vigas, o impacto da sua rigidez seria ainda mais expressivo.

A Figura 22 representa também a influência da rigidez das lâminas na variação do coeficiente de acoplamento. Comparando os casos com $L_w = 2.5$ m e $L_w = 5.0$ m, observa-se que um aumento de 20 % na rigidez da lâmina conduz a uma redução do CR da ordem dos 15 %, para uma dada altura da viga. Este resultado evidencia que paredes mais rígidas limitam a participação das vigas no mecanismo resistente, reduzindo o valor do coeficiente de acoplamento.

Observa-se também que as curvas associadas aos diferentes comprimentos de lâmina mantêm um traçado semelhante, distinguindo-se principalmente por uma translação vertical. Este comportamento indica que o efeito predominante na variação do CR é provocado pela altura da viga de acoplamento. Esta conclusão é reforçada pelo facto de o modelo em análise contar com 12 vigas de acoplamento (uma por piso), enquanto o comprimento das lâminas é alterado apenas em dois elementos verticais, o que acentua o impacto global das variações de rigidez das vigas na determinação do valor de CR.

3.3.3. VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DA VIGA DE ACOPLAMENTO

Para finalizar esta secção realiza-se a análise do CR através da variação do comprimento da viga de acoplamento (L_0). A metodologia é semelhante às anteriores mantendo todos os parâmetros constantes, adotou-se um comprimento da lâmina $L_w = 3.5$ m variando apenas variando apenas o vão livre entre as lâminas.

Semelhante à análise do comprimento das lâminas são adotadas as mesmas alturas das vigas com ($h_b = 0.5$; $h_b = 0.8$ m e $h_b = 1.2$ m), aumentando a rigidez de aproximadamente 3 vezes em cada solução da viga. Esta comparação é interessante pois a rigidez destes elementos está dependente do momento de inércia da secção transversal, mas também do comprimento da viga. Assim sendo adotaram-se para cada cenário valores para o comprimento da viga entre 2 e 10 vezes a altura da viga. O valor de 2 reflete essencialmente a questão de não formar escora direta entre as lâminas

A Figura 23 apresenta a variação do coeficiente de acoplamento em função do comprimento da viga de acoplamento (L_0), considerando três configurações de rigidez associadas a diferentes alturas de viga (h_b).

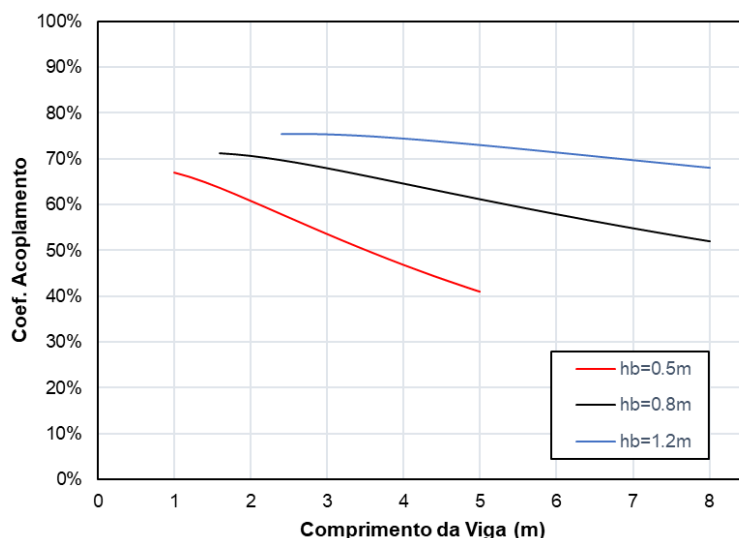


Figura 23 - Variação do coeficiente de acoplamento em função do comprimento da viga para diferentes rigidezes da viga de acoplamento num modelo com 12 pisos

A redução do coeficiente de acoplamento pode ser interpretada à luz da expressão clássica da rigidez de uma viga bi-encastada, dada por:

$$K_{viga} = \frac{4E I_b}{L_0} \quad (3.5)$$

É claro que, para uma viga de acoplamento com secção constante, o aumento de L_0 implica uma redução proporcional da sua rigidez flexional, tornando-a menos eficaz na transmissão de esforços horizontais entre as paredes e, consequentemente, reduzindo o coeficiente de acoplamento.

Este resultado adquire particular relevância quando comparado com os obtidos na análise da variação da altura da viga. Enquanto nessa situação se verificaram aumentos acentuados do coeficiente com pequenas alterações na altura (devido à dependência cúbica da inércia), aqui a variação do comprimento conduz a uma redução mais gradual e progressiva.

Adicionalmente, observa-se que o efeito da variação do comprimento é mais acentuado para vigas mais flexíveis ($h_b = 0,5$ m), onde o CR desce de 65% para 40%. Para vigas mais rígidas ($h_b = 1,2$ m), a descida é menos pronunciada (de 75% para 62%), revelando que o impacto da variação de L_0 depende fortemente da rigidez da viga.

Em suma, no contexto de dimensionamento de estruturas sujeitas a ações horizontais, como edifícios em zonas sísmicas, demonstra-se que a variação do CR não é linear com a variação das características geométricas, a adicionar a esse fator existem características geométricas que apresentam maior influência que outras.

Com esta análise, encerra-se a avaliação paramétrica das variáveis geométricas fundamentais, identificando-se neste tipo de paredes acopladas com 12 pisos que a altura da viga é o parâmetro com maior impacto no coeficiente de acoplamento.

3.4. MODELAÇÃO ESTRUTURAL

Esta secção tem como objetivo identificar as estratégias de modelação que melhor representam o comportamento real das paredes acopladas, com especial enfoque na discretização das vigas de acoplamento. Serão comparadas diferentes abordagens, avaliando a sua influência nos principais parâmetros de resposta estrutural e na qualidade da representação dos mecanismos resistentes.

No desenvolvimento dos modelos estruturais, foram consideradas três cenários distintos para a representação das vigas de acoplamento: (i) modelação com elementos finitos de casca, (ii) modelação com elementos de barra ligados a um único nó de cada lâmina, e (iii) modelação com elementos de barra ligados a vários nós da malha das lâminas. Esta distinção visa analisar o impacto de cada abordagem na representação do binário resistente, na rigidez lateral do sistema e na coerência da transmissão de esforços entre elementos verticais.

As lâminas foram, em todos os casos, modeladas com elementos de casca. Atualmente, os programas de cálculo estrutural permitem a utilização eficiente de elementos finitos bidimensionais, o que viabiliza uma representação detalhada da distribuição de tensões e deformações ao longo da altura da parede. Esta abordagem justifica-se pela necessidade de captar com rigor os mecanismos resistentes verticais, sobretudo em contextos de análise sísmica.

Esta análise permite, assim, fundamentar a escolha do modelo mais apropriado para aplicação nesta dissertação e em projetos edifícios em betão armado com o uso de paredes acopladas.

3.4.1. VIGAS DE ACOPLAMENTO MODELADAS COM ELEMENTOS FINITOS

Quando as vigas de acoplamento e as lâminas são modeladas exclusivamente com elementos finitos (Figura 24), o comportamento estrutural representado aproxima-se mais da realidade física. Esta abordagem permite capturar de forma contínua a distribuição de esforços ao longo das superfícies.

A modelação com elementos de casca possibilita uma descrição precisa do campo de tensões, ao capturar variações ao longo da altura da secção e ao representar adequadamente tensões normais e tangenciais nas zonas de ligação entre as vigas de acoplamento e as lâminas. Isto é particularmente relevante em estruturas com elevadas variações de rigidez. Neste contexto, os esforços transmitidos entre as vigas de acoplamento asseguram a continuidade da rigidez e a coerência física da interface.

Do ponto de vista do campo de deslocamentos, esta abordagem permite uma representação altamente confiável do comportamento global da estrutura. A deformada obtida (Figura 25) reproduz de forma clara os mecanismos resistentes da parede acoplada, revelando uma boa transferência dos momentos fletores e esforços cortantes entre as vigas de acoplamento e as lâminas evitando os erros típicos observados em modelos simplificados, como deslocamentos excessivos ou ausência do binário resistente.

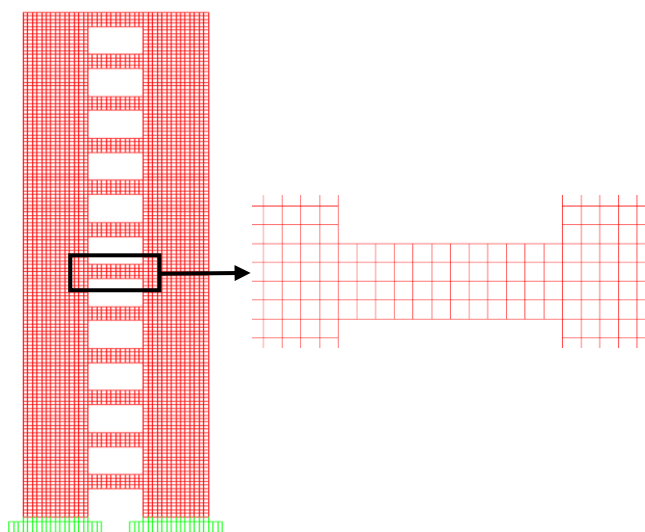


Figura 24 - Parede acoplada modelada com elementos finitos

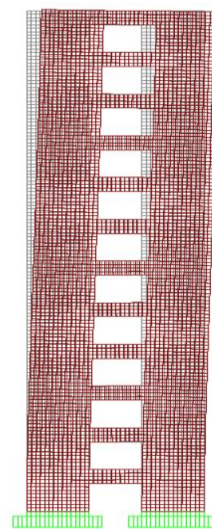


Figura 25 - Deformada da parede acoplada modelada com elementos finitos

3.4.2. VIGAS DE ACOPLAMENTO MODELADAS COM ELEMENTOS BARRA

3.4.2.1. Elemento barra ligado a um único nó

Quando um elemento de barra é ligado apenas a um único nó de uma malha de elementos finitos (Figura 26), a transferência de esforços entre o elemento de barra e os elementos de casca adjacentes fica limitada essencialmente à componente axial, devido à incapacidade da ligação de transmitir momentos fletores de forma realista.

Este comportamento resulta da baixa rigidez rotacional da ligação, já que a continuidade da barra é afetada essencialmente pela rigidez dos elementos finitos nos nós adjacentes, portanto uma rigidez relativamente baixa que se traduz numa pequena restrição às rotações da barra. Como consequência, a barra comporta-se como uma viga biarticulada, incapaz de transmitir momentos nas extremidades. Esta limitação afeta diretamente a estimativa do coeficiente de acoplamento (CR), levando à sua subavaliação na análise da rigidez global do sistema.

No contexto das paredes acopladas, esta simplificação compromete seriamente a precisão da análise estrutural. Tal deficiência é evidenciada na (Figura 27), onde a parede acoplada apresenta uma deformada típica de flexão simples, ignorando o efeito de interação entre as lâminas promovido pela ação das vigas de acoplamento.

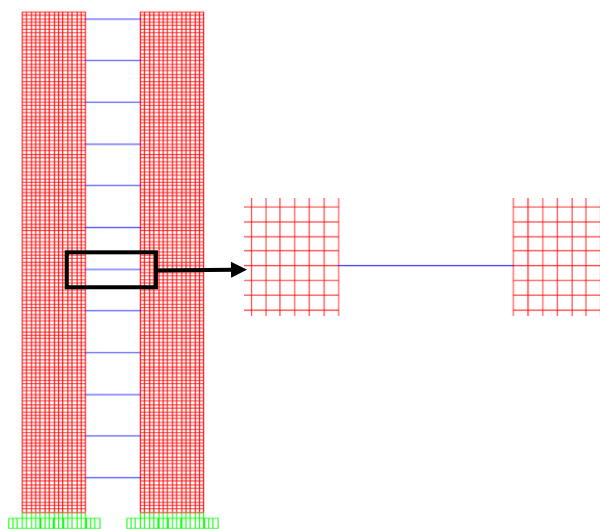


Figura 26 - Elemento barra ligado a um único nó da malha de elementos finitos

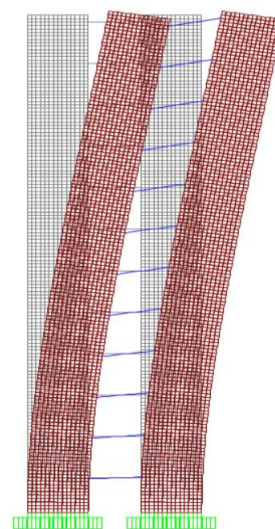


Figura 27 – Deformada da parede acoplada com o elemento barra ligado a um único nó

A ausência de interação entre as lâminas induz uma resposta estrutural não representativa da realidade, onde a parede acoplada se comporta essencialmente como uma simples consola dada pela rigidez das duas lâminas, distorcendo os resultados de dimensionamento.

3.4.2.2. Elemento barra ligado a vários nós

Para ultrapassar as limitações do modelo com barra ligada a um único nó, optou-se por prolongar o elemento de barra para o interior da lâmina, conectando-o a vários nós da malha de elementos finito, de modo a estar abrangido por uma maior área de elementos finitos que conduz a uma maior rigidez e consequentemente uma melhor transmissão de esforços entre os elementos.

Neste caso, o elemento barra está ligado a 4 elementos finitos (Figura 28), e a representação do sistema estrutural aproxima-se significativamente do comportamento obtido com modelação exclusivamente por elementos finitos. Optou-se por 4 nós porque a malha das lâminas possui discretização fina, o que limita a influência da rigidez local dos nós isolados e torna necessária a ligação a múltiplos pontos para representar adequadamente a rigidez rotacional. Importa referir que, caso o número de elementos finitos em contacto com o elemento barra fosse aumentado, os resultados tenderiam a manter-se praticamente inalterados. Isto porque, a partir de um determinado número de nós, a rigidez da ligação barra-lâmina converge para um valor representativo da interface real, deixando de influenciar significativamente a transferência de esforços.

Paralelamente, o campo de deslocamentos evidencia um comportamento estrutural mais compatível com o esperado ao permitir a transmissão eficiente dos esforços, a deformação da parede acoplada reproduz o mecanismo de interação entre vigas e lâminas, refletindo a ativação de um binário resistente que reduz os momentos flectores na base das lâminas. A Figura 29 ilustra este comportamento, demonstrando que a deformada obtida se aproxima do padrão típico de paredes acopladas, com ativação eficaz da interação entre vigas e lâminas e distribuição realista dos esforços internos.

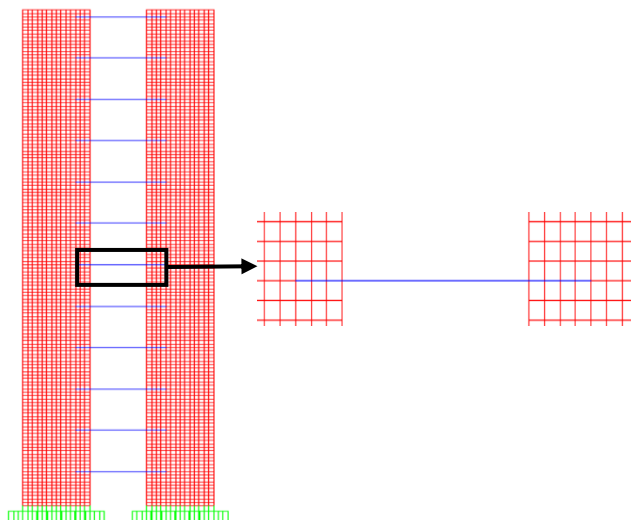


Figura 28 - Elemento barra ligado a vários nós da malha de elementos finitos

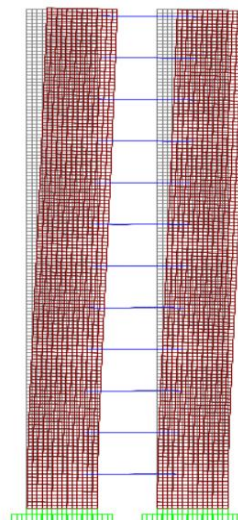


Figura 29 - Deformada da parede acoplada com o elemento barra ligado a um único nó

3.4.3. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

A análise da deformada resultante das diferentes estratégias de modelação da viga de acoplamento permite avaliar quais as soluções mais adequadas para representar o comportamento de paredes acopladas. Esta secção compara resultados numéricos dos três modelos distintos: (i) modelação com elementos finitos (MEF), (ii) elemento de barra ligado a vários nós, e (iii) elemento de barra ligado a um único nó, com os resultados analíticos obtidos através das expressões apresentadas na Secção 2.4.

A Tabela 1 apresenta os valores do coeficiente de acoplamento (CR) e do deslocamento lateral no topo da parede para cada um dos modelos analisados.

Tabela 1 - Comparação de resultados dos vários modelos

	Analítico	MEF	EB vários nós	EB único nó
CR (%)	61.0%	61.5%	56.3%	5.7%
Deslocamento topo (m)	0.095	0.092	0.11	0.424

Os resultados obtidos confirmam as observações anteriormente discutidas. O modelo com elemento de barra ligado a um único nó apresenta um CR extremamente reduzido (5,7%), funcionando praticamente como uma barra bi-articulada do ponto de vista do modelo numérico. Este comportamento revela uma transferência ineficaz de esforços cortantes e momentos flectores para as lâminas, comprometendo a coerência estrutural da modelação.

Além disso, este modelo apresenta um deslocamento no topo significativamente superior aos restantes na medida em que a rigidez global é essencialmente dada pela soma da rigidez das duas lâminas, justificando pela ausência de contribuição das vigas de acoplamento na rigidez global da parede.

Por outro lado, os modelos com ligação do elemento barra por vários nós e com elementos de casca (MEF) demonstram resultados bastante próximos dos valores analíticos, evidenciando uma representação coerente do comportamento estrutural. Ambos os modelos garantem uma transferência eficaz de esforços entre vigas e lâminas, assegurando a ativação do binário resistente. Ainda que o modelo com barra ligada a vários nós se revele uma alternativa válida, a modelação com elementos de casca proporciona uma descrição mais precisa da interação local na interface, permitindo uma representação mais rigorosa das distribuições de tensões e deformações ao longo da ligação.

Embora exija cuidados adicionais na definição da ligação, o modelo de barra com múltiplos nós permite obter uma boa aproximação do comportamento da parede acoplada com menor complexidade numérica. A ligação da barra às lâminas deve, no entanto, prolongar-se por uma zona suficientemente extensa, garantindo a transferência realista dos esforços entre os elementos.

No caso da modelação com elementos de finitos (MEF), apesar de oferecer uma representação mais detalhada da distribuição de esforços e deformações, a obtenção dos esforços é mais exigente, pois requer a definição criteriosa de secções de corte na malha dos elementos finitos através de secções de corte (sections cuts). Em contraste, no modelo com barra ligada a vários nós, os esforços podem ser diretamente obtidos nos nós de ligação, facilitando a extração dos resultados. Assim, ambos os modelos são válidos e adequados, devendo a escolha recair sobre o equilíbrio pretendido entre precisão e eficiência computacional.

Por fim, refira-se que, ao longo da presente dissertação, optou-se pela modelação das vigas de acoplamento com elementos finitos de casca, por garantir maior fidelidade na representação dos mecanismos resistentes. Em projeto, no entanto, a utilização de elementos de barra ligados a vários nós poderá constituir uma solução eficaz e mais eficiente.

4

ESTUDO DE PAREDES ACOPLADAS COM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS

4.1. INTRODUÇÃO

A análise do comportamento estrutural de sistemas de paredes acopladas requer uma definição criteriosa das suas configurações geométricas, de modo a garantir soluções coerentes com os critérios normativos e representativas da prática de projeto. As dimensões das lâminas e das vigas de acoplamento, bem como a relação entre elas, influenciam diretamente a rigidez global do sistema, o modo de redistribuição dos esforços internos e a eficácia do mecanismo resistente perante ações sísmicas.

Neste enquadramento, torna-se essencial que as opções geométricas de paredes acopladas adotadas na fase de conceção garantam simultaneamente o cumprimento dos requisitos normativos e a viabilidade construtiva da solução. A compatibilização entre rigidez, resistência e ductilidade deve ser assegurada desde essa fase permitindo validar a coerência das configurações estruturais propostas face às exigências impostas por ações sísmicas.

O objetivo deste capítulo é estudar o comportamento de diferentes configurações geométricas de paredes acopladas, representada por diferentes coeficientes de acoplamento, concebidas de forma a apresentarem uma rigidez lateral global semelhante à de uma parede dúctil de referência. Pretende-se, com esta comparação, avaliar as implicações estruturais associadas à variação do grau de acoplamento, com especial enfoque na redistribuição de esforços e no desempenho potencial dessas soluções face a ações sísmicas.

Ao longo deste capítulo são comparadas diferentes configurações de paredes acopladas, organizadas em dois grupos de rigidez segundo o comprimento de duas paredes dúcteis inseridas em edifícios idealizados com 5 m e 7 m. Em cada grupo, são consideradas soluções com diferentes graus de acoplamento, mas com rigidez lateral global equivalente, permitindo isolar o efeito da rigidez das vigas na resposta estrutural. As expressões analíticas representadas no capítulo 2 são unicamente utilizadas para a definição das diferentes configurações geométricas. A análise posterior é realizada em regime estático linear com recurso a um programa de modelação numérica obtendo assim deslocamentos, esforços internos e formação de mecanismos resistentes. Por fim, é também avaliada a viabilidade das soluções ao nível das fundações.

Pretende-se assim avaliar em que medida a variação do coeficiente de acoplamento impõe limitações construtivas ou condiciona a aplicabilidade das alternativas propostas, assegurando que estas não se esgotam numa eficácia teórica, mas que se traduzem em soluções realizáveis do ponto de vista técnico e regulamentar.

4.2. METODOLOGIA ADOTADA PARA O ESTUDO

Com o objetivo de avaliar o comportamento estrutural de diferentes configurações de paredes acopladas num contexto sísmico, desenvolveu-se um estudo baseado na modelação de edifícios de referência com paredes dúcteis. Pretendeu-se garantir que a armadura necessária resultante da análise fosse compatível com soluções praticáveis de projeto.

Foram consideradas duas soluções de edifícios idealizados, ambas com 12 pisos, altura total de 36 metros e pisos de 3 metros de altura. A implantação estrutural é regular e simples, com planta quadrada de 24×24 metros, e o contraventamento é realizado essencialmente por paredes dúcteis e núcleos.

A Solução A corresponde a um edifício contraventado unicamente com paredes dúcteis de 7 metros na direção X e de 6 metros na direção Y, como se apresenta na Figura 30. A análise dinâmica efetuada para este modelo permitiu verificar que o modo fundamental na direção X, correspondente à direção da parede de 7 metros, apresenta uma frequência de 0.7 Hz.

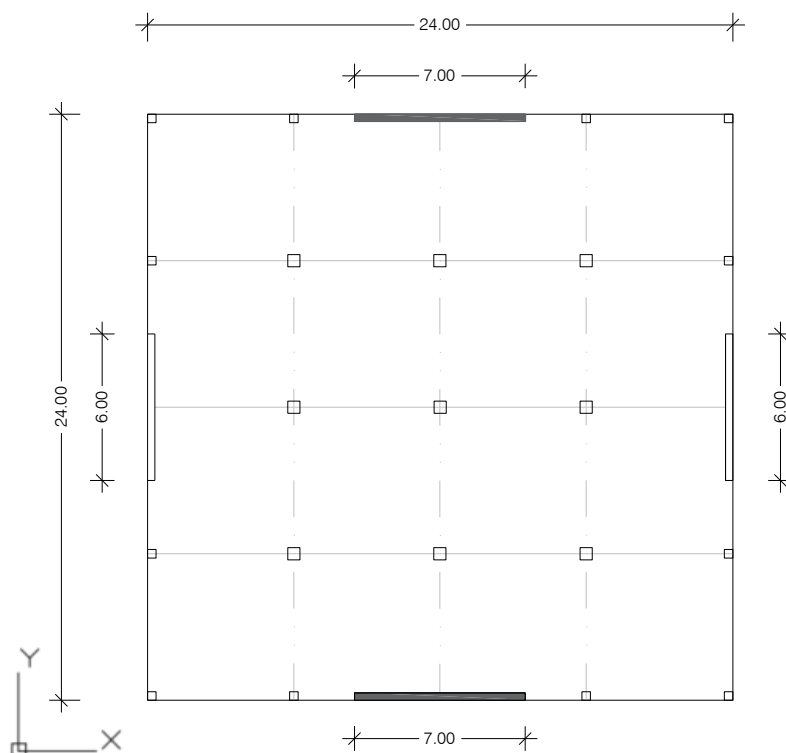


Figura 30 - Planta estrutural da solução A

Com o intuito de analisar paredes com diferente rigidez, estudou-se uma segunda solução estrutural (Solução B), que permitisse a utilização de paredes de 5 metros na direção X. Para garantir a comparabilidade entre os modelos e manter a equivalência dinâmica, foram introduzidos núcleos interiores na planta do edifício, assegurando uma frequência fundamental também próxima de 0.7 Hz nessa mesma direção. A planta da Solução B encontra-se representada na Figura 31.

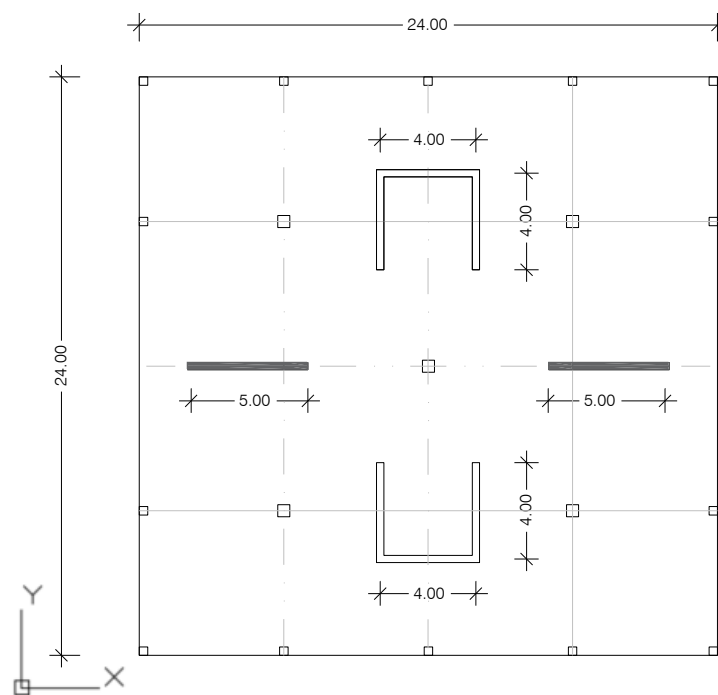


Figura 31 - Planta estrutural da solução B

Ambos os modelos tridimensionais foram desenvolvidos no software SAP2000 com recurso a elementos finitos tipo *Shell*, permitindo avaliar a resposta global da estrutura com paredes de rigidez distinta. As geometrias dos edifícios de referência são ilustradas nas Figuras 32 e 33, respetivamente para as soluções A e B.

