

ANÁLISE SÍSMICA DE NÚCLEOS DE BETÃO COM IRREGULARIDADES EM ALTURA

MATHEUS LUIS REIS AMARAL

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA PARA SATISFAÇÃO PARCIAL DOS REQUISITOS DO GRAU DE
MESTRE EM ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL

ORIENTADOR: PROFESSOR DOUTOR NELSON SARAIVA VILA POUCA

JUNHO DE 2025

MESTRADO EM ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL 2024/2025

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

TEL. +351-22-508 1901

✉ MESTEC@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](http://www.fe.up.pt)

REPRODUÇÕES PARCIAIS DESTE DOCUMENTO SERÃO AUTORIZADAS NA CONDIÇÃO QUE SEJA MENCIONADO O AUTOR E FEITA REFERÊNCIA A *MESTRADO EM ESTRUTURAS DE 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.

RESUMO

A grande utilização de núcleos em betão armado como principal sistema resistente lateral em edifícios de altura intermédia tem trazido desafios adicionais ao projeto estrutural, sobretudo quando a configuração arquitetónica exige aberturas verticais para circulação ou instalações. A presença dessas aberturas pode comprometer a rigidez, a distribuição de esforços e o desempenho sísmico do edifício, particularmente em zonas de moderada sismicidade como o território português. Neste contexto, a presente investigação teve como objetivo analisar, quantificar e comparar os efeitos da geometria e disposição de aberturas verticais no comportamento sísmico de núcleos estruturais, com vista a fundamentar decisões de projeto mais seguras e informadas.

Após uma revisão teórica dos conceitos fundamentais — incluindo resposta dinâmica de edifícios, atuação de diafragmas de laje, comportamento de paredes de corte e mecanismos associados às irregularidades geométricas — desenvolveu-se uma campanha de modelação numérica com recurso ao software Autodesk Robot Structural Analysis. O edifício de referência possui 14 pisos e núcleo central com paredes em “E”, servindo de base para simular diferentes configurações de aberturas com impacto potencial no comportamento lateral. As variantes consideradas incluíram padrões com aberturas contínuas bilaterais, unilaterais, escalonadas e alternadas entre pisos, além de versões em que uma parede era totalmente suprimida.

Os resultados demonstraram que a forma como as aberturas se distribuem ao longo da altura do edifício tem influência tanto quanto a que a sua quantidade total. Configurações com aberturas contínuas bilaterais causaram perdas expressivas de rigidez e aumentaram significativamente os efeitos torsionais, enquanto soluções escalonadas e alternadas mostraram desempenho estrutural mais favorável, reduzindo derivas e concentrando menos tensões nas zonas críticas.

Concluiu-se que a continuidade vertical das aberturas, a sua lateralidade e a repetição geométrica entre pisos são fatores determinantes para o desempenho sísmico do núcleo. Recomenda-se, portanto, evitar padrões contínuos simétricos e favorecer disposições alternadas ou escalonadas, sempre que possível, além de prever mecanismos de acoplamento e reforço local quando a remoção de segmentos estruturais for inevitável. A investigação atinge assim os objetivos propostos, contribuindo com dados comparativos e diretrizes práticas que auxiliam na compatibilização entre exigências arquitetónicas e segurança estrutural em edifícios de média altura.

Palavras-Chave: Núcleo de betão armado, Ações sísmicas, Irregularidades Verticais, Rigidez Lateral, Modelação Numérica.

ABSTRACT

The high usage of reinforced concrete cores as the primary lateral load-resisting system in mid-rise buildings presents additional challenges to structural design, particularly when architectural requirements call for vertical openings to accommodate circulation or utilities. Such openings can significantly affect the stiffness, force distribution, and seismic performance of the structure, especially in regions of moderate seismicity, such as Portugal. In this context, the present study aims to analyze, quantify, and compare the effects of the geometry and layout of vertical openings on the seismic behavior of structural cores, providing design-oriented conclusions based on numerical evidence.

Following a theoretical review of key concepts—including dynamic response of buildings, diaphragm action of slabs, shear wall behavior, and the mechanics of geometric irregularities—a numerical modelling campaign was conducted using Autodesk Robot Structural Analysis. A 14-storey reference building with a central core composed of E-shaped shear walls was used as the basis for parametric simulations involving different opening patterns with potential impact on lateral performance. Variants included continuous bilateral openings, unilateral configurations, staggered arrangements, and alternating openings between stories, as well as versions with full removal of one wall segment.

The results indicated that the vertical distribution pattern of the openings has a big decisive influence like the total opening area. Configurations with continuous bilateral openings led to substantial stiffness loss and significantly amplified torsional effects, whereas staggered and alternating arrangements exhibited more favorable performance, with reduced interstorey drifts and less stress concentration in critical zones.

The study concludes that vertical continuity, asymmetry, and repetition of openings across floors are key factors in determining the seismic performance of core walls. It is therefore recommended to avoid continuous symmetric layouts and to adopt staggered or alternating opening patterns wherever possible. When the removal of structural segments is unavoidable, appropriate coupling mechanisms and local reinforcement strategies should be provided. The research successfully meets its objectives by offering comparative data and practical guidelines that support the reconciliation of architectural requirements with structural safety in mid-rise seismic design.

Keywords: Reinforced Concrete Core, Seismic Actions, Vertical Irregularities, Lateral Stiffness, Numerical Modelling.

ÍNDICE GERAL

1	INTRODUÇÃO	1
1.1.	ENQUADRAMENTO GERAL	1
1.2.	MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	1
1.2.1.	MOTIVAÇÃO	1
1.2.2.	OBJETIVOS	2
1.3.	ESTRUTURA E METODOLOGIA DO TRABALHO	2
1.4.	RELEVÂNCIA E CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS	3
2	ENQUADRAMENTO E REVISÃO TEÓRICA	5
2.1.	DINÂMICA SÍSMICA DE EDIFÍCIOS DE ALTURA INTERMÉDIA	5
2.2.	COMPARAÇÃO DE SISTEMAS RESISTENTES LATERAIS	6
2.3.	MODELOS MECÂNICOS DE PAREDES/NÚCLEOS	7
2.4.	RAZÕES GEOMÉTRICAS E IMPORTÂNCIAS	8
2.5.	RIGIDEZ NO PLANO DOS DIAFRAGMAS DE LAJE	8
2.6.	REVISÃO DOS ESTUDOS DE IRREGULARIDADES EM NÚCLEOS	9
2.7.	INDICADORES DE ANÁLISE DE CORTE E MOMENTO	11
3	CASO DE ESTUDO – ANÁLISE SÍSMICA DO EDIFÍCIO COM NÚCLEO SEM IRREGULARIDADES	13
3.1.	DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO E OBJETO DE ESTUDO	14
3.2.	MODELAÇÃO DA ESTRUTURA	16
3.3.	DEFINIÇÃO DAS AÇÕES	19
3.3.1.	CARGAS GRAVÍTICAS	19
3.3.2.	AÇÕES SÍSMICAS	20
3.4.	ANÁLISE COMPORTAMENTO DINÂMICO	21
3.4.1.	ANÁLISE DOS PERÍODOS E FREQUÊNCIAS	22
3.4.2.	ANÁLISE DE DRIFTS E DESLOCAMENTOS	25
3.5.	ANÁLISE DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS	26
3.5.1.	ESFORÇOS DE CORTE E DISTRIBUIÇÃO NOS ELEMENTOS DE CONTRAVENTAMENTO	26
3.5.2.	ANÁLISE DOS ESFORÇOS NO NÚCLEO	30
4	CASO DE ESTUDO – ANÁLISE SÍSMICA DO EDIFÍCIO COM NÚCLEO COM DIFERENTES IRREGULARIDADES	33

4.1. CONFIGURAÇÃO DE ANÁLISE	33
4.1.1. MODELO A.....	33
4.1.2. MODELO B.....	34
4.1.3. MODELO C.....	34
4.1.4. MODELO D.....	35
4.1.5. PROPOSTA DE ANÁLISE.....	35
4.2. COMPARATIVO DA RESPOSTA GLOBAL	36
4.2.1. COMPARATIVO DE PERÍODOS	36
4.2.2. COMPARATIVO ENTRE DRIFTS E DESLOCAMENTOS	38
4.3. COMPARATIVO DE FORÇAS ENTRE OS ELEMENTOS VERTICAIS	44
4.3.1. ANÁLISE GLOBAL ENTRE PISOS.....	44
4.4. ANÁLISE DETALHADA DE FORÇAS ENTRE MODELOS	47
4.4.1. MODELO A.....	48
4.4.2. MODELO B.....	51
4.4.3. MODELO C.....	54
4.4.4. MODELO D.....	57
4.4.5. SÍNTESE GERAL DO COMPARATIVO ENTRE FORÇAS DE CORTE NOS PISOS E MODELOS	60
4.5. ANÁLISE LOCAL DO NÚCLEO COM BASE NAS RAZÕES R_x E R_y.....	61
4.5.1. MODELO A.....	62
4.5.2. MODELO B.....	64
4.5.3. MODELO C.....	66
4.5.4. MODELO D.....	68
4.5.5. SÍNTESE GERAL ANÁLISE DOS FATORES R ENTRE MODELOS.....	71
 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	 73
5.1. CONCLUSÕES GERAIS	73
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	74

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PLANTA PISO TIPO - EDIFÍCIO DE ESTUDO	15
FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO DOS ELEMENTOS FINITOS PISO TIPO	17
FIGURA 3 - DESCRIÇÃO ELEMENTOS FINITOS NÚCLEO	18
FIGURA 4 - MODELO DE CÁLCULO	19
FIGURA 5 - ESPECTRO DE CÁLCULO CONSIDERADO.....	21
FIGURA 6 - MODO DE VIBRAÇÃO 1 - TRANSLAÇÃO EM Y – VISÃO 3D	23
FIGURA 7 - MODO DE VIBRAÇÃO 1 - TRANSLAÇÃO EM Y – VISÃO EM PLANTA	23
FIGURA 8 - MODO DE VIBRAÇÃO 2 - TRANSLAÇÃO EM X – VISÃO 3D	24
FIGURA 9 - MODO DE VIBRAÇÃO 3 - TORÇÃO – VISÃO 3D.....	24
FIGURA 10 - DRIFT RELATIVO ENTRE PISOS PARA MODELO 0	25
FIGURA 11 - DISTRIBUIÇÃO DE FORÇAS X E Y POR PISO - MODELO 0 – COMBINAÇÃO X.....	27
FIGURA 12 – DISTRIBUIÇÃO DE FORÇAS X E Y POR PISO - MODELO 0 – COMBINAÇÃO Y	29
FIGURA 13 - GEOMETRIA MODELO A	34
FIGURA 14 - GEOMETRIA MODELO B	34
FIGURA 15 - GEOMETRIA MODELO C	35
FIGURA 16 - GEOMETRIA MODELO D	35
FIGURA 17 - COMPARATIVO PERÍODO T1 (TRANSLAÇÃO EM Y) ENTRE MODELOS.....	37
FIGURA 18 - COMPARATIVO PERÍODO T2 (TRANSLAÇÃO EM X) ENTRE MODELOS.....	37
FIGURA 19 - COMPARATIVO PERÍODO T3 (TORÇÃO) ENTRE MODELOS.....	38
FIGURA 20 - DRIFT RELATIVO ENTRE PISOS NA DIREÇÃO X	40
FIGURA 21 - DRIFT RELATIVO ENTRE PISOS NA DIREÇÃO Y	42
FIGURA 22 - DISTRIBUIÇÃO DE FORÇAS Fx COMBINAÇÃO X - MODELOS 0/A/A+	50
FIGURA 23 - DISTRIBUIÇÃO DE FORÇAS Fx COMBINAÇÃO X - MODELOS 0/B/B+	53
FIGURA 24 - DISTRIBUIÇÃO DE FORÇAS Fx COMBINAÇÃO X - MODELOS 0/C/C+	56
FIGURA 25 - DISTRIBUIÇÃO DE FORÇAS Fx COMBINAÇÃO X - MODELOS 0/D/D+	59

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - DIMENSÕES ELEMENTOS ESTRUTURAIS DO ESTUDO DE CASO	16
TABELA 2 - CARGAS APLICADAS NO MODELO	20
TABELA 3 - VALORES PARÂMETROS AÇÃO SÍSMICA	21
TABELA 4 - MODOS DE VIBRAÇÃO E PERÍODOS MODELO 0	22
TABELA 5 - DISTRIBUIÇÃO DE FORÇAS DE CORTE POR PISO - COMBINAÇÃO X.....	27
TABELA 6 - DISTRIBUIÇÃO DE FORÇAS DE CORTE POR PISO - COMBINAÇÃO Y.....	28
TABELA 7 - RAZÕES FATOR R PARA MODELO 0	31
TABELA 8 - VARIAÇÃO DOS PERÍODOS DE VIBRAÇÃO ENTRE MODELOS	36
TABELA 9 - DRIFTS RELATIVOS (%) NA DIREÇÃO X.....	39
TABELA 10 - DRIFTS RELATIVOS (%) NA DIREÇÃO Y	41
TABELA 11 – DRIFT RELATIVO MÁXIMO PARA ELEMENTOS VERTICAIS	43
TABELA 12 - DISTRIBUIÇÃO E COMPARATIVO DE FORÇAS ENTRE ELEMENTOS - COMBINAÇÃO X.....	45
TABELA 13 - DISTRIBUIÇÃO E COMPARATIVO DE FORÇAS ENTRE ELEMENTOS - COMBINAÇÃO Y	46
TABELA 14 - VARIAÇÕES DE FORÇAS DE CORTE ENTRE ELEMENTOS E PISOS - MODELO A.....	48
TABELA 15 - VARIAÇÕES DE FORÇAS DE CORTE ENTRE ELEMENTOS E PISOS - MODELO A+.....	49
TABELA 16 - VARIAÇÕES DE FORÇAS DE CORTE ENTRE ELEMENTOS E PISOS - MODELO B.....	52
TABELA 17 - VARIAÇÕES DE FORÇAS DE CORTE ENTRE ELEMENTOS X PISOS - MODELO B+.....	52
TABELA 18 - VARIAÇÕES DE FORÇAS DE CORTE ENTRE ELEMENTOS X PISOS - MODELO C	55
TABELA 19 - VARIAÇÕES DE FORÇAS DE CORTE ENTRE ELEMENTOS X PISOS - MODELO C+	55
TABELA 20 - VARIAÇÕES DE FORÇAS DE CORTE ENTRE ELEMENTOS X PISOS - MODELO D	58
TABELA 21 - VARIAÇÕES DE FORÇAS DE CORTE ENTRE ELEMENTOS X PISOS - MODELO D+	58
TABELA 22 - VARIAÇÕES FATORES R ENTRE PISOS - MODELO A.....	62
TABELA 23 - VARIAÇÕES FATORES R ENTRE PISOS - MODELO A+.....	62
TABELA 24 - VARIAÇÕES FATORES R ENTRE PISOS - MODELO B.....	64
TABELA 25 - VARIAÇÕES FATORES R ENTRE PISOS - MODELO B+.....	65
TABELA 26 - VARIAÇÕES FATORES R ENTRE PISOS - MODELO C	67
TABELA 27 - VARIAÇÕES FATORES R ENTRE PISOS - MODELO C+	67

TABELA 28 - VARIAÇÕES FATORES R ENTRE PISOS - MODELO D	69
TABELA 29 - VARIAÇÕES FATORES R ENTRE PISOS - MODELO D+	69

ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AN-PT	ANEXO NACIONAL A PORTUGAL
CAD	COMPUTER-AIDED DESIGN
CEN	COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO
EC8	EUROCÓDIGO 8
EN	EUROPEAN NORM (NORMA EUROPEIA)
FEMA	FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY
RC	REINFORCED CONCRETE (BETÃO ARMADO)
R _X	RAZÃO DE MOMENTO POR CORTE (DIREÇÃO X)
R _Y	RAZÃO DE MOMENTO POR CORTE (DIREÇÃO Y)
A	RAZÃO ADIMENSIONAL DE MOMENTO POR ESFORÇO CORTANTE
Γ	COEFICIENTE DE AMPLIFICAÇÃO PARA EFEITOS P- Δ
Δ	DESLOCAMENTO OU DERIVA DE PISO
H	ALTURA DO PAVIMENTO OU ELEMENTO VERTICAL
L	LARGURA DA PAREDE OU DO NÚCLEO
M	MOMENTO FLETOR
Q	COEFICIENTE DE COMPORTAMENTO SÍSMICO
T	PERÍODO DE VIBRAÇÃO
V	ESFORÇO CORTANTE

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

Com o avanço contínuo da urbanização e a escassez de terrenos disponíveis para construção, a verticalização dos centros urbanos tem-se tornado uma solução cada vez mais adotada em Portugal e em diversas regiões do mundo. O crescimento populacional e a necessidade de otimização do uso do solo impõem novos desafios aos projetistas, especialmente em zonas urbanas densas, onde a construção em altura surge como alternativa estratégica para suprir as demandas habitacionais e comerciais.

Dentro deste contexto, os núcleos estruturais em betão armado desempenham um papel essencial na estabilidade global de edifícios de médio e grande porte. Estes elementos concentram, de forma eficaz, as funções de resistência às ações horizontais, sejam elas provenientes do vento ou da atividade sísmica. Além disso, os núcleos são também responsáveis por integrar funções essenciais à utilização do edifício, como circulação vertical (elevadores e escadas), zonas técnicas e compartimentos de instalações.

A funcionalidade dos núcleos exige frequentemente a introdução de aberturas para portas de elevador, passagens técnicas, ventiladores de extração ou acessos internos. Estas aberturas, embora necessárias sob o ponto de vista arquitetónico e funcional, introduzem descontinuidades geométricas que alteram significativamente a distribuição da rigidez e da resistência nos elementos do núcleo. A forma como estas descontinuidades afetam o desempenho global e local da estrutura é uma questão ainda em aberto e alvo de interesse crescente por parte da comunidade técnica.

1.2. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

1.2.1. MOTIVAÇÃO

Portugal, localizado na Península Ibérica, encontra-se numa região de atividade sísmica moderada, mas não negligenciável, o que implica a necessidade de adotar critérios de dimensionamento adequados para garantir a segurança estrutural. O Eurocódigo 8, em conjunto com o Anexo Nacional, estabelece diretrizes rigorosas para o projeto de estruturas em zonas sísmicas, incluindo recomendações sobre regularidade e continuidade estrutural.

Apesar disso, observa-se ainda uma escassez de estudos específicos que analisem o impacto das aberturas nos núcleos de betão armado sob a perspectiva do comportamento global e local da estrutura. A literatura técnica existente tende a focar em irregularidades genéricas ou em modelos simplificados, nem sempre representativos da complexidade encontrada em projetos reais. Esta lacuna é

particularmente relevante num contexto em que as soluções arquitetônicas inovadoras impõem condições geométricas que desafiam os princípios tradicionais de regularidade estrutural.

A presente investigação nasce da necessidade de compreender com maior profundidade como diferentes geometrias de aberturas afetam o comportamento de núcleos estruturais sob ação sísmica. De forma mais específica, pretende-se responder às seguintes questões:

- De que forma diferentes disposições e localizações de aberturas influenciam a rigidez e a redistribuição de esforços no núcleo estrutural?
- Quais são as implicações destas alterações no comportamento global da estrutura (como deslocamentos e frequências naturais) e no comportamento local (nomeadamente esforços cortantes e momentos nos elementos do núcleo)?

1.2.2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é analisar o impacto estrutural de diferentes configurações de aberturas em núcleos de betão armado, com ênfase na forma como estas afetam a rigidez, a distribuição dos esforços e o comportamento global da estrutura sob ações sísmicas. Para isso, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar as variações de rigidez global e local provocadas por aberturas com diferentes configurações geométricas.
- Comparar configurações usuais de aberturas: dupla contínua, unilateral, escalonada e alternada em altura.
- Quantificar a magnitude e a propagação dos efeitos em termos de força cortante e das razões adimensionais entre momento e esforço cortante (R_x e R_y).
- Derivar recomendações de projeto que contribuam para mitigar os efeitos negativos e conciliar requisitos funcionais e estruturais.

1.3. ESTRUTURA E METODOLOGIA DO TRABALHO

A investigação foi orientada por algumas hipóteses fundamentais:

- Aberturas contínuas, especialmente nos dois lados do núcleo, provocam maiores perdas de rigidez e resultam em redistribuições mais severas dos esforços;
- A introdução de aberturas de forma escalonada ao longo dos pisos pode promover um comportamento mais equilibrado, com menor propagação dos efeitos negativos;
- Existe uma altura ou número de pisos acima da zona afetada a partir do qual a influência das aberturas tende a tornar-se marginal.

Para responder aos objetivos propostos, recorreu-se a uma abordagem baseada em modelação numérica utilizando o software Autodesk Robot Structural Analysis. O edifício de referência adotado possui planta quadrada de 30×30 metros, com 12 pisos acima do solo e duas caves, refletindo uma tipologia típica de edifícios urbanos de médio porte.

A dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos. Após esta introdução, o Capítulo 2 apresenta a revisão de estudos e bibliografias que estiveram a aprofundar o tema, além dos fundamentos teóricos

relativos a núcleos estruturais, irregularidades geométricas e ação sísmica. O Capítulo 3 descreve o modelo de base da estrutura sem irregularidades, onde analisa-se o seu comportamento dinâmico e a distribuição de esforços sob ação sísmica. No Capítulo 4, são introduzidas diferentes configurações de aberturas e é feita a comparação sistemática com o modelo base, que detalha os impactos globais e locais observados. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões do estudo, limitações encontradas e sugestões para trabalhos futuros.

As análises realizadas incluíram avaliação modal, análise estática equivalente para ação sísmica e comparações detalhadas entre modelos com e sem irregularidades. As métricas principais utilizadas foram: distribuição de força cortante por piso, variações percentuais em relação ao modelo base, razões R_x e R_y (adimensionais) e esforços internos nos elementos do núcleo.

1.4. RELEVÂNCIA E CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS

Este estudo pretende fornecer subsídios técnicos que apoiem as decisões de arquitetos e engenheiros quanto à localização e continuidade de aberturas em núcleos estruturais. Ao compreender os efeitos que diferentes padrões de aberturas provocam sobre o desempenho da estrutura, será possível compatibilizar os requisitos funcionais com as exigências de segurança estrutural, em particular sob ações horizontais de carácter sísmico.

Os resultados também poderão servir de base comparativa para futuros estudos experimentais e simulações mais complexas, bem como fundamentar diretrizes para boas práticas de projeto. Ao explorar, de forma sistemática, as consequências das aberturas sobre a rigidez e os esforços internos do núcleo, esta investigação contribui para o desenvolvimento de soluções estruturais mais eficazes e seguras.

2

ENQUADRAMENTO E REVISÃO TEÓRICA

2.1. DINÂMICA SÍSMICA DE EDIFÍCIOS DE ALTURA INTERMÉDIA

A resposta sísmica de edifícios com 10 a 15 pisos situa-se numa zona intermédia: os pressupostos simplificados válidos para edifícios baixos (com modo fundamental isolado) deixam de ser suficientes, enquanto os efeitos típicos de “segundo sistema” dos arranha-céus ainda não se manifestam plenamente. Nesses casos, a participação de massa nos dois ou três primeiros modos de translação ultrapassa, em geral, 85 %, mas a contribuição modal torsional torna-se relevante, sobretudo quando o núcleo estrutural não coincide com o centro de massa do pavimento (Chopra 2020). A torção bimodal — ou seja, a combinação de translação e rotação em dois modos principais — foi descrita de forma seminal por Tso e Sadek (1985), exigindo que a análise modal inclua pelo menos as dez primeiras frequências, de modo a captar com precisão a interação translacional-torsional.

Sob excitação sísmica, o desempenho estrutural é regulado pelos drifts inter-piso. Para edifícios de altura intermédia, a metodologia de dimensionamento por deslocamentos recomenda um drift-alvo entre 0,7 % e 1,0 % da altura do piso (Priestley, Calvi e Kowalsky 2007). O Eurocódigo 8 impõe limites similares: para edifícios em betão armado de importância normal (Classe II), a deriva instantânea não deve exceder $0,75 \% \times v$ (com $v = 0,4$ para o sismo de referência), resultando num valor de verificação de aproximadamente 0,30 % no estado limite de utilização, ou entre 0,50 % e 0,75 % no estado limite de dano. Esses limites são especialmente críticos em zonas sísmicas portuguesas, como Lisboa e o Vale Inferior do Tejo, onde o Anexo Nacional define espectros de projeto com aceleração pico entre 0,16 g e 0,30 g (Silva et al. 2019). Tais limites são explícitos dentro do Eurocódigo 8, e complementados em sua parte 3, onde estão descritos os processos para reabilitação e retrofit de estruturas existentes.

Outro aspeto central é o efeito P- Δ , inevitável em estruturas onde os núcleos concentram a rigidez lateral, mas são acompanhados por colunas periféricas mais flexíveis. Em edifícios de média altura, a razão entre a carga gravitacional estabilizadora e a força cortante sísmica pode gerar acréscimos de momento, intensificando a curvatura dos núcleos e originando drifts amplificados (Chopra 2020).

Núcleos perfurados por aberturas ou descontinuidades alteram significativamente a distribuição modal: a remoção de parede nos primeiros pisos reduz a rigidez local e baixa a frequência fundamental, enquanto amplia a excentricidade entre o centro de rigidez e o centro de massa, agravando os efeitos torsionais. Tso e Sadek demonstram que, mesmo com excentricidades modestas ($\approx 5\%$ da dimensão em planta), as rotações de piso nos modos acoplados podem duplicar, caso a rigidez não esteja simetricamente distribuída. Nestes casos, torna-se essencial garantir lajes com rigidez diafragmática suficiente para redistribuir esforços e mitigar assimetrias dinâmicas.

Em síntese, para edifícios na faixa de altura analisada, o projeto estrutural deve satisfazer simultaneamente três requisitos: (i) assegurar rigidez adequada do conjunto núcleo + paredes para cumprir os limites de deriva; (ii) controlar modos torsionais por meio de alinhamento geométrico e diafragmas eficazes; e (iii) verificar os efeitos de segunda ordem, cuja influência aumenta sempre que aberturas reduzem a rigidez lateral. Esses princípios, consolidados na literatura em dinâmica estrutural (Chopra 2020; Priestley et al. 2007) e refletidos no Eurocódigo 8, fundamentam a análise desenvolvida ao longo desta tese sobre o impacto de aberturas nos núcleos de betão armado de edifícios de altura intermédia.

2.2. COMPARAÇÃO DE SISTEMAS RESISTENTES LATERAIS

Em edifícios de média altura, o engenheiro dispõe de um leque restrito, porém significativo, de sistemas resistentes laterais. A escolha desse sistema influencia não apenas os valores finais de deriva, mas também o custo estrutural e a flexibilidade arquitetónica. Os pórticos rígidos representam a solução mais básica. Neles, a rigidez provém essencialmente da rotação nas ligações viga-coluna. No entanto, estudos comparativos demonstram que, a partir do 8.º ou 10.º pavimento, o momento de inércia exigido nas colunas torna-se desproporcionado, o que conduz a derivas próximas dos limites regulamentares e a secções estruturalmente pouco competitivas (Taranath 2016).

Uma evolução natural consiste na introdução de paredes isoladas de betão armado. Ensaaios paramétricos realizados por Smith e Coull (1991) indicam reduções da ordem de 30 a 40 % na deriva de topo em comparação com um pórtico equivalente. Contudo, quando dispostas de forma assimétrica, essas paredes contribuem pouco para a rigidez torsional; mesmo pequenas excentricidades no centro de massa podem induzir rotações significativas dos pisos (Moehle 2014). Além disso, a implantação periférica de paredes pode conflitar com exigências arquitetónicas como fachadas livres ou grandes vãos comerciais.

Para superar essas limitações, muitos projetos recorrem a núcleos centrais em parede, geralmente associados a caixas de escada e elevadores. Ao concentrar a rigidez no centro da planta, garante-se não só o controlo das translações, mas também da torção, dado que o núcleo atua como uma “caixa” estrutural aproximadamente simétrica. Derivas entre 0,30 % e 0,40 % tornam-se viáveis com espessuras moderadas, mantendo a liberdade arquitetónica nas fachadas (Smith e Coull 1991; Moehle 2014). Fardis (2009) destaca ainda que essa configuração pode alcançar coeficientes de comportamento “q” entre 2,5 e 3,5, devido à ductilidade das paredes acopladas que integram o núcleo.

Uma variação frequente é o sistema dual — núcleo central conjugado com pórticos periféricos. Nesse arranjo, o núcleo fornece a rigidez principal, enquanto os pórticos contribuem com resistência ao corte basal e adicionam redundância estrutural. O Eurocódigo 8 permite fatores “q” até 4,5 para sistemas duais bem detalhados, o que viabiliza armaduras mais racionais e reduz a penalização por peso próprio (Fardis 2009).

Em estruturas mais esbeltas, pode-se recorrer a *out-riggers*: vigas profundas ou lajes-cinta que ligam o núcleo a colunas externas, ampliando o braço de alavanca na resposta flexural. No entanto, análises de custo-benefício indicam que, para alturas inferiores a 70 m (cerca de 15 pisos), a redução de deriva raramente excede 10 a 15 %, o que dificilmente justifica o custo adicional e a complexidade construtiva (Hoenderkamp 2014). Por essa razão, os *out-riggers* são geralmente reservados a edifícios muito mais altos.

Comparando as alternativas, o núcleo central destaca-se pelo equilíbrio entre rigidez, controlo torsional e racionalidade construtiva. Ele concentra armaduras, simplifica a execução das lajes e mantém a

liberdade arquitetónica da fachada. Pórticos isolados exigem colunas superdimensionadas; paredes isoladas não controlam a torção; *out-riggers* não compensam, economicamente, em edifícios de média altura. Assim, para edifícios urbanos de 12 a 15 pisos, o núcleo em betão armado configura-se como solução padrão. Isso justifica o foco desta tese na sua modificação geométrica: abrir vãos no núcleo significa intervir diretamente no principal elemento resistente do edifício, com impacto direto sobre derivas, distribuição de corte e modos torsionais. Tal constatação fundamenta tecnicamente as investigações desenvolvidas ao longo deste trabalho.

2.3. MODELOS MECÂNICOS DE PAREDES/NÚCLEOS

O núcleo em parede de betão armado pode ser interpretado, em primeira aproximação, como um elemento vertical sujeito a flexão composta e esforço cortante, cujo comportamento decorre da interação de três mecanismos principais: (i) compressão axial concentrada na biela comprimida, (ii) flexão global da parede, e (iii) corte induzido por deslizamento diagonal. A formulação clássica destes efeitos é apresentada por Paulay e Priestley (1992), que descrevem a parede como um conjunto de fibras de betão e armadura onde a curvatura plástica se concentra na base, ao passo que o diagrama de tensões de corte revela tração diagonal na alma. Esse modelo flexo-cortante justifica a formação de fissuras inclinadas, ancoradas nos cantos das aberturas, e reforça a necessidade de armaduras horizontais e verticais distribuídas adequadamente.

Estudos mais recentes refinaram essa abordagem com modelações em elementos de fibra. Kolozvari, Orakcal e Wallace (2015) demonstraram que a combinação de rótulas plásticas por flexão (em fibras) e rótulas de cisalhamento (com elementos não lineares) reproduz, com elevada precisão, a degradação de rigidez observada em ensaios cíclicos de paredes esbeltas. Este modelo revela que a introdução de uma abertura desloca a linha neutra para a extremidade oposta, aumentando a excentricidade entre a compressão na flange e a tração na armadura. O resultado é a intensificação da curvatura local e a concentração de forças cortantes nas proximidades da abertura.

Quando duas ou mais paredes são ligadas por lintéis ou vigas de acoplamento, formam-se as denominadas paredes acopladas. Aristizábal-Ochoa (1987) quantificou o grau de acoplamento — razão entre a rigidez dos lintéis e a rigidez flexural das paredes — e demonstrou que, à medida que esse grau aumenta, a resistência global do sistema se aproxima da soma das resistências das paredes com o efeito de alavanca adicional dos lintéis. No entanto, a remoção de segmentos críticos de parede ou lintel reduz significativamente esse grau de acoplamento, obrigando cada painel a comportar-se como uma parede isolada, o que resulta em maiores rotações de topo e menor capacidade resistente ao corte.

O modo de falha está fortemente condicionado pela esbelteza (razão H/t) e pelo nível de esforço axial. Ensaios sistematizados por Wallace (2012) indicam que paredes esbeltas ($H/t > 12$) tendem a apresentar falhas por flexo-corte global, enquanto paredes mais baixas ($H/t \approx 6-8$) são propensas a esmagamento por compressão no fuste ou falha em biela de compressão diagonal. A presença de aberturas agrava esse segundo mecanismo, ao criar descontinuidades na trajetória de compressão. Quando localizadas na zona inferior da parede, essas aberturas aumentam substancialmente a probabilidade de esmagamento local.

Além disso, núcleos com secção aberta — em “E”, “U” ou “C” — mostram elevada suscetibilidade a efeitos de torção com empenamento. Paulay (2001) demonstra que, em paredes com geometria em U, a rigidez torsional depende da interação entre as alas laterais e a parede central. A remoção parcial de uma das alas, por meio de uma abertura unilateral, pode induzir rotações significativamente superiores às previstas por análises planas, tornando indispensável a presença de diafragmas rígidos para limitar tais deformações.

2.4. RAZÕES GEOMÉTRICAS E IMPORTÂNCIAS

A eficácia de um núcleo ou parede de betão armado face a ações horizontais depende, em grande medida, das proporções geométricas que regem a sua rigidez e o modo preferencial de rotura. O Eurocódigo 8 estabelece, como salvaguarda inicial, que a espessura da parede não seja inferior a 150 mm e que satisfaça simultaneamente os critérios de geometria do edifício (CEN 2021, §5.4). Estes limites visam evitar instabilidade local, assegurar espaço para a armadura e garantir compatibilidade com a verificação $P-\Delta$, que controla os efeitos de segunda ordem em estruturas esbeltas.

Do ponto de vista mecânico, a razão entre alturas e espessuras, atua como indicador do mecanismo resistente dominante. Ensaio normalizados e análises teóricas mostram que, em paredes esbeltas ($H/t > 10$), o comportamento é governado pela flexão: forma-se um diagrama de tensões análogo ao de uma viga em consola, com compressão localizada numa flange e tração distribuída na armadura oposta (Paulay e Priestley 1992). À medida que H/t (altura “H” e espessura da parede “t”) se reduz para valores entre 6 e 8, o regime transita para flexo-corte; a alma passa a suportar um campo de compressão diagonal que, quando interrompido, compromete significativamente a capacidade resistente.

A base experimental sistematizada por Wallace (2012) quantifica esses efeitos: paredes com $H/t \approx 15$ perderam, em média, 30 a 35 % da rigidez inicial após a formação de fissuras cíclicas de corte; já provetes mais compactos (*squat*) apresentaram reduções superiores a 50 %, culminando em esmagamento do betão na biela comprimida. Um estudo paramétrico com modelos de 12 pavimentos, conduzido por Lu e Ma (2013), confirma essa sensibilidade: a redução da espessura da parede de 300 mm para 200 mm pode aumentar a deriva de topo em cerca de 25 %, mesmo mantendo-se constante a distribuição de cargas horizontais.

A razão altura-comprimento (H/L) introduz outra variável importante. Núcleos curtos e largos (baixo H/L) oferecem alavanca flexural suficiente para controlar deslocamentos; por outro lado, núcleos muito estreitos tendem a concentrar tensões e favorecer modos de falha por corte. Coull e El-Ayouti (1967) demonstraram que, em paredes acopladas, o grau de acoplamento depende tanto da rigidez dos lintéis quanto da razão H/L : paredes altas e estreitas tiram menos proveito dos lintéis, sobretudo quando estes se encontram perfurados ou interrompidos por vãos.

Além disso, a rigidez efetiva da estrutura está condicionada pelo comportamento do diafragma de laje. Quando a laje se comporta como diafragma rígido em planta, o corte é distribuído entre os elementos verticais em proporção à sua rigidez relativa. Se, no entanto, o diafragma for flexível, pode ocorrer uma redistribuição não intencional: paredes esbeltas podem atrair esforços superiores aos previstos, enquanto outras mais rígidas permanecem subutilizadas. A norma europeia autoriza a hipótese de diafragma rígido quando se utilizam lajes maciças ou nervuradas com altura suficiente; caso contrário, exige verificação explícita da compatibilidade de deformações (CEN 2021).

2.5. RIGIDEZ NO PLANO DOS DIAFRAGMAS DE LAJE

Em análise sísmica, a laje atua como diafragma horizontal, transferindo rapidamente o esforço cortante de piso para as paredes ou para o núcleo. Quando apresenta rigidez suficiente no seu plano, é admissível assumir que todos os elementos verticais ligados ao pavimento se deslocam com a mesma translação e rotação — o denominado pressuposto de diafragma infinitamente rígido. Ensaio em mesa vibratória, realizados em modelos reduzidos de edifícios, demonstraram que lajes maciças ou nervuradas com armadura contínua atingem rigidezes in-plane da ordem dos 100 a 200 kN/mm, valor substancialmente

superior à rigidez flexo-cortante dos elementos verticais. Nestes casos, a redistribuição de esforços ocorre de forma praticamente instantânea (Paulay e Priestley, 1992).

O Eurocódigo 8 formaliza esta distinção. O §4.3 permite modelar a laje como rígida se a espessura for ≥ 70 mm (em betão armado) e se a relação vão/espessura não exceder 30. Em alternativa, é possível comprovar que a deformação cortante média do diafragma é inferior a um terço da deriva média de piso (Fardis, 2009). Se estas condições não forem satisfeitas — como sucede, por exemplo, em lajes de chapa colaborante ou em sistemas pré-fabricados —, o código exige a modelação explícita da flexibilidade in-plane ou a adoção de diafragmas semirrígidos.

A importância desta hipótese torna-se evidente quando o núcleo perde rigidez devido à presença de aberturas. Ensaios de lajes integradas em pórticos, conduzidos por Filiatrault, Bruneau e Collins (2001), mostraram que, após a perfuração de paredes internas, o esforço cortante redistribui-se para as paredes remanescentes em menos de meio ciclo sísmico. Essa transferência depende diretamente da rigidez in-plane: num corpo de prova com armadura descontínua na laje, verificou-se uma rotação do pavimento de até 0,006 rad; com diafragma integral, a rotação reduziu-se para 0,002 rad. A conclusão reforça a prática de modelar as lajes como rígidas, desde que a espessura e a continuidade da armadura assegurem elevada rigidez membranar.

Contudo, estudos numéricos recentes alertam para situações intermédias. Dashti e Pinho (2018) demonstraram que considerar uma laje como totalmente rígida ou totalmente flexível pode provocar variações nas forças atuantes nas paredes da ordem dos 20 %, sobretudo em plantas alongadas. A abordagem recomendada consiste em modelar a laje com elementos de membrana, impondo restrições rígidas apenas em faixas de recolha junto ao núcleo, conciliando realismo estrutural com eficiência computacional.

Observações pós-sísmicas confirmam esta abordagem: falhas em diafragmas de betão são raras em edifícios até 15 pisos, desde que exista ligação adequada entre laje e paredes — por meio de armadura de arranque e ancoragens (Moehle, 2014). Assim, em estruturas de altura intermédia com lajes maciças ou fungiformes — como no caso da geometria estudada nesta tese —, o modelo de diafragma rígido permanece uma representação fiável do comportamento in-plane. Este assegura que os efeitos das aberturas no núcleo sejam interpretados como variações genuínas de rigidez vertical, e não como artefactos resultantes da flexibilidade do pavimento.

2.6. REVISÃO DOS ESTUDOS DE IRREGULARIDADES EM NÚCLEOS

A crescente adoção de núcleos de betão armado como principal sistema resistente lateral em edifícios de média e grande altura tem colocado em evidência os desafios associados à compatibilização entre exigências arquitetónicas e desempenho estrutural. Entre esses desafios, a introdução de aberturas verticais — destinadas a elevadores, passagens técnicas ou acessos — configura-se como uma das principais fontes de irregularidade em altura, com impacto significativo na rigidez, resistência e resposta sísmica dos edifícios (Hidalgo, Fuentes e Jirsa, 2002; Takaoka e Watanabe, 2004).

A literatura classifica as aberturas segundo três critérios principais: continuidade vertical, simetria e localização em planta. No que respeita à continuidade, distinguem-se aberturas localizadas (em um ou dois pisos), escalonadas (alternadas entre níveis ou lados) e contínuas (ao longo de vários pisos consecutivos). Em termos de simetria, aberturas bilaterais — comuns em núcleos de elevador com portas opostas — tendem a preservar o centro de rigidez, ao passo que aberturas unilaterais introduzem excentricidades significativas, exacerbando a rotação torsional (Li e Lam, 2010).