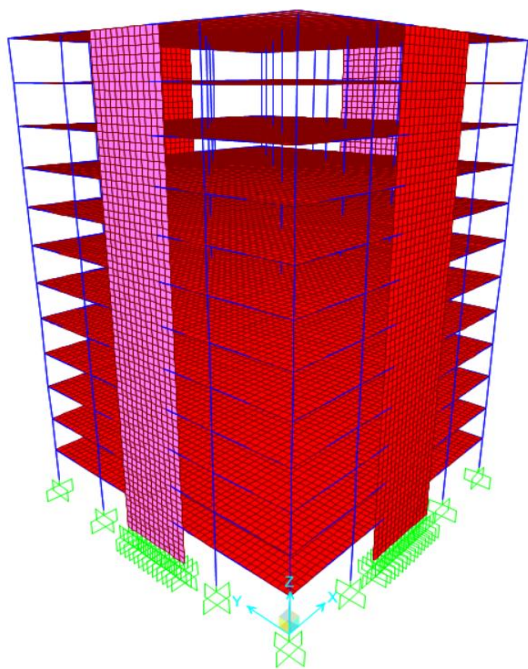


Figura 32 – Edifício referência parede dúctil 7 metros

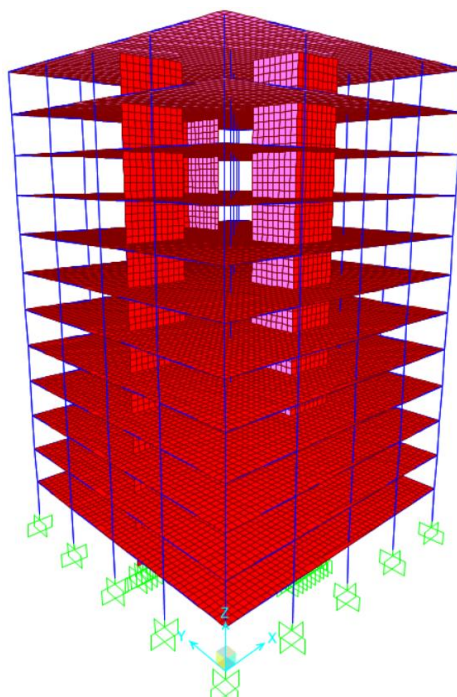


Figura 33 – Edifício referencia parede de 5 metros

Importa referir que a análise estrutural neste capítulo foi realizada de forma isolada para cada parede acoplada, sem a sua inserção num modelo global do edifício. Aplicando-se diretamente uma ação lateral estática sobre cada parede acoplada, com o objetivo de reproduzir de forma simplificada os efeitos da ação sísmica. Esta ação foi determinada com base no esforço de corte basal obtido nos edifícios de referência, mais concretamente, nas paredes de 7 metros e 5 metros de comprimento, respetivamente, garantindo que os esforços aplicados fossem coerentes com aqueles que se verificariam em contexto real de projeto.

Com o objetivo de obter soluções de paredes acopladas com rigidez lateral global equiparada à das paredes dúcteis de referência, foram definidas diferentes configurações com base na variação do coeficiente de acoplamento (CR). Consideraram-se, para tal, quatro valores distintos de CR (50%, 60%, 70% e 80%) para cada uma das geometrias de parede adotadas (com 7 m e 5 m de comprimento), permitindo avaliar diferentes níveis de influência relativa entre as lâminas e as vigas de acoplamento no comportamento global da parede. As configurações geométricas foram definidas com base nas expressões analíticas apresentadas na Secção 2.4, garantindo que todas as soluções apresentavam, à partida, uma rigidez equivalente em termos de deslocamento lateral no topo.

Esta estratégia permitiu evitar a modelação completa dos oito edifícios, concentrando o estudo nas paredes acopladas isoladamente com cargas laterais equivalentes. Assim, foi possível avaliar de forma comparativa o impacto das variações geométricas e do grau de acoplamento na resposta estrutural, mantendo o deslocamento no topo como critério de comparação entre as soluções.

4.3. MODELAÇÃO ESTRUTURAL E APLICAÇÃO DAS AÇÕES EQUIVALENTES

Neste subcapítulo, apresentam-se os modelos estruturais desenvolvidos para a representação numérica das paredes acopladas, detalhando-se os critérios de discretização, aplicação de cargas e hipóteses adotadas para simular o seu comportamento estrutural.

Tal como discutido no Capítulo 3, a abordagem mais adequada para este tipo de análise consistiu na utilização de uma malha de elementos finitos baseada em elementos do tipo *Shell*, tanto para representar as lâminas verticais como as vigas de acoplamento. Esta opção permite uma correta transferência dos esforços internos e assegura uma melhor representação tridimensional das interações entre elementos verticais e horizontais, fundamentais para captar o comportamento global da estrutura. Ambos os modelos foram desenvolvidos no SAP2000 com recurso a elementos *Shell*, permitindo representar de forma consistente tanto os efeitos de flexão como a transferência de esforços entre componentes.

Relativamente à aplicação da ação lateral, numa análise estática linear, esta foi distribuída uniformemente ao longo dos vários pisos. Embora esta abordagem não reflita diretamente a distribuição triangular típica das forças sísmicas, a sua adoção baseia-se no facto de que, num edifício real, as paredes acopladas integram um sistema estrutural mais complexo, onde interagem com outros elementos resistentes, como pórticos e paredes de contraventamento. Nesses casos, a redistribuição dos esforços tende a uniformizar os efeitos ao longo da altura da estrutura. Assim, considerou-se que a carga uniforme se aproxima mais da realidade estrutural do edifício de referência descrito no início deste capítulo.

A Figura 34 a) ilustra o modelo correspondente à parede de referência (7 m de comprimento), e as cargas distribuídas ao longo da altura correspondente à força de corte basal, a Figura 34 b), apresenta a mesma

situação mas para a parede dúctil de 5 metros e a Figura 34 c) representa a configuração de uma parede acoplada concebida para apresentar uma rigidez global equiparada à da parede dúctil de 7 metros por essa razão apresenta a mesma carga lateral.

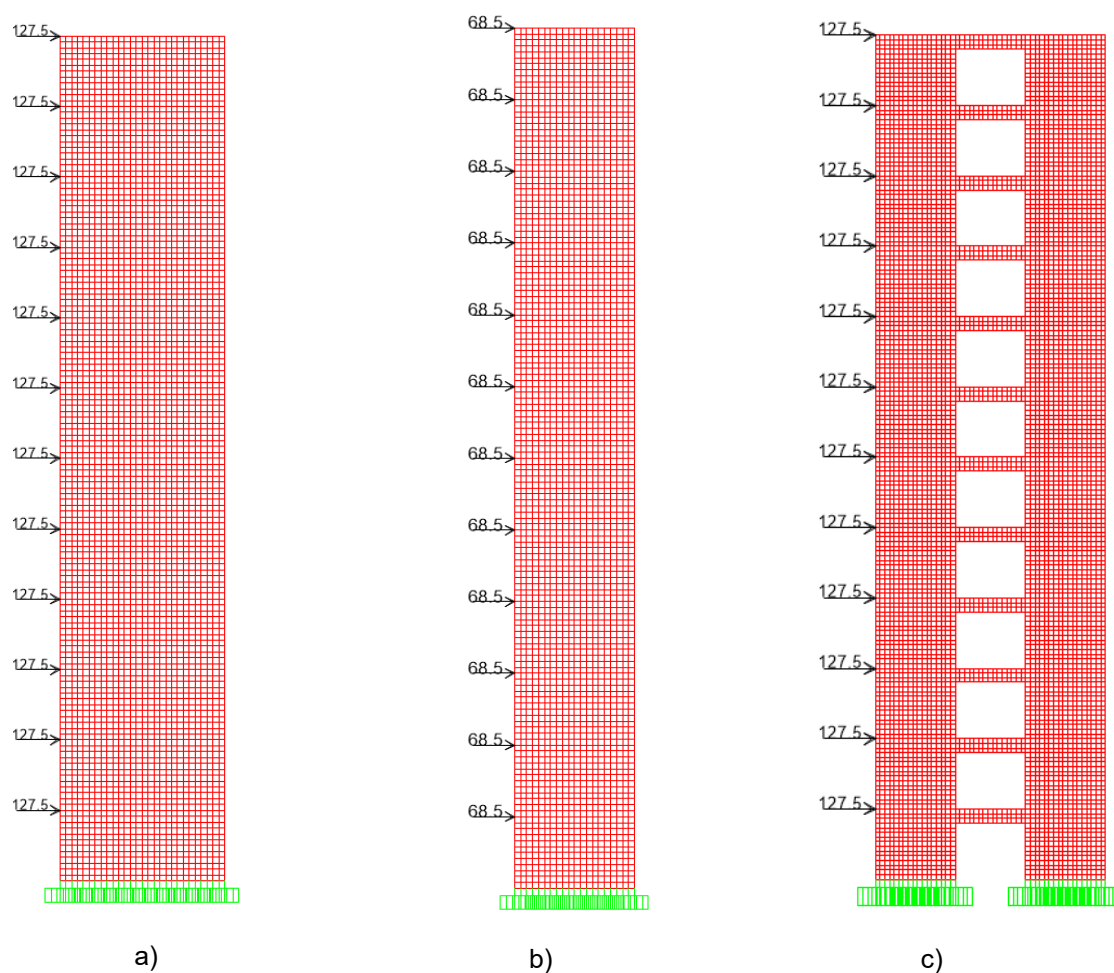


Figura 34 – Modelo estrutural a) da parede dúctil isolada 7 metros; b) da parede dúctil isolada 5 metros; c) da parede acoplada com rigidez semelhante a uma parede de 7 metros

O dimensionamento da malha obedeceu ao critério de discretizar cada viga de acoplamento com, pelo menos, três elementos ao longo da sua altura, assegurando uma distribuição adequada dos esforços e a representação da variação de tensões. Em seguida, a malha foi uniformizada ao longo das lâminas, de modo a garantir continuidade entre os elementos e coerência global do modelo. As bases das paredes foram consideradas encastradas, representando uma ligação rígida à fundação.

Além do peso próprio das paredes, foram aplicadas cargas verticais representativas das ações gravitacionais usuais dos pisos, simulando as cargas de combinação quase permanente dos edifícios. Esta abordagem permitiu introduzir uma sollicitação axial realista nas paredes, assegurando que a análise numérica reflete com fidelidade as condições de serviço. A Figura 35 ilustra a distribuição das cargas verticais aplicadas ao modelo.

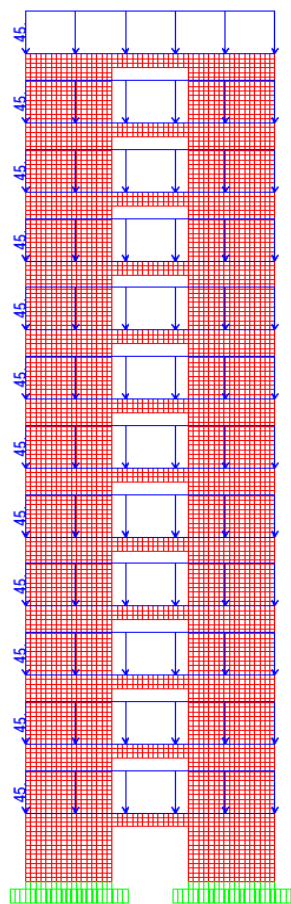


Figura 35 - Cargas verticais aplicadas às paredes acopladas

As análises foram realizadas com recurso a modelos lineares estáticos, em duas fases distintas: a primeira com aplicação exclusiva da carga lateral, para avaliação do comportamento global e dos deslocamentos no topo; e a segunda com inclusão das cargas verticais distribuídas ao longo das paredes, permitindo analisar a evolução dos esforços axiais e apoiar o dimensionamento das fundações.

Este procedimento permitiu distinguir de forma clara os efeitos das ações laterais e verticais na resposta das paredes acopladas, possibilitando uma avaliação separada dos mecanismos resistentes envolvidos e contribuindo para uma melhor compreensão do comportamento estrutural global.

4.4. CRITÉRIOS DE BASE

No seguimento das análises numéricas realizadas para os modelos isolados de paredes acopladas, e antes da definição das configurações finais a adotar, identificaram-se abordagens prévias que se revelaram essenciais para garantir o cumprimento dos critérios regulamentares definidos no Eurocódigo 8. Estas abordagens, além de permitirem conformidade com os requisitos normativos, influenciaram diretamente a geometria das paredes acopladas, condicionando dimensões, proporções e a distribuição de esforços. Apesar de se tratar de um estudo local, torna-se essencial considerar desde já os limites normativos relevantes, uma vez que estes condicionam diretamente o desempenho sísmico, mesmo antes da inserção das paredes num modelo global.

4.4.1. ESFORÇO AXIAL REDUZIDO

Verificou-se que o aumento do grau de acoplamento conduz a um acréscimo das forças axiais nas lâminas, resultante da ativação do binário resistente pelas vigas de acoplamento. Este binário gera um forças de tração numa lâmina e de compressão na outra, sendo esta última a mais crítica, por se encontrar em situação potencialmente limitativa da ductilidade local. Com o aumento do acoplamento, a concentração do esforço axial de compressão tende a intensificar-se na base da parede, podendo ultrapassar os limites normativos estabelecidos.

A análise dos resultados obtidos para diferentes níveis de acoplamento, em paredes com 5 m e 7 m de comprimento, revelou que, para coeficientes de acoplamento elevados, o esforço axial reduzido nas lâminas (v_{Rd}) ultrapassava o valor limite de 0.40 estabelecido no Eurocódigo 8. Este parâmetro, embora aqui aplicado sob ações estáticas, é normativamente relevante por estar diretamente associado à capacidade resistente da parede sob ações sísmicas.

Inicialmente, todas as configurações de paredes acopladas foram concebidas com lâminas de espessura constante, assegurando uniformidade entre as diferentes geometrias. No entanto, verificou-se que, para níveis de acoplamento mais elevados, o critério de esforço axial reduzido (v_{Rd}) não era cumprido, especialmente na lâmina comprimida. Como forma de mitigar este incumprimento normativo, procedeu-se ao ajuste da espessura das lâminas, aumentando-a nos casos mais penalizados. Esta estratégia permitiu manter a rigidez global equivalente entre os modelos, garantindo simultaneamente o respeito pelos limites regulamentares. Assim, algumas configurações com CR mais elevados apresentam uma espessura de lâmina superior às restantes

4.4.2. COMPRIMENTO DA VIGA DE ACOPLAMENTO

Considerando o objetivo de adotar soluções com armaduras convencionais, foi necessário assegurar que o comprimento das vigas de acoplamento fosse superior ao dobro da sua altura, de forma a evitar a formação de escoras diagonais diretas e, assim, armaduras colocadas nessa direção.

Optou-se, por isso, por limitar a relação geométrica entre o comprimento e a altura da viga, fixando o comprimento igual a cinco vezes a sua altura. Esta escolha permite manter o momento na viga praticamente constante, reduzindo simultaneamente os esforços de corte tanto na viga como nas lâminas.

O momento na viga é dado pela expressão:

$$M_{viga} = \frac{V_{viga} \times L_0}{2} \quad (4.1)$$

onde V_{viga} representa o esforço cortante e L_0 o comprimento da viga.

Esta estratégia geométrica revelou-se eficaz, uma vez que, ao fixar o comprimento da viga como cinco vezes a sua altura, o momento resistente gerado pelas vigas de acoplamento permaneceu praticamente constante, mesmo com a variação da sua rigidez associada aos diferentes valores de CR. Este comportamento resulta do aumento do braço de alavanca do binário, que compensa a redução do esforço cortante na viga necessária para atingir o mesmo momento. Assim, o esforço axial induzido nas lâminas foi significativamente reduzido, mitigando os efeitos de concentração de esforços e promovendo um desempenho local mais favorável. Garante-se, desta forma, a conformidade com os critérios normativos e a eficácia do mecanismo resistente, sem comprometer a estabilidade global da estrutura.

Importa sublinhar que a validade da expressão (4.1) se restringe à aplicação de ações laterais. No caso da combinação com carregamentos verticais, o esforço cortante na viga deixa de ser constante ao longo do seu comprimento, o que compromete a validade direta desta relação.

4.4.3. ESFORÇO DE CORTE ELEVADO

A necessidade de reduzir a altura das vigas, para compatibilizar a rigidez global nos modelos com acoplamentos baixos, resultou num aumento das tensões de corte nas vigas de acoplamento. Este efeito decorre da dependência da resistência ao corte em relação à espessura da secção, tornando vigas mais esbeltas menos eficazes e exigindo maiores quantidades de armadura transversal.

De forma semelhante ao que foi observado no critério de esforço axial, a espessura das lâminas revelou-se também condicionante neste caso. Para atingir a rigidez global pretendida com diferentes níveis de acoplamento, foram necessárias soluções com lâminas curtas, o que dificultou o cumprimento da exigência do Eurocódigo 2 de que o comprimento da parede seja, no mínimo, quatro vezes a sua espessura.

Embora se trate de um modelo isolado, esta limitação antecipa possíveis dificuldades de conformidade com os critérios de resistência ao corte, especialmente relevantes em contexto sísmico. Mesmo quando os valores obtidos se mantêm dentro dos limites admissíveis, a estabilidade dos binários gerados nas vigas impõe especial atenção ao dimensionamento transversal.

Esta avaliação prévia revelou-se, assim, essencial para garantir que as soluções definidas possam ser integradas com segurança num modelo global, assegurando compatibilidade com a regulamentação vigente.

4.5. DESCRIÇÃO DA GEOMETRIA

Para estabelecer uma base de comparação coerente entre sistemas de paredes dúcteis e acopladas, adotou-se como critério principal a obtenção de deslocamentos laterais semelhantes no topo da estrutura, sob a mesma ação aplicada.

Com esse objetivo, recorreu-se a expressões analíticas apresentadas no Subcapítulo 2.4, de modo a definir preliminarmente configurações equivalentes com diferentes graus de acoplamento. Estas expressões, baseadas em modelos simplificados de barras, permitem estimar o deslocamento no topo da estrutura em função da rigidez dos elementos verticais e da viga de ligação.

A expressão do deslocamento no topo de uma parede acoplada e de uma parede dúctil assemelhada à deformada de uma consola é dada por:

$$\delta_{topo\ PAA} = \frac{qH^4}{8EI_{PAA}} F_3(k\alpha H) \quad (4.2)$$

$$\delta_{topo\ PD} = \frac{qH^4}{8EI_{PD}} \quad (4.3)$$

Em que:

- I_{PAA} – Corresponde ao somatório da inércia das duas lâminas das paredes acopladas; I_{PD} – Corresponde à inércia de uma parede dúctil; q – Carregamento lateral aplicado; H – Altura total do edifício; E – Modulo de elasticidade do material a ser usado.

A função $F_3(k\alpha H)$, definida no Capítulo 2, que relaciona a rigidez da viga de acoplamento com a deformabilidade global do sistema, é dada por:

$$F_3(k\alpha H) = 1 - \frac{1}{k^2} \left[1 - \frac{4}{(k\alpha H)^2} + \frac{8}{(k\alpha H)^4 \cosh(k\alpha H)} (1 + k\alpha H * \sinh(k\alpha H) - \cosh(k\alpha H)) \right] \quad (4.4)$$

Igualando os deslocamentos das expressões (4.2) e (4.3), assumindo iguais propriedades mecânicas do material, obtém-se:

$$\frac{qH^4}{8EI_{PA}} F_3(k\alpha H) = \frac{qH^4}{8EI_{PD}} \quad (=) \quad \frac{I_{PD}}{I_{PA}} F_3(k\alpha H) = 1.0 \quad (4.5)$$

A fórmula (4.3) indica que, para valores inferiores a 1, o sistema acoplado apresenta menor deslocamento no topo, ou seja, maior rigidez face à parede dúctil. Valores superiores a 1 indicam menor rigidez global e consequentemente um maior deslocamento no topo. A diferença percentual pode ser interpretada pela razão entre este valor obtido e a unidade.

A determinação do coeficiente de acoplamento baseia-se na seguinte expressão:

$$CR = \frac{2}{(k\alpha H)^2} \left[1 + \frac{\sinh(k\alpha H) - (k\alpha H)}{\cosh(k\alpha H)} \sinh(k\alpha H) - \cosh(k\alpha H) + \frac{(k\alpha H)^2}{2} \right] \quad (4.6)$$

Importa salientar que esta expressão foi deduzida assumindo uma distribuição uniforme de cargas laterais ao longo da parede, o que condiciona a sua aplicação direta a outros cenários de carregamento.

Antes de avançar para a comparação aprofundada, foram testadas diversas configurações no SAP2000, com o objetivo de validar as estimativas analíticas e os modelos numéricos. Esta etapa de verificação

revelou boa concordância entre os resultados obtidos, confirmando a adequação das fórmulas utilizadas para o pré-dimensionamento de sistemas acoplados em regime elástico linear, onde o comportamento permanece controlado.

Com base nas equações validadas, foram definidas configurações de paredes acopladas com coeficientes de acoplamento de 50%, 60%, 70% e 80%. Para cada caso, ajustou-se a rigidez da viga de acoplamento e das lâminas de forma a garantir que o deslocamento no topo fosse equivalente ao observado nas paredes isoladas de referência. Este processo permitiu identificar soluções com desempenho global equivalente, isolando o efeito do coeficiente de acoplamento na análise.

Foram consideradas duas famílias de configurações geométricas: o Modelo A, correspondente às paredes acopladas comparadas com a parede dúctil de 7 metros de comprimento, e o Modelo B, correspondente às paredes acopladas com rigidez equivalente à de 5 metros de comprimento. Estas designações são utilizadas de forma consistente ao longo do capítulo para distinguir as diferentes comparações. As geometrias adotadas para cada modelo estão representadas nas Tabelas 2 e 3, servindo de base ao estudo paramétrico desenvolvido nas secções seguintes. A seleção destas configurações teve como objetivo garantir a conformidade com os critérios normativos de dimensionamento.

Tabela 2 - Dados geométricos das paredes acopladas comparadas com a parede dúctil de 7 metros – Modelo A

	Parede		Viga			Le (m)	coef de acoplamento	$\frac{I_{PD}}{I_{PA}} F_3 (k\alpha H)$
	Lw (m)	bw (m)	L0 (m)	bb (m)	hb (m)			
PAA1	1.9	0.45	5.75	0.3	1.15	7.650	79%	0.982
PAA2	2.8	0.3	4.5	0.3	0.9	5.800	69%	0.969
PAA3	3.4	0.3	3	0.3	0.6	6.400	57%	0.996
PAA4	3.8	0.3	2	0.3	0.4	5.800	48%	1.005

Tabela 3 - Dados geométricos das paredes acopladas comparadas com a parede dúctil de 5 metros - Modelo B

	Parede		Viga			Le (m)	coef de acoplamento	$\frac{I_{PD}}{I_{PA}} F_3 (k\alpha H)$
	Lw (m)	bw (m)	L0 (m)	bb (m)	hb (m)			
PAB1	1.6	0.4	3.25	0.3	0.65	4.850	78%	0.952
PAB2	2	0.3	2.75	0.3	0.55	4.750	70%	0.957
PAB3	2.3	0.3	2	0.3	0.4	4.300	61%	0.987
PAB4	2.7	0.3	1.3	0.3	0.25	4.000	50%	0.956

A análise dos dados das Tabelas 2 e 3 confirma que, para aumentar o coeficiente de acoplamento, é necessário aumentar a altura das vigas. Esta tendência, já evidenciada no capítulo anterior, reflete o papel dominante da altura da viga na definição do grau de ligação entre as lâminas.

A partir deste ponto, todas as análises estruturais detalhadas, bem como a extração de resultados para posterior interpretação, foram conduzidas no SAP2000, com ações estáticas laterais aplicadas diretamente aos modelos tridimensionais. Esta etapa permitiu uma avaliação precisa do comportamento global, cessando a utilização direta das expressões analíticas. A metodologia adotada, que conjugou modelação numérica e avaliação analítica, assegura uma base robusta para o estudo paramétrico desenvolvido, permitindo aferir com rigor a influência dos parâmetros geométricos e da rigidez no desempenho das paredes acopladas.

4.5.1. CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS DO MODELO A – PAREDE DE 7 METROS

Com base nas definições geométricas obtidas segundo os critérios normativos e os requisitos de rigidez global, esta secção apresenta as configurações do modelo A, correspondente às paredes acopladas que se comparam à parede dúctil de 7 metros de comprimento. Foram analisadas quatro geometrias distintas, associadas a diferentes coeficientes de acoplamento ($CR = 50\%$, 60% , 70% e 80%), com o objetivo de avaliar o impacto do grau de acoplamento no comportamento estrutural.

As dimensões das lâminas e vigas foram ajustadas de forma a manter constante a rigidez lateral global, assegurando o mesmo deslocamento no topo da parede. Esta abordagem permite isolar os efeitos associados à variação do grau de acoplamento, nomeadamente no comportamento axial, cortante e na redistribuição de esforços entre as lâminas e as vigas de ligação.

A Figura 36 apresenta as geometrias idealizadas para cada configuração de parede acoplada do modelo A, obtidas através da variação controlada das dimensões das lâminas e vigas, de modo a manter constante a rigidez lateral global. Esta estratégia assegura uma base coerente para comparar o efeito do CR na resposta estrutural.

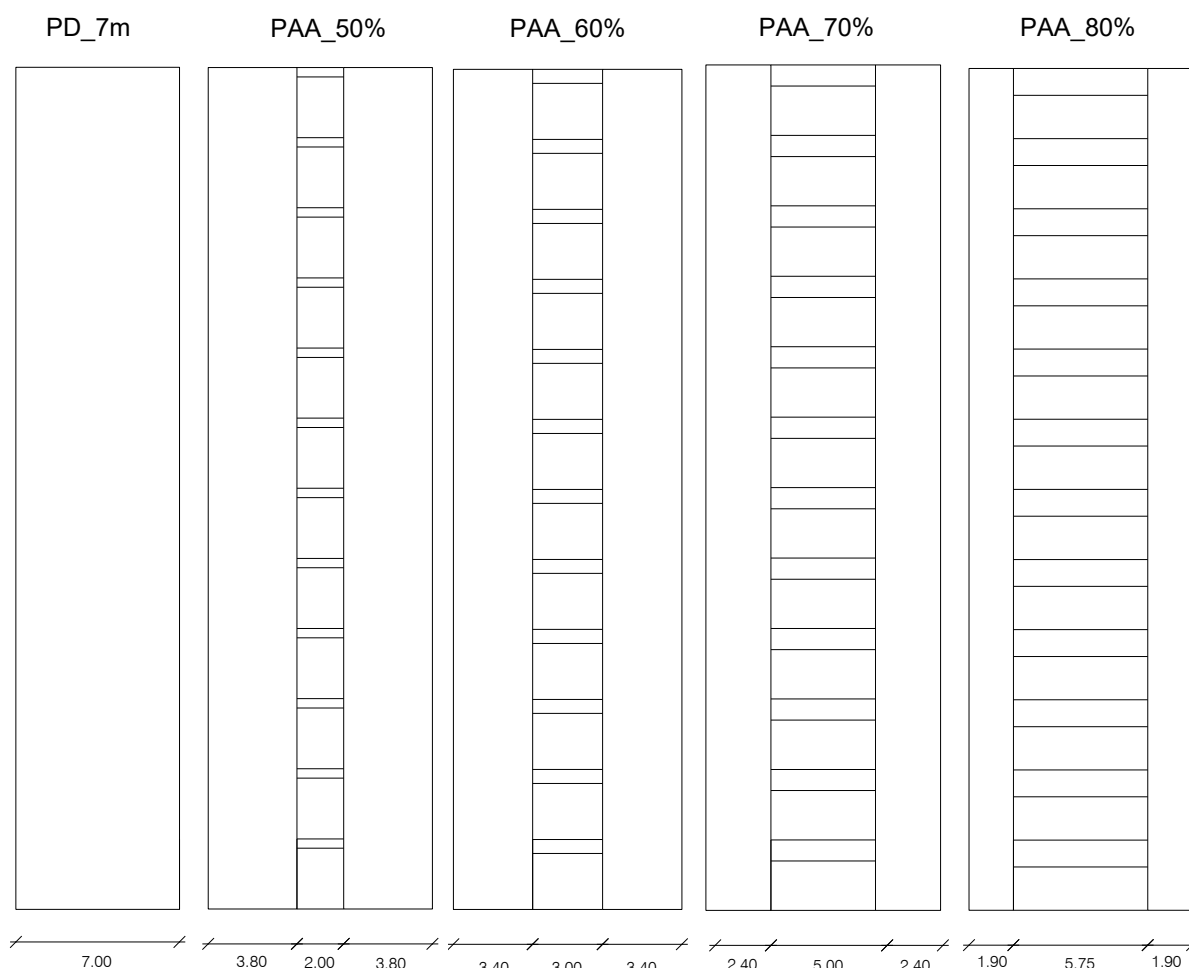


Figura 36 - Geometria das diferentes configurações das paredes acoplada - Modelo A

A avaliação das diferentes geometrias foi conduzida com base em três indicadores principais, permitindo aferir a influência do grau de acoplamento no comportamento estrutural global das paredes acopladas.

- Deslocamento horizontal no topo da parede, como medida da rigidez lateral global do sistema;
- Distribuição das forças axiais nas lâminas, refletindo diretamente a atuação do binário resistente gerado pelas vigas;
- Momentos fletores nas bases das paredes, influenciados pela redistribuição entre flexão e esforço axial.

Antes de passarmos a resultados a Tabela 4 resume os parâmetros geométricos definidos para cada valor de CR. Observa-se que o aumento do acoplamento requer, simultaneamente, a redução da largura das lâminas e o aumento da altura e da inércia das vigas. Este equilíbrio geométrico garante uma rigidez global constante, mas modifica significativamente o modo de funcionamento interno do sistema, com implicações diretas na redistribuição de esforços e na natureza do mecanismo resistente dominante.

Tabela 4 - Parâmetros geométricos das diferentes configurações do modelo A

		Parâmetros Geométricos			
		CR (coupling ratio)			
		PAA_50%	PAA_60%	PAA_70%	PAA_80%
Lâmina	Lw	3.8	3.4	2.8	1.9
	bw	0.3	0.3	0.3	0.45
	Iw	1.37	0.98	0.55	0.26
	Rácio Iw/Iw ₅₀	1.00	0.72	0.40	0.19
Viga	hb	0.4	0.6	0.9	1.15
	Rácio hb/hb ₅₀	1.00	1.50	2.25	2.88
	bb	0.3	0.3	0.3	0.3
	L0	2.0	3.0	4.5	5.75
	Rácio L0/L0 ₅₀	1.00	1.50	2.25	2.88
	Ib	0.0016	0.0054	0.0182	0.0380
	Rácio Ib/Ib ₅₀	1.00	3.38	11.39	23.76

Legenda:

Lw - Comprimento da lâmina

bw - Largura da lâmina

Iw - Inércia da lâmina

hb - Altura da viga de acoplamento

bb - Largura da viga de acoplamento

L0 - Vão livre / Comprimento da viga

Ib - Inércia da viga de acoplamento

A análise dos resultados permite observar uma transição gradual do comportamento estrutural, desde configurações com funcionamento predominantemente flexional para outras em que os mecanismos de corte e compressão axial assumem maior relevância. Esta transição é fundamental para compreender a resposta de paredes acopladas em contexto sísmico, evidenciando como a variação do grau de acoplamento influencia o tipo de mecanismo resistente. Os resultados permitem estabelecer critérios objetivos para o dimensionamento equilibrado de soluções com diferentes níveis de rigidez relativa.

4.5.2. CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS DO MODELO B – PAREDE DE 5 METROS

Dando continuidade à abordagem aplicada ao modelo A (parede de 7 metros), desenvolve-se agora uma análise comparativa para a parede mais esbelta e de menor rigidez, com 5 metros de comprimento (modelo B). As configurações geométricas adotadas, ilustradas na Figura 37, seguem os mesmos princípios de variação do coeficiente de acoplamento ($CR = 50\%$, 60% , 70% e 75%).

Devido à menor rigidez da parede de referência, este modelo revelou-se mais sensível às variações na eficácia do acoplamento, com efeitos mais pronunciados na distribuição de esforços e nos mecanismos resistentes ativados. Embora as tendências globais observadas sejam semelhantes às do modelo A, as implicações no comportamento local das lâminas e vigas são mais marcadas, justificando uma análise diferenciada nas secções seguintes.

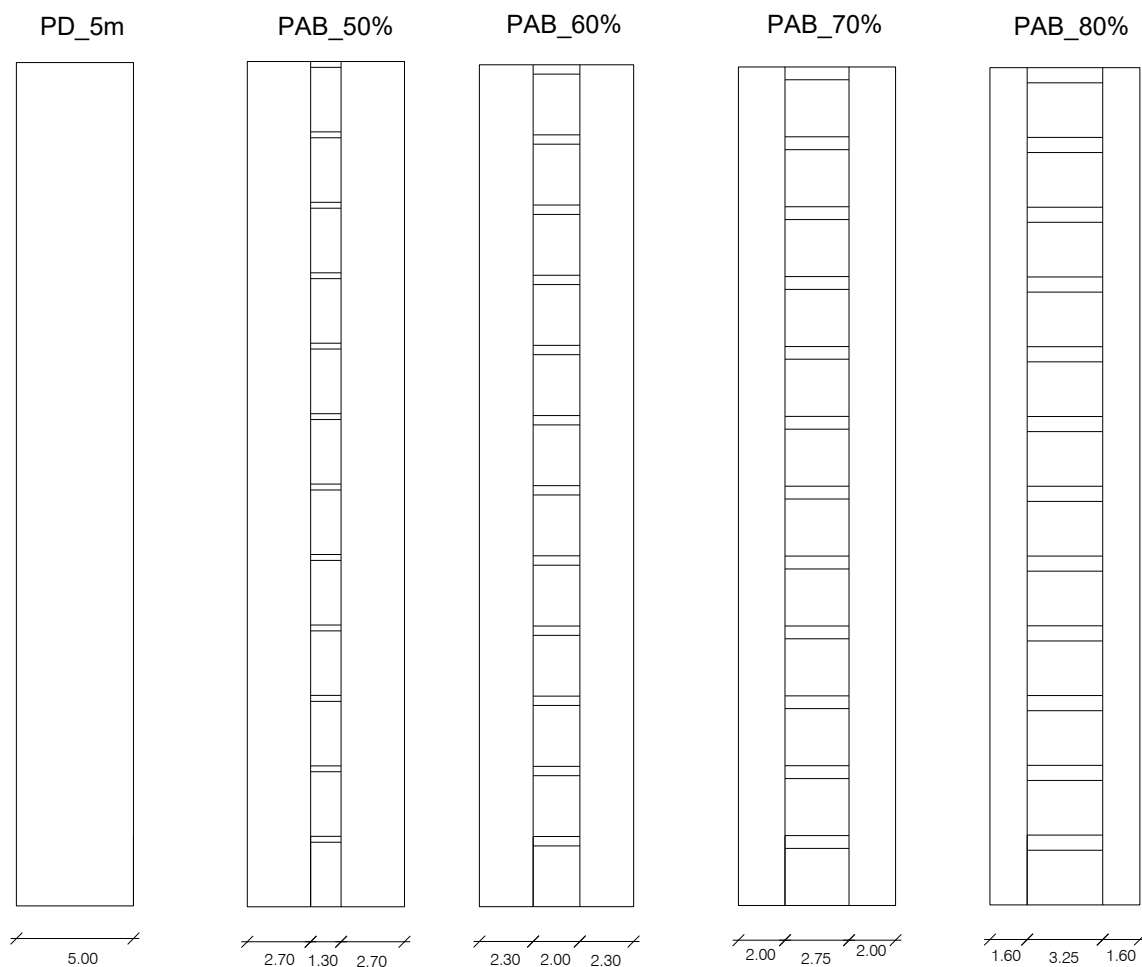


Figura 37 - Geometria das diferentes configurações das paredes acoplada - Modelo B

A Tabela 5 resume os parâmetros geométricos das diferentes configurações do modelo B, permitindo uma análise paralela à efetuada para o modelo A. Tal como anteriormente, verifica-se que o aumento do coeficiente de acoplamento implica uma redução progressiva do comprimento das lâminas (L_w) e, em contrapartida, um aumento significativo da altura (h_b) e da inércia das vigas de acoplamento.

Tabela 5 - Parâmetros geométricos das diferentes configurações do modelo B

		Parâmetros Geométricos			
		CR (coupling ratio)			
		PAB_50%	PAB_60%	PAB_70%	PAB_80%
Lâmina	Lw	2.7	2.3	2.0	1.6
	bw	0.3	0.3	0.3	0.40
	Iw	0.49	0.30	0.20	0.14
	Rácio Iw/Iw ₅₀	1.00	0.62	0.41	0.28
Viga	hb	0.25	0.4	0.6	0.65
	Rácio hb/hb ₅₀	1.00	1.60	2.20	2.60
	bb	0.3	0.3	0.3	0.3
	L0	1.25	2.0	2.8	3.25
	Rácio L0/L0 ₅₀	1.00	1.60	2.20	2.60
	Ib	0.0004	0.0016	0.0042	0.0069
	Rácio Ib/Ib ₅₀	1.00	4.10	10.65	17.58

Legenda:

Lw - Comprimento da lâmina

hb - Altura da viga de acoplamento

L0 - Vão livre / Comprimento da viga

bw - Largura da lâmina

bb - Largura da viga de acoplamento

Ib - Inércia da viga de acoplamento

Iw - Inércia da lâmina

A comparação entre os modelos evidencia uma compensação entre a rigidez das lâminas e das vigas de acoplamento, com vista à preservação da rigidez global do sistema. Por exemplo, para o coeficiente de acoplamento de 60%, no modelo B, a redução do comprimento da lâmina resulta numa menor rigidez ($I/I_{50} = 0.62$), face ao valor de 0.72 obtido no modelo A. Para equilibrar essa redução, a viga de acoplamento apresenta uma maior inércia relativa ($Ib/Ib_{50} = 4.10$, face a 3.38 no modelo A), reforçando a sua função de ligação e redistribuição de esforços.

De forma geral, observa-se que a relação entre os parâmetros normalizados (I/I_{50} e Ib/Ib_{50}) tende a manter-se relativamente constante entre os modelos, assegurando o equilíbrio estrutural. Quando há alguma variação, esta ocorre de forma coordenada: o aumento da rigidez das vigas permite reduzir proporcionalmente a rigidez das lâminas, e vice-versa.

Verifica-se que, para obter aumentos de cerca de 10% no coeficiente de acoplamento, são necessárias variações geométricas mais significativas nos modelos com CR baixos, tornando este intervalo particularmente sensível à rigidez relativa entre os elementos.

4.6. ANÁLISE DE RESULTADOS DAS DIFERENTES GEOMETRIAS

4.6.1. DESLOCAMENTOS LATERAIS

Concluída a definição das geometrias equivalentes dos modelos A e B com base nos critérios normativos e de rigidez lateral global, dá-se agora início à análise dos resultados estruturais obtidos para as diferentes configurações. Apresenta-se, em primeiro lugar, a evolução dos deslocamentos horizontais ao longo da altura das paredes para as diferentes configurações associadas ao modelo A (Figura 38) e ao modelo B (Figura 39). Observa-se que a forma da deformada está fortemente influenciada pelo grau de acoplamento entre as lâminas, refletindo os efeitos das geometrias previamente ilustradas nas Figura 36 e Figura 37.

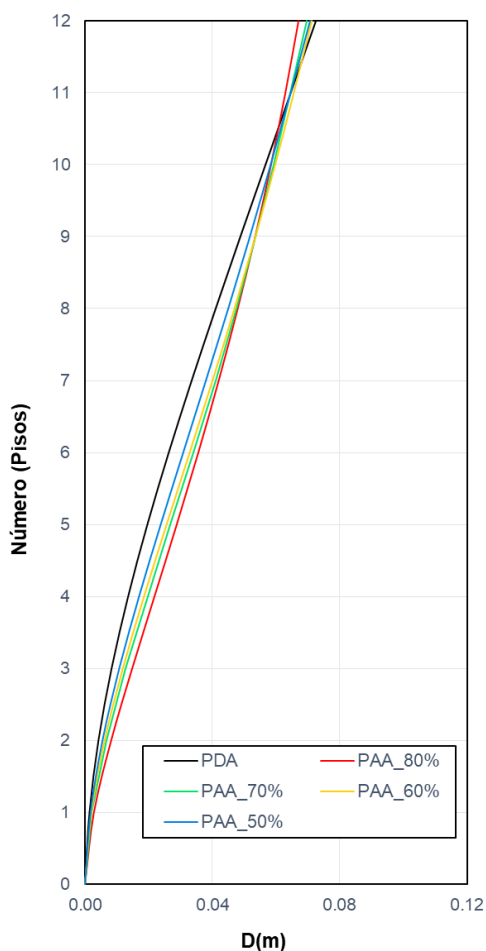


Figura 38 - Deslocamentos das configurações do modelo A

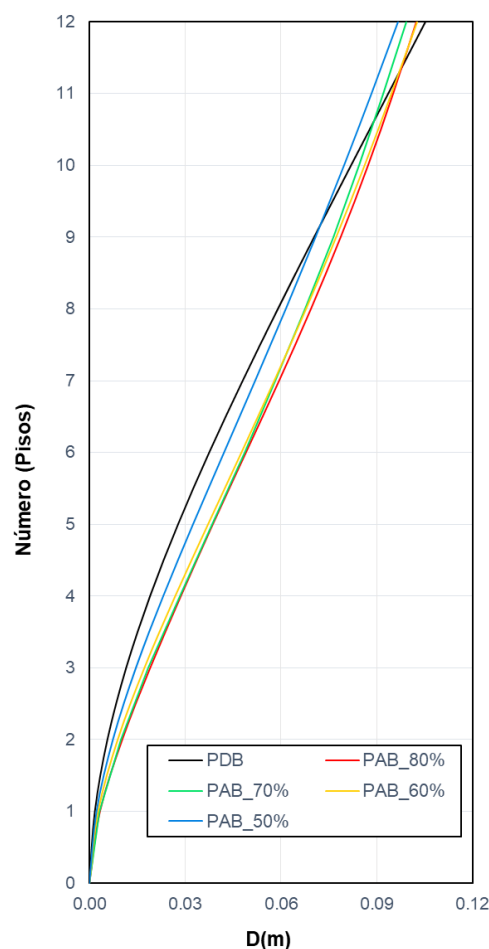


Figura 39 - Deslocamentos das configurações do modelo B

Nos modelos de referência (PDA e PDB), que representam uma parede isolada, observa-se uma deformada por flexão, com curvatura contínua e deslocamentos crescentes desde a base até ao topo. O padrão que se assemelha mais a este tipo de deformação são os modelos com CR = 50%, nos quais a rigidez reduzida das vigas de acoplamento resulta numa menor interação entre as lâminas.

À medida que o coeficiente de acoplamento aumenta, o sistema deixa de apresentar uma resposta puramente flexional e evolui para um comportamento misto. Nesta fase, verifica-se uma deformada resultante da interação entre as lâminas e as vigas de acoplamento, que passam a desempenhar um papel estrutural relevante. Esta transição manifesta-se por uma alteração da forma da deformada, que se torna mais acentuada na base e menos significativa no topo, refletindo a influência crescente das vigas. A

rigidez introduzida pelas ligações horizontais reduz os deslocamentos diferenciais entre lâminas nos pisos superiores, reforçando o papel das vigas na transferência de esforços e na eficácia do mecanismo de acoplamento.

A comparação entre os modelos permite verificar que, no modelo A com maior rigidez estrutural a deformada se apresenta mais diferenciada entre as diferentes configurações, o que facilita a percepção dos efeitos associados à variação do coeficiente de acoplamento (CR). No modelo B, além da menor rigidez global, as soluções adotadas apresentam geometrias mais próximas entre si, o que conduz a deformadas mais semelhantes. Essa menor variação na resposta evidencia a sensibilidade do modelo B ao acoplamento e reforça a eficácia das paredes acopladas como alternativa viável a soluções de paredes dúcteis com maior rigidez.

4.6.2. ESFORÇOS DE CORTE NAS VIGAS DE ACOPLAMENTO

Dando continuidade à análise da resposta estrutural ao longo da altura das paredes, esta subsecção avalia a distribuição dos esforços de corte nas vigas de acoplamento para duas configurações representativas: uma com coeficiente de acoplamento elevado ($CR = 80\%$) e outra com CR reduzido (50%). O objetivo é caracterizar a eficiência da redistribuição dos esforços verticais entre lâminas, com base na participação relativa de cada viga, identificando possíveis concentrações de solicitação e desvios em relação a um comportamento idealizado.

Como a distribuição dos esforços apresenta tendências semelhantes em ambos os modelos (paredes de 7 m e 5 m), optou-se por representar apenas os resultados do modelo A.

A análise desenvolve-se com base no rácio entre o esforço de corte real mobilizado por cada viga em cada piso V_{real} e o valor médio teórico $V_{médio}$, correspondente a uma distribuição uniforme ao longo da altura (ou seja, como se todas as vigas ao longo da altura transmitissem todas o mesmo esforço de corte e, consequentemente, o mesmo momento fletor). Este indicador permite quantificar o contributo relativo de cada viga na redistribuição dos esforços entre as lâminas ao longo da sua altura.

A Figura 40 e a Figura 41 ilustram essa variação para os casos de $CR = 80\%$ e $CR = 50\%$, respectivamente.

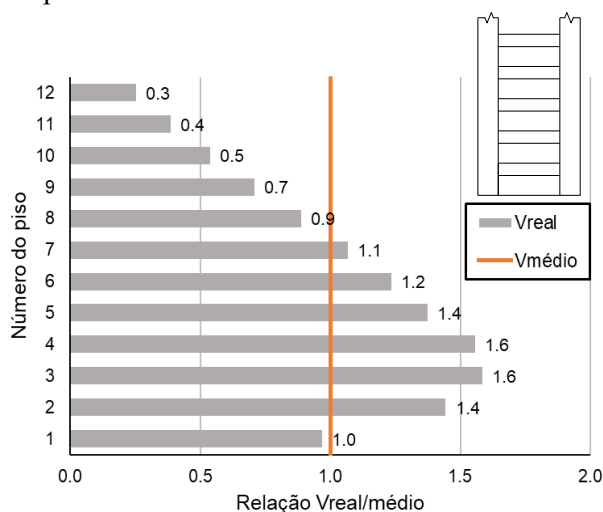


Figura 40 – Variação do esforço de corte nas vigas ao longo da altura da PAA_80%

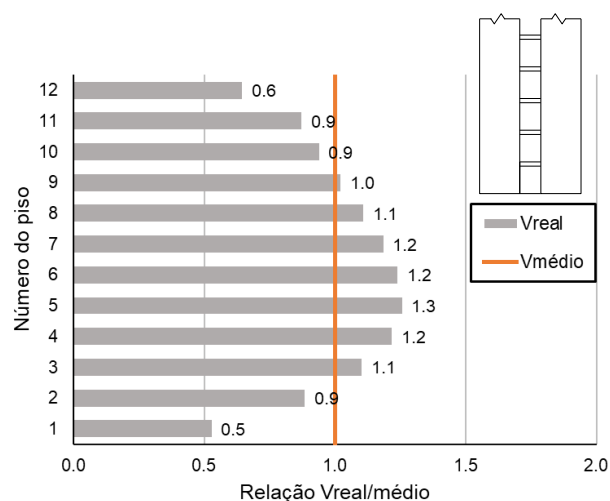


Figura 41 - Variação do esforço de corte nas vigas ao longo da altura da PAA_50%

Nos modelos com diferentes coeficientes de acoplamento, observa-se que o piso onde ocorre o esforço de corte máximo varia significativamente com a rigidez das ligações. Para $CR = 80\%$, os maiores valores concentram-se nos pisos inferiores, especialmente no piso 3, onde a ligação entre lâminas é mais eficaz e a transferência de esforços ocorre de forma rápida e localizada. Já no caso de $CR = 50\%$, a menor rigidez do sistema atrasa a mobilização das ligações horizontais, fazendo com que o esforço máximo surja mais acima, no piso 5, refletindo um comportamento mais flexível e gradual.

Além dessa diferença no piso crítico, nota-se também uma alteração no padrão de redistribuição dos esforços ao longo da altura. Enquanto o modelo com $CR = 80\%$ apresenta uma forte concentração dos esforços nos pisos inferiores e uma rápida queda nos superiores, evidenciando uma atuação localizada da ligação, o modelo com $CR = 50\%$ mostra uma distribuição mais equilibrada entre pisos. Esta resposta mais homogênea é típica de sistemas com ligação menos rígida, onde a transferência de esforços se faz de forma gradual.

Esta distribuição desigual tem implicações relevantes no desempenho em regime não linear. Em sistemas com elevado acoplamento, a eficácia da ligação entre lâminas conduz a uma mobilização intensa das vigas inferiores, aumentando a possibilidade de formação de rótulas plásticas repetidas nesses pisos. Esse efeito é agravado quando a rigidez das lâminas é reduzida, o que transfere para as vigas uma parcela significativa dos momentos e esforços. Por contraste, em sistemas com CR reduzido, a resposta mantém-se dominada pela flexão das lâminas, limitando a participação das vigas e o risco de plastificação, ainda que com níveis de tensão elevados em virtude das dimensões reduzidas das secções das vigas.

4.6.3. ESFORÇOS DEVIDO À CARGA LATERAL

Antes da consideração conjunta das ações laterais e gravitacionais, a Tabela 6 e a Tabela 7 apresentam os principais esforços internos obtidos para cada configuração de parede acoplada, nos modelos A e B, respetivamente.

Todos os valores apresentados estão normalizados em relação ao modelo de referência com coeficiente de acoplamento de 50%, o que permite uma análise relativa independente das magnitudes absolutas. Os valores associados às vigas correspondem ao piso onde se regista a solicitação máxima, representando o cenário crítico de atuação das ligações horizontais.

Tabela 6 - Comparação dos esforços devido à ação lateral – Modelo A

	Coef. Acoplamento	PAA_50%	Parede acoplada	Esforços Lâmina				Esforços na Viga		
				Nw/Nw _{50%}	Mw/Mw _{50%}	Mbin/Mbin _{50%}	Coef.acop	L0/L0 _{50%}	Vb/Vb _{50%}	Mb/Mb _{50%}
Lâmina	Esforço axial (Nw)	2540 kN								
	Momento (Mw)	7648 kN.m	PAA_50%	1.00	1.00	1.00	0.49	1.00	1.00	1.00
	Mbin	14732 kN.m	PAA_60%	1.06	0.84	1.16	0.57	1.50	1.10	1.63
Viga	Esorço transversal (Vb)	266 kN	PAA_70%	1.13	0.60	1.41	0.69	2.25	1.27	2.85
	Momento (Mb)	266 kN.m	PAA_80%	1.27	0.41	1.62	0.79	2.88	1.55	4.43

Tabela 7 - Comparação dos esforços devido à ação lateral – Modelo B

	Coef. Acoplamento	PAB_50%	Parede acoplada	Esforços Lâmina				Esforços na Viga		
				Nw/Nw _{50%}	Mw/Mw _{50%}	Mbin/Mbin _{50%}	Coef.acop	L0/L0 _{50%}	Vb/Vb _{50%}	Mb/Mb _{50%}
Lâmina	Esforço axial (Nw)	2460 kN								
	Momento (Mw)	4617 kN.m	PAB_50%	1.00	1.00	1.00	0.52	1.00	1.00	1.00
	Mbin	9840 kN.m	PAB_60%	1.11	0.79	1.19	0.62	1.60	1.19	1.83
Viga	Esorço transversal (Vb)	263 kN	PAB_70%	1.14	0.62	1.42	0.70	2.20	1.30	2.75
	Momento (Mb)	171 kN.m	PAB_80%	1.24	0.51	1.50	0.78	2.60	1.48	4.27

A análise dos esforços axiais (N) nas lâminas revela um acréscimo moderado com o aumento do coeficiente de acoplamento: cerca de 27% no modelo A e 24% no modelo B. Este comportamento é coerente com o esperado para sistemas em que, à medida que a rigidez das vigas de acoplamento aumenta, intensifica-se a transferência de esforços para as lâminas, gerando maiores esforços axiais de sentidos contrários nas lâminas.

Por outro lado, os esforços de corte nas vigas, medidos no piso mais solicitado, apresentam um crescimento significativamente mais acentuado. Este comportamento resulta da atuação localizada das ligações horizontais nos pisos inferiores, onde a rigidez introduzida promove concentrações de solicitação. Enquanto o esforço axial nas lâminas se distribui ao longo da altura da parede, o corte mobilizado pelas vigas está associado à transferência direta de momento entre lâminas, o que justifica o aumento não proporcional dos rácios V_b/V_{b50} face a N_w/N_{w50} .

Verifica-se também que a soma dos rácios normalizados dos momentos fletores nas lâminas M_w/M_{w50} e do binário entre as lâminas M_{bin}/M_{bin50} se mantém aproximadamente constante e próxima de 2 em todas as configurações. Este resultado evidencia a conservação do momento total resistente do sistema e reforça a coerência interna na redistribuição de esforços entre vigas e lâminas.

Observa-se ainda uma discrepância significativa entre o esforço transversal (V_b/V_{b50}) e o momento nas vigas (M_b/M_{b50}). Esta diferença é justificada pela relação direta entre momento, esforço cortante e comprimento da viga. A verificação de que o produto $V_b/V_{b50} \times l_0/l_{050}$ corresponde ao rácio M_b/M_{b50} valida esta coerência geométrica e reforça a consistência dimensional entre os resultados.

No que respeita aos momentos fletores nas lâminas (M_w), observa-se uma tendência de redução com o aumento do grau de acoplamento, acompanhada por um aumento dos momentos nas vigas (M_b). Esta redistribuição de esforços entre componentes verticais e horizontais confirma o papel estrutural das vigas de acoplamento e reforça a sua importância em configurações com maior grau de ligação.

Por fim, o coeficiente de acoplamento analítico mostra-se coerente com esta redistribuição de esforços. Enquanto critério de pré-dimensionamento das geometrias da secção, este indicador revelou-se robusto, assegurando valores de rigidez relativa e configurações geométricas compatíveis com o desempenho estrutural desejado. Os resultados obtidos confirmam, assim, a validade das expressões analíticas adotadas na Secção 4.5 para estimar o comportamento global e orientar o processo de definição geométrica, demonstrando a utilidade prática dessas fórmulas na conceção preliminar de sistemas de paredes acopladas.

4.6.4. ESFORÇOS NA COMBINAÇÃO CARGA LATERAL E CARGA VERTICAL

Complementando a análise realizada para a ação lateral isolada, esta secção avalia os esforços internos resultantes da combinação das ações laterais e gravitacionais, refletindo uma condição mais próxima da realidade de projeto. A Tabela 8 e Tabela 9 apresentam os rácios normalizados dos principais esforços nas lâminas verticais dos modelos A e B, respeitando a mesma metodologia adotada nas secções anteriores.