Estudos experimentais pioneiros evidenciaram perdas relevantes de desempenho estrutural em núcleos com aberturas. Em ensaios com modelos de parede com quatro e oito pisos, Hidalgo et al. (2002) observaram reduções de até 35 % na rigidez lateral e na resistência ao corte máximo, em comparação com paredes intactas. A presença de aberturas alterou os mecanismos resistentes, promovendo fissuração diagonal precoce e plastificação dos lintéis. Resultados semelhantes foram obtidos por Takaoka e Watanabe (2004), que identificaram mecanismos locais de rotação e colapso prematuro em paredes com grandes aberturas verticais contínuas sujeitas a cargas cíclicas.

Diversos autores têm procurado quantificar o grau de irregularidade através da razão entre a área perfurada e a área total da parede ou do núcleo. Segundo Eslami, Ronagh e Xue (2017), razões superiores a 15 % já induzem reduções marcantes de rigidez e aumentos de derivas de topo. Simulações numéricas realizadas por Chowdhury et al. (2012) em modelos ANSYS e SAP2000 confirmam que paredes perfuradas em mais de um quinto da área já não conseguem mobilizar eficientemente o braço de alavanca interno, resultando em maiores rotações de topo e derivas acentuadas.

Contudo, para além da percentagem de área vazada, a disposição geométrica das aberturas tem-se revelado ainda mais determinante. Estudos paramétricos demonstram que vãos localizados na metade inferior da parede ou junto aos seus extremos intensificam as derivas globais e as tensões de canto, acelerando a propagação de fissuras e reduzindo a ductilidade residual (Itware e Kalwane, 2015; Gandhi et al., 2015; Varma et al., 2021). Por oposição, aberturas centradas na zona média contribuem para preservar a rigidez global, particularmente em paredes esbeltas (Chowdhury et al., 2012).

O modo de distribuição das aberturas ao longo da altura também influencia decisivamente a resposta. Paredes com vãos alinhados verticalmente concentram os esforços nos lintéis, promovendo plastificação precoce da armadura horizontal e rotura frágil por corte ou compressão, antes que a armadura vertical possa ser mobilizada. Já paredes com aberturas escalonadas favorecem trajetórias diagonais de esforços, assemelhando-se ao comportamento de uma treliça, com atraso da fissuração crítica e formação controlada de rótulas plásticas nas bases (Masi et al., 2014). Em termos quantitativos, esses autores observaram que núcleos com vãos escalonados alcançaram forças últimas 20–30 % superiores e derivas pós-pico entre 0,75 % e 1 %, enquanto paredes com aberturas alinhadas apresentaram valores entre 0,25 % e 0,35 %.

Para mitigar os efeitos negativos das aberturas, a ligação entre os painéis verticais adjacentes — através de vigas lintel ou da própria laje — assume papel central. Estudos numéricos e experimentais demonstram que essas ligações, quando devidamente detalhadas, transferem esforços cortantes entre as paredes e mobilizam casais tração-compressão que aumentam a rigidez lateral equivalente (Nasr et al., 2022; Janevski e Isaković, 2024). Quando os vãos se alinham verticalmente, o acoplamento contribui para distribuir os danos ao longo da altura, evitando concentrações críticas na base. No entanto, para que estas ligações funcionem como "fusíveis" de dissipação, é essencial que as vigas tenham ductilidade superior à das paredes (Kišiček, Haladin e Bićanić, 2020).

Lu, Guan e Ma (2018) propuseram o conceito de grau de acoplamento efetivo como métrica para quantificar a continuidade funcional dos núcleos perfurados. Este parâmetro depende da rigidez das ligações e reflete a capacidade do núcleo de transferir momentos e forças cortantes transversalmente. Observaram-se reduções superiores a 30 % neste grau de acoplamento com o aumento da altura das aberturas, especialmente em núcleos de esbelteza moderada.

A modelação numérica tem reforçado estas observações. Chen e Li (2009), ao estudar edifícios com 8 a 15 pisos, mostraram que aberturas contínuas em dois ou mais níveis podem reduzir a rigidez lateral do núcleo em mais de 40 %, propondo curvas de degradação de rigidez em função da fração de área removida. Al-Hamaydeh (2021) reforçou que configurações unilaterais geram maiores deslocamentos

laterais e excentricidades do centro de rigidez, enquanto padrões escalonados contribuem para uma distribuição mais favorável dos efeitos sísmicos.

Além da rigidez lateral, a rotação torsional dos pisos revelou-se especialmente sensível à geometria e disposição das aberturas. Em edifícios onde o núcleo é o principal sistema resistente lateral, aberturas assimétricas podem originar excentricidades relevantes entre o centro de massa e o centro de rigidez. Li e Lam (2010) demonstraram que excentricidades superiores a 5 % da dimensão em planta podem duplicar a rotação torsional em comparação com configurações simétricas, aumentando a solicitação dos elementos periféricos. Este fenómeno agrava-se em núcleos com geometria em “E” ou “U”, onde a introdução de vãos unilaterais reduz significativamente o braço resistente das paredes externas, amplificando os efeitos de torção bimodal (Paulay, 2001).

Por fim, Al-Shweiki e Haidar (2019) propuseram fatores de correção para a resistência ao corte último em paredes com aberturas, relacionando-os com a esbelteza e localização dos vãos. Verificaram perdas de capacidade de até 50 % em paredes altas com aberturas centrais ou longitudinais, sublinhando a importância da verificação local das zonas críticas.

Em síntese, os estudos analisados convergem na constatação de que as aberturas em núcleos de betão armado comprometem tanto a resposta global (rigidez, derivas, torção) como o desempenho local (redistribuição de esforços, plastificação de lintéis, concentração de tensões). A forma, posição e distribuição das aberturas, bem como a presença de mecanismos de acoplamento eficazes, são determinantes para o comportamento sísmico. A correta consideração destas variáveis é essencial para garantir desempenho estrutural adequado e prevenir modos de rotura indesejados em edifícios de média e grande altura.

2.7. INDICADORES DE ANÁLISE DE CORTE E MOMENTO

A comparação entre diferentes paredes ou núcleos requer um indicador adimensional que não dependa do valor absoluto das ações sísmicas. Paulay e Priestley (1992) introduziram, para esse efeito, o *shear-span ratio*, definido como $\alpha = M / (V \cdot h)$, o qual permite distinguir diferentes regimes de resposta estrutural: valores inferiores a 1,5 indicam comportamento dominado por corte, enquanto $\alpha > 3,0$ caracteriza uma resposta predominantemente flexural. Ensaio compilados por Wallace (2012) validaram estes limiares, mostrando que paredes esbeltas com α próximo de 2,5 alcançam níveis elevados de ductilidade sem perda súbita de resistência.

Priestley, Verma e Xiao (1994) refinaram o conceito ao incorporar α numa expressão de resistência ao corte que transita gradualmente entre os domínios de flexão e corte. A formulação evidenciou que aberturas verticais — por reduzirem V mais do que M — tendem a aumentar α , aproximando a parede de um mecanismo de flexão pura. Esta sensibilidade levou o FEMA P-695 (2009) a classificar os muros entre *flexure-controlled* e *shear-controlled*, recomendando o intervalo $1,5 \leq \alpha \leq 3,0$ como zona mista, adequada a soluções com ductilidade moderada.

Kolozvari, Orakcal e Wallace (2015) validaram numericamente estas transições: em modelos *fibre-based* com rótulas de cisalhamento, a distorção por corte tornou-se dominante sempre que α caiu abaixo de 1,5, ao passo que, para $\alpha > 3,0$, as deformações plásticas concentraram-se em curvatura.

Estudos paramétricos em edifícios de 10 a 15 pisos reforçam a relevância deste indicador. Chen e Li (2009), com base em modelos tridimensionais, demonstraram que a introdução de aberturas contínuas em três níveis consecutivos elevou α de 2,1 para 3,4 nos pisos imediatamente superiores, evidenciando a transferência de momento para segmentos não perfurados. Resultados análogos foram relatados por

Lu, Guan e Ma (2018): o grau de acoplamento entre paredes caiu 35 %, enquanto α aumentou 40 %, sinalizando perda de rigidez ao corte nas zonas abertas. Al-Hamaydeh (2021) observou que aberturas unilaterais provocam aumentos de R_x até 60 % em relação a configurações simétricas, acompanhados por rotação torsional acrescida.

A convergência destes estudos justifica, portanto, a adoção das razões M/V — aqui designadas por R_x e R_y — como métrica principal nesta investigação. Estas razões são de cálculo simples, compatíveis com definições normativas de rigidez (FEMA, EC8) e captam, com sensibilidade, a transição entre regimes estruturais induzida por aberturas de diferentes geometrias e localizações.

3

**CASO DE ESTUDO – ANÁLISE
SÍSMICA DO EDIFÍCIO COM
NÚCLEO SEM
IRREGULARIDADES**

Ao se definir um objeto de estudo, é importante idealizar boas condições geométricas e de funcionamento para que o estudo possa ser amplamente enquadrado nas tipologias de edifícios que atualmente são frequentemente executadas. Diante da grande gama de condições que podem influenciar na decisão de um tipo de estrutura e a disposição dos elementos estruturais, esta deve atender principalmente à arquitetura que será prevista, garantindo uma estrutura que seja uniforme, eficiente, e que proporcione as condições necessárias de estabilidade para edificação.

A escolha de um edifício com 14 pisos (12 pisos acima do solo e 2 caves), para o presente estudo, justifica-se pela representatividade deste tipo de estrutura no contexto urbano da região de Lisboa e de outros grandes centros urbanos em Portugal. Edifícios com esta tipologia são comuns tanto em empreendimentos residenciais como comerciais, estando alinhados com a tendência de verticalização das cidades, motivada pela escassez de espaço urbano e pela necessidade de otimização do uso do solo.

Além disso, optou-se por estudar uma estrutura com este número de pisos por considerar que, em edifícios de menor porte, os efeitos estruturais provocados por aberturas no núcleo tendem a ser menos significativos ou mesmo desprezáveis sob o ponto de vista do comportamento global. Em contrapartida, em edifícios mais altos, como o que aqui se propõe, a introdução de descontinuidades — como as aberturas para caixas de elevador — pode provocar variações relevantes no regime de esforços e na redistribuição da rigidez, tornando-se, assim, mais expressivas e merecedoras de análise detalhada.

Optar por uma estrutura desta escala permite um maior enquadramento do objeto de análise com a realidade do mercado da construção, viabilizando a aplicação prática dos resultados obtidos. A presença de caves, por exemplo, é uma exigência frequente em edifícios de média e grande dimensão, destinadas a estacionamento ou zonas técnicas, o que acrescenta complexidade ao comportamento estrutural e, por conseguinte, maior relevância ao estudo.

Além disso, esta configuração permite abordar um conjunto mais amplo de elementos estruturais e construtivos – tais como núcleos de circulação vertical, sistemas de contraventamento, entre outros – promovendo uma análise mais completa e realista. Assim, os resultados do estudo poderão ser facilmente adaptados ou aplicados a projetos com características semelhantes, contribuindo para soluções mais eficazes e executáveis em contextos reais de projeto e construção.

Para este estudo, foi elaborado uma geometria que representasse bem as questões de grandeza que um edifício usual de utilização residencial e comercial possa apresentar. Uma distribuição de área que usualmente pode ser idealizada em diversas regiões, em especial condicionada por ações sísmicas, que é o caso de edifícios com múltiplos pisos, são as plantas ortogonais com disposições retangulares ou quadráticas, que também são bons objetos de estudos por apresentarem simetria e simplicidade na análise entre os elementos de mesmas dimensões e posicionamento.

Adicionalmente, edifícios com esta tipologia e dimensão tendem a incorporar soluções funcionais mais complexas, como é o caso de núcleos de betão armado que integram elevadores com aberturas em lados opostos — designadamente à frente e atrás — para responder à necessidade de acessos independentes, circulação eficiente ou ligação a diferentes zonas do edifício, como entradas principais, garagens ou espaços comerciais. Estas soluções arquitetónicas e funcionais, embora comuns em edifícios multifamiliares e mistos, introduzem irregularidades importantes ao nível estrutural, nomeadamente na distribuição de rigidez e resistência dos núcleos, o que pode comprometer o seu desempenho sísmico e estrutural global. Assim, a análise destas irregularidades torna-se essencial para compreender e propor soluções de dimensionamento mais seguras e eficazes, alinhadas com a realidade da construção contemporânea em centros urbanos densos.

3.1. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO E OBJETO DE ESTUDO

O presente estudo busca analisar uma estrutura de um edifício de grande porte com uma planta quadrada com dimensões de 30 x 30 metros. Trata-se de uma configuração representativa das práticas construtivas adotadas em grandes centros urbanos, tanto em termos de escala quanto das soluções estruturais e funcionais empregadas.

O núcleo central da edificação, executado em betão armado, apresenta geometria em “E” e foi projetado para abrigar elevadores de alta capacidade, dimensionados tendo em mente a utilização para o transporte de até 26 pessoas. Essa solução atende simultaneamente às exigências funcionais de fluxo de usuários, compatíveis com a área construída, e aos requisitos de rigidez estrutural e resistência às ações horizontais. Como complemento ao sistema resistente, o edifício conta com quatro conjuntos de paredes estruturais em betão armado, localizados nos cantos da planta. Cada conjunto possui configuração em “L” e dimensões de 4 metros por 4 metros.

A configuração e o dimensionamento dos elementos verticais foram definidos de forma a garantir uma rigidez global compatível com a tipologia e escala do edifício analisado. A distribuição entre o núcleo central e os conjuntos de paredes periféricas foi pensada para reproduzir, de forma realista, a relação de rigidez frequentemente observada em estruturas de porte semelhante. Embora se trate de um modelo idealizado para fins de estudo, a proporção entre os elementos foi cuidadosamente estabelecida para que o comportamento global da estrutura refletisse, com boa aproximação, o que se esperaria em edifícios reais. A posição e espessura das paredes em “L” foram mantidas constantes ao longo da altura, funcionando como complemento estabilizador ao núcleo e conferindo maior uniformidade à rigidez lateral. Ainda que tais elementos possam variar em projetos concretos, conforme condicionantes arquitetónicas, neste trabalho priorizou-se a coerência do sistema resistente como um todo, assegurando que o núcleo estivesse inserido num contexto estrutural verosímil, capaz de proporcionar um cenário adequado para a avaliação dos efeitos das aberturas verticais.

O sistema de lajes adotado é do tipo fungiforme maciço, com espessura de 25cm, o que confere elevada rigidez aos planos horizontais e favorece a distribuição das cargas. As lajes estão integradas a um sistema

de pórticos periféricos, formados por vigas de bordo e pilares dispostos ao longo do perímetro da planta, contribuindo para o equilíbrio estrutural e a estabilidade global da edificação.

A configuração estrutural adotada, pela sua complexidade e proximidade com soluções amplamente utilizadas na prática profissional, constitui um objeto de estudo relevante para a análise de irregularidades em núcleos estruturais. Permite-se, assim, avaliar os efeitos de diferentes soluções arquitetónicas e da distribuição de massa e rigidez sobre o desempenho global da estrutura

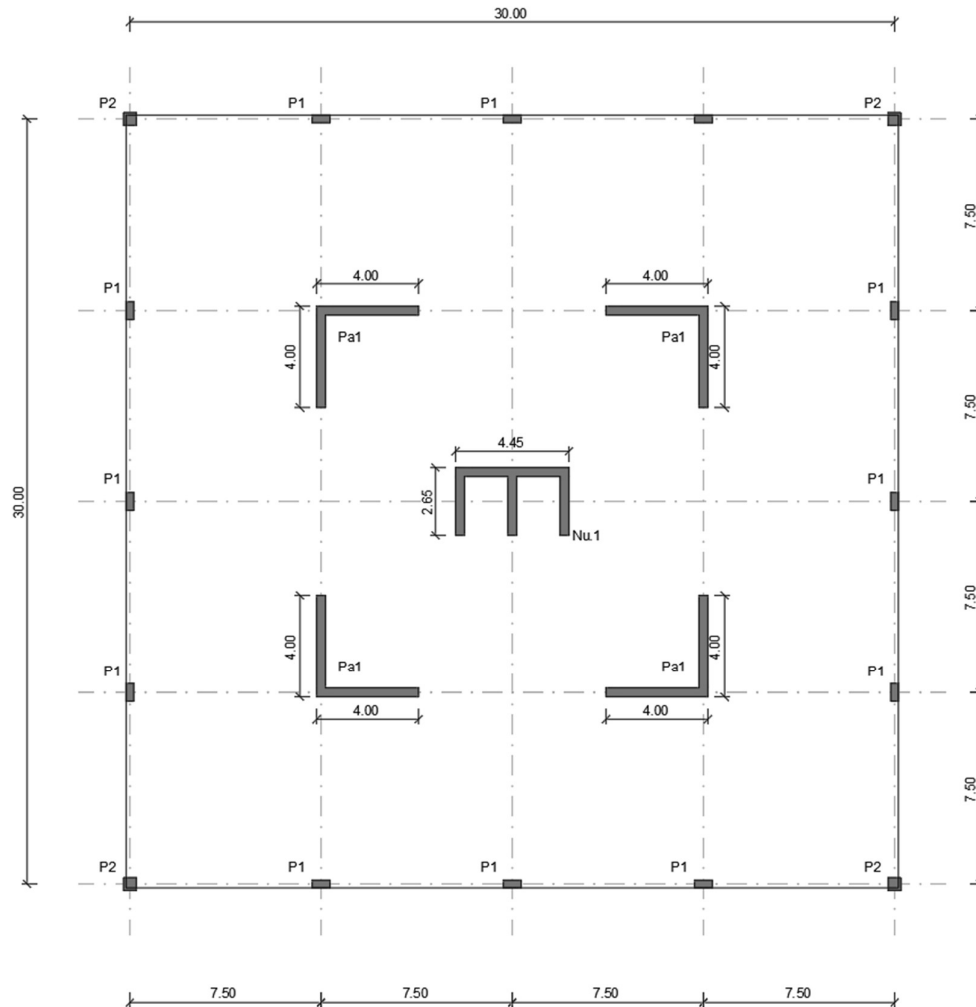


FIGURA 1 - PLANTA PISO TIPO - EDIFÍCIO DE ESTUDO

Com o intuito de aproximar o modelo adotado das soluções correntes na prática da engenharia estrutural, foi prevista a redução gradual da espessura dos elementos verticais ao longo da altura da edificação. Essa estratégia busca otimizar o uso de materiais e aprimorar o desempenho estrutural de forma racional, acompanhando a diminuição progressiva dos esforços atuantes nos pavimentos superiores. As transições de seção foram estabelecidas a cada quatro pavimentos, de modo a assegurar a continuidade construtiva e facilitar o processo executivo. A variação escalonada da espessura contribui para uma representação mais fiel das práticas usuais em projetos de edifícios altos, conciliando eficiência estrutural, economia de materiais e viabilidade construtiva.

Na planta, é possível observar as dimensões em planta das paredes e do núcleo. As demais dimensões e também as variações de seções, são representadas no quadro abaixo.

TABELA 1 - DIMENSÕES ELEMENTOS ESTRUTURAIS DO ESTUDO DE CASO

ELEMENTO ESTRUTURAL	PISOS	DIMENSÃO (M)	
PILAR P1 (A X B)	3 A 4	0.30	0.70
	5 A 8	0.30	0.65
	9 A 14	0.30	0.60
PILAR P2 (A X B)	3 A 14	0.50	0.50
VIGAS V1	3 A 14	0.30	0.50
PAREDES NÚCLEO (E)	1 A 4	0.35	
	5 A 8	0.30	
	9 A 14	0.25	
PAREDES (E)	1 A 4	0.35	
	5 A 8	0.30	
	9 A 12	0.25	
LAJE FUNGIFORME MACIÇA (E)	1 A 14	0.25	

Quanto a altura, foi adotado para os dois pisos aterrados e os quatro primeiros pavimentos um pé direito de 3.5m, seguidos por 8 pavimentos com 3.0m, a totalizar uma altura de 38 metros acima do nível do solo, e de 7 metros abaixo.

Para todos os elementos estruturais, foi adotado uma classe de betão C30/37, cujo possui maior utilização em edifícios convencionais.

3.2. MODELAÇÃO DA ESTRUTURA

A modelagem estrutural por meio do método dos elementos finitos constitui uma prática amplamente consolidada na engenharia, em razão de sua capacidade de representar, com elevado grau de precisão, o comportamento de sistemas estruturais complexos. Neste estudo, adotaram-se elementos do tipo “shell” para a representação de paredes e lajes, dada a necessidade de capturar seu comportamento bidimensional, caracterizado por solicitações combinadas de flexão e esforços membranares. Elementos “shell” são particularmente adequados para componentes planos e delgados, permitindo uma análise mais precisa das distribuições de esforços, deslocamentos e modos de deformação — aspetos que seriam sub-representados em uma modelagem composta exclusivamente por elementos de barra.

Por sua vez, a utilização de elementos de barra para vigas e pilares mostrou-se mais adequada, uma vez que esses componentes apresentam comportamento estrutural predominantemente uniaxial, com rigidez e resistência concentradas ao longo de um único eixo. Além disso, a modelagem com elementos de barra é mais eficiente do ponto de vista computacional, sem prejuízo na precisão dos resultados referentes a esforços normais, cortantes e momentos fletores. A distinção criteriosa entre os tipos de elementos adotados — “shell” e barra — é fundamental para garantir o equilíbrio entre a fidelidade do modelo e a eficiência computacional, evitando a introdução de complexidade desnecessária sem ganhos significativos em termos de precisão.

Para simular o comportamento das padieiras, as vigas na ligação dos núcleos, foi escolhido também elementos em “shell” para sua representação, dado a uma melhor representatividade em conjunta dos

elementos na região do núcleo, que serão objeto de análise frente as combinações de aberturas que serão posteriormente abordadas.

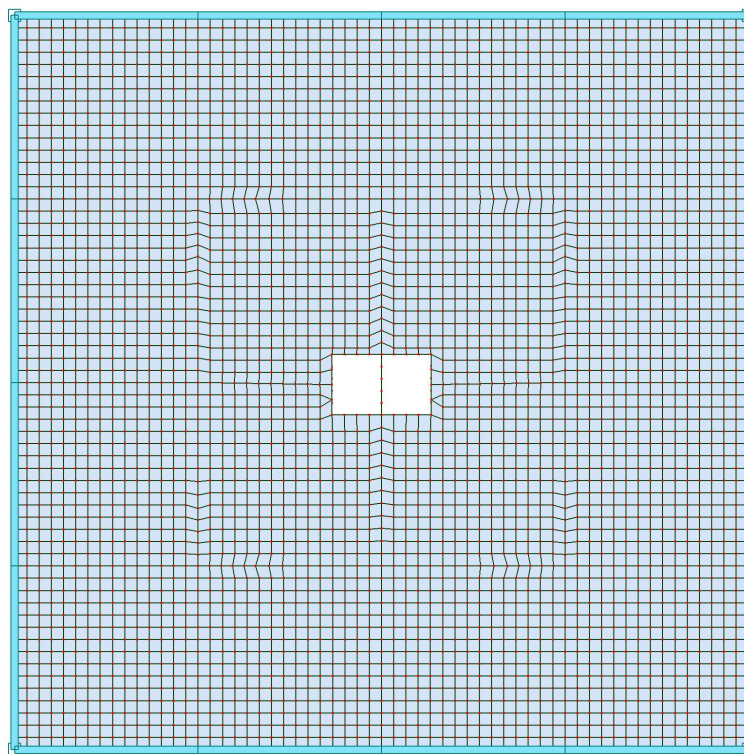


FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO DOS ELEMENTOS FINITOS PISO TIPO

Neste capítulo, apresenta-se o modelo estrutural de referência, denominado “Modelo 0”, caracterizado pela ausência de aberturas adicionais no núcleo central. A adoção deste modelo inicial tem como principal objetivo estabelecer uma base comparativa consistente, a partir da qual será possível avaliar o impacto das alterações geométricas introduzidas nos modelos subsequentes.

Ao analisar uma configuração estrutural isenta de interferências significativas — como aberturas posteriores para elevadores — obtêm-se dados de referência sobre a distribuição de rigidez, esforços internos e modos de deformação da estrutura. Essa abordagem permite isolar os efeitos causados exclusivamente pelas variações geométricas introduzidas posteriormente, garantindo maior clareza na interpretação dos resultados.

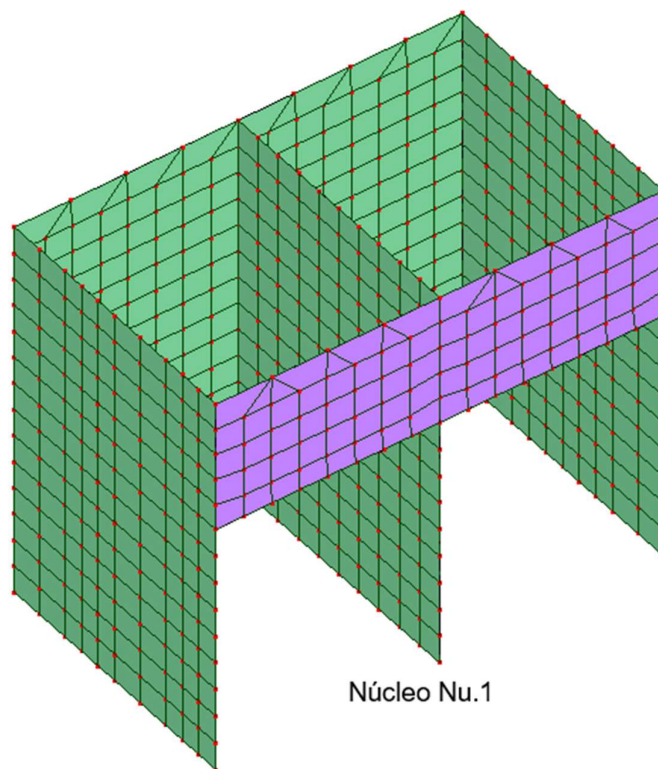


FIGURA 3 - DESCRIÇÃO ELEMENTOS FINITOS NÚCLEO

Além disso, a definição de um modelo-base é uma etapa fundamental em estudos comparativos, especialmente na fase inicial de análise, pois oferece um panorama do comportamento estrutural sem condicionantes adicionais. A partir dessa referência, torna-se possível quantificar de forma mais precisa as influências de diferentes combinações de aberturas, que serão detalhadas no capítulo seguinte.

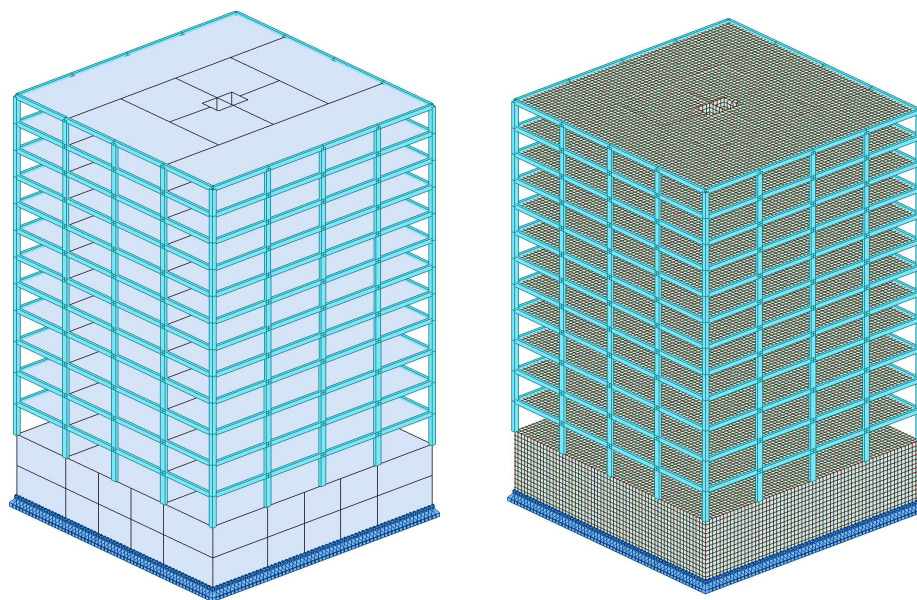


FIGURA 4 - MODELO DE CÁLCULO

3.3. DEFINIÇÃO DAS AÇÕES

Nesta etapa do estudo, define-se o conjunto de ações considerado na análise do modelo estrutural. Embora se trate de uma estrutura idealizada, buscou-se representar uma condição de carregamento compatível com a realidade de edifícios de grande porte em contexto urbano. Essa abordagem assegura que as respostas estruturais obtidas sejam representativas e forneçam uma base confiável para a avaliação dos efeitos gerados pelas irregularidades geométricas que serão exploradas nas fases seguintes.

Foram incluídas na modelagem apenas as ações essenciais ao propósito do estudo, a saber: ações gravíticas — compreendendo o peso próprio, cargas permanentes adicionais e sobrecargas de uso — e a ação sísmica. Essas solicitações foram aplicadas de forma a induzir efeitos significativos no núcleo em concreto armado, permitindo observar, com clareza, como diferentes configurações de aberturas influenciam o comportamento global da estrutura.

A opção por limitar o conjunto de ações a essas componentes visa concentrar a análise nos aspetos estruturais diretamente afetados pelas variações geométricas, evitando a introdução de variáveis secundárias que poderiam desviar o foco do objetivo principal do trabalho.

3.3.1. CARGAS GRAVÍTICAS

Para a definição das ações gravíticas aplicadas na estrutura, foi considerada uma sobrecarga de utilização de $2,0 \text{ kN/m}^2$, em conformidade com a Categoria A da norma EN 1991-1-1:2002 – Eurocódigo 1: Ações em estruturas – Parte 1-1: Ações gerais – Pesos próprios, cargas permanentes e sobrecargas de utilização em edifícios. Esta categoria abrange áreas de utilização residencial, incluindo salas, corredores e compartimentos de habitação.

Relativamente às restantes cargas permanentes (RCP), adotou-se um valor de $3,0 \text{ kN/m}^2$, com o objetivo de representar os revestimentos e acabamentos previstos, bem como a eventual presença de elementos de compartimentação interior não estruturais. Esta estimativa visa garantir uma aproximação realista às condições típicas de edifícios residenciais de médio a grande porte.

A tabela abaixo apresenta, de forma sistematizada, os valores das ações gravíticas consideradas na análise estrutural do modelo-base.

TABELA 2 - CARGAS APLICADAS NO MODELO

TIPO	VALOR
PESO PRÓPRIO	25.0 kN/M3
RCP - RESTANTES CARGAS PERMANENTES	3.0 kN/M2
SOBRECARGA DE UTILIZAÇÃO	2 kN/M2 ($\Psi=0.3$)

3.3.2. AÇÕES SÍSMICAS

No que se refere à caracterização da ação sísmica, considerou-se que a edificação está localizada na cidade de Lisboa, adotando-se a Classe de Importância II, correspondente a edifícios de uso corrente, conforme definido na norma EN 1998-1:2004 – Eurocódigo 8: Projeto de estruturas para resistência aos sismos – Parte 1: Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios.

O tipo de solo foi classificado como Tipo B, correspondente a solos sedimentares de rigidez média, condição frequentemente encontrada em áreas urbanas densamente ocupadas. Esta classificação segue os critérios estabelecidos no Anexo A da referida norma.

Para a definição do coeficiente de comportamento sísmico (q), assumiu-se uma classe de ductilidade média (DCM), considerando que o sistema estrutural principal de resistência sísmica é constituído por paredes de betão armado não acopladas. Embora a EN 1998-1 permita, para este tipo de sistema, a adoção de um valor de $q=3.0$, optou-se por um valor mais conservador, fixado em $q=2.5$, com o intuito de refletir o caráter idealizado do modelo e introduzir um fator adicional de segurança.

Adicionalmente, considerou-se unicamente a ação sísmica do Tipo 1, uma vez que esta se revelou mais condicionante nas análises preliminares. Assim, serviu de base para o desenvolvimento das simulações estruturais apresentadas neste estudo. Deste modo, a ação sísmica imposta à estrutura é constituída pelos seguintes parâmetros representados no quadro abaixo.

TABELA 3 - VALORES PARÂMETROS AÇÃO SÍSMICA

Ação Sísmica TIPO 1	
Zona	1.3
ζ (%)	5
g_I	1
ag_R (m/s ²)	1.5
ag (m/s ²)	1.5
S_{max}	1.35
S	1.3
TB	0.1
TC	0.6
TD	2
η	1.0

Com os parâmetros especificados, a imagem abaixo demonstra o espectro de cálculo considerado para ação sísmica na estrutura.

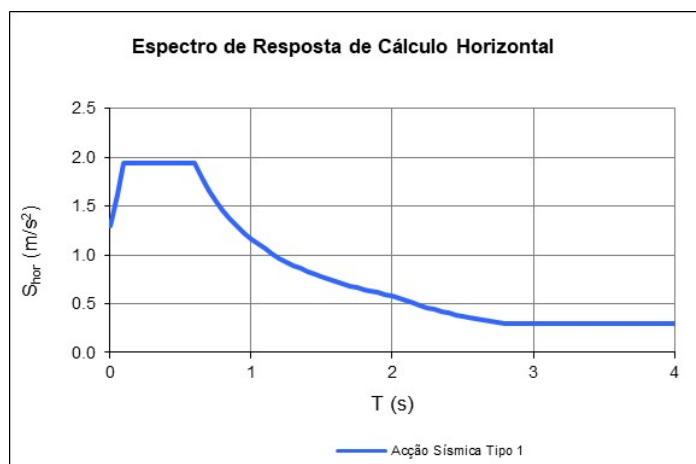


FIGURA 5 - ESPECTRO DE CÁLCULO CONSIDERADO

3.4. ANÁLISE COMPORTAMENTO DINÂMICO

Com o modelo estrutural idealizado e as ações devidamente aplicadas, procede-se à análise dos resultados obtidos. O objetivo desta etapa é compreender o comportamento estrutural da configuração de referência — o Modelo 0 — e estabelecer uma base sólida para comparações com os modelos modificados que serão apresentados posteriormente. A análise foi dividida em dois níveis principais: avaliação global do comportamento dinâmico da estrutura e análise da resposta sísmica e local da distribuição de esforços internos.

Num primeiro momento, a atenção centra-se nos parâmetros globais, com ênfase na resposta sísmica da estrutura. São avaliadas as frequências naturais e os modos de vibração predominantes, o corte basal gerado pela ação sísmica e os deslocamentos horizontais (drift) ao longo da altura do edifício. Estes indicadores permitem caracterizar a rigidez global da estrutura e a sua resposta dinâmica face a ações laterais.

Em seguida, aprofunda-se a análise ao nível local, com foco na distribuição de esforços entre os diferentes elementos estruturais. Pretende-se identificar o contributo individual do núcleo central, das paredes estruturais em “L” e dos pilares periféricos na resistência às ações horizontais, quantificando a percentagem de força absorvida por cada tipo de componente. Esta avaliação fornece uma base comparativa essencial para os modelos que incorporam irregularidades geométricas.

3.4.1. ANÁLISE DOS PERÍODOS E FREQUÊNCIAS

A primeira etapa da análise global consistiu na avaliação do comportamento dinâmico da estrutura por meio de uma análise modal. Este procedimento permitiu identificar os modos de vibração predominantes, bem como os respetivos períodos, frequências naturais e níveis de participação de massa modal. Foram considerados os dez primeiros modos de vibração, conforme recomendado pela norma EN 1998-1 (Eurocódigo 8), que orienta a inclusão de um número suficiente de modos para garantir que uma fração significativa da massa estrutural seja mobilizada — especialmente em edifícios com grande número de pavimentos. Os resultados encontram-se sistematizados na tabela abaixo.

TABELA 4 - MODOS DE VIBRAÇÃO E PERÍODOS MODELO 0

MODOS	FREQUÊNCIA (Hz)	PERÍODO (SEC)	MASSA X (%)	MASSA Y (%)
1	0.50	1.99	0	64
2	0.52	1.92	53	0
3	0.54	1.84	11	0
4	2.04	0.49	0	13
5	2.10	0.48	3	0
6	2.21	0.45	11	0
7	4.65	0.22	0	0
8	4.66	0.21	0	6
9	4.99	0.20	5	0
10	7.44	0.13	0	0

O primeiro modo de vibração apresentou um padrão dominante de translação na direção Y, com mobilização de massa próxima de 64%, evidenciando uma resposta expressiva da estrutura nessa direção. O segundo modo correspondeu a uma translação na direção X, com uma componente torsional discreta, refletida na mobilização de massa de 53%, inferior à do primeiro modo. Essa diferença sugere uma leve assimetria na rigidez ou na distribuição de massas, associada a disposição das paredes estruturais próximas ao núcleo, concentrando a rigidez longe dos bordos.

O terceiro modo revelou um comportamento nitidamente torsional, com participação modal de 11%. Apesar de inferior aos modos de translação, esse valor é relevante e demonstra que a torção não pode ser negligenciada, mesmo em modelos com configuração aparentemente regular — especialmente considerando que o foco do estudo recai sobre a introdução de irregularidades no núcleo estrutural.

Os períodos fundamentais dos três primeiros modos — aproximadamente 1,99 segundos, 1,92 segundos e 1,84 segundos, respetivamente — permaneceram abaixo de dois segundos. Este resultado indica uma estrutura globalmente rígida, condizente com a presença de um núcleo robusto em betão armado e de paredes estruturais distribuídas na planta. Adicionalmente, a existência de dois subsolos enterrados

contribui para restringir os modos de vibração localizados na base da estrutura, concentrando os deslocamentos modais nos pisos superiores. Esta condição geométrica reforça a predominância dos modos inferiores na resposta sísmica global e limita a contribuição dos modos superiores.

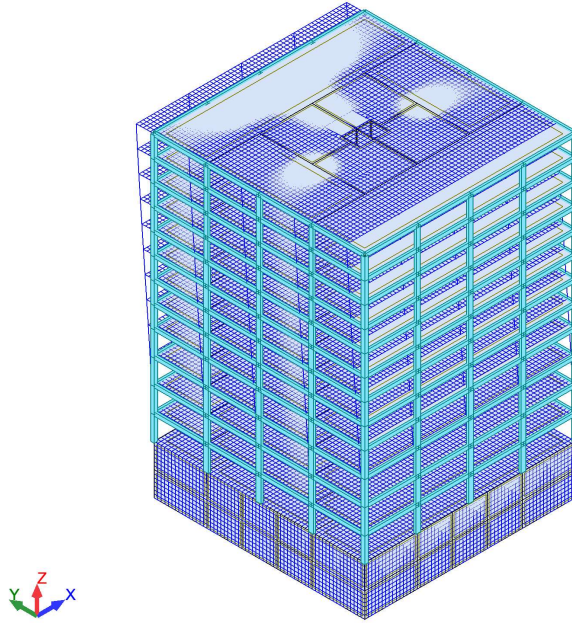


FIGURA 6 - MODO DE VIBRAÇÃO 1 - TRANSLAÇÃO EM Y – VISÃO 3D

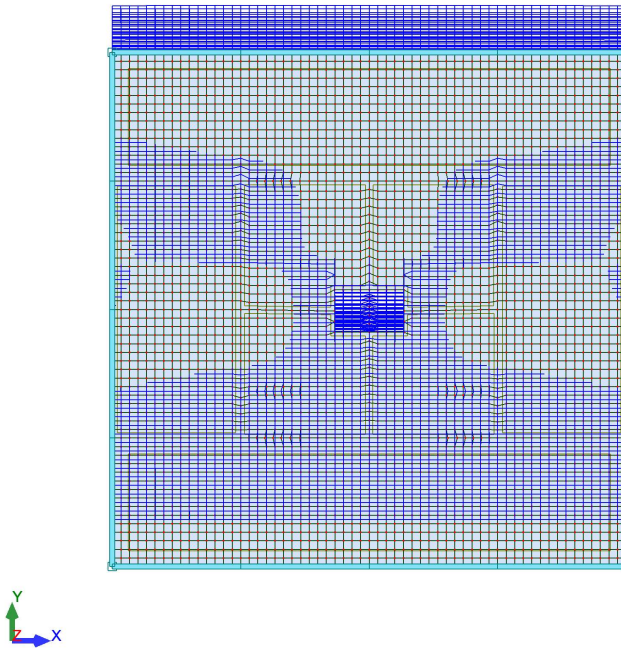


FIGURA 7 - MODO DE VIBRAÇÃO 1 - TRANSLAÇÃO EM Y – VISÃO EM PLANTA

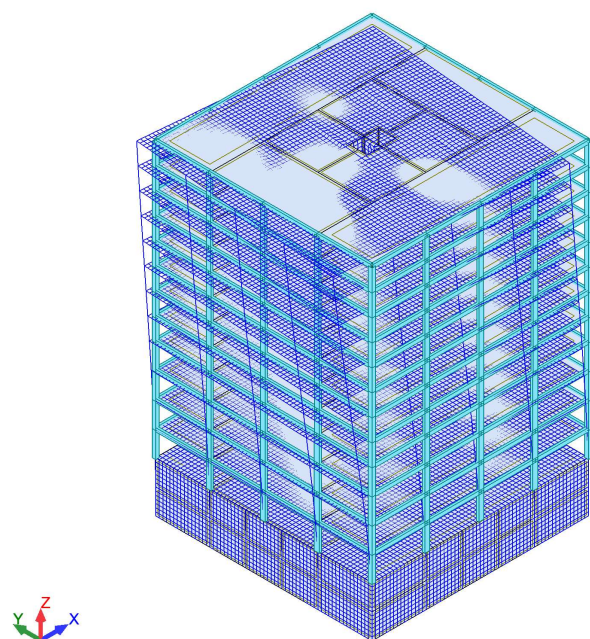


FIGURA 8 - MODO DE VIBRAÇÃO 2 - TRANSLAÇÃO EM X – VISÃO 3D

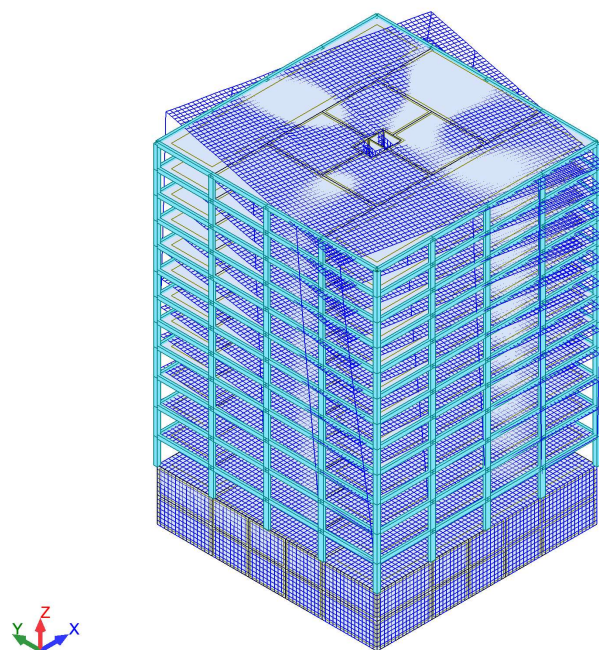


FIGURA 9 - MODO DE VIBRAÇÃO 3 - TORÇÃO – VISÃO 3D

3.4.2. ANÁLISE DE DRIFTS E DESLOCAMENTOS

Na continuidade da análise global do Modelo 0, procede-se à avaliação dos deslocamentos relativos entre pavimentos (drifts), provocados pela ação sísmica nas direções X e Y, separadamente, sem a influência do coeficiente de comportamento. Esta etapa permite caracterizar o comportamento flexional da estrutura ao longo da altura, identificar as zonas de maior deformação e, consequentemente, os trechos com rigidez relativa inferior. Os valores de drift foram expressos em percentagem da altura entre pisos e agrupados por faixas de altura, facilitando a leitura do padrão estrutural.