Tabela 8 - Comparação dos esforços devido à ação lateral – Modelo A

	Coef. Acoplamento	PAA_50%	Parede acoplada	Lâmina			
				Nw/Nw _{50%} (Tração)	Nw/Nw _{50%} (Compr)	Mw/Mw _{50%}	Vw/Vw _{50%}
Lâmina	Esforço axial (Nw) (Tração)	1127.4 kN (C)	PAA_50%	1.00 (C)	1.00 (C)	1.00	1.00
	Esforço axial (Nw) (Compressão)	6208.8 kN (C)	PAA_60%	0.87 (C)	1.02 (C)	0.84	1.03
	Momento (Mw)	7593 kN.m	PAA_70%	0.75 (C)	1.05 (C)	0.60	1.07
	Esforço de corte (Vw)	860 kN.m	PAA_80%	0.33 (C)	1.06 (C)	0.44	1.08

Tabela 9 - Comparação dos esforços devido à ação lateral – Modelo B

	Coef. Acoplamento	PAB_50%	Parede acoplada	Lâmina			
				Nw/Nw _{50%} (Tração)	Nw/Nw _{50%} (Compr)	Mw/Mw _{50%}	Vw/Vw _{50%}
Lâmina	Esforço axial (Nw) (Tração)	487.2 kN (C)	PAB_50%	1.00 (C)	1.00 (C)	1.00	1.00
	Esforço axial (Nw) (Compressão)	4637.7 kN (C)	PAB_60%	0.29 (C)	1.03 (C)	0.79	1.02
	Momento (Mw)	3860 kN.m	PAB_70%	0.14 (C)	1.04 (C)	0.62	1.04
	Esforço de corte (Vw)	410 kN	PAB_80%	-0.61 (T)	1.05 (C)	0.47	1.04

No que respeita ao esforço axial, importa esclarecer que as variações nas lâminas de compressão e tração observadas nos diferentes modelos não devem ser interpretadas como simétricas ou de igual relevância. A diferença entre os valores absolutos é substancial: enquanto os esforços de compressão estão na ordem dos 5000 kN, os de tração não ultrapassam os 500 kN, cerca de dez vezes inferiores. Assim, a redução do esforço na lâmina em tração com o aumento do acoplamento reflete, sobretudo, uma redistribuição de escala entre as forças internas, não uma alteração estrutural significativa na contribuição das lâminas para a resistência axial.

Por outro lado, verifica-se que, para coeficientes de acoplamento mais elevados, os esforços axiais induzidos pelas ações laterais podem ultrapassar os valores associados às próprias cargas gravitacionais. Este efeito é particularmente evidente no modelo B, onde lâminas se encontram em tração para o $CR=70\%$ e $CR=80\%$.

Os rácios $V/V_{50\%}$ mantêm-se próximos da unidade em todas as configurações analisadas (entre 1.00 e 1.08), em ambos os modelos. Este resultado demonstra que a carga transversal é aplicada de forma aproximadamente constante ao sistema, independentemente do grau de acoplamento. Importa ainda referir que a força de corte é partilhada de forma praticamente equitativa entre as duas lâminas.

Relativamente aos momentos fletores nas lâminas (M_w), observa-se uma estabilidade nos valores totais ao longo das diferentes configurações, quando comparados com os resultados obtidos para a situação com ação lateral isolada. Este comportamento confirma que as forças gravitacionais têm influência reduzida na resposta dos modelos, sendo os momentos gerados essencialmente pela ação das forças laterais.

De forma geral, os resultados obtidos validam as tendências já identificadas com a ação lateral isolada, agora com maior clareza na modulação do comportamento interno das paredes acopladas. Importa ainda referir que os esforços apresentados correspondem aos valores considerados no dimensionamento das fundações. Conclui-se assim a análise do comportamento estrutural das diferentes geometrias, passando-se à fase de dimensionamento da armadura, com base nos esforços internos obtidos.

4.6.5. DIMENSIONAMENTO DAS LÂMINAS

Concluída a análise dos esforços atuantes, passa-se à fase de dimensionamento das armaduras longitudinais das lâminas, de modo a assegurar o cumprimento das exigências estruturais em conformidade com o Eurocódigo 8.

O dimensionamento das armaduras das lâminas foi realizado com o objetivo de obter soluções compatíveis com critérios usuais de projeto, assegurando armaduras exequíveis em contexto real de engenharia. Esta abordagem permitiu estabelecer uma base consistente para a comparação entre as diferentes configurações de paredes acopladas, avaliando a sua eficiência estrutural à luz das exigências normativas.

As armaduras foram tomadas nas situações condicionantes quer em termos de ductilidade, quer em termos de ductilidade. Posto isto a armadura longitudinal foi dimensionada com base na lâmina que apresenta um esforço axial menor, no que toca ao confinamento a lâmina considerada condicionante é a lâmina sujeita a um maior esforço axial.

Dado que as duas lâminas partilham a mesma armadura, aquela que se encontra sujeita ao esforço axial superior apresenta uma resistência à flexão mais elevada (sobreerresistência), conduzindo a valores de M_{Rd} significativamente superiores a M_{Ed} . Simultaneamente, foram verificados os critérios mínimos de ductilidade exigidos pelo Eurocódigo 8, promovendo um comportamento adequado em regime sísmico.

Para o dimensionamento ao esforço transversal (V_{Ed}), foi considerado um fator de majoração que reflete a sobreerresistência à flexão da lâmina, nestes casos a secção é capaz de receber esforços maiores, exigindo o reforço da armadura transversal nessas regiões.

A estratégia adotada assegura que todas as soluções analisadas apresentem armaduras que respeitem os requisitos de resistência e ductilidade impostos pela regulamentação europeia, constituindo uma base fiável para a comparação entre diferentes graus de acoplamento.

As Tabelas 10 e 11 apresentam os respetivos desenhos e valores de armadura longitudinal total, as percentagens de armadura e ainda a razão do esforço transversal pelo comprimento da lâmina (v_{Ed}), expresso pela seguinte expressão:

$$v_{Edw} = \frac{V_{Ed}}{L_w} \quad (4.7)$$

Esta razão é expressa pelos rácios normalizados em relação parede com coeficiente de acoplamento de 50%, considerando este parâmetro como indicador da solicitação transversal.

Tabela 10 - Comparação das armaduras das diferentes lâminas – Modelo A

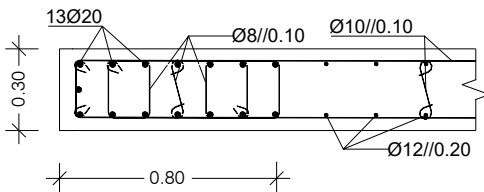
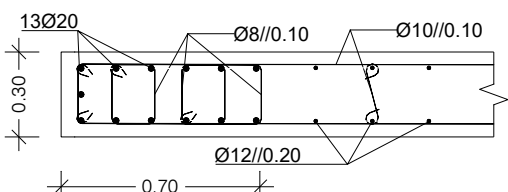
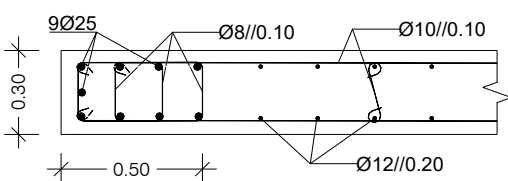
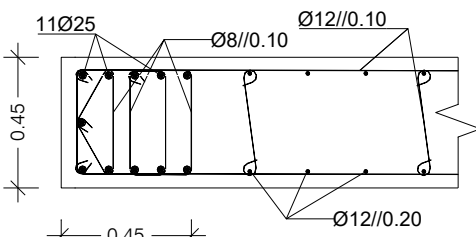
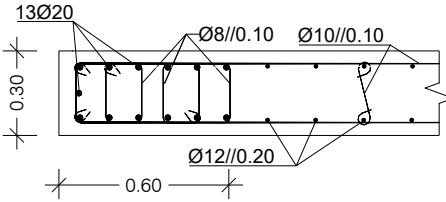
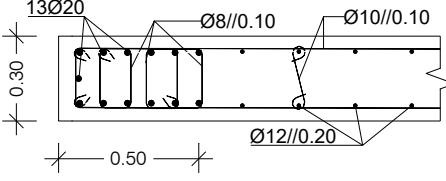
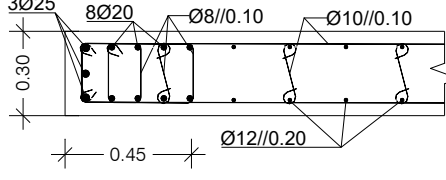
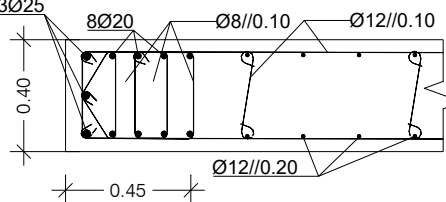
	Desenho da armadura na zona de confinamento	L_w (m)	A_{sl} (cm ²)	ρ_t %	$\frac{A_{sw}}{s}$ (cm ² /m)	$\frac{v_{Edw}}{v_{Edw50}}$
PAA_50%		3.8	117	1.03	7.85	1.0
PAA_60%		3.4	102	1.00	7.85	1.11
PAA_70%		2.4	106	1.47	7.85	1.33
PAA_80%		1.9	117	1.37	11.3	1.94

Tabela 11 - Comparação das armaduras das diferentes lâminas – Modelo B

	Desenho da armadura na zona de confinamento	L_w (m)	A_{sl} total (cm ²)	ρ_l %	$\frac{A_{sw}}{s}$ (cm ² /m)	$\frac{V_{Edw}}{V_{Edw_{50}}}$
PAB_50%		2.7	98	1.21	7.85	1.0
PAB_60%		2.3	95	1.37	7.85	1.15
PAB_70%		2	91	1.52	7.85	1.32
PAB_80%		1.6	87	1.36	11.3	1.66

Todas as soluções de armadura apresentadas cumprem os limites mínimos estabelecidos nos Eurocódigos, tanto em termos de área mínima como de espaçamento e ancoragem, garantindo a conformidade com os requisitos de ductilidade local.

A observação dos resultados evidencia uma correlação direta entre a geometria das paredes, os esforços atuantes e a exigência de armadura. Em ambos os modelos, verifica-se que a área de armadura longitudinal permanece relativamente constante ao longo das diferentes configurações, apesar do aumento do coeficiente de acoplamento. Este comportamento está alinhado com a redução progressiva do momento fletor nas lâminas, que tende a ser compensada pela diminuição do esforço axial na lâmina em tração. Como consequência, a exigência de armadura longitudinal mantém-se equilibrada.

Contudo, à medida que o comprimento das lâminas diminui com o aumento do CR, verifica-se que, apesar da quantidade absoluta de armadura longitudinal se manter praticamente constante, a percentagem de armadura aumenta, uma vez que a secção resistente é menor. Um caso particular ocorre com CR = 80%, onde, apesar do elevado acoplamento, se regista a menor percentagem de armadura.

Este resultado explica-se pelo aumento da espessura da lâmina, devido à necessária compensação geométrica.

Em contraste, a armadura transversal evidencia uma evolução mais significativa, a percentagem de armadura aumenta progressivamente com o CR, refletindo a maior solicitação transversal. Esta tendência é bem representada pelo rácio V_{Ed} / L_w , que aumenta de 1.00 para 1.94 no modelo A e para 1.66 no modelo B. O acréscimo deste rácio traduz diretamente o aumento do esforço de corte por unidade de comprimento da base da parede, consequência direta da redução do comprimento das lâminas. Dado que o valor de V_{Ed} não varia significativamente, o aumento é essencialmente geométrico.

Por fim, importa destacar a compensação entre modelos, embora os valores de armadura absoluta sejam semelhantes entre modelos A e B, o modelo B tende a apresentar maiores percentagens, uma vez que possui paredes mais esbeltas e menos rígidas, exigindo, por isso, armaduras mais densas para assegurar a mesma resistência.

4.6.6. DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS DE ACOPLAMENTO

Para o dimensionamento das armaduras das vigas de acoplamento, consideraram-se apenas os esforços resultantes das ações laterais, seguindo uma abordagem de capacity design. Assim, os efeitos das cargas verticais foram desconsiderados, focando-se a análise na situação sísmica mais exigente.

Esta opção simplificou o processo de dimensionamento e permitiu adotar uma disposição simétrica da armadura longitudinal, assegurando um comportamento equilibrado sob inversão de esforços, condição fundamental para estruturas sujeitas a ações cíclicas.

A Tabela 12 e a Tabela 13 apresentam as configurações de armadura das vigas de acoplamento para os diferentes níveis de acoplamento considerados no estudo, nos modelos A e B. Os desenhos correspondem às secções das vigas mais solicitadas e localizam-se junto à ligação com as lâminas, onde se concentram os maiores esforços de corte e flexão, exigindo maior densidade de armadura.

De modo a considerar a variação da solicitação transversal das diferentes configurações adotou-se o mesmo procedimento da análise das lâminas pela razão do esforço transversal agora pela altura da viga de acoplamento (v_{Ed}), expresso pela seguinte expressão:

$$v_{Edb} = \frac{V_{Ed}}{h_b} \quad (4.7)$$

Tabela 12 - Comparação das armaduras das diferentes vigas de acoplamento – Modelo A

	CR (coupling ratio)			
	PAA_50%	PAA_60%	PAA_70%	PAA_80%
Desenho da armadura				
$A_{sl\ total} (cm^2)$	59 cm ²	58 cm ²	59 cm ²	59 cm ²
hb (m)	0.4	0.6	0.9	1.15
$\frac{v_{Edb}}{v_{Edb50}}$	1.0	0.73	0.56	0.54

Tabela 13 - Comparação das armaduras das diferentes vigas de acoplamento – Modelo B

	CR (coupling ratio)			
	PAB_50%	PAB_60%	PAB_70%	PAB_80%
Desenho da armadura				
$A_{sl\ total} (cm^2)$	48 cm ²	49 cm ²	56 cm ²	56 cm ²
hb (m)	0.25	0.4	0.55	0.65
$\frac{v_{Edb}}{v_{Edb50}}$	1.0	0.74	0.59	0.59

Observa-se que a área de armadura longitudinal se mantém praticamente constante em todas as configurações, mesmo entre os extremos de CR = 50% e CR = 80%. Esta constância deve-se ao facto de a variação do momento fletor ser compensada pela alteração da altura útil da secção, o que aumenta o braço dos esforços internos. Assim, mesmo com acréscimos de momento, é possível manter uma exigência relativamente estável de armadura longitudinal.

Ao contrário do que se verificou nas lâminas, a armadura transversal nas vigas apresenta os maiores valores nas configurações com coeficiente de acoplamento reduzido ($CR = 50\%$), cerca de duas vezes superior às vigas com ($CR = 80\%$) que é dado pelo rácio V_{Ed} / hb . Esta tendência decorre da menor altura útil dessas vigas, o que conduz a tensões de corte mais elevadas e, conseqüentemente, à necessidade de maior densidade de armadura transversal. À medida que o coeficiente de acoplamento aumenta, a maior altura das vigas permite uma redução proporcional das tensões, refletindo-se numa menor exigência de armadura, apesar do aumento dos esforços.

Importa destacar que para $CR = 50\%$ as geometrias adotadas, de forma a constituir rigidezes equivalentes entre os modelos, em especial as vigas de acoplamento com secções reduzidas apresentadas são meramente realizadas para efeitos comparativos, pois a armadura necessária para resistir aos esforços de flexão é superior a 4% da área da secção, ultrapassando o valor limite imposto pelo EC2, com estas limitações normativas as condições geometrias consideradas para estas opções perderiam validade.

Para além desta limitação dimensional, é importante alertar que a viga da PAB_50% apresenta uma altura semelhante à de uma laje, portanto em situações em que dois núcleos estruturais, como escadas ou elevadores, estão alinhados e próximos, a própria laje pode comportar-se como uma viga de acoplamento. Esta situação pode induzir a formação de trajetórias de carga com elevados esforços de corte, particularmente difíceis de controlar em projeto, tanto ao nível do dimensionamento como da pormenorização. Este tipo de configuração exige, por isso, atenção especial na fase de conceção estrutural, sobretudo em zonas sujeitas a ação sísmica.

Em suma, para valores de CR elevados, o principal desafio encontra-se nas lâminas. A rigidez exigida às vigas de acoplamento obriga à redução do comprimento das lâminas, de forma a garantir uma rigidez global compatível. Esta limitação conduz a esforços axiais elevados nas paredes e a limitações ao nível da ductilidade. Além disso, o menor comprimento da lâmina intensifica a solicitação de corte nas vigas, exigindo armaduras transversais reforçadas para assegurar a resistência ao corte.

Por outro lado, para CR reduzidos, embora os esforços principais se concentrem nas lâminas, as vigas de acoplamento apresentam uma altura reduzida, tornando-se o elemento mais crítico. Nestes casos, a baixa inércia das vigas conduz a solicitações de corte igualmente elevadas, impondo requisitos significativos ao nível da armadura transversal, sobretudo para garantir a segurança em zonas críticas, sendo eventualmente necessário estender as cintagens da zona de interligação para fazer face aos diversos sistemas de corte em presença no local (sísmico e gravítico).

4.6.7. SOLUÇÃO DE SAPATAS ISOLADAS

Com o intuito de validar a exequibilidade das soluções estruturais analisadas, esta secção apresenta uma análise comparativa do dimensionamento das fundações. O objetivo principal consiste em verificar se os momentos fletores nas lâminas e o binário gerado pelas vigas de acoplamento conduzem a exigências significativamente distintas ao nível das fundações, comprometendo a sua aplicação em contexto real.

Importa salientar que o edifício considerado não possui pisos de cave, o que influencia diretamente o comportamento estrutural ao nível das fundações. Com efeito, na ausência de paredes perimetrais enterradas, todos os esforços verticais e momentos fletores desenvolvidos nas lâminas são integralmente transferidos para as sapatas, exigindo destas uma resposta mais rigorosa em termos de equilíbrio e capacidade resistente. Em contrapartida, em edifícios com cave, parte significativa desses esforços seria redistribuída através dos muros de suporte laterais, aliviando parcialmente as fundações individuais das paredes acopladas. Esta consideração reforça a relevância da análise apresentada, na medida em que permite aferir se as configurações estudadas são viáveis mesmo sob ponto de vista construtivo.

Analisando as opções disponíveis verificou-se que a adoção de uma sapata para cada lâmina não se revelou viável, uma vez que, dadas as dimensões envolvidas, essas fundações tenderiam a sobrepor-se ou a aproximar-se excessivamente, perdendo eficácia e comprometendo a integridade do sistema. Por outro lado, a utilização de uma sapata contínua permite garantir a continuidade dos apoios, evitar assentamentos diferenciais e reduzir a amplificação de efeitos indesejáveis associados à ação sísmica.

Para o dimensionamento das fundações dos sistemas de paredes acopladas estudados, consideraram-se os esforços globais resultantes em cada parede acoplada, admitindo-se o funcionamento conjunto das lâminas como uma única unidade estrutural.

Adicionalmente, foi adotada uma tensão admissível do solo de 300 kPa, valor utilizado na verificação da capacidade de carga da fundação. Atendendo às forças aplicadas e à magnitude dos momentos de excentricidade, foi ainda aplicado o critério de garantir que, em cálculo, pelo menos 3/4 da base da sapata estivesse sujeita a tensões de compressão, assegurando condições de equilíbrio e evitando o levantamento da fundação. Importa referir que o contributo do peso próprio da sapata é essencial para o dimensionamento da sapata, uma vez que ajuda a reduzir a excentricidade global da parede acoplada.

A Figura 42 apresenta as dimensões em planta para cada uma das sapatas consideradas nas diferentes configurações de acoplamento (50%, 60%, 70% e 80%). Importa referir que esta análise foi realizada apenas para o Modelo A, correspondente às paredes com 7 metros de comprimento. Esta decisão baseou-se no facto de que, dada a rigidez global equivalente assumida nos diferentes modelos, o dimensionamento e os resultados obtidos para as fundações no Modelo B seriam muito semelhantes.

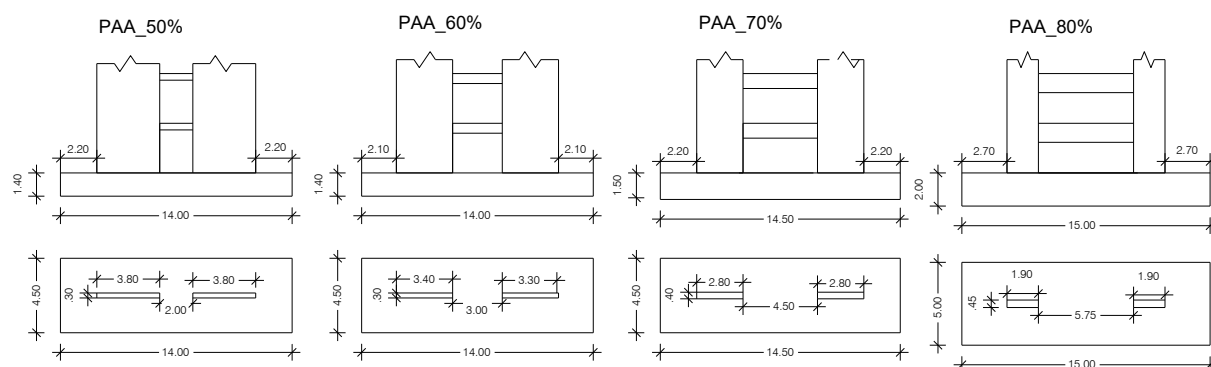


Figura 42 - Representação das dimensões das sapatas para as diferentes configurações – Modelo A

Como se pode observar, as variações nas dimensões das sapatas entre os vários casos são relativamente reduzidas. Este comportamento decorre do facto de todas as paredes estarem sujeitas às mesmas ações laterais e os esforços axiais se manterem praticamente iguais, uma vez que o comprimento total do conjunto não varia de forma significativa entre as configurações.

Adicionalmente, a adoção de uma geometria simétrica da sapata permitiu minimizar eventuais excentricidades entre o centro de rigidez e o centro de carga, promovendo uma distribuição mais equilibrada de tensões na fundação.

Com o objetivo de verificar se pelo menos 75% da base da sapata permanecia em contacto com o solo sob compressão, procedeu-se à modelação das fundações no software SAP2000, com consideração da interação solo-estrutura para os extremos PAA_80% e PAA_50% (Figura 43). Os resultados demonstram que a maior parte da sapata se encontra efetivamente em compressão, apresentando tensões de compressão no solo, com apenas uma pequena parcela da extremidade à esquerda da linha vermelha assinalada a entrar em tração, evidenciada por tensões positivas muito menores ao 1/4 da sapata.

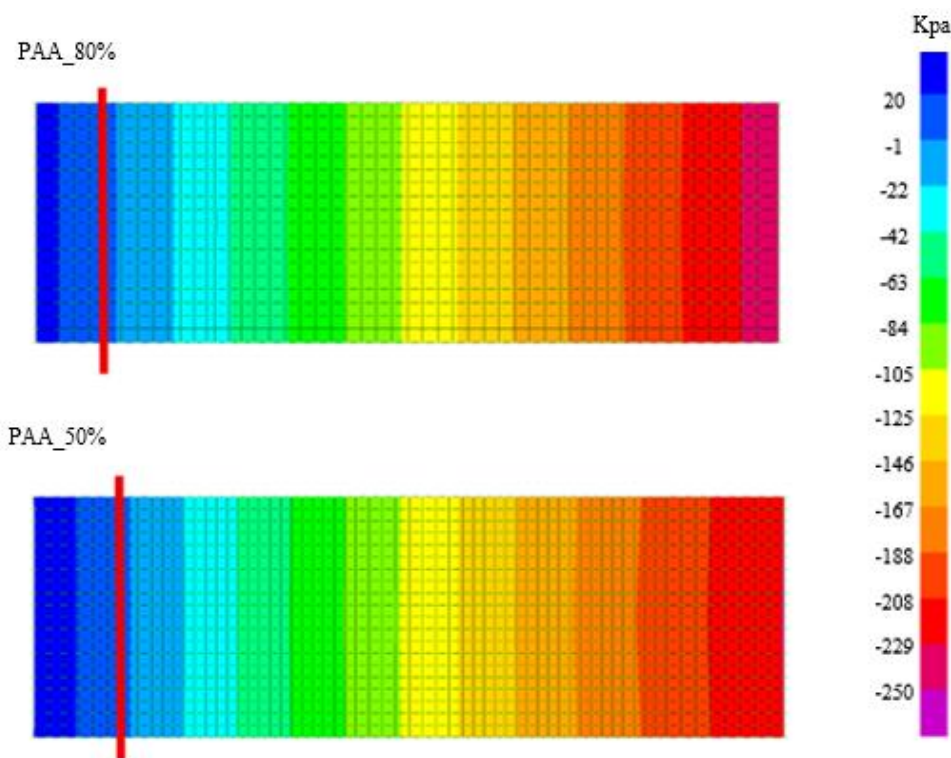


Figura 43 –Tensão induzidas na sapata

Para além disso, o que corresponde a uma tensão vertical máxima de aproximadamente 250 kPa, um valor que se mantém dentro de uma margem segura face à tensão admissível considerada de 300 kPa.

Embora o cálculo detalhado da armadura de fundação não esteja incluído no âmbito desta dissertação, importa salientar que diferentes configurações geométricas podem conduzir a variações relevantes na distribuição interna de esforços e, por consequência, na exigência de armadura. Em particular, nota-se que há casos em que as paredes apresentam grande extensão longitudinal, associadas a elementos de ligação mais rígidos e concentrados, enquanto outras combinações envolvem lâminas mais compactas com vigas de maior comprimento.

Estas diferenças influenciam diretamente a forma como os esforços verticais são transmitidos à fundação e poderão implicar, em fase de projeto, exigências distintas ao nível da armadura de punçoamento ou flexão, mesmo que as dimensões globais da sapata se mantenham inalteradas.

Verificada a compatibilidade das soluções ao nível das fundações, garante-se assim que todas as configurações analisadas apresentam viabilidade construtiva e estrutural coerente com as práticas de engenharia

5

CASO DE ESTUDO

5.1. INTRODUÇÃO

Após o desenvolvimento conhecimentos estruturados previamente definidos nos capítulos anteriores sobre paredes acopladas, este capítulo visa aplicar os conhecimentos adquiridos ao estudo de um caso prático, avaliando o comportamento sísmico de diferentes configurações de paredes acopladas integradas num edifício real.

Para tal, considera-se um projeto desenvolvido pela empresa Struconcept, localizado em Aveiro, cuja estrutura em betão armado foi adaptada com o objetivo de permitir uma análise comparativa entre distintas soluções resistentes. A modelação foi ajustada de modo a preservar a coerência com a proposta original, garantindo simultaneamente a viabilidade da substituição da parede dúctil inicialmente prevista por alternativas com paredes acopladas.

O edifício de referência inclui originalmente uma parede dúctil isolada, situada na fachada principal. Nesta análise, essa solução foi comparada com duas variantes estruturais, nas quais se introduzem paredes acopladas com diferentes coeficientes de acoplamento. Procurou-se garantir a equivalência da rigidez lateral global entre os modelos, assegurando que as diferenças observadas decorrem exclusivamente do grau de interação entre as lâminas, sem interferência de alterações na massa ou rigidez globais.

Ao longo do capítulo são descritas as simplificações adotadas na modelação, os critérios de definição das ações e os resultados globais obtidos. Em seguida, procede-se ao dimensionamento detalhado das armaduras da parede dúctil e das configurações com paredes acopladas, concluindo com uma análise crítica sobre o desempenho estrutural, os quantitativos de armadura e as implicações construtivas de cada solução.

5.2. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO

O edifício em análise localiza-se na Rua Conselheiro Luís Magalhães, em Aveiro, integrando um empreendimento de uso misto, (comércio e habitação) composto por dois blocos estruturalmente independentes: o Bloco Norte e o Bloco Sul. Estes dois volumes são separados por uma junta de dilatação estrutural, conforme ilustrado na Figura 44, garantindo independência sísmica entre os blocos e permitindo a sua análise individualizada. O presente estudo incide exclusivamente sobre o Bloco Norte, devido ao seu maior desenvolvimento em altura e à maior massa estrutural.

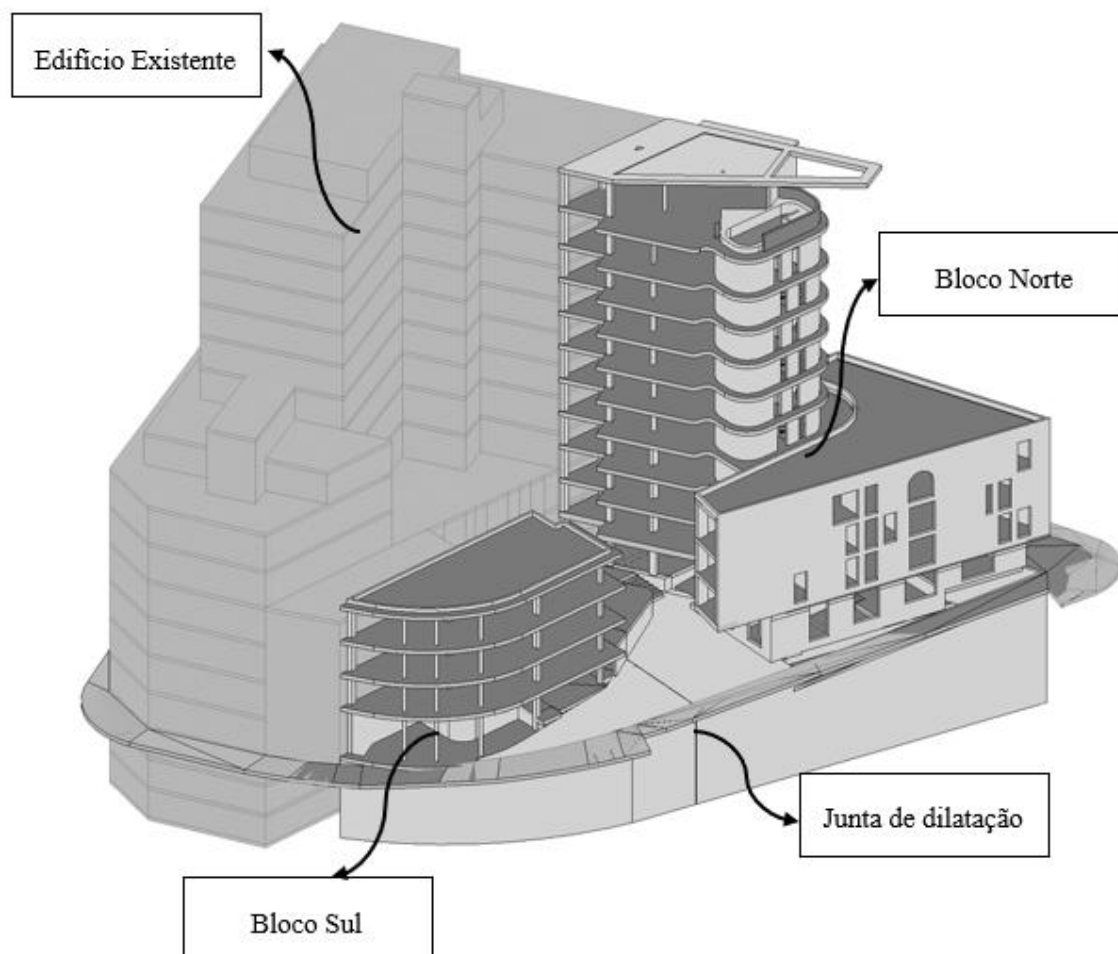


Figura 44 - Perspetiva geral do edifício em estudo.

Este bloco será construído no âmbito de uma intervenção de demolição e reconstrução total, substituindo edifícios antigos de alvenaria por uma nova estrutura em betão armado. A nova construção contará com 11 pisos acima do solo e dois pisos enterrados (Figura 47), destinados a estacionamento e zonas técnicas. Os quatro primeiros pisos acima do solo ocupam toda a largura do lote, a partir do quinto piso, a edificação assume uma configuração em torre com uma área mais reduzida.

O Bloco Norte inclui núcleos verticais de circulação e serviços (caixa de escadas e elevador), os quais se estendem ao longo de toda a altura da torre e constituem zonas de elevada rigidez estrutural. Estes núcleos influenciam significativamente a rigidez lateral da estrutura e o seu comportamento dinâmico.

No âmbito do caso de estudo, foi seleccionada para análise uma das paredes estruturais longitudinais exteriores do Bloco Norte, assinalada na Figura 45 e Figura 46 como “parede em estudo”. Esta parede assume um papel relevante no comportamento sísmico, contribuindo para a rigidez lateral e promovendo uma distribuição mais equilibrada da rigidez horizontal.

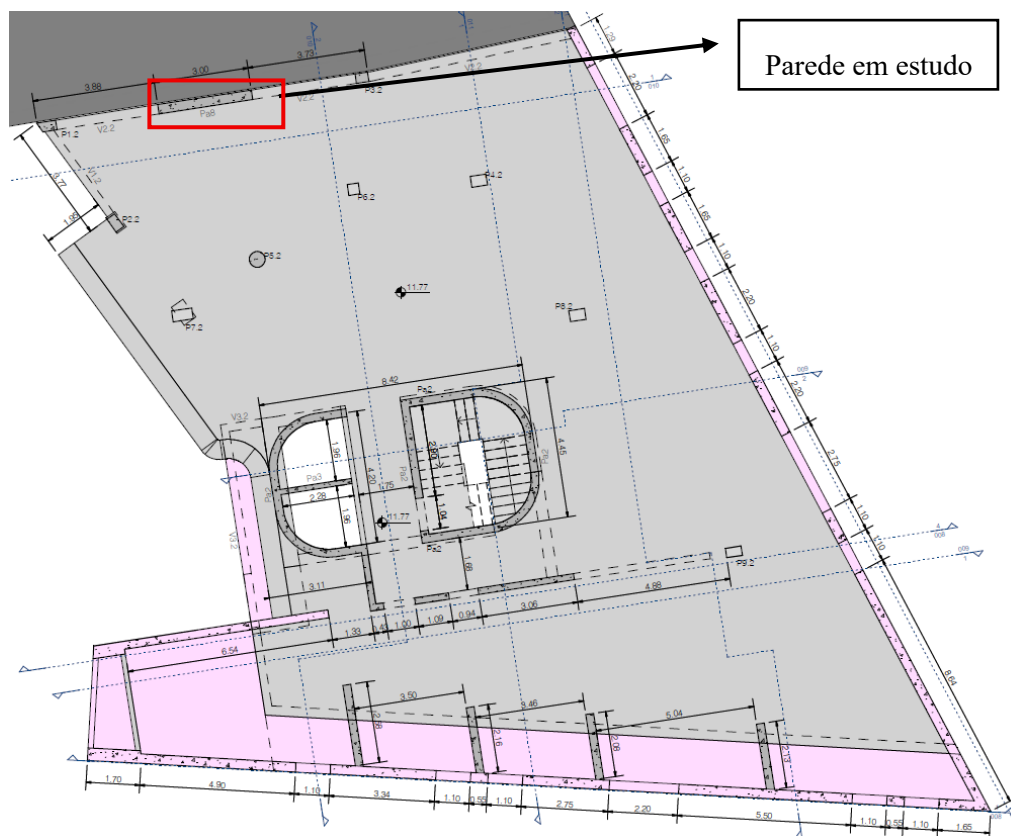


Figura 45 – Plantas estruturais do piso 2.

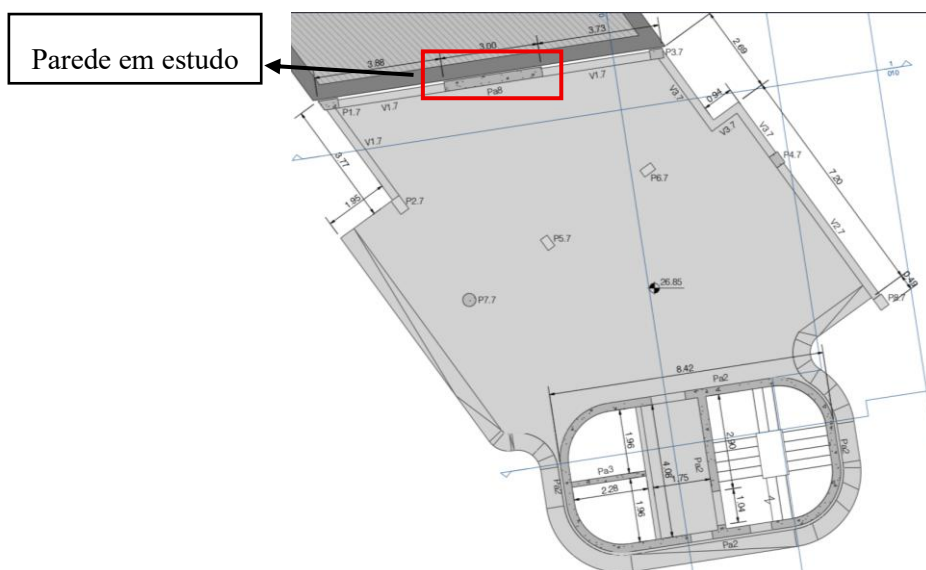


Figura 46 - Planta estrutural do piso 6-11

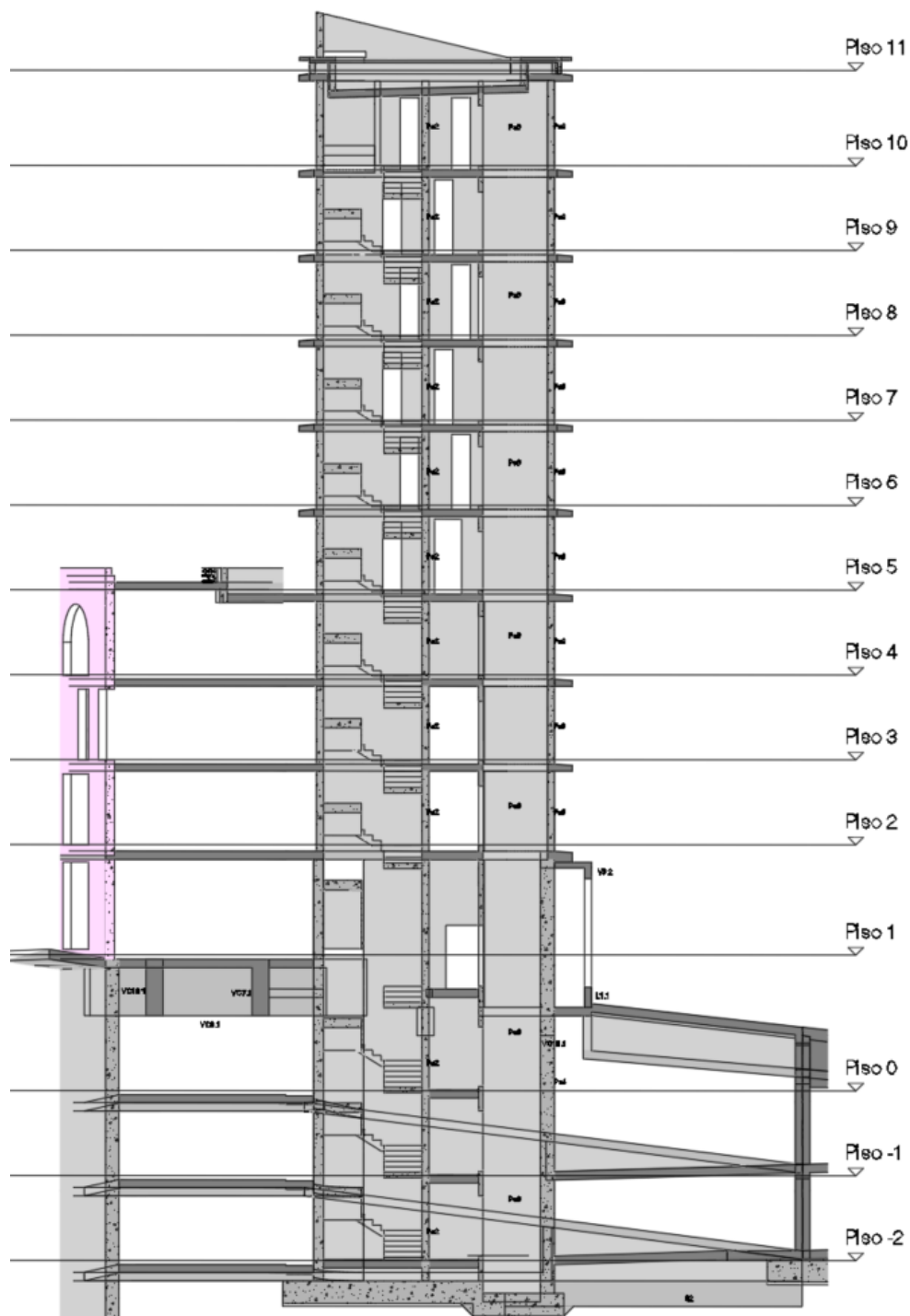


Figura 47 - Corte estrutural do edifício

A presença do núcleo rígido na extremidade oposta tende a deslocar o centro de rigidez nessa direção, podendo induzir efeitos torsionais indesejados durante um sismo. A ativação eficiente da parede em estudo permite recentrar o centro de rigidez e aproximá-lo do centro de massa, favorecendo uma resposta dinâmica mais equilibrada, com menores rotações e solicitações assimétricas.

Esta parede será analisada em três configurações distintas: como parede dúctil isolada (solução prevista no projeto) e como componente de dois sistemas de paredes acopladas, com coeficientes de acoplamento

de 75% e 60%. Esta abordagem visa avaliar o impacto do grau de ligação entre lâminas verticais na eficácia da atuação da parede e no desempenho sísmico global do edifício.

A organização volumétrica do edifício, com base contínua e torre elevada, induz variações significativas na distribuição de rigidez, massas e transmissão de esforços. Tal configuração reforça a importância do presente estudo, permitindo a comparação entre diferentes soluções de paredes resistentes com base em critérios estruturais coerentes.

5.2.1. SIMPLIFICAÇÕES ADOTADAS

Com o objetivo de centrar a análise no comportamento sísmico da estrutura e na comparação entre diferentes configurações de paredes resistentes, foram adotadas as seguintes simplificações geométricas e estruturais no modelo de cálculo:

- **Substituição da parede original de 3 metros por uma parede de 6 metros:** a “parede em estudo” localizada na extremidade noroeste do Bloco Norte e apresenta, no projeto real, um comprimento de cerca de 3 metros. Para efeitos do presente estudo, foi substituída por uma parede idealizada com 6 metros de comprimento, permitindo a posterior subdivisão em lâminas acopladas com rigidez lateral equivalente. Esta adaptação assegura geometrias compatíveis com critérios de proporcionalidade e permite também dar uma maior relevância a esta parede no contexto sísmico.
- **Alteração da geometria dos núcleos:** Os núcleos originais com geometrias curvas e complexas, foram substituídos por núcleos de geometria retangulares equivalentes. Esta substituição teve como principal objetivo simplificar o processo de modelação e garantir a compatibilidade da malha de elementos finitos entre os diferentes pisos, nomeadamente na ligação entre lajes e paredes verticais. As dimensões dos núcleos retangulares foram ajustadas de forma a garantir a equivalência da rigidez à flexão em ambas as direções principais, assegurando uma representação semelhante da sua contribuição estrutural face à estrutura original. Esta mudança é legítima dado que este estudo não se análise deste núcleo.
- **Exclusão das caves:** Os pisos enterrados foram omitidos da modelação, estabelecendo-se apoios ao nível do piso 1 do projeto, o qual passou a ser considerado como o piso de base da estrutura, com um total de 10 pisos acima do solo, correspondentes aos Pisos 2 a 11 do projeto.

Esta opção é aceitável dada a existência de muros de suporte perimetrais que restringem significativamente os deslocamentos horizontais destes pisos, tornando pouco relevante no comportamento dinâmico do edifício os pisos enterrados omitidos. Adicionalmente a existência de desníveis em boa parte dos pisos enterrados obrigaria a dificuldades na sua modelação situação que foi evitada com a supressão destes pisos.

Estas simplificações visam otimizar a modelação, concentrando a análise nos elementos estruturais com maior relevância para a resposta sísmica, assegurando simultaneamente validade técnica e comparabilidade entre os diferentes modelos adotados. Permitem ainda uma análise mais direta e objetiva dos elementos em estudo.

5.3. MODELAÇÃO ESTRUTURAL

Para o presente trabalho, foram respeitadas as exigências regulamentares em vigor. A classe de resistência característica à compressão do betão foi C30/37. Para as armaduras, foi utilizado aço do tipo A500 NR.

Nas subseções seguintes é descrita os aspetos fundamentais no SAP2000 e a definição das ações consideradas para análise sísmica.

5.3.1. MODELO ESTRUTURAL

A modelação estrutural foi realizada no programa SAP2000, com base num modelo tridimensional elástico ajustado à análise dinâmica. Para representar adequadamente o comportamento sísmico, adotou-se uma redução da rigidez de 50% nos elementos de betão armado, conforme recomendado pelo Eurocódigo 8, simulando o efeito da fendilhação nas zonas tracionadas sob ações cíclicas.

As paredes resistentes, assim como as vigas de acoplamento, foram modeladas com elementos de casca (*shell*), permitindo considerar simultaneamente os efeitos de membrana e flexão, assegurando uma representação coerente da resposta em duas direções. As vigas e pilares foram representados através de elementos de barra com seis graus de liberdade por nó (três de translação e três de rotação), incluindo os efeitos de flexão, axial e corte.

A malha de discretização foi definida com malhas quadradas, assegurando a compatibilidade dos nós das lajes com os das paredes e núcleos verticais, e garantindo a transmissão de esforços em ligações entre elementos de diferentes tipos. Para melhorar essa transferência, os elementos de barra prolongam-se por dois a três elementos dentro das paredes e núcleos, conforme ilustrado no Capítulo 3.

Para evitar a transferência artificial de momentos fletores para os pilares, anulou-se a rigidez à torção das vigas nesses elementos. A estrutura foi apoiada em apoios encravados ao nível do piso térreo, com bloqueios em todas as direções (translação e rotação) nos nós de base. Esta condição foi mantida em todos os modelos, assegurando comparabilidade entre as diferentes configurações de paredes acopladas, sem influência do tipo de apoio.

A Figura 48 apresenta o modelo tridimensional da estrutura desenvolvido no SAP2000, com a discretização dos elementos estruturais e as condições de apoio adotadas.

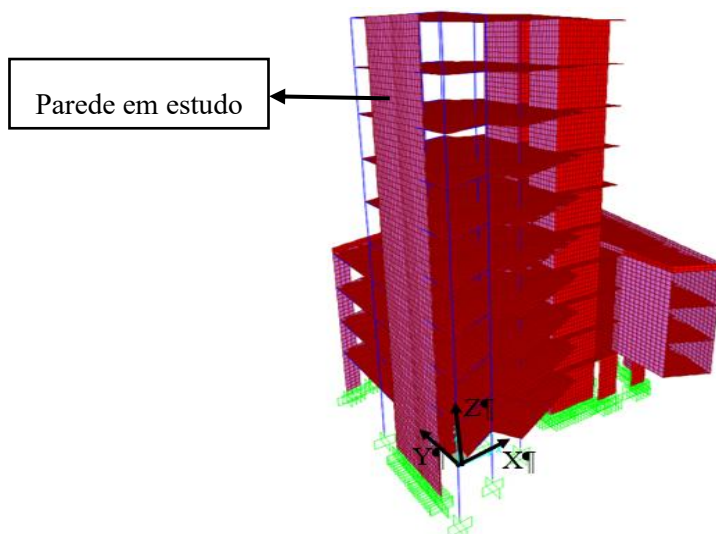


Figura 48 - Modelo tridimensional desenvolvido no SAP2000

5.3.2. AÇÕES CONSIDERADAS

Dado que o foco desta dissertação é o desempenho sísmico da estrutura, apenas foram consideradas as ações verticais e a ação sísmica. Outras ações, como vento, temperatura e retração, não foram incluídas na modelação, por não influenciarem significativamente a comparação entre os modelos estruturais.

5.3.2.1. Ações verticais

As ações permanentes consistem nos efeitos que atuam de forma constante ao longo da vida útil da estrutura, incluindo os pesos próprios dos elementos estruturais e as cargas permanentes não estruturais. A sua definição baseou-se nas especificações da norma EN 1991-1-1.

O peso próprio foi calculado com base numa massa volúmica de 25 kN/m³ para o betão armado. Para os elementos não estruturais, como revestimentos, pavimentos e paredes de compartimentação, foi adotado um valor médio uniformizado de 3,5 kN/m², abrangendo todos os elementos relevantes para o dimensionamento vertical.

As ações variáveis foram definidas em função da utilização prevista, sendo o edifício classificado na categoria A (atividades domésticas e residenciais), conforme a EN 1991-1-1. Foram consideradas sobrecargas de 2,0 kN/m² para os pavimentos habitacionais e de 0,4 kN/m² para a cobertura. A Tabela 14

Tabela 14 resume os valores adotados.

Tabela 14 – Cargas verticais aplicadas ao edifício.

Uso	RCP	SOB
Habitação (Piso 1-9)	3.5 kN/m ²	2.0 kN/m ²
Cobertura	3.5 kN/m ²	0.4 kN/m ²

No caso das combinações com ação sísmica, foi aplicada uma redução das ações variáveis através do coeficiente de combinação para cálculo sísmico (Tabela 15), conforme previsto nas normas EN 1990 e EN 1998-1. Esta redução considera que nem todas as áreas da estrutura se encontram simultaneamente carregadas durante um evento sísmico.

Tabela 15 – Coeficiente de redução para as ações variáveis.

Ψ_2	φ	$\Psi_2 \times \varphi$
0.30	0.80	0.24

5.3.2.2. Ação sísmica

A ação sísmica foi definida com base na norma NP EN 1998-1, considerando os parâmetros de zonamento sísmico e as características do solo. Embora o edifício em estudo se localize em Aveiro, foi adotado o cenário de cálculo correspondente à cidade de Lisboa, com o objetivo de amplificar os efeitos sísmicos e garantir uma análise mais exigente do ponto de vista sísmico.

No edifício original, o sistema estrutural corresponde a paredes não acopladas, integradas numa estrutura com irregularidades em planta e em altura. De acordo com o Eurocódigo 8, para sistemas desta natureza e com comportamento dúctil médio (classe DCM), o valor máximo admissível do coeficiente de comportamento é $q = 3.0$. No entanto, face às irregularidades geométricas presentes e com o objetivo de garantir maior realismo na resposta sísmica, optou-se por um valor mais conservador de $q = 2.0$. Esta escolha conduz a maior quantidade de armadura, mas reduz a dissipação de energia considerada no cálculo e, consequentemente, retarda a formação de rótulas plásticas, exigindo deslocamentos mais elevados para a ativação dos mecanismos inelásticos.

Foram considerados os dois tipos de ação sísmica definidos na norma, com base nos espectros elásticos de projeto correspondentes. A Figura 49 resume os parâmetros utilizados, incluindo o tipo de terreno, classe de importância, tipo de ductilidade e coeficiente de comportamento.

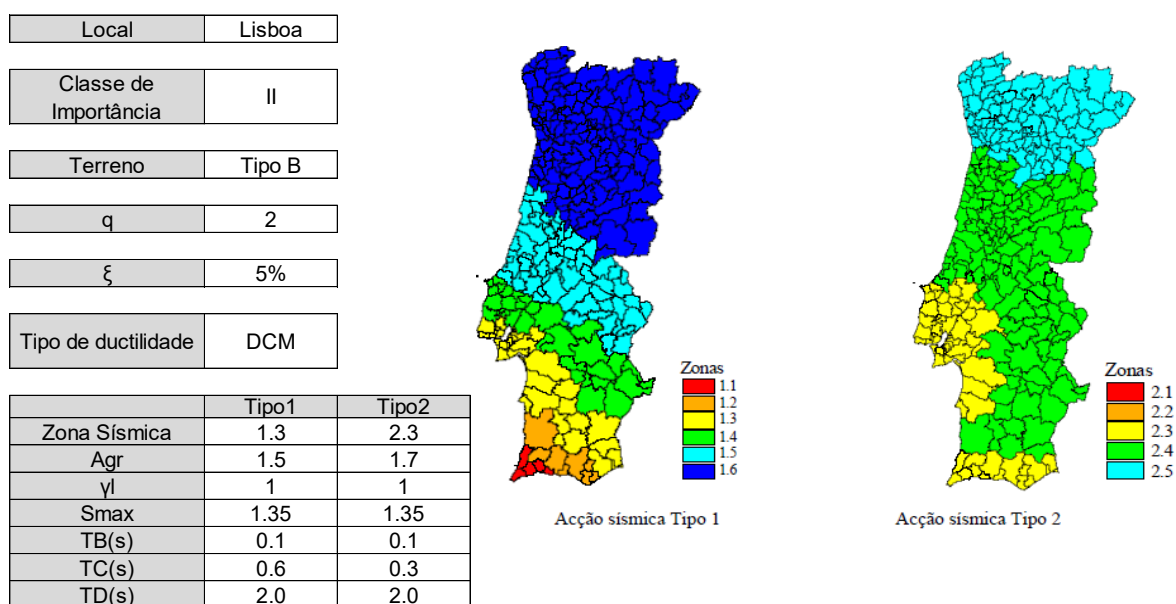


Figura 49 - - Parâmetros para a Definição do Espectro

Na Figura 50 apresentam-se os espectros elásticos de projeto correspondentes aos dois tipos de ação sísmica considerados.

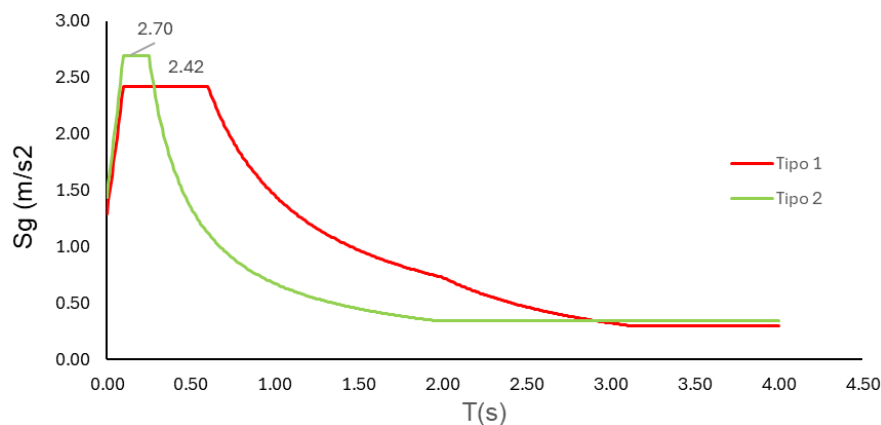


Figura 50 - Espectro da resposta de cálculo

5.4. ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO SÍSMICO

5.4.1. COMPORTAMENTO DINÂMICO

A análise modal teve como objetivo caracterizar o comportamento dinâmico da estrutura, através da identificação dos modos de vibração e da verificação da participação da massa modal efetiva em cada direção principal. De acordo com o Eurocódigo 8, os modos considerados devem mobilizar, no conjunto, pelo menos 90% da massa total da estrutura em cada direção horizontal.

No presente caso, tal como se observa na Tabela 16, esse critério foi satisfeito na direção X, mas não na direção Y, onde a participação da massa modal efetiva totalizou 82%. Apesar de se ter considerado um número adequado de modos para caracterizar a resposta sísmica da estrutura, esta limitação resulta da elevada concentração de rigidez das paredes resistentes dispostas nessa direção, o que reduz a ativação da massa associada e limita a sua contribuição para os modos globais de vibração.

Tabela 16 - Participação da massa modal em cada direção.

	Participação da massa modal efetiva
Direção X	91%
Direção Y	82%

A Tabela 17 apresenta os seis primeiros modos de vibração, com os respetivos períodos, frequências e percentagens de massa modal efetiva associadas às direções de translação (X, Y) e rotação (RZ). São identificados como modos dominantes aqueles que mobilizam 5% ou mais de massa efetiva em pelo menos uma das direções. Como se verifica, todos os modos apresentam participação significativa em mais do que uma direção, o que evidencia a inexistência de modos puros de translação. Este comportamento confirma a presença de efeitos torsionais relevantes, induzidos pela irregularidade geométrica da estrutura em planta e em altura.