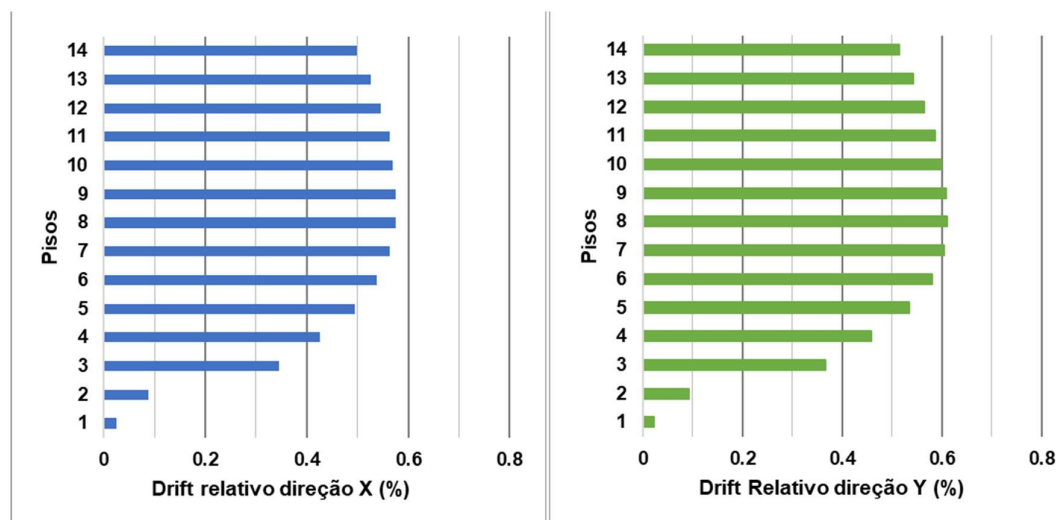


FIGURA 10 - DRIFT RELATIVO ENTRE PISOS PARA MODELO 0

Na base da estrutura (pisos 1 a 3), os deslocamentos relativos apresentaram-se extremamente reduzidos, com valores entre 0,0002% e 0,0037%. Este comportamento reflete um encastramento eficaz, assegurado pela presença das caves enterradas, das paredes perimetrais e do núcleo central em betão armado. A base funciona, assim, como zona de ancoragem, com deformações residuais praticamente nulas.

Na zona intermédia (pisos 4 a 8), registou-se um aumento gradual dos drifts, com valor máximo observado no oitavo piso: 0,00575% na direção X e 0,00611% na direção Y. Esta evolução traduz uma diminuição progressiva da rigidez ao longo da altura da edificação, comportamento compatível com sistemas de resistência lateral centrados e contínuos, como o núcleo estrutural em betão armado. O perfil dos deslocamentos ao longo dos pisos revela uma resposta global dominada por flexão, com deformação crescente até ao ponto de máxima influência sísmica.

Nos pisos superiores (9 a 14), verificou-se uma ligeira redução nos valores de drift, associada à diminuição da massa e da rigidez, em consequência do afilamento das paredes verticais. A menor participação destes pisos na resposta global é típica de estruturas altas com rigidez distribuída de forma regular.

A comparação entre as direções evidencia uma assimetria consistente: os valores médios de drift na direção Y são entre 3% e 8% superiores aos registados na direção X. Esta diferença, ainda que discreta, sugere uma rigidez ligeiramente inferior na direção Y. Esta conclusão é reforçada pela análise modal, onde o segundo modo, de translação em X com uma pequena parcela de torção, e o terceiro modo, de natureza torsional, já indicavam uma resposta assimétrica da estrutura. Embora os valores apresentados representem médias por piso, a torção implícita observada na análise modal confirma a existência de pequenas, mas relevantes, irregularidades na distribuição de rigidez.

De forma geral, os resultados da análise de drift confirmam um comportamento estrutural predominantemente flexional, com o pico de deformação localizado na zona intermédia e uma participação reduzida dos pisos superiores. A assimetria direcional introduz uma componente torsional, ainda pouco expressiva neste modelo base, mas com potencial para amplificar-se nos modelos seguintes, especialmente aqueles que modificam a configuração do núcleo estrutural — foco central deste trabalho.

3.5. ANÁLISE DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS

3.5.1. ESFORÇOS DE CORTE E DISTRIBUIÇÃO NOS ELEMENTOS DE CONTRAVENTAMENTO

Para esta avaliação, foram consideradas duas combinações sísmicas, formuladas de acordo com as recomendações da norma EN 1998-1 (Eurocódigo 8), através da combinação das ações gravitacionais — peso próprio, cargas permanentes adicionais e sobrecargas de utilização — com ações sísmicas aplicadas nas direções principais (X e Y). Cada combinação inclui a ação sísmica predominante numa direção principal, associada a trinta por cento da ação na direção ortogonal, conforme previsto na norma para contemplar efeitos multiaxiais. As combinações utilizadas encontram-se indicadas abaixo.

$$Comb_x = \sum_j G_{k,j} + \sum_i \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} + E_{Edx} + 0.3 \cdot E_{Edy} \quad (1)$$

$$Comb_y = \sum_j G_{k,j} + \sum_i \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} + 0.3 \cdot E_{Edx} + E_{Edy} \quad (2)$$

A opção por restringir a análise a estas duas combinações, com predomínio da ação sísmica nas direções X e Y, justifica-se pela geometria praticamente simétrica da estrutura, o que permite assumir que outras combinações — com inversão de sinais ou rotação de eixos — produziriam distribuições de esforços semelhantes. Assim, evita-se a duplicação do esforço analítico sem prejuízo para a representatividade dos resultados. Esta abordagem permite manter o foco na análise das alterações provocadas pelas irregularidades geométricas introduzidas no núcleo.

TABELA 5 - DISTRIBUIÇÃO DE FORÇAS DE CORTE POR PISO - COMBINAÇÃO X

Piso	Forças totais (kN)		Distribuição de forças por elemento (%)					
			Pilares		Paredes		Núcleo	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	7252	2147	0	0	88	93	12	7
2	7216	2137	0	0	88	91	12	9
3	7091	2100	7	7	73	73	20	20
4	6734	1994	7	7	66	71	27	21
5	6228	1840	9	10	63	70	28	20
6	5703	1680	11	11	62	69	27	19
7	5239	1542	15	15	61	65	25	20
8	4863	1433	16	16	60	63	24	21
9	4536	1341	17	17	60	61	23	22
10	4242	1259	19	18	59	59	22	22
11	3947	1178	19	18	59	58	22	23
12	3534	1061	21	20	58	56	22	25
13	2816	851	24	22	55	50	21	28
14	1634	496	51	46	28	22	21	32

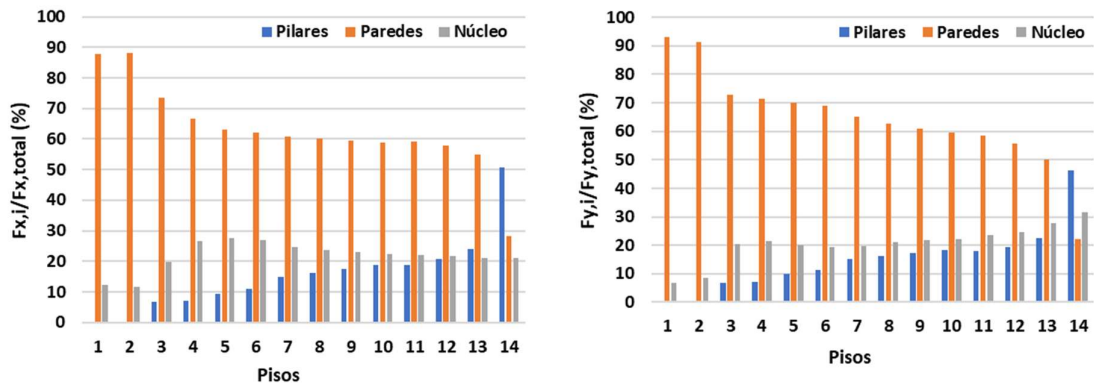


FIGURA 11 - DISTRIBUIÇÃO DE FORÇAS X E Y POR PISO - MODELO 0 – COMBINAÇÃO X

A análise da Combinação X — com ação sísmica principal na direção X e componente secundária de 30% na direção Y — revela um comportamento típico de estruturas com cave rígida. Nos dois primeiros pisos acima da cave, observa-se, em ambas as direções, uma predominância clara das paredes estruturais na absorção dos esforços laterais: cerca de 88% na direção X e mais de 91% na direção Y. O núcleo contribui com uma parcela residual (aproximadamente 12% em X e 7% em Y). Este comportamento confirma a elevada rigidez da base, que impõe um encastramento eficaz dos níveis superiores, restringindo os deslocamentos iniciais e concentrando os esforços nos elementos verticais mais contínuos e centrais.

Entre os pisos 3 e 6 — zona que será posteriormente afetada pelas aberturas no núcleo — regista-se uma alteração significativa na distribuição de esforços. Na direção X, a participação dos pilares aumenta de aproximadamente 7% para 11%, enquanto as paredes reduzem a sua contribuição para valores entre 62% e 66%. O núcleo, por sua vez, assume um papel mais relevante, atingindo cerca de 27%. Na direção Y, verifica-se um comportamento semelhante, com distribuição proporcional entre os três tipos de elementos. Destaca-se, contudo, uma ligeira maior participação do núcleo nesta direção, já nos pisos

intermédios, o que poderá estar relacionado com a maior rigidez transversal do núcleo ou com a disposição das suas paredes internas.

Do piso 7 ao piso 10, a tendência de redistribuição mantém-se. As paredes continuam a perder importância relativa (caindo para valores próximos de 58% a 59%), os pilares reforçam progressivamente a sua contribuição (entre 14% e 19%), e o núcleo estabiliza numa faixa entre 22% e 25%, em ambas as direções. A semelhança nos valores registados nas direções X e Y nesta faixa de altura reforça a regularidade geométrica da estrutura e a distribuição equilibrada de rigidez e resistência entre os elementos resistentes. Mesmo com ação sísmica predominante em X, a estrutura mobiliza de forma eficiente os seus componentes para responder aos esforços transversais.

Nos pisos superiores (11 a 14), esta tendência acentua-se. A força total reduz-se naturalmente, mas os pilares passam a ser os principais responsáveis pela resistência lateral. No último piso, absorvem cerca de 51% em X e 46% em Y. Esta inversão decorre da redução expressiva da rigidez das paredes e do núcleo nestes níveis. As paredes contribuem com aproximadamente 28% em X e 22% em Y. O núcleo mantém valores estáveis em X, mas regista um aumento na direção Y, atingindo cerca de 31%. Este reforço poderá estar associado à geometria interna do núcleo ou à espessura das suas paredes transversais, que condicionam o seu desempenho nesta direção.

TABELA 6 - DISTRIBUIÇÃO DE FORÇAS DE CORTE POR PISO - COMBINAÇÃO Y

Piso	Forças totais (kN)		Distribuição de forças por elemento (%)					
			Pilares		Paredes		Núcleo	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	2176	7157	0	0	88	88	12	12
2	2165	7124	0	0	89	87	11	13
3	2128	7002	7	7	74	75	19	17
4	2020	6646	7	8	68	74	25	18
5	1869	6134	10	10	64	73	26	17
6	1711	5602	11	12	63	72	26	16
7	1572	5140	15	16	62	68	23	16
8	1459	4778	16	17	61	66	22	16
9	1361	4470	18	19	60	65	22	17
10	1273	4198	19	20	59	64	22	17
11	1184	3927	19	19	60	63	21	18
12	1060	3537	21	21	58	61	21	18
13	845	2836	24	24	56	57	20	19
14	490	1655	51	51	29	33	20	17

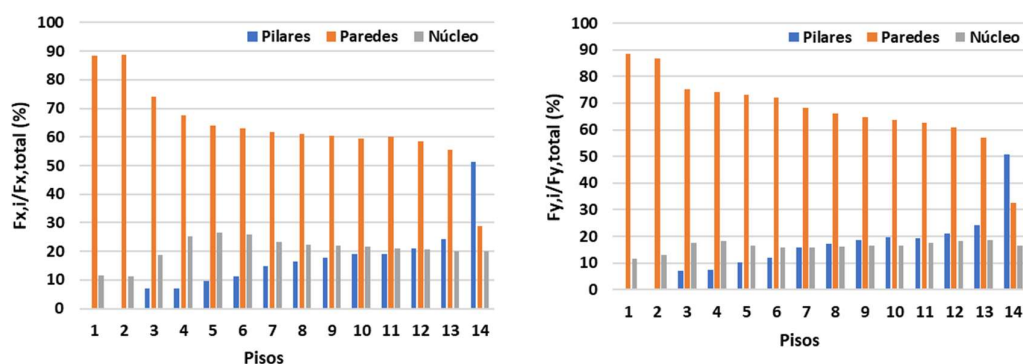


FIGURA 12 – DISTRIBUIÇÃO DE FORÇAS X E Y POR PISO - MODELO 0 – COMBINAÇÃO Y

Na análise da Combinação Y — ação sísmica predominante na direção Y — verifica-se, nos dois primeiros pisos acima da cave, uma resposta dominada pelas paredes estruturais, que absorvem cerca de 88% dos esforços horizontais e o núcleo contribui com aproximadamente 12%. Este comportamento está diretamente associado à elevada rigidez da cave enterrada, que impõe um encastramento eficaz dos níveis superiores, canalizando os esforços para os elementos com maior rigidez e continuidade vertical — neste caso, as paredes e o núcleo.

A partir do terceiro piso, observa-se uma redistribuição progressiva dos esforços laterais, acompanhada de um aumento gradual da participação dos pilares. Estes passam a absorver cerca de 7% da carga lateral, valor que evolui de forma quase linear até ultrapassar os 19% no piso 10. Esta transição reflete a dissipação progressiva do efeito de encastramento da base, permitindo que a rigidez lateral seja partilhada entre os diferentes sistemas resistentes. As paredes mantêm-se como o principal elemento de resistência, mas com importância relativa decrescente, enquanto o núcleo assume uma participação ligeiramente inferior à observada na combinação com sismo na direção X, variando entre 15% e 18% nos pisos intermédios.

Nos pisos superiores (11 a 14), esta tendência acentua-se. O núcleo mantém uma contribuição estável, na ordem dos 17%. As paredes descem para valores inferiores a 33% no piso 14, enquanto os pilares passam a absorver mais de 50% do esforço lateral. Este comportamento é compatível com a diminuição de rigidez dos elementos em betão armado nos pisos superiores, quer por redução das secções resistentes, quer por descontinuidades geométricas, o que leva os pilares a assumir o papel principal na resistência lateral nesses níveis.

A comparação entre as Combinações X e Y revela coerência no comportamento global da estrutura, mas destaca diferenças relevantes na participação do núcleo entre as direções principais. Na direção X, o núcleo atinge até 27% da carga lateral (piso 5), enquanto na direção Y os valores máximos situam-se em torno de 18%. Esta disparidade indica maior rigidez do núcleo na direção X, possivelmente associada à sua configuração geométrica interna, à disposição das paredes que o compõem ou à forma como se liga aos restantes elementos estruturais. Esta assimetria deve ser cuidadosamente considerada nas análises subsequentes, sobretudo nas que introduzem aberturas no núcleo, dado o potencial para gerar efeitos torsionais e amplificações localizadas de esforços.

Nos pisos 3 a 6 — que serão modificados com a introdução de aberturas — esta diferença torna-se particularmente crítica. Na direção X, o núcleo suporta entre 25% e 27% da ação lateral, enquanto na direção Y esses valores situam-se entre 16% e 18%. Esta discrepância sugere que eventuais perdas de rigidez nesta zona terão maior impacto sob solicitação na direção X, podendo comprometer o desempenho global caso não sejam adotadas soluções compensatórias adequadas.

Em síntese, a análise da Combinação Y confirma um comportamento estrutural previsível e bem distribuído ao longo da altura. Contudo, a comparação com a Combinação X evidencia uma assimetria relevante na resposta do núcleo, cuja influência pode tornar-se determinante nos modelos seguintes, especialmente na presença de irregularidades geométricas ou de redução localizada de rigidez.

3.5.2. ANÁLISE DOS ESFORÇOS NO NÚCLEO

Nesta secção apresentam-se os resultados obtidos para o modelo de referência (Modelo 0), com base nas razões entre o momento fletor e o esforço cortante na direção condicionante. As expressões utilizadas foram as seguintes:

$$R_x = \frac{M_{y,piso}}{V_{x,piso} * H_{piso}} \quad (3)$$

$$R_y = \frac{M_{x,piso}}{V_{y,piso} * H_{piso}} \quad (4)$$

Estas razões, correspondem a combinação X apresentada (sismo na direção X) e Y (sismo na direção Y), respetivamente. O parâmetro em causa funciona como um indicador do tipo de solicitação predominante por piso no núcleo estrutural: valores mais elevados sugerem um comportamento dominado por flexão, enquanto valores mais baixos indicam uma resposta com maior influência do esforço cortante.

A utilização desta razão adimensional permite uma leitura comparativa mais clara do comportamento estrutural, especialmente útil quando se analisam diferentes geometrias do núcleo, devido a presença de aberturas. Com isso, evitam-se comparações baseadas apenas em grandezas absolutas, que podem ser influenciadas por diversos fatores locais ou variações globais de rigidez, o que dificulta a interpretação precisa dos efeitos estruturais.

A análise que se segue estabelece a base de comparação para os modelos modificados (Modelos A a D), que posteriormente serão apresentados, nos quais foram introduzidas aberturas verticais no núcleo, ao longo dos quatro primeiros pisos acima da cave. Espera-se que tais alterações provoquem variações visíveis nas razões M/V, tanto por redistribuição vertical de esforços para pisos superiores como por alterações no equilíbrio entre corte e flexão nos pisos diretamente afetados.

Estas variações serão interpretadas com base no comportamento estrutural previsto, o que permite aferir o impacto das aberturas no desempenho do núcleo, quer ao nível da sua eficiência resistente, quer na eventual intensificação de zonas críticas.