Tabela 17 - Resultados da análise modal (períodos, frequências e massas efetivas).

Modo	Período	Frequência	M_{eff}, UX	M_{eff}, UY	M_{eff}, RZ
	(s)	(Hz)	(%)	(%)	(%)
1	0.76	1.31	37.2	10.3	10.8
2	0.59	1.70	10.2	37.9	4.0
3	0.36	2.77	1.7	5.2	25.6
4	0.23	4.33	33.1	1.2	0.9
5	0.20	5.11	1.4	19.8	17.1
6	0.18	5.55	2.0	6.3	24.6

As Figura 51 a Figura 53 ilustram as formas deformadas dos três primeiros modos de vibração, representando deslocamento predominante nas direções principais e componente torsional.

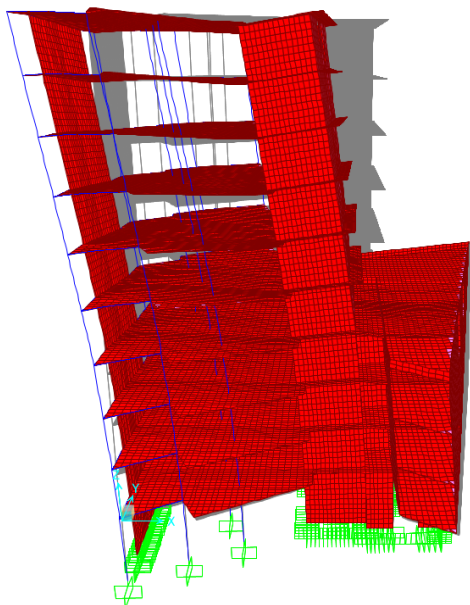


Figura 51 - Deformada do 1º modo (Vista do plano YZ).

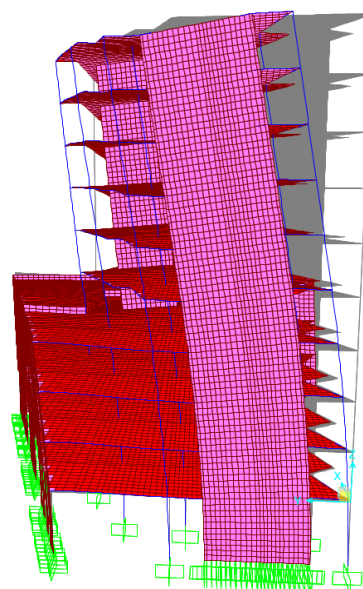


Figura 52 - Deformada do 2º modo (vista do plano XZ).

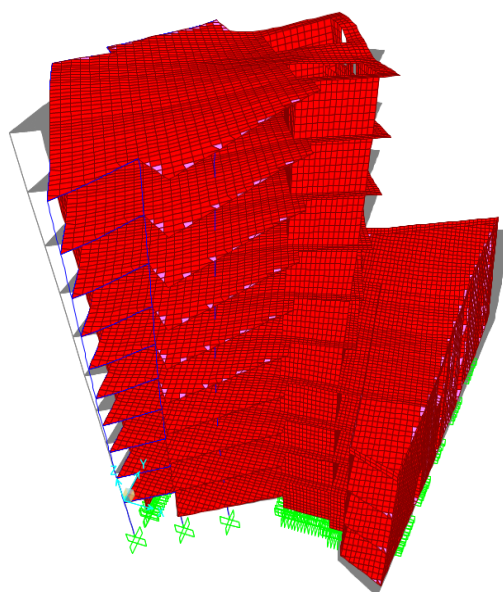


Figura 53 - Deformada do 3º modo (Torção).

As propriedades dinâmicas obtidas (períodos, frequências e formas modais) dependem diretamente da distribuição de massa e rigidez da estrutura. Como estes parâmetros foram mantidos constantes entre os três modelos em estudo (parede dúctil, parede acoplada com $CR=75\%$ e com $CR=60\%$), os resultados da análise modal são válidos para todos os casos. Esta estratégia garante que as diferenças de resposta observadas nos modelos em comparação resultem exclusivamente da variação na configuração da parede em estudo, permitindo isolar o impacto do grau de acoplamento no comportamento estrutural.

5.4.2. DISTRIBUIÇÃO DAS FORÇAS DE CORTE

Antes da análise detalhada da “parede em estudo”, apresenta-se uma visão global do comportamento da estrutura, com o objetivo de contextualizar os esforços que atuam nesse elemento.

Os esforços analisados nesta secção referem-se exclusivamente à ação sísmica na direção Y, por ser aquela em que a parede em estudo possui maior rigidez à flexão no seu plano, assumindo, por isso, maior relevância para a sua atuação estrutural. Para efeitos de dimensionamento, são consideradas todas as combinações sísmicas, incluindo a combinação com ação principal na direção X, conforme o previsto no Eurocódigo 8.

As combinações sísmicas utilizadas são representadas pelas Equações 5.1 e 5.2, aplicando o critério de superposição direcional com inclusão implícita dos efeitos torsionais globais:

$$E_{EDX} + 0.30 \cdot E_{EDY} \quad (5.1)$$

$$0.30 \cdot E_{EDX} + E_{EDY} \quad (5.2)$$

De seguida, analisa-se a distribuição das forças de corte globais ao longo da altura da estrutura e a sua variação entre pisos consecutivos. As Figuras 45 e 46 apresentam, respetivamente, os valores acumulados por piso e os incrementos entre níveis.

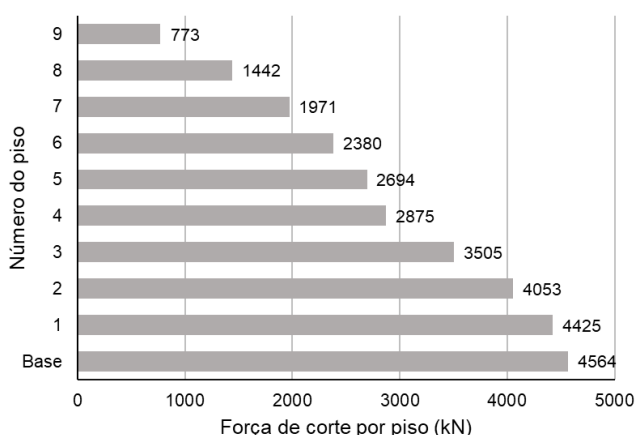


Figura 54 - Forças de corte por pisos na direção Y

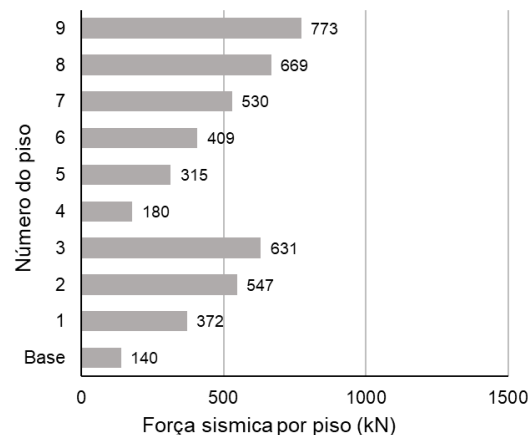


Figura 55 - Força sísmica por piso na direção Y

Verifica-se que as forças de corte sísmicas aumentam progressivamente com a descida na elevação, uma vez que o corte horizontal num dado piso resulta da acumulação das forças inerciais geradas pelas massas dos pisos superiores. Este padrão de distribuição é típico de estruturas porticadas e de paredes resistentes, sendo independente da configuração estrutural adotada.

Na maioria dos edifícios principalmente, quando eles são regulares os incrementos de força de corte entre pisos são maiores nos níveis superiores e decrescem progressivamente em direção à base. Este comportamento decorre da forma como a ação sísmica é distribuída ao longo da altura do edifício.

No edifício em estudo, observa-se uma redução abrupta dos incrementos de corte entre os pisos 3 e 4 (Figura 46), associada à descontinuidade geométrica existente na transição para a torre, onde se verifica uma redução significativa da área em planta e, conseqüentemente, da massa mobilizada. Embora os pisos superiores apresentem maiores deslocamentos relativos, essa redução de massa conduz a uma menor contribuição inercial e, portanto, a um decréscimo nos esforços de corte.

Excluindo esta zona de transição, a estrutura revela-se relativamente regular entre os pisos 1 a 3 e entre os pisos 4 a 9, com incrementos de corte coerentes com o aumento da altura.

Para quantificar o contributo da “parede em estudo” na resistência global da estrutura, a Tabela 18 apresenta a distribuição da força de corte sujeito apenas à ação sísmica na direção Y nos elementos verticais da base.

Tabela 18 - Distribuição dos esforços da base por elemento resistente

Elemento estrutural	Força de Corte
Paredes exteriores	21%
Paredes interiores	33%
Núcleo	20%
Pilares	1%
Parede em estudo	25%
TOTAL	100%

Com base nesta distribuição, verifica-se que a parede em estudo contribui com 25% da força de corte evidenciando o seu papel estrutural relevante na resistência sísmica da estrutura.

A baixa percentagem de força de corte atribuída ao núcleo neste nível resulta do seu alinhamento com paredes interiores e exteriores do lado direito, as quais não se prolongam para os pisos superiores. Esta descontinuidade provoca um aumento das solicitações no núcleo nos pisos superiores, onde a força de corte se eleva significativamente, atingindo valores aproximadamente duas vezes superiores aos registados na base da parede em estudo.

5.5. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DA PAREDE EM ESTUDO: PD_6M, PA_60% E PA_75%

Como referido anteriormente, o presente estudo visa comparar três soluções distintas da parede em estudo: um com parede dúctil isolada e dois com paredes acopladas, com diferentes geometrias e configurações de ligação entre lâminas verticais, de modo a definir coeficientes de acoplamento de 60% e 75%. Estas configurações geram distintos graus de acoplamento, permitindo avaliar o impacto desta variável no desempenho estrutural. Tal como estabelecido no capítulo anterior, procurou-se garantir rigidez lateral equivalente entre os modelos, de forma que o uso de paredes dúcteis ou paredes acopladas não apresente alterações do comportamento sísmico na resposta global do edifício assegurar condições comparáveis para análise.

Nesta fase preliminar, foram aplicadas as expressões referidas no Capítulo 2 para estimar as dimensões das lâminas e vigas de acoplamento, com o objetivo de obter soluções com rigidez lateral semelhante e com o correspondente coeficiente de acoplamento.

A Figura 56 apresenta os principais parâmetros geométricos dos modelos considerados, incluindo a espessura das lâminas (bw), o comprimento total da parede (lw), a altura e espessura das vigas (hb e bb), bem como a distância entre os centros das lâminas (Le).

	Parede		Viga			Le	coef de acoplamento	$\frac{I_{PD}}{I_{PA}} F_3(k\alpha H)$
	lw	bw	l0	bb	hb			
Cenário 1	2	0.3	5	0.3	1	7.000	76%	0.989
Cenário 2	2.9	0.3	3	0.3	0.6	5.900	57%	0.967

Figura 56 - Parâmetros geométricos dos modelos estruturais e respetivos coeficientes de acoplamento.

Os valores do coeficiente de acoplamento foram comparados com os resultados do programa de calculo SAP 2000, para a ação sísmica isolada na direção Y (direção da parede em estudo). Para este efeito o cálculo foi realizado com base na decomposição do momento global resistente na base da parede acoplada. Subtraindo-se os momentos individuais resistidos por cada lâmina ao momento total do conjunto, obteve-se o momento transmitido pelas vigas de acoplamento, associado ao binário de forças verticais. A relação entre este momento e o momento total define o coeficiente de acoplamento.

Os resultados obtidos foram de 77% para o cenário 1 e de 59% para o cenário 2, demonstrando a eficácia das fórmulas adotadas na estimativa da rigidez relativa e confirmando a sua adequação em fases de conceção de paredes acopladas.

O cálculo foi realizado com base na decomposição do momento total resistente na base da parede acoplada. Subtraindo-se os momentos individuais resistidos por cada lâmina ao momento total do conjunto, obteve-se o momento transmitido pelas vigas de acoplamento, associado ao binário de forças verticais. A relação entre este momento e o momento total define o coeficiente de acoplamento.

Como se verá nas secções seguintes, os modelos confirmam a equivalência de rigidez e massa. Nas análises que se seguem de seguida os modelos passam a ser designados da seguinte forma apresentando-se na Figura 57 as diferentes configurações.

- **PD_6m:** parede dúctil com 6 metros de comprimento;
- **PA_60%:** parede acoplada com CR = 60%;
- **PA_75%:** parede acoplada com CR = 75%.

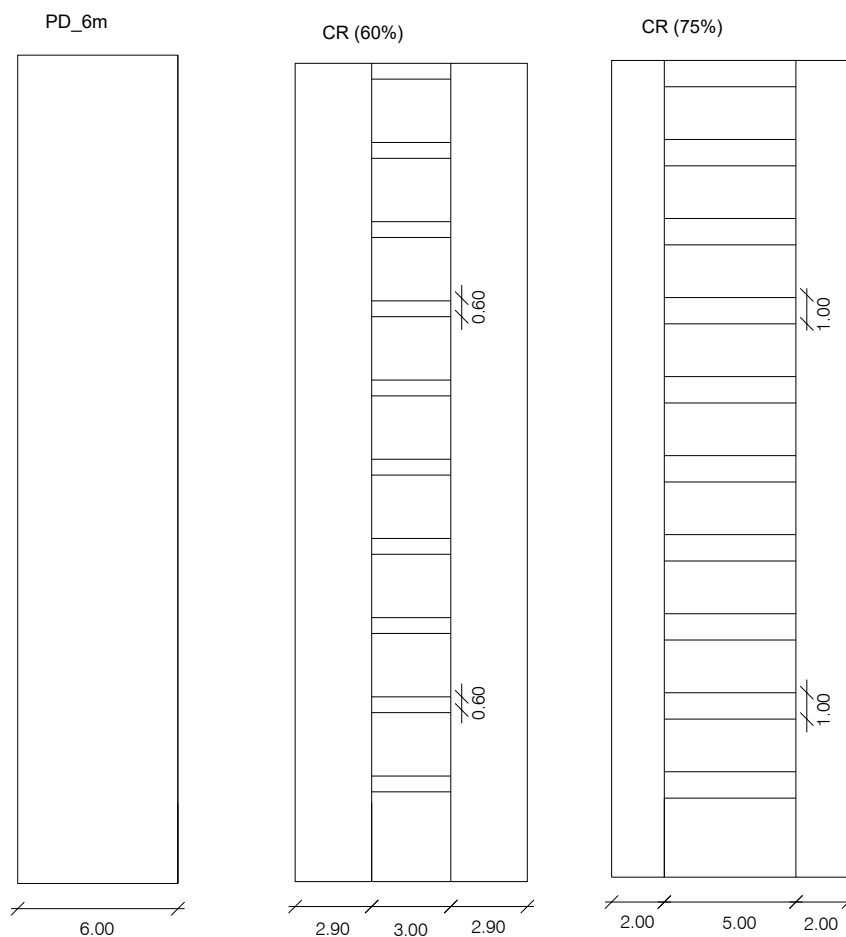


Figura 57 – Geometria das três configurações da parede em estudo analisadas: PD_6m (parede dúctil), PA_60% (parede acoplada com CR = 60%) e PA_75% (parede acoplada com CR = 75%).

5.6. COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DAS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES

Neste subcapítulo analisam-se os esforços globais dos três modelos estruturais, com o objetivo de avaliar o impacto da ligação entre lâminas verticais no desempenho sísmico global. Serão comparados os deslocamentos totais e relativos entre pisos, bem como os esforços desenvolvidos na parede em estudo.

5.6.1. ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DE RESULTADOS

De acordo com o Eurocódigo 8, o deslocamento real da estrutura devido à ação sísmica de cálculo (designado por d_s) deve ser obtido pela multiplicação do deslocamento elástico correspondente (d_e) pelo fator de comportamento sísmico q . No presente caso, este valor foi assumido como $q = 2$, conforme descrito na secção 5.3.2.2.

A verificação da limitação de danos foi realizada com base nos deslocamentos de cálculo da estrutura, já afetados pelo coeficiente q . O deslocamento foi analisado na direção Y, correspondente ao plano da parede em estudo e os valores obtidos para os três modelos são apresentados na Figura 58. As deformadas refletem o perfil de deslocamento ao longo da altura da estrutura, considerando apenas a excitação sísmica nesta direção.

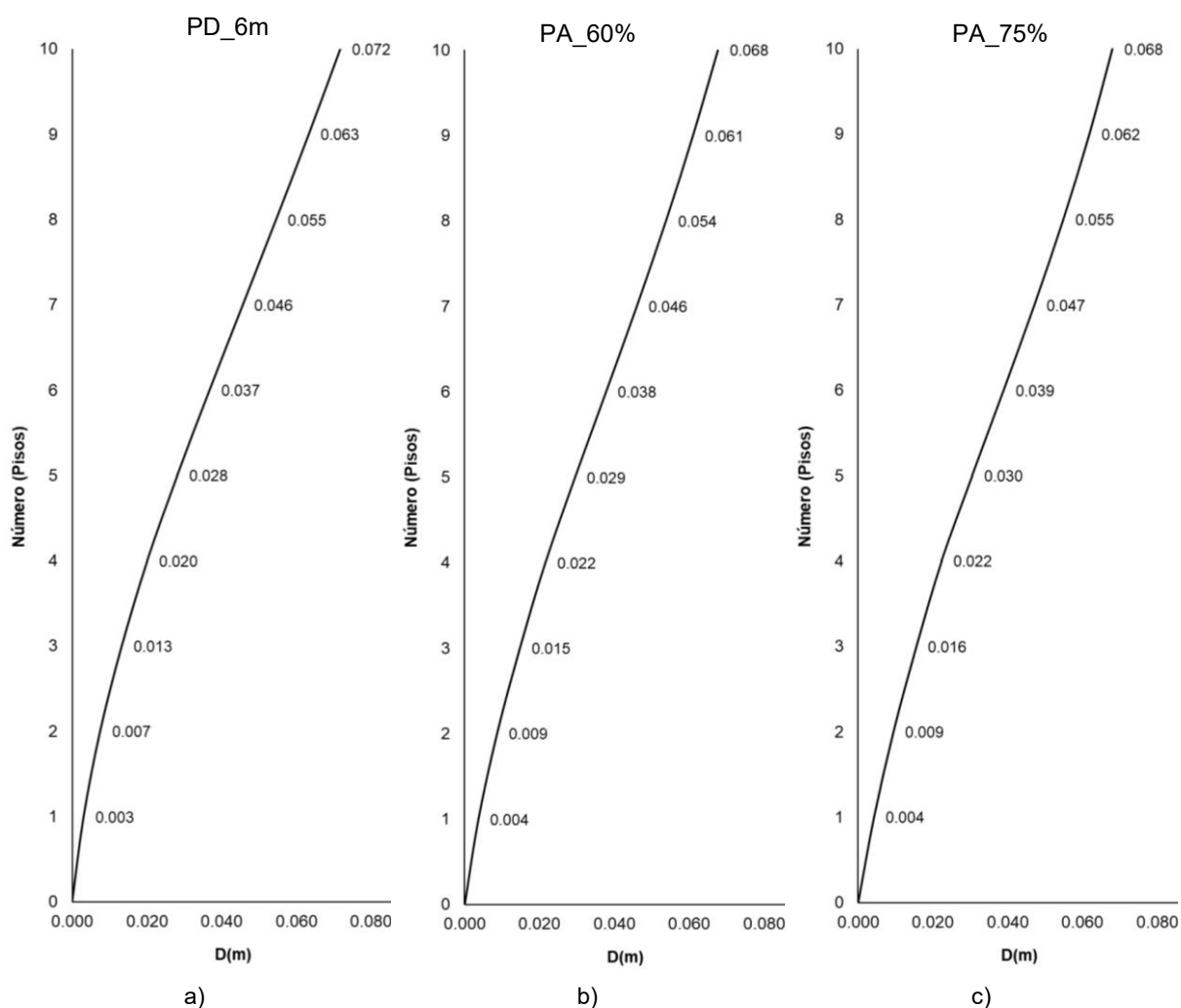


Figura 58 - Deslocamento real médio na direção Y para os diferentes modelos: a) Parede dúctil; b) Parede acoplada CR=60%; c-) Parede acoplada CR= 75%

A forma da deformada da parede dúctil Figura 58, a) evidencia um comportamento dominado por flexão, típico de estruturas com paredes resistentes e elevada rigidez lateral. Nos modelos com paredes acopladas (PA_60% e PA_75%), os deslocamentos no topo são ligeiramente inferiores, em linha com os valores de rigidez comparativa apresentados na Figura 58. Contudo, nota-se uma alteração na forma da deformada: enquanto o modelo com parede isolada mantém um comportamento flexional até ao topo, os modelos com paredes acopladas apresentam uma transição de em comportamento à flexão, para um comportamento acoplado influenciado pelas vigas de acoplamento.

Este comportamento é ainda mais evidente na análise dos drifts entre pisos, apresentados na Figura 59, este parâmetro é obtido pela diferença de deslocamento entre dois níveis consecutivos, dividida pela altura correspondente do piso. A evolução do drift ao longo da altura da estrutura encontra-se representada na Figura 59 para os diferentes modelos, indicando os valores obtidos antes da aplicação do coeficiente de redução v .

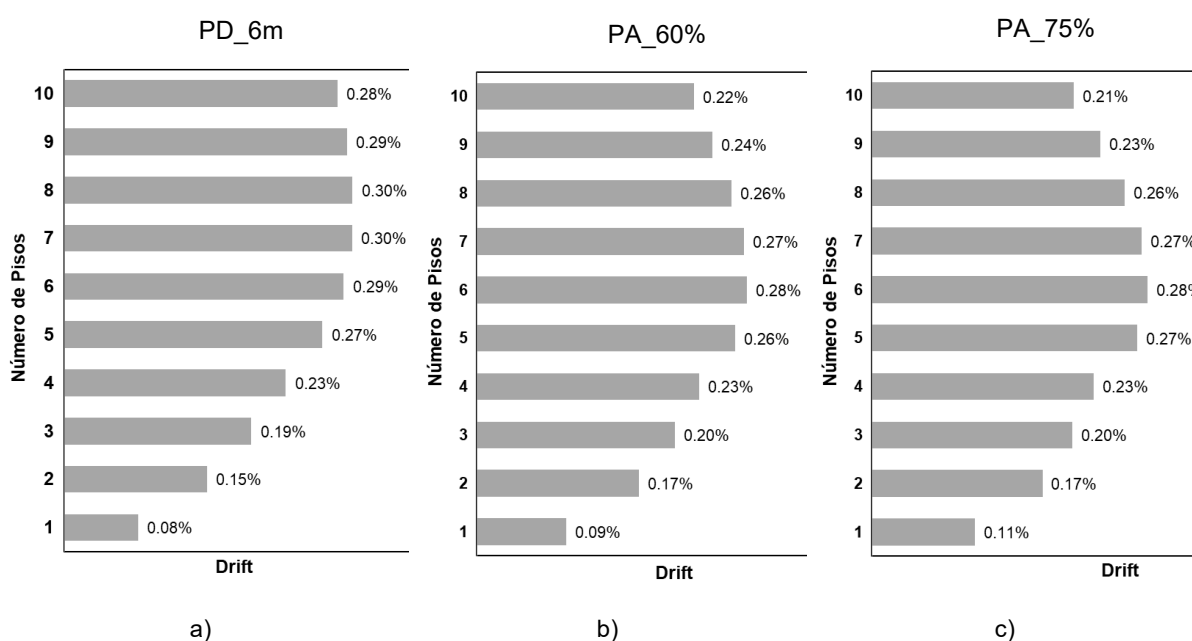


Figura 59 – Drift na direção Y para os diferentes modelos: a) Parede dúctil; b) Parede acoplada CR=60%; c-) Parede acoplada CR= 75%

De acordo com o EC8, para estruturas da classe de importância II, o valor de v a considerar para limitação de danos em situação de serviço é de 0.55, correspondente a uma ação sísmica com período de retorno inferior (aproximadamente 95 anos). Mesmo sem aplicar este fator de redução, os drifts máximos verificados são da ordem de 0.30%, valor substancialmente inferior ao limite de 0.50% definido pelo EC8 para prevenir danos estruturais ou não estruturais em eventos sísmicos frequentes.

Nos modelos com paredes acopladas, o drift máximo foi de 0.28%, ligeiramente inferior ao valor de 0.30% registado no modelo com parede isolada. Mais relevante do que a diferença absoluta é a evolução do drift ao longo da altura: no modelo PD_6m, o drift mantém-se praticamente constante até ao topo, enquanto nos modelos PA_60% e PA_75% ocorre uma quebra acentuada a partir do piso 6, associada à mudança no regime de deformação.

A distribuição do *drift* ao longo dos pisos mostra uma variação regular, com incrementos moderados e controlados. Este comportamento resulta da capacidade das paredes resistentes (dúcteis e acopladas) em uniformizar os deslocamentos relativos entre pisos, contribuindo para limitar as deformações diferenciais e aumentar a robustez sísmica global da estrutura.

5.6.2. ANÁLISE DOS ESFORÇOS

Com o objetivo de comparar diretamente os resultados obtidos para as configurações de paredes acopladas com o modelo da parede dúctil, procede-se à avaliação dos esforços globais atuantes na base de cada piso (Momento fletor e esforço de corte) sob ação sísmica na direção Y.

Esta abordagem permite contabilizar o esforço de corte total e o momento total resistente do sistema acoplado, considerando tanto os momentos fletores das lâminas como o momento adicional associado ao binário de forças verticais transferidas pela viga de acoplamento. Assim, evita-se a análise isolada dos esforços em cada componente (viga ou lâmina), privilegiando uma leitura global e coerente com o modelo da parede dúctil.

Na Figura 60, são apresentados os valores do esforço de corte total ao longo da altura das paredes para cada modelo. A análise global apresentada tem apenas um caráter comparativo, permitindo aferir diferenças estruturais globais entre os sistemas.

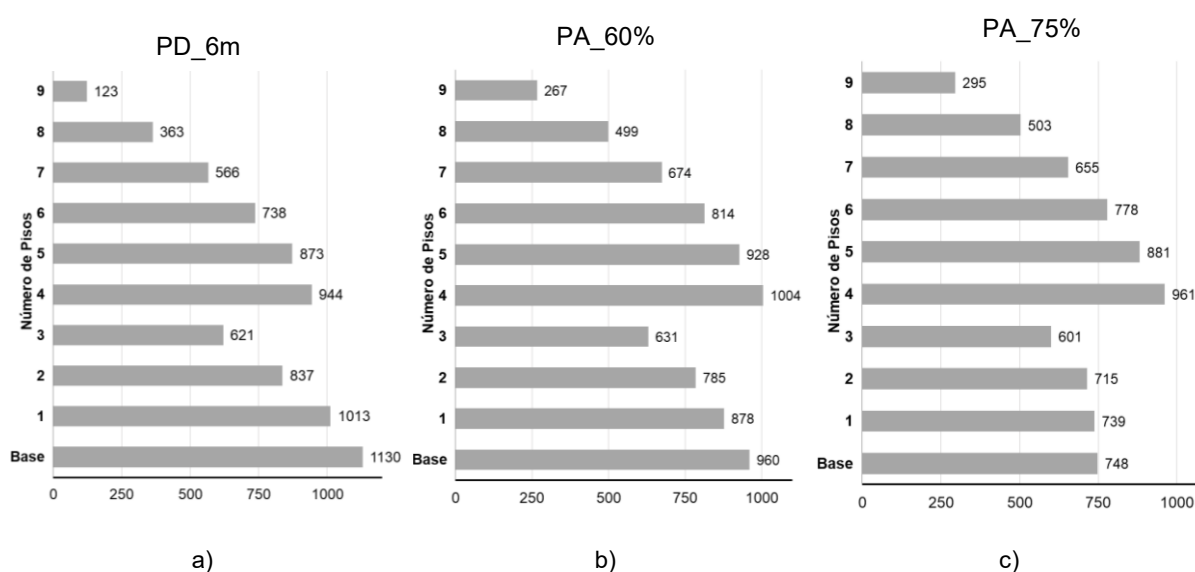


Figura 60 – Força de corte por piso para os diferentes modelos: a) Parede dúctil; b) Parede acoplada CR=60%; c-) Parede acoplada CR= 75%

Percebe-se que a descontinuidade registada do piso 3 para o piso 4 permanece nas configurações de paredes acopladas, e repara-se que a parede acoplada com um CR=60% apresenta uma maior semelhança na distribuição dos esforços pois no caso de CR=75% a variação dos esforços de corte nos três primeiros pisos é mínima.