TABELA 7 - RAZÕES FATOR R PARA MODELO 0

Piso	Comb. X			Comb. Y		
	Fx (kN)	My (kN*m)	Rx	Fy (kN)	Mx (kN*m)	Ry
1	886	15566	5.02	824	2927	1.01
2	849	18661	6.28	940	6136	1.86
3	1401	21331	4.35	1221	9711	2.27
4	1790	17995	2.87	1218	7045	1.65
5	1717	13942	2.32	1019	4889	1.37
6	1528	10732	2.01	888	3777	1.22
7	1285	8661	2.25	820	3269	1.33
8	1144	7713	2.25	782	3092	1.32
9	1039	6931	2.22	742	2914	1.31
10	953	6073	2.12	695	2716	1.30
11	866	5021	1.93	696	2247	1.08
12	764	3827	1.67	641	1678	0.87
13	594	2560	1.44	531	1134	0.71
14	343	1284	1.25	274	689	0.84

A tabela acima apresenta os valores das razões Rx e Ry ao longo da altura da estrutura, calculadas a partir das relações entre momento fletor e esforço cortante nas direções X e Y, respetivamente. No caso de Rx, observa-se que os dois primeiros pisos (níveis da cave) apresentam valores expressivamente elevados: 5,02 no piso 1 e 6,28 no piso 2. Estes rácios sinalizam a presença de momentos fletores significativos, típicos de uma região com base fixa e elevada rigidez, onde o núcleo se comporta de forma bastante flexionada. A partir do piso 3, com Rx = 4,35, inicia-se uma tendência de redução progressiva — 2,87 no piso 4, 2,32 no piso 5 e 2,01 no piso 6 — que marca uma mudança no regime estrutural. Essa transição indica que, à medida que se afasta da base, o comportamento do núcleo sob sismo na direção X torna-se menos flexionado e mais cortante.

Entre os pisos 7 e 10, os valores de Rx estabilizam-se em torno de 2,12 a 2,25, sugerindo uma zona de equilíbrio entre flexão e corte. A partir do piso 11 até ao topo (piso 14), os rácios continuam a diminuir gradualmente: 1,93, 1,67, 1,44, chegando a 1,25 no último piso. Este decréscimo está relacionado à redução progressiva dos esforços internos e à esbeltez crescente das paredes do núcleo, o que faz com que o comportamento global se torne mais rígido e dominado por corte.

Em contraste, os valores de Ry mostram um perfil ascendente ao longo da altura. Começando com 1,01 no piso 1 e 1,86 no piso 2, a razão aumenta de forma constante até atingir 2,27 no piso 3. A partir daí, ocorre uma ligeira descida e estabilização entre os pisos 4 e 6 (1,65, 1,37, 1,22), seguida por um novo aumento gradual que se prolonga até ao piso 14. Os valores de Ry sobem de 1,33 no piso 7 para 1,84 no piso 14, com pequenas oscilações intermediárias. Este crescimento contínuo, embora mais suave que em Rx, sugere que, na direção Y, o núcleo assume um comportamento cada vez mais flexionado à medida que se ascende na estrutura — o que é coerente com a redução da massa e rigidez lateral nas zonas superiores.

Comparando as duas direções, nota-se que nos primeiros pisos (1 a 3), os valores de Rx superam significativamente os de Ry, com diferenças da ordem de duas a quatro vezes. Isso evidencia que o núcleo está muito mais solicitado em flexão na direção X na base, enquanto na direção Y o comportamento cortante é dominante. Do piso 4 ao piso 10, as razões tornam-se mais próximas, o que indica uma transição para um comportamento misto nas duas direções. A partir do piso 11, os valores de Ry passam a ser mais elevados que os de Rx, invertendo a relação observada nos níveis inferiores.

Esta leitura estabelece uma base de referência clara para os modelos modificados com aberturas nos pisos 3 a 6. Com base neste perfil, prevêem-se os seguintes efeitos:

- Na direção X (R_x): a introdução de aberturas nestes pisos deverá reduzir a rigidez e aumentar os momentos locais, conduzindo a reduções adicionais nos rácios dentro da zona afetada, com possíveis aumentos nos pisos imediatamente superiores devido à redistribuição de momentos;
- Na direção Y (R_y): a presença de aberturas poderá causar aumentos localizados dos rácios, indicando maior flexão relativa, embora a tendência global ascendente de R_y tenda a ser mantida.

Assim, os valores do Modelo 0 funcionam como referência para avaliar as alterações causadas pelas aberturas geométricas nas configurações A a D e suas variantes "+", o que permite identificar com clareza os pisos mais sensíveis à perda de rigidez e os pontos de possível redistribuição de esforços no núcleo

4

CASO DE ESTUDO – ANÁLISE SÍSMICA DO EDIFÍCIO COM NÚCLEO COM DIFERENTES IRREGULARIDADES

Neste capítulo, apresentam-se os resultados e a análise comparativa das variações introduzidas no núcleo de elevador, a partir do Modelo 0 — estrutura de referência sem qualquer tipo de abertura. O objetivo é avaliar o impacto de diferentes configurações de abertura no comportamento global e local da estrutura. As alterações foram inspiradas em soluções arquitetónicas plausíveis para edifícios de uso residencial e/ou comercial, consistindo na introdução de aberturas com 1,00 por 2,20 metros, correspondentes às dimensões típicas de portas de elevador.

4.1. CONFIGURAÇÃO DE ANÁLISE

Foram desenvolvidos quatro grupos de modelos, cada um com uma variante simplificada (“+”), na qual a parede onde se insere a abertura é completamente removida. Todas as variações que aqui foram aplicadas, optou-se por manter inalterados os restantes elementos da estrutura.

4.1.1. MODELO A

O Modelo A apresenta aberturas duplas contínuas, posicionadas nas paredes opostas do núcleo ("frente e trás"), abrangendo integralmente os pisos críticos (pisos 3 a 6). O Modelo A+ consiste numa variante extrema do Modelo A, onde as paredes com aberturas duplas nos pisos 3 a 6 são totalmente removidas, resultando numa abertura completa em ambos os lados nesses pisos.

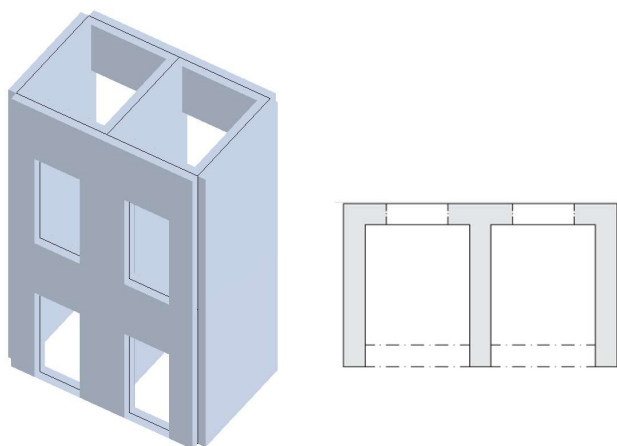


FIGURA 13 - GEOMETRIA MODELO A

4.1.2. MODELO B

No Modelo B, a abertura é posicionada somente num lado das paredes estruturais ("frente"), abrangendo continuamente os pisos críticos (3 a 6). Para o modelo B+, este correspondente as paredes com as aberturas completamente removida entre os pisos críticos (3 a 6).

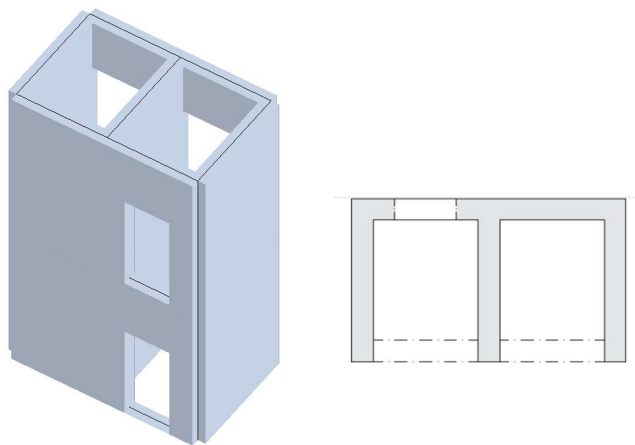


FIGURA 14 - GEOMETRIA MODELO B

4.1.3. MODELO C

Este modelo apresenta aberturas posicionadas de forma escalonada ao longo dos pisos críticos. As aberturas alternam a sua posição verticalmente em lados opostos do núcleo ("frente" no piso 3, "trás" no piso 4, e assim sucessivamente). A variante C+ possui a mesma configuração, entretanto, além do escalonamento das aberturas, as paredes correspondentes às aberturas são completamente removidas em cada piso crítico.

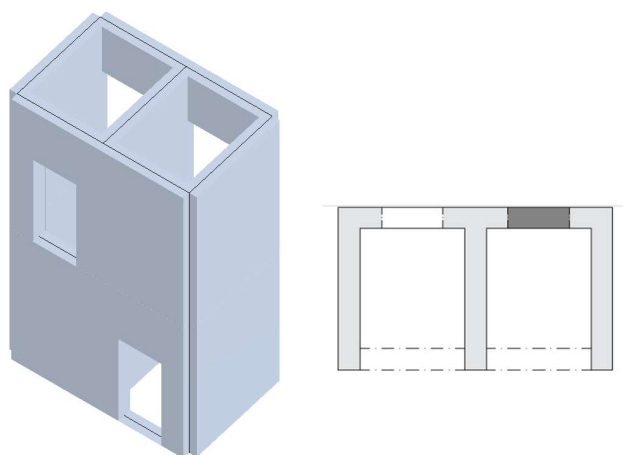


FIGURA 15 - GEOMETRIA MODELO C

4.1.4. MODELO D

Este modelo apresenta aberturas duplas posicionadas de forma escalonada ao longo dos pisos críticos. As aberturas alternam entre pisos, a estar presente em um piso sim e outro não. A variante D+ possui a mesma configuração, entretanto, além do escalonamento das aberturas, as paredes correspondentes às aberturas são completamente removidas em cada piso crítico.

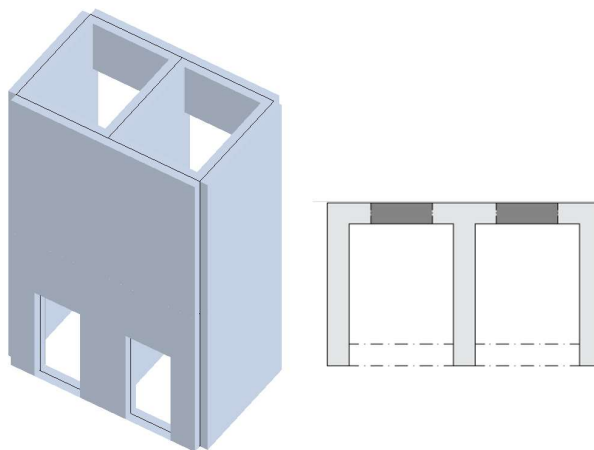


FIGURA 16 - GEOMETRIA MODELO D

4.1.5. PROPOSTA DE ANÁLISE

A análise segue a metodologia adotada no capítulo anterior. Inicia-se com a avaliação do comportamento global, através dos períodos fundamentais de vibração e dos deslocamentos relativos entre pisos (drifts) nas direções X e Y, com o objetivo de identificar alterações na rigidez global induzidas pelas aberturas.

Segue-se a análise da distribuição dos esforços horizontais entre os elementos principais — pilares, paredes e núcleo — para as duas combinações sísmicas consideradas: combinação 1 (sismo predominante em X) e combinação 2 (sismo predominante em Y). Esta etapa visa compreender de que forma as aberturas afetam a redistribuição dos esforços ao longo da altura do edifício.

Por fim, a análise concentra-se no núcleo, através das razões R_x e R_y por piso, definidas como o quociente entre o momento fletor e o esforço cortante nas direções principais. Estes indicadores, com unidades de comprimento, permitem observar alterações no equilíbrio entre flexão e corte ao longo da altura da estrutura. A comparação com o modelo de base servirá de referência para interpretar os efeitos estruturais das diferentes soluções estudadas.

Com esta abordagem, procura-se uma leitura clara e sistemática dos efeitos provocados pelas aberturas no núcleo, permitindo uma avaliação quantitativa e qualitativa da sua influência no desempenho sísmico da estrutura.

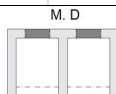
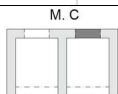
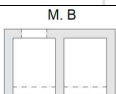
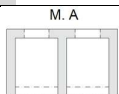
4.2. COMPARATIVO DA RESPOSTA GLOBAL

4.2.1. COMPARATIVO DE PERÍODOS

Antes da apresentação dos valores específicos, importa destacar que a análise dos períodos naturais de vibração — em particular dos três primeiros modos — fornece uma indicação direta da rigidez global da estrutura e das alterações provocadas pelas aberturas no núcleo. A comparação percentual entre os períodos de cada modelo e os do Modelo 0 permite avaliar o impacto relativo de cada tipologia de intervenção sobre a resposta dinâmica da edificação

TABELA 8 - VARIAÇÃO DOS PERÍODOS DE VIBRAÇÃO ENTRE MODELOS

Modelo	Modo 1 (s)	$\Delta\%$	Modo 2 (s)	$\Delta\%$	Modo 3 (s)	$\Delta\%$
M.0	1.99	0.00%	1.92	0.00%	1.84	0.00%
M.A	2.00	0.31%	1.93	0.86%	1.84	0.36%
M.A+	2.01	1.09%	1.96	2.23%	1.85	0.72%
M.B	1.99	0.15%	1.92	0.36%	1.84	0.17%
M.B+	2.00	0.47%	1.94	1.11%	1.85	0.45%
M.C	2.00	0.16%	1.92	0.29%	1.84	0.13%
M.C+	2.00	0.58%	1.93	0.86%	1.84	0.31%
M.D	2.00	0.22%	1.93	0.39%	1.84	0.17%
M.D+	2.01	0.89%	1.94	1.06%	1.84	0.36%



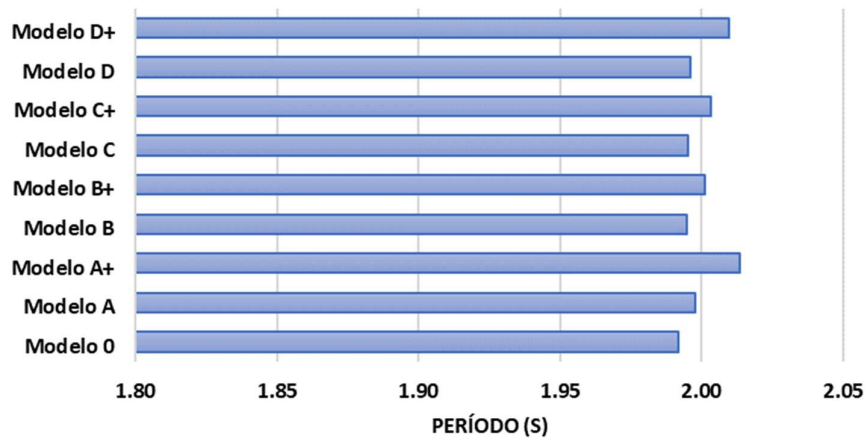


FIGURA 17 - COMPARATIVO PERÍODO T1 (TRANSLAÇÃO EM Y) ENTRE MODELOS

No Modo 1 (T_1), translação em Y, observa-se uma variação muito discreta em todos os modelos analisados, com aumentos inferiores a 1,1% em relação ao modelo de referência. Esta ligeira elevação confirma que as aberturas introduzidas, mesmo nos casos em que a parede é totalmente removida (modelos “+”), provocam apenas uma redução moderada da rigidez global no modo fundamental. Os Modelos A e B, que apresentam intervenções pontuais, registam variações inferiores a 0,5%, enquanto as versões A+ e D+ — mais agressivas em termos de perda de continuidade — alcançam valores próximos de 1,1%. Estes resultados indicam que, embora o núcleo contribua para a rigidez global, essa função é partilhada de forma relevante com as paredes periféricas e o sistema porticado.

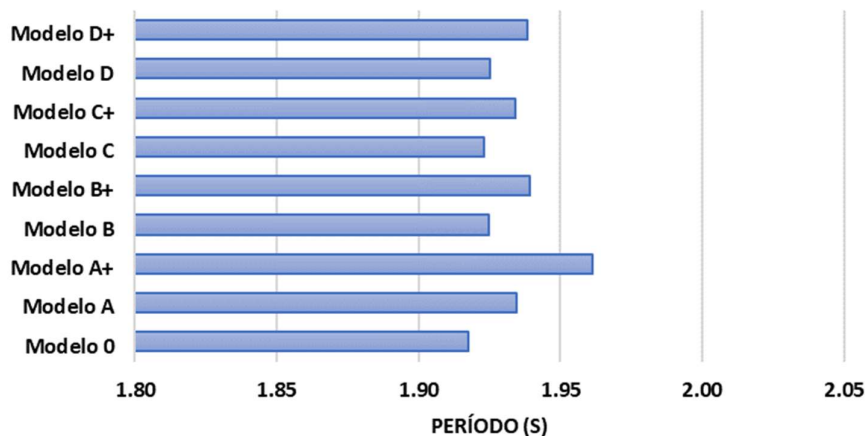


FIGURA 18 - COMPARATIVO PERÍODO T2 (TRANSLAÇÃO EM X) ENTRE MODELOS

No Modo 2 (T_2), translação em X, as variações são ligeiramente superiores, atingindo até 2,2% no caso do Modelo A+. As aberturas que envolvem ambas paredes do núcleo (A, A+, C+ e D+) registam aumentos entre 0,8% e 2,2%, enquanto as intervenções localizadas em apenas um dos lados do núcleo (Modelos B e B+) mantêm-se abaixo de 1,2%. Estes resultados sugerem que o segundo modo, frequentemente associado a uma combinação de movimentos de translação e torção, é mais sensível às assimetrias geradas pela modificação das paredes do núcleo. Tal sensibilidade reforça a necessidade de considerar este modo nos estudos que envolvem alterações geométricas no sistema resistente.

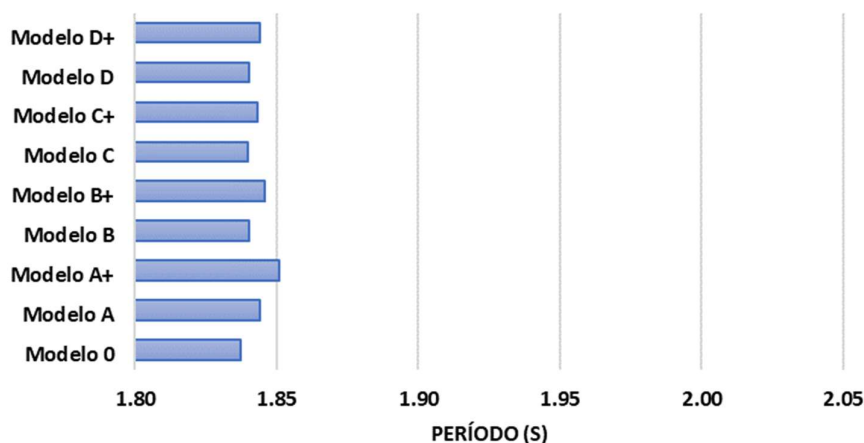


FIGURA 19 - COMPARATIVO PERÍODO T3 (TORÇÃO) ENTRE MODELOS

No Modo 3 (T_3), predominante de torção, as variações são as mais discretas, todas inferiores a 0,8%. Mesmo nas versões com remoção integral das paredes, os aumentos observados mantêm-se entre 0,3% e 0,7%. Este comportamento confirma que os modos superiores, com forte componente torsional ou localizada, são menos afetados por intervenções nos pisos inferiores, refletindo uma resposta estrutural menos dependente da continuidade plena do núcleo em toda a altura.

De forma geral, os resultados demonstram que a introdução de aberturas — tanto na forma de vãos de porta como através da remoção completa de paredes — não compromete significativamente o desempenho global da estrutura em termos de rigidez dinâmica. Este comportamento confirma que a resposta global do edifício é sustentada de maneira eficiente pela interação entre núcleo, paredes e pilares. No entanto, as alterações observadas no segundo modo recomendam atenção especial às análises locais e ao comportamento de deslocamentos relativos, já que mudanças subtis na rigidez podem, em alguns casos, influenciar de forma mais sensível o desempenho sísmico, especialmente em situações de maior irregularidade geométrica.

Essa avaliação reforça a importância de prosseguir com a análise de drifts e distribuição de esforços, aprofundando a compreensão dos efeitos locais e globais induzidos pelas diferentes tipologias de abertura.