Entre os modelos analisados, verifica-se que as dimensões das lâminas influenciam significativamente o comportamento ao corte. Ao contrário do que acontece com o momento fletor, onde o binário entre lâminas assume um papel determinante, o esforço de corte depende diretamente da rigidez e continuidade dos elementos verticais. A parede dúctil, com 6 m de comprimento contínuo, apresenta os valores de corte mais elevados, enquanto o modelo PA_75%, com lâminas de apenas 2 m, permite uma maior redistribuição destes esforços para elementos estruturais adjacentes.

Esta redistribuição é particularmente evidente abaixo do piso 3, onde surgem outros elementos verticais com capacidade resistente (como paredes exteriores), que absorvem parte do esforço de corte.

Na Figura 61, ilustra a variação do momento fletor total ao longo da altura. Em todos os modelos, o valor máximo ocorre na base, mas a sua magnitude varia com o grau de acoplamento.

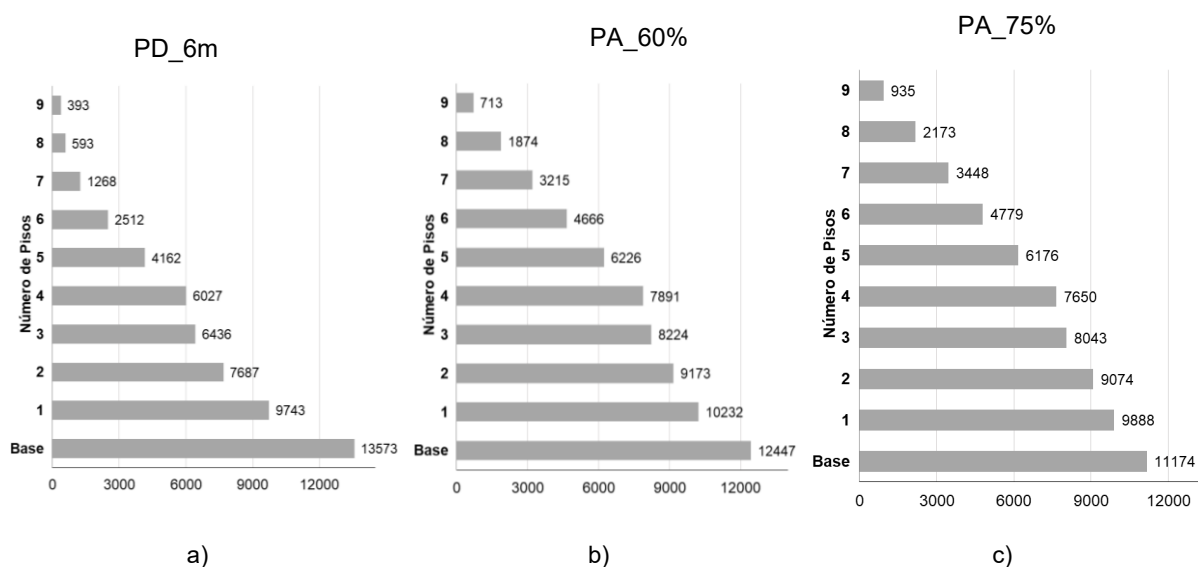


Figura 61 – Momento fletor por piso para os diferentes modelos: a) Parede dúctil; b) Parede acoplada CR=60%; c-) Parede acoplada CR= 75%

Esta redução nos modelos acoplados reflete o papel das vigas na redistribuição dos esforços, aliviando a base e promovendo uma participação mais equilibrada ao longo da altura. Enquanto o modelo com parede dúctil concentra a maioria dos momentos na base, comportamento típico de elementos monolíticos com atuação predominantemente flexional, os modelos com paredes acopladas distribuem os momentos de forma mais uniforme ao longo da altura.

Em síntese, verifica-se que o grau de acoplamento influencia diretamente a forma como os esforços se distribuem ao longo da parede resistente. A presença de acoplamento promove uma partilha mais eficiente dos esforços fletores, reduzindo a solicitação na base e reforçando a atuação dos pisos superiores, o que pode ser vantajoso do ponto de vista do desempenho sísmico, principalmente pelo maior número de rótulas plásticas que é possível formar.

5.7. DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS PD_6M

Após a análise comparativa dos modelos, procede-se ao dimensionamento da parede designada como parede em estudo na configuração PD_6m, de acordo com os critérios para estruturas com comportamento dúctil (DCM). O dimensionamento foi realizado com base nas diretrizes das normas (EC2) e (EC8), assegurando o cumprimento das exigências de ductilidade nas zonas críticas, onde se concentram as deformações inelásticas durante um sismo.

Embora a distribuição dos esforços ao longo da parede tenha sido já analisada na secção 5.6.2, apresenta-se aqui a sua aplicação direta ao dimensionamento. Os valores considerados correspondem à combinação sísmica mais condicionante, resultante da combinação linear $100\%Y + 30\%X$, conforme definido na secção 4.4. Estes esforços foram obtidos diretamente do modelo numérico desenvolvido no SAP2000, sem inclusão dos efeitos de segunda ordem.

A Figura 62 apresenta a distribuição da força de corte e a Figura 63 do momento fletor ao longo da altura da parede, permitindo observar a variação dos esforços entre pisos para a combinação mais solicitante.

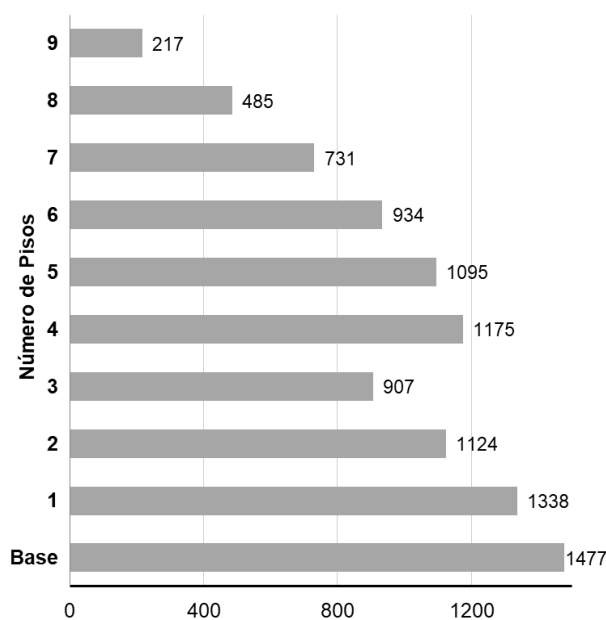


Figura 62 - Força de corte por piso no modelo de parede dúctil

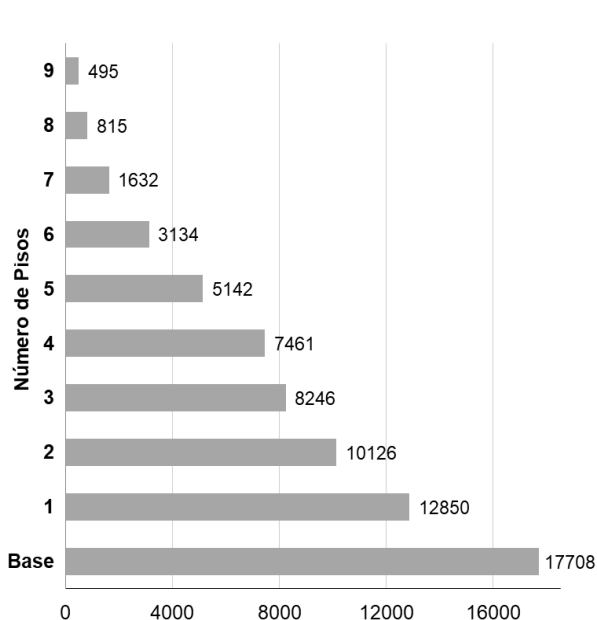


Figura 63 - Momento fletor por piso no modelo de parede dúctil

Tal como esperado, observa-se um crescimento progressivo da força cortante até à base, em resultado da acumulação das forças inerciais. Uma descontinuidade local entre os pisos 3 e 4 é visível, associada à transição geométrica da estrutura. Apesar desta variação, o momento fletor apresenta uma evolução aproximadamente contínua até à base.

Os valores mais significativos concentram-se na base da parede, onde se localiza a zona crítica de dissipação de energia. A distribuição dos momentos indica que a rótula plástica tenderá a desenvolver-se nesta região, justificando a aplicação das disposições do EC8 apenas na zona inferior da parede.

O dimensionamento foi realizado assumindo que a parede está sujeita a flexão desviada, com recurso à folha de cálculo “2D DESIGN ULS” (Pinheiro, Costa e Vila Pouca). A secção transversal adotada

encontra-se representada na Figura 64, com armadura longitudinal e transversal definida em conformidade com os requisitos de ductilidade.

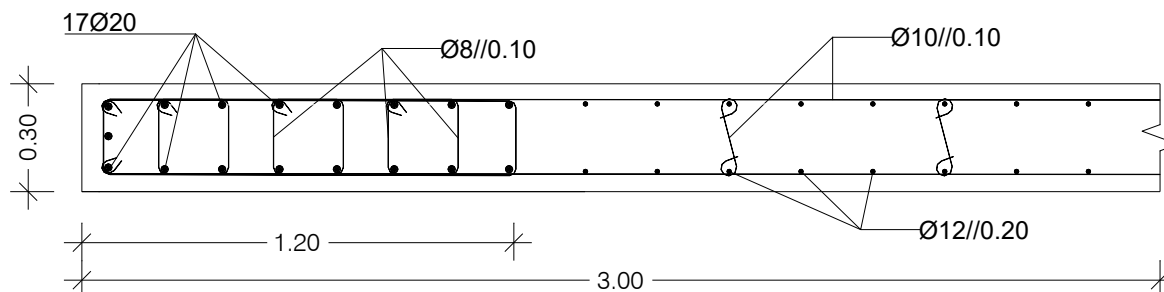


Figura 64 - Secção transversal da parede dúctil

No gráfico de interação (Figura 65), os esforços considerados no gráfico correspondem a combinações de M_x e M_y , e $N_{ed} = 3000$ kN, verificados ao nível da base da parede, estão representados por cruzes vermelhas, correspondendo aos valores de cada combinação de cálculo. Verifica-se que todos os pontos se encontram dentro da envolvente resistente da secção, evidenciando a verificação da segurança. Destaca-se ainda uma margem significativa de sobrerresistência em relação aos momentos M_y .

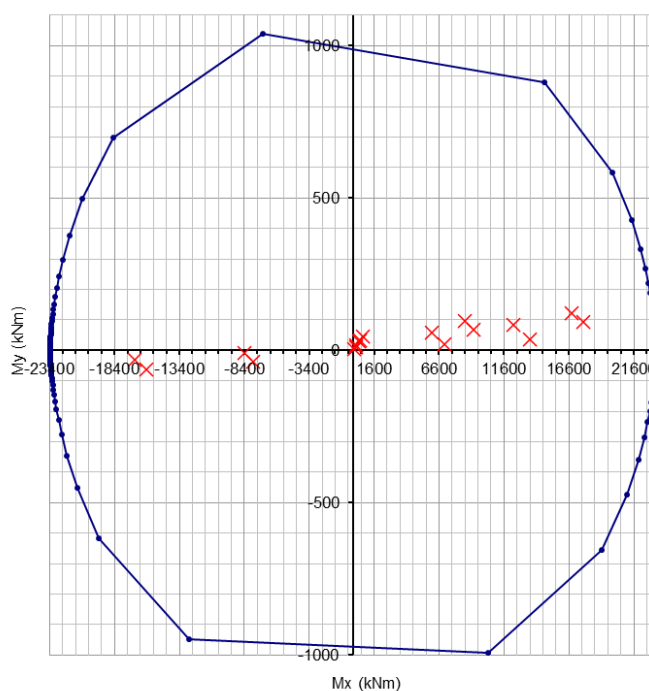


Figura 65 - Gráfico de interação da flexão desviada para a PD_6m

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a parede em estudo cumpre os requisitos de resistência e ductilidade impostos pelo EC8, verificando-se a segurança da secção crítica para as combinações mais exigentes e garantindo um comportamento adequado em situação de sismo.

5.8. DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS PA_60% E DA PA_75%

5.8.1. CÁLCULO DAS ARMADURAS DAS LÂMINAS

Dando continuidade à análise, e após a avaliação global dos esforços, procede-se agora ao dimensionamento das armaduras nas lâminas verticais das configurações com paredes acopladas.

O dimensionamento foi realizado com base nos esforços obtidos diretamente do modelo numérico, considerando todas as combinações sísmicas exigidas pela regulamentação. Para cada lâmina, foram extraídos os esforços máximos por combinação, assegurando a consideração dos cenários mais desfavoráveis. Este procedimento permite verificar o cumprimento das condições de segurança e ductilidade definidas no Eurocódigo 8, sendo igualmente aplicável ao dimensionamento das vigas de acoplamento.

Tal como verificado no estudo paramétrico do Capítulo 4, onde uma das lâminas ficava predominantemente tracionada e a outra comprimida, esse mesmo padrão também se observa nas configurações do caso de estudo quando se analisam apenas os efeitos da ação sísmica. No entanto, ao considerar a combinação com as cargas verticais, verifica-se que ambas as lâminas se encontram sob compressão, devido ao acréscimo da solicitação axial.

Para efeitos comparativos, são apresentados nas Figura 66 e Figura 67 valores da força cortante por piso para as lâminas nos modelos com CR = 60% e CR = 75%, respetivamente, obtidos para a combinação sísmica mais condicionante 100%Y + 30%X.

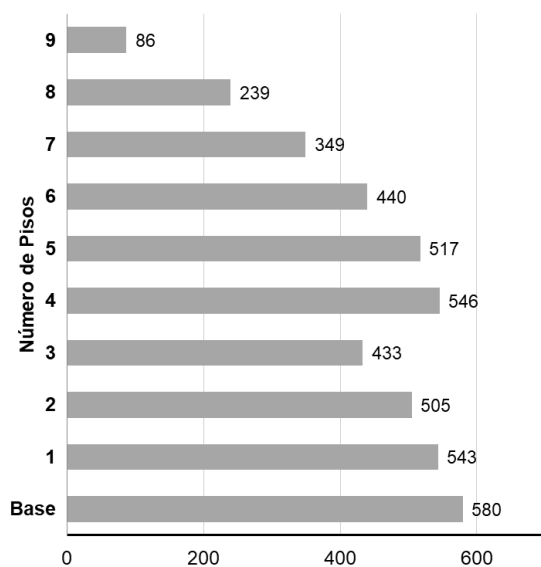


Figura 66 - Força de corte na lâmina da parede acoplada PA_60%

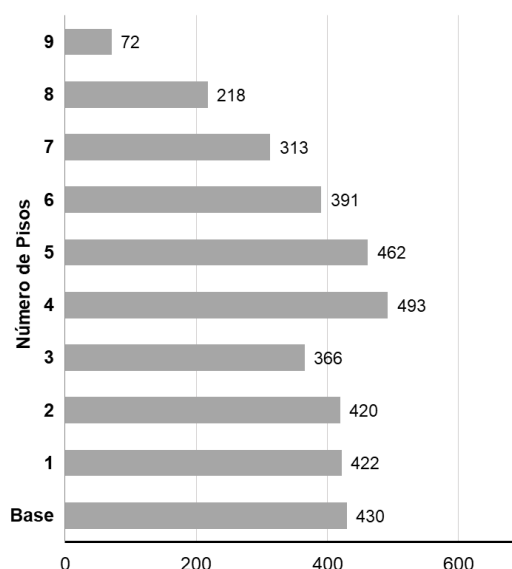


Figura 67 - Força de corte na lâmina da parede acoplada PA_75%

Verifica-se que cada lâmina resiste aproximadamente a 50% do esforço de corte total da parede acoplada, comportamento coerente com a simetria e a presença de uma viga de acoplamento com rigidez suficiente para compatibilizar as deformações. Esta distribuição equilibrada reforça a atuação conjunta das lâminas.

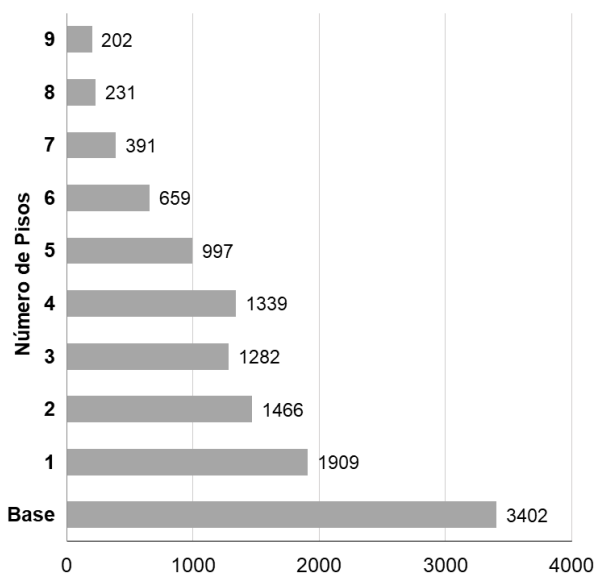


Figura 68 - Momentos fletores por piso na lâmina da parede acoplada PA_60%

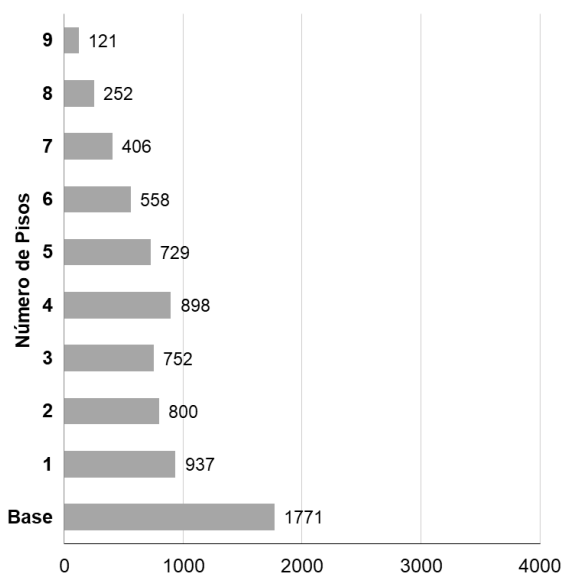


Figura 69 - Momentos fletores por piso na lâmina da parede acoplada PA_75%

No que diz respeito aos momentos fletores, verifica-se que os valores por lâmina correspondem a cerca de 13.5% do momento global na parede para o modelo com CR = 75%, e a cerca de 20% no modelo com CR = 60%, coerente com os coeficientes de acoplamento reais (~77% e ~60%, respetivamente).

Ao contrário do modelo PD_6m e do momento total da parede acoplada, que apresentavam uma redução contínua dos momentos com a altura, nas lâminas observa-se um incremento localizado entre os pisos 3 e 4. Esta inversão da tendência está intimamente associada à descontinuidade geométrica já identificada nesse intervalo, sendo especialmente marcada no modelo PA_75%. Este comportamento mais sensível poderá estar relacionado com o maior espaçamento entre as lâminas e a maior altura das vigas de acoplamento, que amplificam a redistribuição dos esforços fletores ao longo da parede.

Seguindo o mesmo critério adotado para a parede PD_6m, o dimensionamento das lâminas foi realizado considerando as solicitações obtidas nas combinações sísmicas, e aplicando as disposições normativas do EC2 para regiões não dissipativas. Para as armaduras transversais do modelo PA_75 % foi considerado o esforço do piso 4, sendo este maior que na base da lâmina. As secções transversais adotadas são ilustradas nas Figura 70 e Figura 71.

Lâmina CR=60%

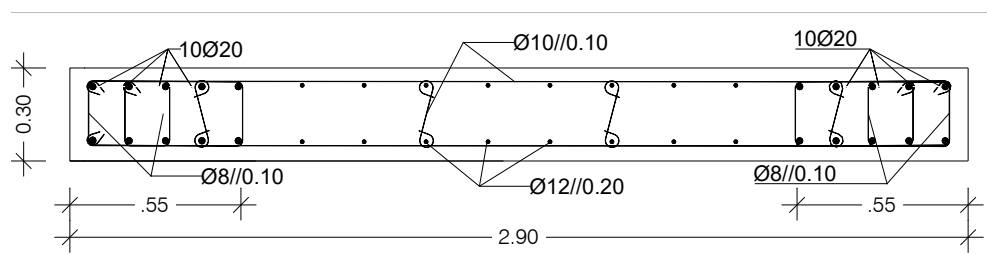


Figura 70 - Secção transversal da lâmina na parede acoplada PA_60%

Lâmina CR=75%

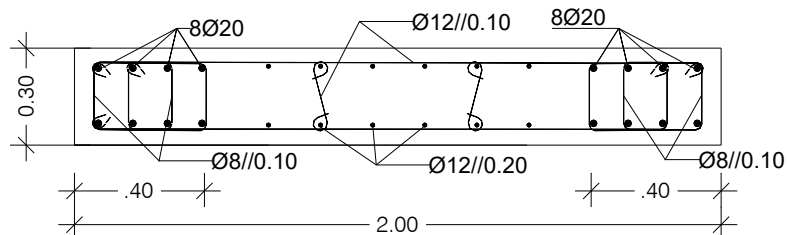


Figura 71 - Secção transversal da lâmina na parede acoplada PA_75%

Os esforços foram combinados em flexão desviada com $N_{ed} = 1000$ kN, e representados nos gráficos de interação das Figura 72 e Figura 73. As cruzes vermelhas correspondem aos valores das combinações de cálculo. Em ambos os casos, verifica-se que todos os pontos se encontram dentro do domínio resistente da secção, demonstrando a verificação da segurança com margem significativa de sobrerresistência em relação aos momentos atuantes.

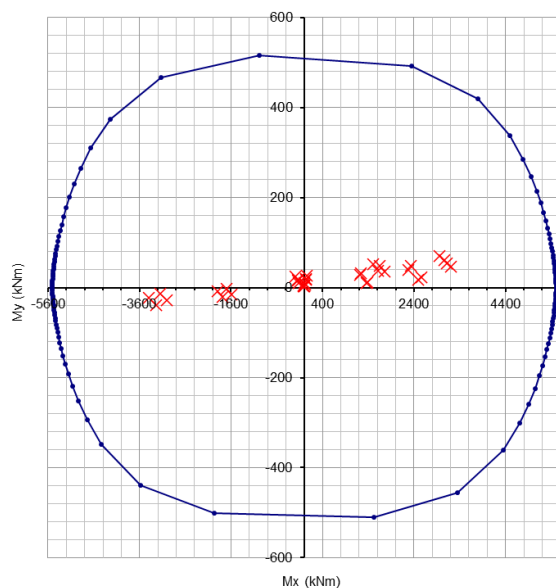


Figura 72 - Gráfico de interação da flexão desviada para a PA_60%

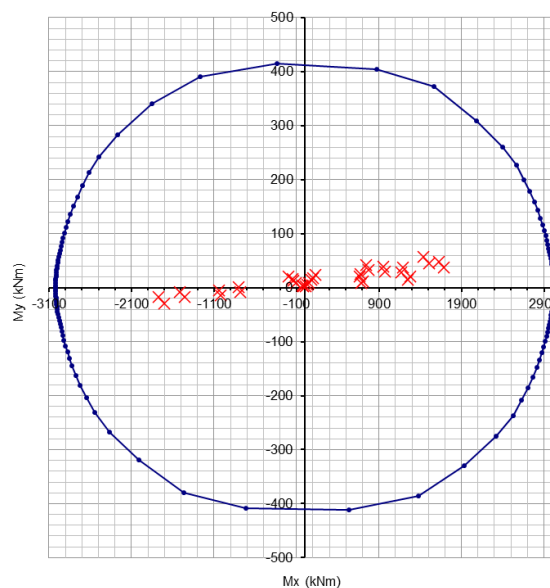


Figura 73 - Gráfico de interação da flexão desviada para a PA_75%

5.8.2. CÁLCULO DAS ARMADURAS NAS VIGAS DE ACOPLAMENTO

Antes de avançar para o dimensionamento das armaduras das vigas de acoplamento, procede-se à análise dos esforços de cálculo obtidos ao longo da altura da parede, com o objetivo de identificar padrões estruturais relevantes e avaliar as implicações no dimensionamento. As Figura 74 e Figura 75 apresentam a distribuição da força cortante por piso e as Figura 76 e Figura 77 mostram os momentos fletores máximos nas vigas de acoplamento para os modelos com CR = 60% e CR = 75%, respetivamente.