4.2.2. COMPARATIVO ENTRE DRIFTS E DESLOCAMENTOS

Dando seguimento à avaliação do comportamento global da estrutura, passamos agora à análise dos deslocamentos relativos entre pisos, também conhecidos como drifts. Este parâmetro é particularmente relevante em projetos sísmicos, uma vez que fornece uma medida direta da capacidade da estrutura de controlar as deformações durante ações horizontais.

A análise dos deslocamentos relativos entre pisos (drifts) permite avaliar de forma mais direta o impacto das aberturas introduzidas no núcleo sobre o comportamento deformacional da estrutura.

TABELA 9 - DRIFTS RELATIVOS (%) NA DIREÇÃO X

Piso	0	A	A+	B	B+	C	C+	D	D+
1	0.024	0.023	0.022	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023
2	0.087	0.086	0.085	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086
3	0.346	0.364	0.387	0.353	0.366	0.351	0.357	0.36	0.374
4	0.426	0.451	0.48	0.436	0.455	0.433	0.442	0.431	0.438
5	0.494	0.519	0.548	0.504	0.524	0.501	0.511	0.512	0.529
6	0.538	0.558	0.583	0.546	0.561	0.544	0.554	0.541	0.547
7	0.564	0.565	0.569	0.565	0.566	0.565	0.569	0.564	0.567
8	0.575	0.572	0.57	0.574	0.572	0.575	0.576	0.574	0.575
9	0.576	0.572	0.569	0.575	0.572	0.576	0.576	0.575	0.576
10	0.57	0.566	0.563	0.568	0.566	0.569	0.57	0.569	0.569
11	0.563	0.56	0.557	0.562	0.56	0.562	0.563	0.562	0.562
12	0.545	0.542	0.539	0.544	0.542	0.544	0.545	0.544	0.544
13	0.526	0.524	0.521	0.525	0.523	0.526	0.526	0.526	0.526
14	0.499	0.497	0.495	0.499	0.497	0.499	0.5	0.499	0.499



A avaliação dos perfis de deslocamentos relativos (drift) para o sismo na direção X evidencia o impacto das diferentes configurações de abertura no núcleo da estrutura. Os resultados foram organizados em dois grupos de análise: num primeiro momento, compararam-se os modelos com abertura parcial (Modelos A, B, C e D) com o modelo de base (Modelo 0); posteriormente, analisaram-se os modelos com remoção total da parede (Modelos A+, B+, C+ e D+) em relação ao mesmo modelo de referência.

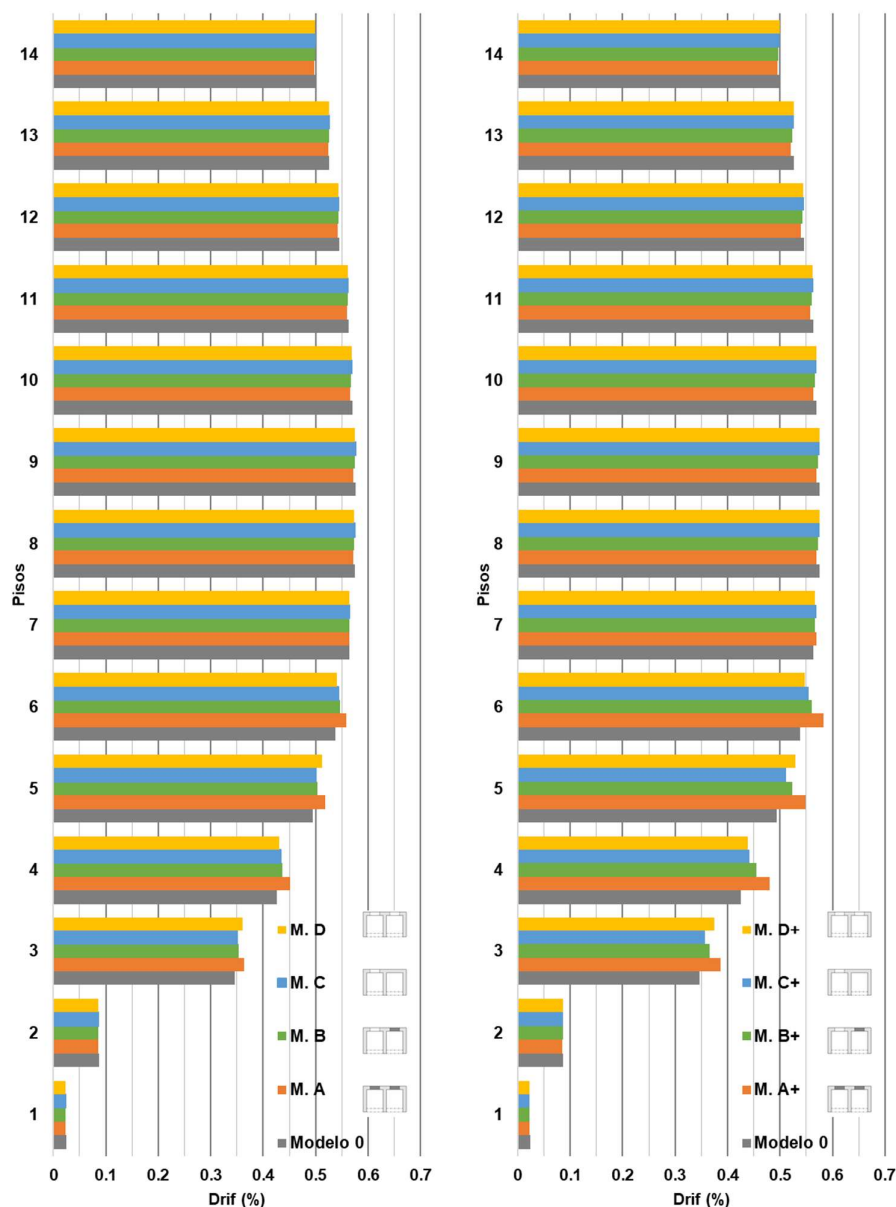


FIGURA 20 - DRIFT RELATIVO ENTRE PISOS NA DIREÇÃO X

Nos modelos com abertura parcial, as variações em relação ao modelo base revelam-se relativamente discretas. Nos pisos 1 e 2, as diferenças de drift são praticamente insignificantes, mantendo-se abaixo de 0,001% em termos absolutos. Este comportamento era esperado, dado que os níveis inferiores beneficiam do efeito de encastramento proporcionado pela cave, o que garante elevada rigidez estrutural. A partir do terceiro piso, onde se localizam as aberturas no núcleo, começam a surgir incrementos mais perceptíveis. Nos pisos 3 e 4, os modelos A, B, C e D registam aumentos de drift entre 0,01% e 0,03% face ao modelo de base, com o Modelo A (aberturas em ambos os lados do núcleo) a apresentar os maiores acréscimos. Esta tendência prolonga-se até ao piso 6, evidenciando que a introdução de aberturas contribui para uma redução localizada da rigidez. A partir do piso 7, os perfis de drift dos

modelos alterados convergem para o do modelo base, indicando que o impacto das aberturas se limita principalmente aos pisos diretamente afetados e aos imediatamente superiores.

Nos modelos com remoção total da parede (Modelos A+, B+, C+ e D+), observa-se um comportamento análogo, embora com variações de maior magnitude. As diferenças de drift relativamente ao modelo base tornam-se mais pronunciadas a partir do terceiro piso, atingindo valores máximos nos pisos 4 e 5. No piso 4, por exemplo, o drift do Modelo A+ atinge 0,480%, face aos 0,426% registados no modelo de base, representando um aumento de cerca de 12,7%. Este padrão é igualmente observado nos Modelos B+, C+ e D+, ainda que de forma ligeiramente menos acentuada. Até ao piso 6, as diferenças mantêm-se significativas, mas a partir do piso 7 os perfis tendem novamente a aproximar-se do comportamento do modelo de base. Estes resultados indicam que a remoção total da parede provoca uma diminuição mais expressiva da rigidez local, refletida em maiores deslocamentos relativos nos pisos inferiores, embora o impacto global da alteração tenda a dissipar-se nas zonas superiores da estrutura.

De forma geral, a análise dos perfis de drift para direção X demonstra que os efeitos das aberturas, sejam elas parciais ou totais, concentram-se essencialmente nos pisos onde foram introduzidas e nos pisos imediatamente acima. As variações são mais pronunciadas nos modelos com remoção total da parede, como seria expectável, ainda que os valores absolutos de drift se mantenham, na maioria dos casos, dentro de limites aceitáveis.

TABELA 10 - DRIFTS RELATIVOS (%) NA DIREÇÃO Y

Piso	0	A	A+	B	B+	C	C+	D	D+
1	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023
2	0.092	0.091	0.088	0.092	0.091	0.092	0.09	0.091	0.088
3	0.366	0.365	0.365	0.365	0.366	0.365	0.363	0.367	0.368
4	0.459	0.461	0.466	0.46	0.462	0.46	0.462	0.46	0.465
5	0.535	0.538	0.543	0.536	0.538	0.536	0.54	0.537	0.542
6	0.581	0.584	0.587	0.582	0.584	0.582	0.586	0.583	0.586
7	0.604	0.606	0.607	0.605	0.606	0.605	0.608	0.606	0.607
8	0.611	0.613	0.612	0.612	0.612	0.612	0.613	0.612	0.612
9	0.608	0.609	0.608	0.609	0.609	0.609	0.61	0.609	0.608
10	0.598	0.599	0.597	0.598	0.598	0.598	0.599	0.599	0.597
11	0.586	0.587	0.584	0.586	0.586	0.587	0.587	0.587	0.585
12	0.564	0.564	0.562	0.564	0.563	0.564	0.564	0.564	0.562
13	0.542	0.542	0.539	0.542	0.541	0.542	0.542	0.542	0.54
14	0.514	0.514	0.511	0.514	0.513	0.514	0.513	0.514	0.512



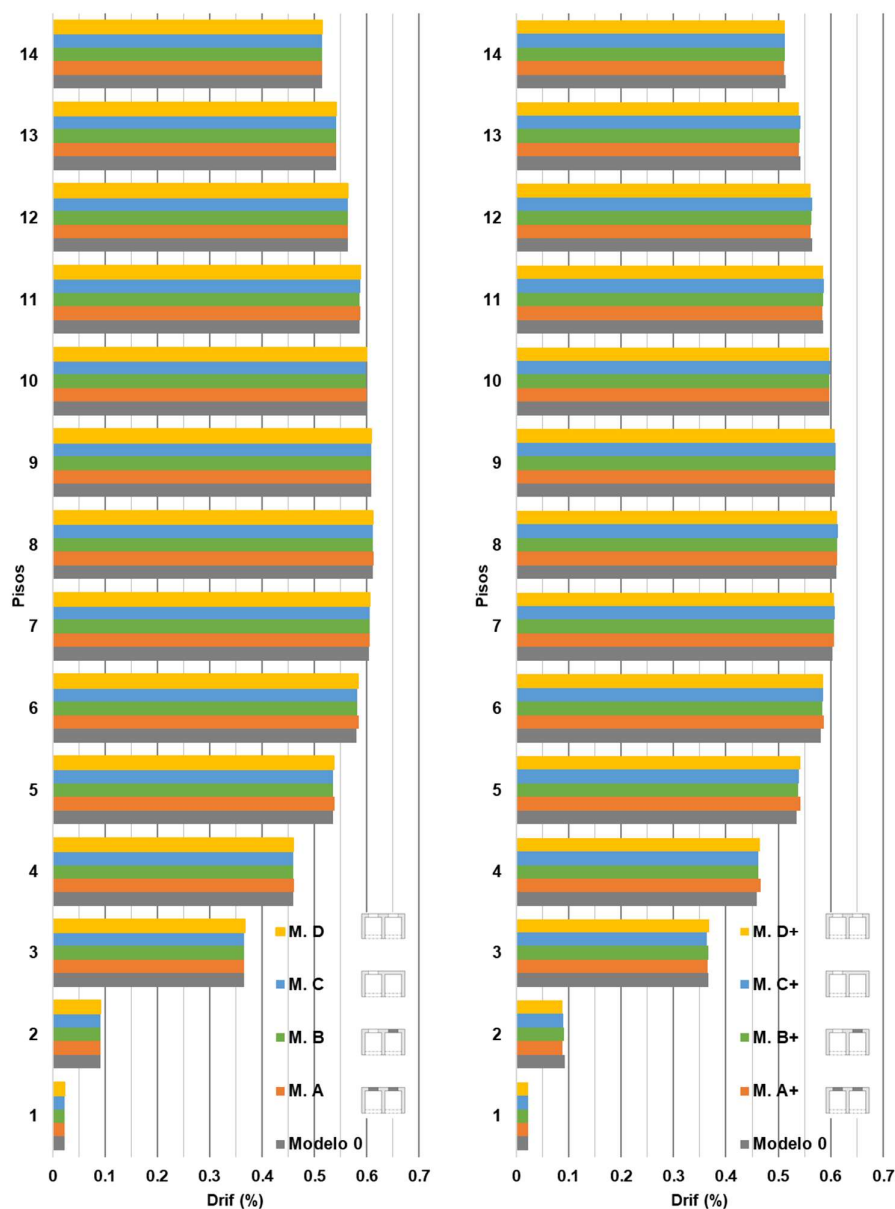


FIGURA 21 - DRIFT RELATIVO ENTRE PISOS NA DIREÇÃO Y

A análise dos perfis de deslocamentos relativos (drift) na direção Y revela que as variações entre os modelos modificados (A, B, C, D e respectivas versões “+”) e o modelo de base (Modelo 0) são extremamente reduzidas ao longo de toda a altura do edifício. A introdução de aberturas no núcleo, localizada nas paredes orientadas na direção X, não produziu efeitos relevantes sobre o comportamento deformacional na direção transversal (Y), em linha com o que seria expectável do ponto de vista estrutural.

Nos pisos inferiores (1 e 2), os valores de drift mantêm-se praticamente constantes em todos os modelos analisados, com variações desprezíveis, da ordem de 0,001% a 0,004% em termos absolutos. Esta

estabilidade confirma que o efeito de encastramento proporcionado pela cave continua eficaz no controlo dos deslocamentos iniciais, mesmo após a introdução das aberturas no núcleo.

A partir do terceiro piso, onde se concentram as alterações geométricas, registam-se ligeiras diferenças nos perfis de drift. Contudo, essas variações permanecem de magnitude muito reduzida, não ultrapassando 0,003% a 0,006% relativamente ao modelo de base, tanto nos modelos com abertura parcial como nas versões com remoção total da parede. Estas diferenças são praticamente impercetíveis na leitura gráfica e não comprometem de forma significativa o comportamento global da estrutura na direção Y.

A ausência de impactos relevantes pode ser atribuída à configuração estrutural do edifício: as aberturas introduzidas afetam diretamente apenas a resistência lateral na direção X, mantendo-se inalterada a capacidade resistente na direção transversal. Paredes, pilares e o restante sistema estrutural preservam a sua função de controlo dos deslocamentos em Y, assegurando a rigidez global do edifício nesta direção.

Em síntese, conclui-se que, para o sismo com ação predominante na direção Y, o comportamento dos modelos alterados é praticamente idêntico ao do modelo de base. Este resultado reforça a ideia de que, em estruturas simetricamente organizadas e com uma distribuição racional dos elementos resistentes, alterações localizadas num eixo têm impacto reduzido sobre o desempenho estrutural no eixo perpendicular.

Para complementar a avaliação dos perfis de deslocamento relativo, apresenta-se na tabela seguinte o valor máximo de drift dos elementos verticais registado em cada modelo, para ambas as direções de análise (X e Y). Esta abordagem permite uma leitura sintética do impacto das aberturas introduzidas no núcleo sobre o comportamento deformacional global da estrutura, funcionando como indicador comparativo entre os diferentes cenários estudados.

TABELA 11 – DRIFT RELATIVO MÁXIMO PARA ELEMENTOS VERTICAIS

Modelo	Drift	Drift
	Máximo X (%)	Máximo Y (%)
M.0	0.525	0.611
M.A	0.684	0.689
M.A+	0.622	0.688
M.B	0.71	0.686
M.B+	0.674	0.677
M.C	0.713	0.688
M.C+	0.696	0.686
M.D	0.707	0.689
M.D+	0.684	0.688

M. A

M. B

M. C

M. D

Analisando os resultados obtidos na direção X, verifica-se que todos os modelos alterados apresentam aumentos do drift máximo em relação ao modelo de base. O Modelo 0 registou um drift máximo de 0,525%, enquanto os modelos com abertura parcial (A, B, C e D) atingiram valores entre 0,684% e 0,713%. Destacam-se os Modelos C e B, que apresentaram os maiores drifts máximos, respetivamente 0,713% e 0,710%, sugerindo que a abertura escalonada (Modelo C) e a abertura unilateral (Modelo B) tiveram impacto mais significativo na rigidez da estrutura na direção X. Por outro lado, nos modelos com remoção total da parede (A+, B+, C+ e D+), os valores de drift máximo, ainda que superiores ao

do modelo base, mostraram-se ligeiramente inferiores aos dos modelos com abertura parcial, variando entre 0,622% e 0,696%. Este comportamento poderá ser atribuído a uma redistribuição mais eficiente dos esforços entre os elementos resistentes, reduzindo a concentração localizada de deformações.

Na direção Y, como antecipado na análise dos perfis de deslocamento, as variações nos valores máximos foram muito mais discretas. O Modelo 0 registou um drift máximo de 0,611%, enquanto os modelos modificados oscilaram entre 0,677% e 0,689%. Estas diferenças, embora presentes, são pouco significativas e confirmam que as alterações realizadas no núcleo, orientadas na direção X, tiveram impacto praticamente nulo na resposta deformacional da estrutura na direção Y. Tal comportamento é coerente com a lógica estrutural do edifício, em que a resistência sísmica transversal é assegurada, essencialmente, por paredes e pilares laterais não afetados pelas intervenções no núcleo.

Importa salientar que, embora a comparação dos valores máximos de drift forneça uma visão global útil do impacto das alterações introduzidas, esta métrica não capta a distribuição nem a localização exata das deformações ao longo da altura da estrutura. Assim, os valores máximos de drift devem ser interpretados como complemento às análises dos perfis desenvolvidas anteriormente, permitindo uma compreensão mais abrangente do comportamento dos modelos alterados sem substituir a necessidade de avaliações locais detalhadas.

4.3. COMPARATIVO DE FORÇAS ENTRE OS ELEMENTOS VERTICAIS

Neste momento da análise, o objetivo é avaliar de que forma as diferentes configurações de abertura introduzidas no núcleo afetam a distribuição das forças horizontais entre os principais elementos estruturais do edifício — pilares, paredes e núcleo.

4.3.1. ANÁLISE GLOBAL ENTRE PISOS

Para garantir uma leitura clara e objetiva dos resultados, optou-se por organizar os dados médios em grupos de pisos representativos, facilitando a identificação das tendências gerais.

Os pisos foram divididos em três grupos principais, com base em critérios estruturais e funcionais bem definidos: o primeiro grupo (pisos 3 a 6) corresponde à zona diretamente afetada pelas intervenções, onde se espera observar as maiores variações na distribuição de forças; o segundo grupo (pisos 7 a 10) abrange os pavimentos imediatamente superiores às alterações, permitindo avaliar como se processa a redistribuição de forças logo acima da zona modificada; e o terceiro grupo (pisos 11 a 14) representa a região superior do edifício, mais afastada das intervenções, servindo para confirmar a dissipação dos efeitos provocados ou a manutenção de alterações residuais.

Serão, assim, apresentadas tabelas contendo as percentagens médias das forças absorvidas por cada tipo de elemento estrutural em cada grupo de pisos e para cada modelo analisado. A partir destes dados, será possível identificar com clareza as tendências de redistribuição de esforços, estabelecendo uma base sólida para uma análise detalhada e comparativa dos pisos mais críticos da estrutura.

Os resultados apresentados e analisados a seguir correspondem à combinação X, na qual o sismo atua de forma predominante na direção X. Esta combinação considera a ação sísmica principal no eixo onde se encontram localizadas as aberturas introduzidas no núcleo. A análise focar-se-á na comparação da distribuição média de forças horizontais entre pilares, paredes e núcleo, com especial atenção às alterações provocadas pelas diferentes configurações de abertura testadas.