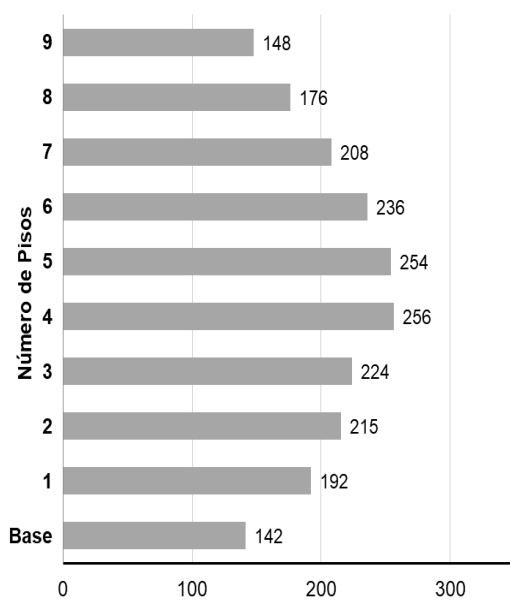


Figura 74 – Força de corte por piso nas vigas de acoplamento para a PA_60%

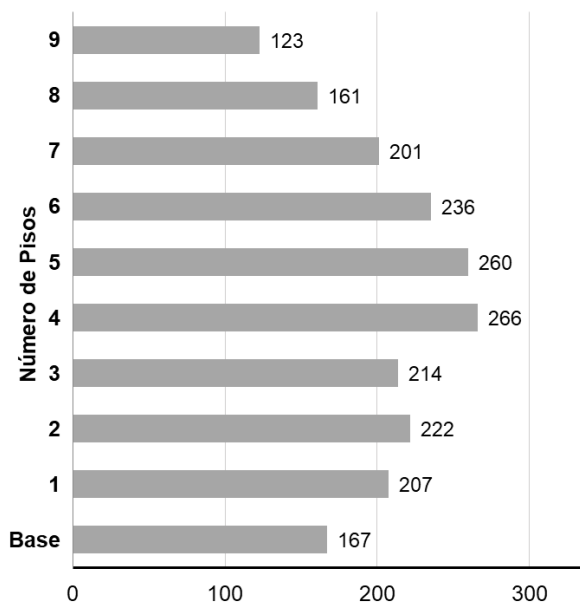


Figura 75 – Força de corte por piso nas vigas de acoplamento para a PA_75%

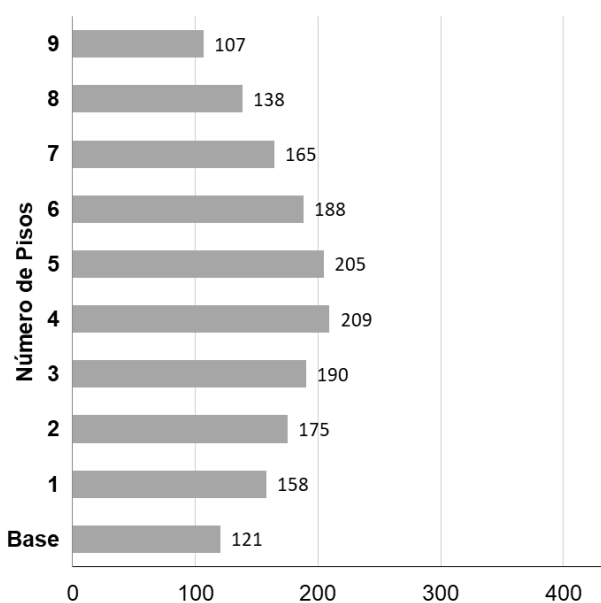


Figura 76 – Momento fletor máximo por piso nas vigas de acoplamento para a PA_60%

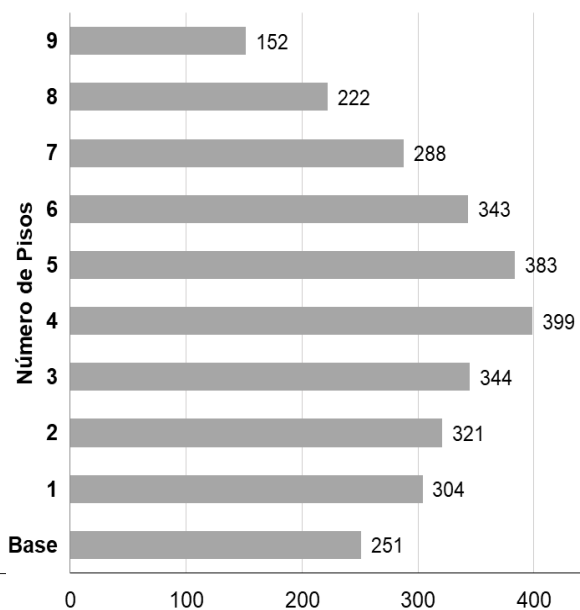


Figura 77 -Momento fletor máximo por piso nas vigas de acoplamento para a PA_75%

Verifica-se que, apesar da diferença no grau de acoplamento, os valores de força cortante por piso são semelhantes entre os dois modelos. Este comportamento é coerente com o papel das vigas na transferência de esforços verticais entre lâminas, assegurando compatibilidade de deformações e continuidade estrutural.

No entanto, observa-se um aumento expressivo dos momentos fletores máximos no modelo com CR=75%. Esta amplificação não resulta diretamente de uma maior rigidez ou inércia da viga, mas deve-se sobretudo ao aumento do braço do binário, ou seja, à maior distância entre as lâminas verticais acopladas. Sendo o momento resultante do produto entre a força de corte transferida e o braço de alavanca entre os seus pontos de aplicação, o incremento da separação entre lâminas conduz inevitavelmente a um aumento da solicitação fletora nas vigas.

Esta tendência evidencia a influência da geometria do sistema acoplado na definição das solicitações internas, reforçando a necessidade de uma análise cuidadosa antes do dimensionamento. A leitura dos esforços obtidos permite antecipar que, embora o corte transferido seja equivalente entre configurações, a variação do braço do binário impõe exigências distintas ao nível da armadura longitudinal. Assim, esta etapa constitui uma base indispensável para a verificação de segurança segundo o Eurocódigo 8.

Dando continuidade ao processo de dimensionamento, a seguir apresenta-se o cálculo das armaduras longitudinais nas vigas de acoplamento, respeitando os critérios normativos definidos para sistemas com comportamento dúctil de classe DCM.

O dimensionamento foi realizado com base nos esforços extraídos do modelo numérico, considerando todas as combinações sísmicas envolvidas, assumindo flexão desviada como mecanismo resistente predominante. Adotou-se uma secção transversal retangular com armadura concentrada nas extremidades superior e inferior, conforme ilustrado nas Figura 78 (PA_75%) e Figura 79 (PA_60%). A armadura transversal foi distribuída uniformemente ao longo do vão, e o esforço axial foi considerado nulo ($N_{ed} = 0$), assumindo-se uma situação conservadora para verificação da flexão desviada.

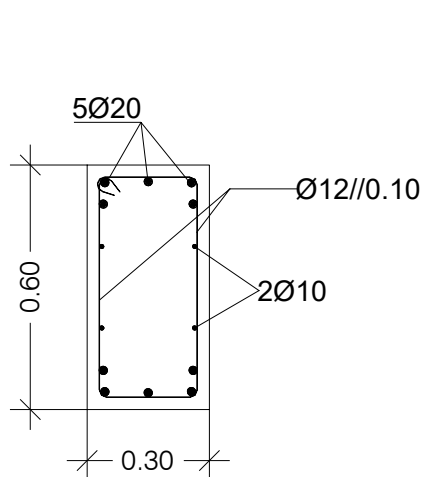


Figura 78 – Secção transversal da viga de acoplamento PA_60%

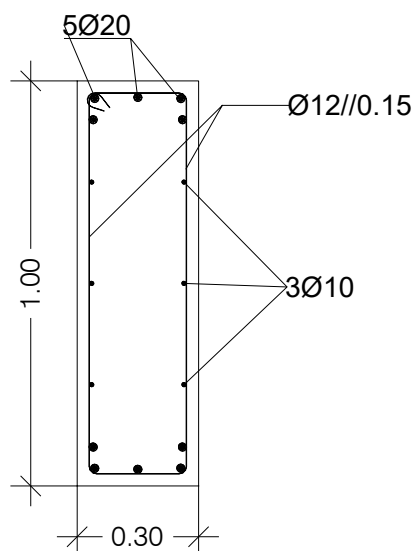


Figura 79 - Secção transversal da viga de acoplamento PA_75%

A verificação da segurança foi realizada com recurso à folha de cálculo “2D DESIGN ULS” (Pinheiro, Costa e Vila Pouca), com base nos pares de valores M_x e M_y representativos das combinações de cálculo. A Figura 80 e Figura 81 apresentam os gráficos de interação para os modelos PA_75% e PA_60%, respetivamente.

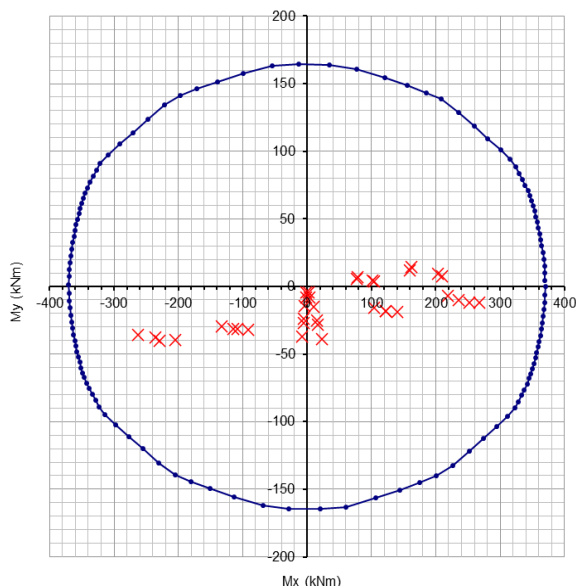


Figura 80 - Gráfico de interação da flexão desviada da viga de acoplamento para PA_60%

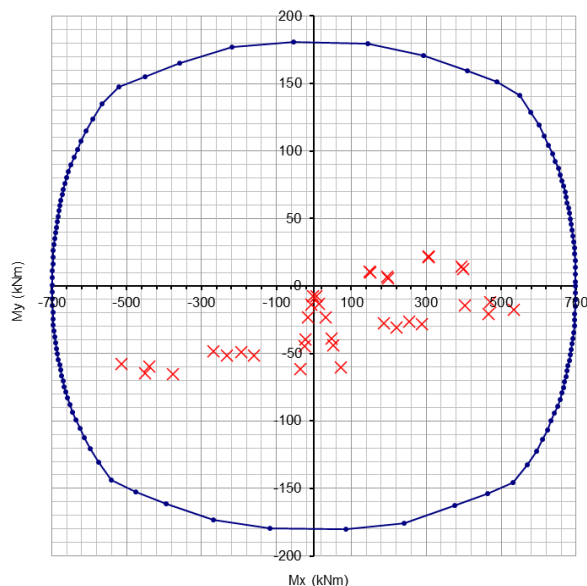


Figura 81 - Gráfico de interação da flexão desviada da viga de acoplamento para PA_75%

Em ambos os casos, todos os pontos se encontram dentro da envolvente resistente da secção, confirmando a verificação da segurança. Verifica-se ainda uma margem significativa de sobrerresistência, mais acentuada no modelo PA_75%, beneficiando da maior altura da secção, que resulta num braço interno mais eficaz.

Assim, conclui-se que, apesar da maior solicitação em momento fletor no modelo com CR = 75%, a solução adotada para a viga foi suficiente para garantir a resistência exigida, sem necessidade de aumento significativo da armadura longitudinal.

De seguida, apresenta-se na Figura 82 e Figura 83 a pormenorização da armadura longitudinal adotada nas vigas de acoplamento para os modelos PA_60% e PA_75%. A solução para a PA_60% contempla uma zona crítica com 0.60 m de comprimento, enquanto para a PA_75% esta zona estende-se por 1.05 m, refletindo a maior solicitação e maior altura da viga. As zonas de ligação entre vigas e lâminas foram definidas de acordo com as regras de pormenorização aplicáveis a nós viga-pilar, assegurando o confinamento adequado das armaduras nas extremidades.

Nas soluções apresentadas, a armadura transversal foi dimensionada com maior densidade nas extremidades das vigas, correspondendo às zonas críticas de ligação com as lâminas, onde se concentram os esforços de corte mais elevados.

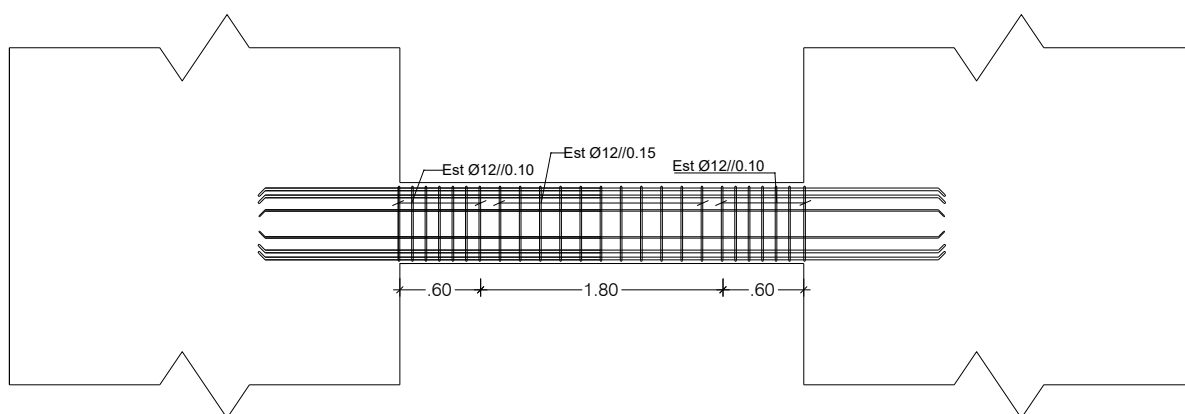


Figura 82 – Secção longitudinal da viga de acoplamento PA_60%

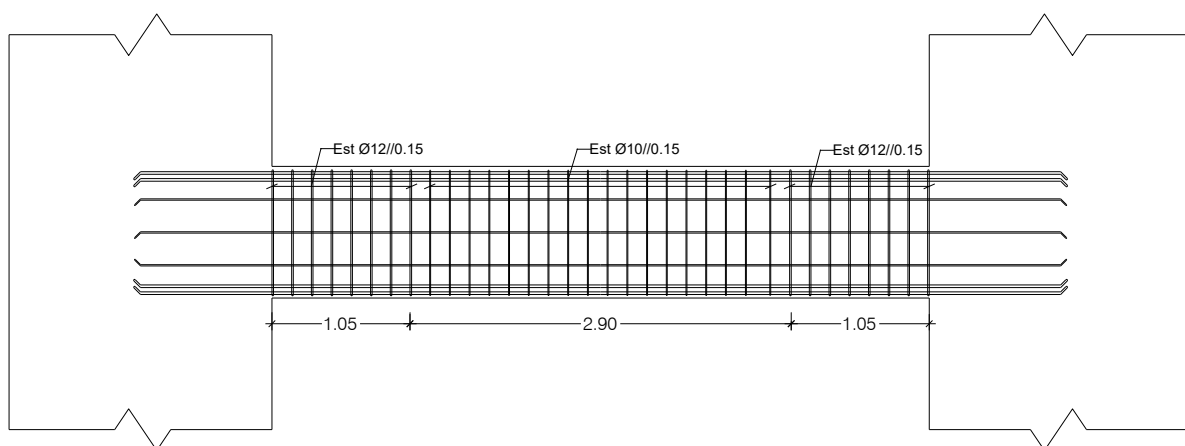


Figura 83 – Secção longitudinal da viga de acoplamento PA_75%

5.9. COMPARAÇÃO DO CONSUMO DE MATERIAIS

Com o objetivo de avaliar a eficiência estrutural e construtiva das diferentes soluções analisadas — parede dútil e paredes acopladas com coeficientes de acoplamento de 75% e 60%, apresenta-se nesta secção uma comparação qualitativa dos consumos de materiais (Figura 84) e da distribuição de armaduras (Figura 85), complementando os dados quantitativos já apresentados nas secções anteriores.

	Betão (m3)	Arm. Long.(m3)	Arm. trans.(m3)
Parede dútil	55.8	0.66	0.48
Parede acoplada CR=75%	55.2	0.59	0.46
Parede acoplada CR=60%	60.42	0.63	0.49

Figura 84 - Volume total dos materiais

A Figura 84 mostra que a parede com CR = 60% apresenta o maior volume total de betão e de armaduras, resultado direto do aumento das dimensões das lâminas verticais. Por outro lado, a solução com CR = 75%, ao recorrer a vigas mais altas e maior espaçamento entre lâminas, permite uma redução global do volume de betão e mantém um consumo de armadura mais equilibrado.

	(%) armadura secção			
	Lâmina		Viga	
	Long	Trans	Long	Trans
Parede acoplada CR=75%	1.35%	1.25%	1.17%	0.42%
Parede acoplada CR=60%	0.71%	0.83%	2.00%	1.00%

Figura 85 - Percentagem de armadura em cada modelo.

A análise das taxas de armadura por elemento (Figura 85) confirma que, para geometrias com menor grau de acoplamento, os valores mais elevados de armadura concentram-se nas vigas. Já para CR mais elevados, as exigências recaem sobretudo nas lâminas, em particular na armadura longitudinal, consequência da sua maior altura e da menor rigidez individual.

Do ponto de vista construtivo e económico, as soluções com paredes acopladas envolvem maior complexidade em obra, exigindo cofragens mais elaboradas, juntas de betonagem, armaduras em espera e um controlo dimensional rigoroso, sobretudo quando se prolongam por vários pisos. Embora não tenha sido realizada uma estimativa de custos detalhada, é expectável que soluções com maior grau de acoplamento apresentem um custo indireto superior, associado ao aumento das exigências em armadura longitudinal e pormenorização. Ainda assim, este acréscimo poderá ser compensado por ganhos estruturais relevantes, como a redução da solicitação na base, a melhoria do desempenho sísmico e a eventual otimização das fundações.

Do ponto de vista arquitetónico e funcional, as paredes acopladas oferecem maior flexibilidade ao projeto, permitindo a abertura de vãos intermédios, zonas técnicas ou passagens entre compartimentos. Esta capacidade de fragmentação da parede resistente em componentes conectados por vigas é altamente valorizada em edifícios residenciais e de serviços, onde a articulação entre compartimentos é um requisito funcional relevante.

Todos estes resultados reforçam a validade da estratégia adotada ao longo do estudo: equiparar a rigidez lateral das soluções para permitir uma comparação objetiva do seu comportamento estrutural. Este princípio revelou-se essencial para isolar os efeitos do acoplamento e confirmar que, quando bem dimensionadas, as paredes acopladas são soluções não só eficientes em termos sísmicos, como também potencialmente vantajosas do ponto de vista construtivo e funcional.

6

CONCLUSÕES

6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho permitiu avaliar o desempenho estrutural de paredes acopladas com diferentes configurações geométricas, com base em modelação numérica, expressões analíticas e verificação normativa segundo os Eurocódigos. Através da investigação retirou-se um conjunto de conclusões com aplicação prática no dimensionamento de edifícios em zonas sísmicas, contribuindo para a definição de soluções equiparadas em termos de rigidez lateral, principalmente numa fase de conceção, que se apresenta nos próximos parágrafos.

A modelação com elementos de barra ligados a um único nó revelou-se inadequada para representar vigas de acoplamento, uma vez que dificulta a transferência correta dos esforços de corte da viga para esforços axiais nas lâminas. Nestes casos, a modelação com elementos de casca ou a ligação com elemento de barra a vários nós é essencial, pois possibilita capturar a distribuição de tensões ao longo da secção da viga, refletindo de forma mais fiel o seu contributo para a rigidez e o comportamento global da parede.

Importa destacar, a utilidade prática das equações aplicadas na conceção e no pré-dimensionamento de paredes acopladas. Dada a multiplicidade de parâmetros geométricos envolvidos, torna-se difícil, numa fase inicial de projeto, estimar com precisão a rigidez global do sistema. As expressões utilizadas ultrapassam esta dificuldade, ao possibilitarem a equiparação da rigidez de um sistema acoplado à de uma parede dúctil equivalente.

Além disso, estas equações permitem estimar o coeficiente de acoplamento (CR), proporcionando uma aproximação à redistribuição dos esforços entre as lâminas e as vigas de acoplamento, o que se revela essencial para orientar decisões de projeto nas fases iniciais.

Verificou-se que vigas com uma relação comprimento/altura elevada impõem implicações significativas no comportamento estrutural. Por um lado, ocorre um aumento expressivo do esforço de corte nas vigas de acoplamento, por outro, esse esforço é transferido para as lâminas sob a forma de esforço axial, o que pode comprometer o cumprimento das normas. Esta combinação gera limitações ao nível da ductilidade e pode conduzir a situações de instabilidade estrutural em caso de ações sísmicas.

No que respeita ao coeficiente de acoplamento, verificou-se que valores excessivamente elevados ou demasiado reduzidos tendem a gerar desequilíbrios estruturais:

- Para valores de CR elevados, o principal desafio encontra-se nas lâminas. A rigidez exigida às vigas de acoplamento obriga à redução do comprimento das lâminas, de forma a garantir uma rigidez global compatível. Esta limitação conduz a esforços axiais elevados nas paredes e a limitações ao nível da ductilidade. Além disso, o menor comprimento da lâmina intensifica a solicitação de corte nas vigas, exigindo armaduras transversais reforçadas para assegurar a resistência ao corte.
- Para CR reduzidos, embora os esforços principais se concentrem nas lâminas, as vigas de acoplamento apresentam uma altura reduzida, tornando-se o elemento mais crítico. Nestes casos, a baixa inércia das vigas conduz a solicitações de corte igualmente elevadas, impondo requisitos significativos ao nível da armadura transversal, sobretudo para garantir a segurança em zonas críticas.
- Na distribuição de esforços nas vigas ao longo da altura das paredes para um CR elevado apresenta uma forte concentração nos pisos inferiores e uma rápida queda nos superiores, evidenciando uma atuação localizada da ligação, para CR mais reduzidos mostra uma distribuição mais equilibrada entre pisos.

Por fim, para edifícios de altura intermédia, verifica-se que para as diferentes configurações, em termos de desempenho estrutural e de custos de material, as diferenças entre as soluções analisadas são pouco significativas. No entanto, as paredes acopladas exigem maior complexidade construtiva e implicam maior tempo de execução, o que se traduz em maior custo de mão de obra. Apesar de se tratar de soluções estruturalmente mais dispendiosas, a sua adoção pode bastante relevante em contextos com restrições arquitetónicas, condicionantes funcionais, ou o tipo de uso dado à estrutura.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Apesar da abrangência e profundidade do estudo desenvolvido, existem diversas possibilidades de continuação e aprofundamento do trabalho, que poderão contribuir para uma compreensão mais alargada e realista do comportamento estrutural de paredes acopladas em contexto sísmico.

Uma possibilidade imediata consiste na aplicação da metodologia a edifícios de maior altura, com 20 pisos ou mais, onde a contribuição das paredes acopladas tende a assumir um papel ainda mais significativo na resposta sísmica do sistema.

Outra linha de continuidade consiste na exploração de diferentes proporções entre o comprimento da viga de acoplamento e a altura das lâminas. O presente trabalho adotou uma razão igual a 5, mas seria pertinente analisar o comportamento estrutural para rácios mais reduzidos, entre 3.5 e 4, de modo a verificar a influência desta razão na eficiência do mecanismo de ligação.

Adicionalmente, a introdução de modelos não lineares com comportamento histerético permitiria avaliar a dissipação de energia e a resposta pós-elástica das ligações entre lâminas. Esta abordagem é particularmente relevante para estudar a formação e propagação de rótulas plásticas, a degradação de rigidez e os efeitos cumulativos de ciclos de carga.

A par disso, a adoção de métodos de análise incremental dinâmica (pushover ou time-history) viabilizaria o estudo da resposta sísmica sob ações severas, ultrapassando as limitações impostas pela análise linear elástica. Estes métodos são particularmente úteis na verificação da capacidade resistente de estruturas sujeitas a solicitações sísmicas intensas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TARANATH. Bungale, S. *Reinforced concrete design of tall buildings*. Boca Raton: CRC press, 2010. <https://civilengineering.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/10/reinforced-concrete-design-of-tall-building.pdf>
- [2] APPLETON, Júlio. *Estruturas de Betão*. 3ª edição. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.
- [3] LOPES, M. *Sismos e Edifícios*. 1ª edição. Lisboa: IST Press, 2009.
- [4] MOEHLE, J. Gedhada, R. HOOPER, J. *Seismic Design of Cast-in-Place Concrete Special Structural Walls and Coupling Beams*. EUA: National Institute of Standards and Technology (NIST). 2016. Disponível em: <https://www.nehrp.gov/pdf/nistgcr11-917-11.pdf>
- [5] MOEHLE, J. *Seismic design of reinforced concrete buildings*. New York: McGraw-Hill Education, 2015.
- [6] CEN – COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. *EN 1998-1: Eurocódigo 8 – Projeto de Estruturas para Resistência aos Sismos: Parte 1*. Instituto Português da Qualidade, 2010
- [7] HARRIES, K. MOULTON, J. CLEMSON, R. *Parametric Study of Coupled Wall Behavior—Implications for the Design of Coupling Beams*. *Journal of Structural Engineering*. 2004 <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%2907339445%282004%29130%3A3%28480%29>
- [8] El-tawil, S. Fortney, P. Harries, K. *Recommendations for Seismic Design of Hybrid Coupled Wall Systems*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2009: <https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784410608>
- [9] Smith, S. Coull, A. *Tall Building Structures: Analysis and Design*. 1ª edição. New York (EUA) e Canadá: John Wiley & Sons, Inc., 1991. Wiley-Interscience publication.
- [10] Munthe, A. Nalahuddin, T *Coupling beam design with special moment frame and special reinforced concrete shear walls*. *Neutron*. 2019, 28–41. <https://ejournal.worldconference.id/index.php/neutron/article/view/75>
- [11] Zhang, L. Liu, T. Chen, Y. *Calculations of additional axial force and coupling ratio for coupled shear walls*. *Structures*. 2023,, 1531–1547. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352012422011602>
- [12] LOPES, M. BENTO, R. *Modelação Fisicamente Não Linear de Estruturas de Betão Armado*. 1999.
- [13] MOEHLE, J. Gedhada, R. HOOPER, J. *Seismic Design of Cast-in-Place Concrete Special Structural Walls and Coupling Beams*. EUA: National Institute of Standards and Technology (NIST). 2016. Disponível em: <https://www.nehrp.gov/pdf/nistgcr11-917-11.pdf>
- [14] VALENTE, J. *Dimensionamento Sísmico com Diferentes Classes de Ductilidade- Impacto no Projeto de Edifícios com Paredes Estruturais*. *Dissertação Mestrado, FEUP*, 2023.
- [15] César, M. OLIVEIRA, D. *Comportamento sísmico de edifícios com paredes resistentes*. 7º congresso de sismologia e engenharia sísmica. 2007

- [16] Patel, P. Pandya, D. *A Study on Seismic Behaviour of Symmetrical Coupled Shear Wall Systems with Different Height to Depth Ratio of Coupling Beams*. 2019.
- [17] COULL, A. CHOUDHURY, J. *Analysis of Coupled Shear Walls*. *ACI Journal Proceedings*. 1967.
- [18] Xiaodong, J. CHENG, X. *Coupled axial tension-shear behavior of reinforced concrete walls*. *Engineering Structures*. 2018,, 132–142.
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029617333357>
- [19] GAMA, M. *Dimensionamento Sísmico de edifícios de betão armado - Estudo de diferentes soluções envolvendo paredes estruturais*. *Dissertação Mestrado, FEUP*, 2023.
- [20] CSi. (2025). SAP2000 v25, Computers and Structures, Inc., EUA. [Online]. Disponível: <https://www.csiamerica.com/products/sap2000/enhancements/26>.
- [21] Sakr, M. Darwish, M. *A review on coupling beam types in coupled shear wall*. *International Conference on Advances in Structural and Geotechnical Engineering*. 2023.
- [22] RUFINO, R. *Modelação de Paredes Resistentes em Edifícios de Betão Armado*. *Dissertação Mestrado, UNL*, 2011.
- [23] ZHANG, Z. DING, R. FAN, J. *Numerical study of reinforced concrete coupled shear walls based on a two-dimensional finite element model*. *Engineering Structures*. 2021, <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029621009421>
- [24] BREÑA, S. F., & IHTIYAR, O. *Assessment of FEMA 356 Techniques for Orthogonally Reinforced Coupling Beams Through Experimental Testing*. In *2007 ASCE Structures Congress: Structural Engineering Research Front*.
- [25] BEZELGA, J. *Vigas de Acoplamento de Paredes Estruturais*. *Dissertação Mestrado, IST*, 2015.
- [26] CHOI, Y. HAJYALIKHANI, P. CHAO, S.. *Seismic Behavior of RC Coupling Beams with Simplistic Reinforcement Layout*. In: *16th World Conference on Earthquake Engineering (16WCEE)*. Santiaio, Chile: International Association for Earthquake Engineering. 2017.: <https://www.wcee.nicee.org/wcee/article/16WCEE/WCEE2017-2859.pdf>
- [27] HARRIES, K. MOULTON, J. CLEMSON, R. *Study of major design parameters affecting the behaviour of coupled core wall systems*. https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_3312.pdf
- [28] Paulay, T., & Binney, J. R. *Diagonally Reinforced Coupling Beams of Shear Walls*. *ACI Special Publication*, 42, 579–598. 1974
- [29] CEN – COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. EN 1992-1-1: Eurocódigo 2 - Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. Instituto Português Da Qualidade.