TABELA 12 - DISTRIBUIÇÃO E COMPARATIVO DE FORÇAS ENTRE ELEMENTOS - COMBINAÇÃO X

Pisos	Modelo	Distribuição de forças médias por elemento (%)			Variação de forças em relação ao Modelo 0 (%)		
		Pilares	Paredes	Núcleo	Pilares	Paredes	Núcleo
3–6	M.0	9	66	25	-	-	-
	M.A	9	76	15	6%	14%	-39%
	M.A+	10	86	5	14%	29%	-81%
	M.B	9	70	21	2%	6%	-16%
	M.B+	9	77	14	7%	16%	-45%
	M.C	9	69	23	1%	4%	-10%
	M.C+	9	71	20	4%	8%	-22%
	M.D	9	70	21	3%	6%	-17%
	M.D+	9	74	17	6%	12%	-34%
7–10	M.0	17	60	23	-	-	-
	M.A	17	56	27	0%	-7%	17%
	M.A+	17	51	32	1%	-14%	35%
	M.B	17	58	25	0%	-3%	9%
	M.B+	17	54	29	-1%	-10%	26%
	M.C	17	59	24	0%	-1%	3%
	M.C+	17	58	24	1%	-2%	5%
	M.D	17	58	25	0%	-2%	5%
	M.D+	17	58	25	1%	-4%	9%



A análise da distribuição média das forças horizontais para os grupos de pisos 3–6 e 7–10 permitiu identificar com clareza os efeitos das aberturas introduzidas no núcleo sobre o comportamento estrutural global da edificação. Nos pisos 3–6, que correspondem à zona diretamente afetada pelas intervenções, verifica-se uma redução significativa da participação do núcleo em todos os modelos alterados, comparativamente ao modelo de base.

Nos modelos com abertura parcial (Modelos A, B, C e D), a perda de participação do núcleo variou entre aproximadamente –10% e –39%, sendo o Modelo A o que registou a maior redução (–38,94%). Nos modelos com remoção total da parede (Modelos A+, B+, C+ e D+), as reduções foram ainda mais pronunciadas, destacando-se o Modelo A+, com uma queda de –81,42% na participação do núcleo. Esta tendência confirma que a remoção integral de elementos resistentes provoca uma diminuição muito mais severa da capacidade de controlo das forças horizontais pelo núcleo, comparativamente à introdução de aberturas localizadas.

A redistribuição de forças evidencia que as paredes estruturais absorvem a maior parte da carga desviada. Em todos os modelos analisados, registou-se um aumento da percentagem de força absorvida pelas paredes, com incrementos entre aproximadamente +4% e +29% em relação ao modelo de base. Nos modelos “+”, este aumento é ainda mais expressivo, indicando que, com o enfraquecimento do núcleo, a função resistente se desloca significativamente para as paredes perimetrais. Quanto aos pilares, embora apresentem pequenos acréscimos de participação (entre +1% e +14%), continuam a desempenhar um papel secundário na resistência lateral global, mesmo nos cenários mais desfavoráveis.

Nos pisos 7–10, o comportamento altera-se de forma clara: o impacto das aberturas torna-se gradualmente menos relevante. O núcleo, em vez de continuar a perder capacidade resistente, recupera parte da sua função, com variações positivas de participação em comparação ao modelo de base. Modelos como o A+ e o B+ evidenciam incrementos superiores a +25% na contribuição do núcleo nesta zona. Este comportamento confirma que o efeito das aberturas é essencialmente localizado nos pisos onde estas foram realizadas, não se propagando de forma crítica para os níveis superiores. Em paralelo, a participação das paredes reduz-se ligeiramente nos pisos 7–10, acompanhando a recuperação da contribuição do núcleo, enquanto os pilares mantêm variações pouco expressivas.

Relativamente aos pisos 11–14, optou-se por não incluir uma análise detalhada, uma vez que as variações observadas foram residuais. Nos pisos 1-2, mais de 90% da força horizontal continua a ser absorvida pelas paredes da cave e pelas paredes estruturais, o que reduz significativamente o impacto das alterações realizadas no núcleo. Assim, confirma-se que a influência das aberturas se concentra essencialmente nos primeiros pisos acima do solo, sem comprometer de forma relevante o desempenho global da estrutura.

Prosseguindo com a análise, apresentam-se agora os resultados correspondentes à combinação Y, na qual o sismo atua de forma predominante na direção Y. Esta direção é perpendicular àquela onde foram introduzidas as aberturas no núcleo, pelo que se antecipa um impacto estrutural reduzido em comparação com a análise anterior. Ainda assim, a avaliação da distribuição de forças entre pilares, paredes e núcleo permanece essencial para confirmar a consistência do comportamento estrutural e identificar eventuais alterações localizadas.

TABELA 13 - DISTRIBUIÇÃO E COMPARATIVO DE FORÇAS ENTRE ELEMENTOS - COMBINAÇÃO Y

Pisos	Modelo	Distribuição de forças médias por elemento (%)			Variação de forças em relação ao Modelo 0 (%)		
		Pilares	Paredes	Núcleo	Pilares	Paredes	Núcleo
3–6	M.0	9	74	17	-	-	-
	M.A	9	75	15	2%	2%	-9%
	M.A+	10	78	13	5%	5%	-26%
	M.B	9	74	16	1%	1%	-4%
	M.B+	9	75	15	2%	2%	-10%
	M.C	9	74	16	1%	1%	-4%
	M.C+	10	76	15	3%	3%	-13%
	M.D	9	75	15	1%	2%	-10%
	M.D+	10	79	11	5%	8%	-36%
7–10	M.0	18	66	16	-	-	-
	M.A	18	67	15	2%	1%	-7%
	M.A+	19	70	12	5%	6%	-29%
	M.B	18	66	16	1%	1%	-3%
	M.B+	18	67	15	2%	2%	-9%
	M.C	18	66	16	1%	1%	-4%
	M.C+	19	68	14	3%	3%	-17%
	M.D	18	66	16	1%	0%	-2%
	M.D+	19	67	15	4%	1%	-10%



A análise da distribuição média das forças horizontais para os grupos de pisos 3–6 e 7–10, agora considerando a ação sísmica predominante na direção Y (Combinação 2), revela impactos consideravelmente mais moderados das aberturas introduzidas no núcleo, quando comparados com a análise anterior para a direção X. Esta diferença já era expectável, dado que as alterações geométricas foram realizadas em paredes orientadas na direção X, mantendo-se o sistema estrutural relativamente preservado na direção transversal.

Nos pisos 3–6, zona diretamente afetada pelas aberturas, observa-se que a redução da participação do núcleo é substancialmente inferior à registada para o sismo em X. Enquanto na Combinação X as reduções ultrapassavam 30% a 80% nos modelos “+”, nesta combinação as perdas situam-se entre aproximadamente –4% e –36%, com o Modelo D+ a apresentar a maior redução (–36,32%). Nos modelos com abertura parcial (Modelos A, B, C e D), as reduções de participação do núcleo mantêm-se ainda mais discretas, variando entre –4% e –10%. Estes resultados confirmam que o impacto das aberturas é consideravelmente menos severo quando a ação sísmica atua numa direção perpendicular às modificações introduzidas.

Relativamente às paredes estruturais, verifica-se um aumento ligeiro da participação em quase todos os modelos. Este crescimento, embora modesto, situa-se entre +1% e +8%, sendo mais pronunciado nos modelos com remoção total da parede (“+”). Quanto aos pilares, observam-se incrementos marginais de participação, entre +0,78% e +5,22%, sem que estes assumam um papel estrutural relevante, mesmo nos modelos mais alterados.

Nos pisos 7–10, a influência das aberturas torna-se ainda menos significativa. A participação do núcleo tende a estabilizar, registando variações moderadas entre os modelos, de aproximadamente –2% até –29%, com o Modelo A+ a evidenciar a maior redução. Paralelamente, as paredes apresentam pequenos acréscimos de participação, enquanto os pilares mantêm alterações discretas, inferiores a $\pm 5\%$ em todos os casos. Estes resultados demonstram que, na direção Y, a estrutura recupera rapidamente o seu comportamento original à medida que se distancia dos pisos diretamente afetados pelas modificações no núcleo.

De forma geral, esta análise confirma que o impacto das aberturas no desempenho estrutural é altamente condicionado pela direção da ação sísmica. As intervenções realizadas nas paredes do núcleo provocam alterações significativas no comportamento da estrutura sob solicitação na direção X, mas induzem apenas variações moderadas e localizadas quando a ação se dá na direção Y. Ainda assim, mesmo na direção transversal, os modelos “+”, com remoção completa de parede, continuam a apresentar maiores variações que os modelos com abertura parcial, embora de forma muito menos acentuada.

Tal como na análise anterior, optou-se por não detalhar os resultados para os pisos 11–14, dado que as variações observadas nestes níveis superiores foram residuais.

4.4. ANÁLISE DETALHADA DE FORÇAS ENTRE MODELOS

Para aprofundar a leitura do comportamento da estrutura, este subcapítulo foca-se numa análise detalhada das variações de força de corte na direção X nos elementos estruturais, comparando cada modelo com aberturas ao modelo de referência (Modelo 0). Ao contrário da secção anterior, que abordou a distribuição global dos esforços com base em médias por grupo de pisos e para ambas as combinações

sísmicas, nesta fase considera-se apenas a Combinação X — correspondente à ação horizontal na direção X — por se ter revelado a mais condicionante para o núcleo estrutural.

A análise tem por objetivo identificar como diferentes configurações de aberturas afetam a distribuição de forças cortantes entre os pilares, paredes e núcleo central ao longo dos pisos, com especial atenção para os níveis diretamente afetados pelas intervenções geométricas. Esta abordagem permite compreender não só os efeitos imediatos das aberturas, mas também a forma como os esforços se redistribuem piso a piso, fornecendo subsídios mais precisos sobre o impacto das irregularidades na coerência estrutural global.

4.4.1. MODELO A

O Modelo A caracteriza-se pela introdução de aberturas posteriores em ambos os lados do núcleo estrutural, aplicadas continuamente do Piso 3 ao Piso 6. Esta configuração representa uma intervenção simétrica e contínua, e, conforme esperado, gera um impacto significativo na capacidade de rigidez lateral do núcleo.

Adicionalmente, o Modelo A+ é uma variação onde, em vez da abertura pontual, procede-se à remoção integral da parede posterior, configurando uma situação mais severa de perda de rigidez.

O objetivo desta análise é compreender como a distribuição de forças entre pilares, paredes e núcleo é afetada nestas condições.

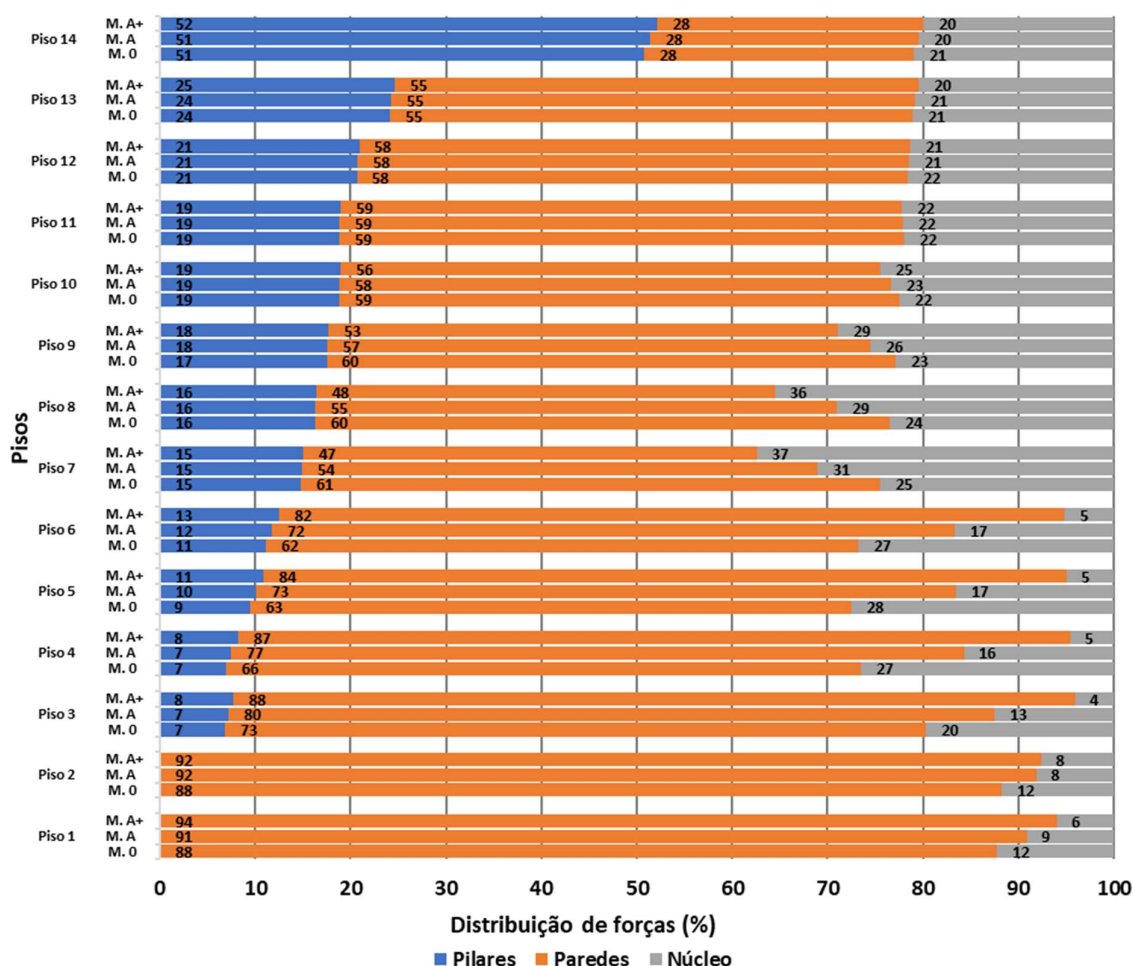
TABELA 14 - VARIAÇÕES DE FORÇAS DE CORTE ENTRE ELEMENTOS E PISOS - MODELO A

Pisos	Distribuição de forças no piso por elemento (%)			Variação de forças em relação ao Modelo 0 (%)		
	Pilares	Paredes	Núcleo	Pilares	Paredes	Núcleo
1	0	91	9	-	3.5	-25.3
2	0	92	8	-	4.1	-31.1
3	7	80	13	5.0	9.4	-36.5
4	7	77	16	8.0	15.5	-40.8
5	10	73	17	6.2	16.7	-40.2
6	12	72	17	5.6	15.2	-37.6
7	15	54	31	0.4	-10.9	26.8
8	16	55	29	0.4	-9.3	23.4
9	18	57	26	0.2	-4.5	11.6
10	19	58	23	0.0	-1.6	4.1
11	19	59	22	0.1	-0.3	0.6
12	21	58	21	0.4	0.1	-0.7
13	24	55	21	0.8	0.2	-1.5
14	51	28	20	1.3	-0.6	-2.3

TABELA 15 - VARIAÇÕES DE FORÇAS DE CORTE ENTRE ELEMENTOS E PISOS - MODELO A+

Pisos	Distribuição de forças no piso por elemento (%)			Variação de forças em relação ao Modelo 0 (%)		
	Pilares	Paredes	Núcleo	Pilares	Paredes	Núcleo
1	0	94	6	-	7.1	-51.2
2	0	92	8	-	4.7	-34.9
3	8	88	4	11.9	20.2	-79.2
4	8	87	5	18.1	31.3	-82.9
5	11	84	5	14.0	33.9	-82.2
6	13	82	5	12.8	32.5	-80.8
7	15	47	37	1.8	-21.7	52.6
8	16	48	36	1.4	-20.4	51.2
9	18	53	29	0.8	-10.3	26.2
10	19	56	25	0.5	-3.7	9.3
11	19	59	22	0.6	-0.7	1.4
12	21	58	21	1.2	0.1	-1.4
13	25	55	20	2.0	0.3	-3.0
14	52	28	20	2.8	-1.6	-4.7



FIGURA 22 - DISTRIBUIÇÃO DE FORÇAS F_x COMBINAÇÃO X - MODELOS 0/A/A+

No Piso 3, observa-se, no Modelo A, uma redução da participação do núcleo na ordem dos -36% relativamente ao modelo de base, acompanhada de um aumento de +9% da carga absorvida pelas paredes. Esta redistribuição inicial indica que, logo no primeiro piso com abertura, o sistema estrutural começa a transferir esforços para os elementos periféricos. No Modelo A+, a tendência agrava-se de forma significativa: a participação do núcleo reduz-se para cerca de 4%, enquanto as paredes passam a absorver mais 20% da força total, confirmando uma transferência mais marcada de cargas para os elementos exteriores.

No Piso 4, a perda de contribuição do núcleo torna-se ainda mais acentuada. No Modelo A, regista-se uma diminuição de aproximadamente -41%, enquanto a absorção de forças pelas paredes cresce para mais de +15%. Este comportamento é coerente com a continuidade das aberturas em ambos os lados do núcleo. No Modelo A+, o núcleo praticamente deixa de contribuir para a resistência lateral (com cerca de 4,5% da carga), enquanto as paredes absorvem um acréscimo superior a +30%, consolidando a tendência de redistribuição já observada.

No Piso 5, o comportamento mantém-se semelhante: no Modelo A, a perda de capacidade resistente do núcleo aproxima-se dos -40%, enquanto as paredes absorvem um aumento de aproximadamente +17%. A diferença entre o Modelo A e o Modelo A+ torna-se ainda mais expressiva neste nível, com o núcleo

no A+ a absorver menos de 5% das forças, enquanto as paredes concentram mais de 84% da carga lateral, evidenciando a severidade da intervenção.

No Piso 6, embora ainda dentro da zona crítica, começam a observar-se sinais iniciais de recuperação. A perda do núcleo no Modelo A reduz ligeiramente para cerca de -38%, mantendo-se ainda elevada. No Modelo A+, contudo, a severidade persiste, com o núcleo a absorver apenas cerca de 5,2% da força lateral.

Nos Pisos Superiores (7 a 14), a análise revela uma mudança clara no padrão de comportamento. No Modelo A, o núcleo retoma a absorção de cerca de 31% da força no Piso 7, com tendência de recuperação gradual até ao Piso 9. Paralelamente, as paredes, que haviam concentrado grande parte dos esforços nos pisos inferiores, começam a reduzir a sua participação relativa. A partir do Piso 10, a distribuição de forças entre pilares, paredes e núcleo aproxima-se progressivamente da situação observada no modelo de base.

No Modelo A+, a recuperação é visivelmente mais lenta. Mesmo no Piso 8, a participação do núcleo permanece reduzida em relação ao Modelo 0, indicando que a remoção total das paredes provocou efeitos persistentes até pisos mais elevados. Este comportamento demonstra que, enquanto o impacto das aberturas pontuais tende a ser localizado, a remoção integral de elementos resistentes gera efeitos mais prolongados ao longo da altura da estrutura.

De forma geral, verifica-se que as aberturas contínuas em ambos os lados do núcleo provocam perdas severas de rigidez local, conduzindo a uma redistribuição dos esforços predominantemente para as paredes, com apenas um incremento moderado nos pilares. A recuperação do comportamento estrutural original ocorre apenas a partir do Piso 9 no Modelo A, enquanto no Modelo A+ os efeitos negativos persistem até pisos mais elevados. A remoção integral das paredes amplifica substancialmente a degradação do núcleo e atrasa a recuperação da estrutura, evidenciando a maior vulnerabilidade dos modelos “+” face às aberturas pontuais. É evidenciado que intervenções simétricas e contínuas no núcleo comprometem fortemente a capacidade lateral do núcleo. A variante A+, com remoção integral da parede, reforça que a presença de qualquer continuidade estrutural residual é fundamental para mitigar os efeitos negativos das aberturas.

4.4.2. MODELO B

O Modelo B simula a introdução de aberturas posteriores em apenas um dos lados do núcleo, localizadas entre os pisos 3 e 6. Esta configuração visa representar situações onde apenas um dos poços de elevador requer acesso posterior, por razões arquitetónicas ou funcionais. Já o Modelo B+ corresponde à variante mais severa, em que a parede onde se localiza a abertura é removida na totalidade, desconsiderando qualquer rigidez remanescente. Esta comparação permite avaliar o impacto relativo entre a abertura parcial e a eliminação completa da parede correspondente.

TABELA 16 - VARIAÇÕES DE FORÇAS DE CORTE ENTRE ELEMENTOS E PISOS - MODELO B

Pisos	Distribuição de forças no piso por elemento (%)			Variação de forças em relação ao Modelo 0 (%)		
	Pilares	Paredes	Núcleo	Pilares	Paredes	Núcleo
1	0	89	11	-	1.0	-7.0
2	0	89	11	-	1.0	-7.3
3	7	76	17	2.0	4.2	-16.2
4	7	71	22	3.0	6.7	-17.6
5	10	67	23	2.2	7.0	-16.7
6	11	65	24	1.6	4.8	-11.8
7	15	57	28	-0.5	-5.9	14.9
8	16	58	26	-0.4	-4.5	11.8
9	17	58	24	-0.4	-2.2	6.0
10	19	58	23	-0.4	-0.8	2.5
11	19	59	22	-0.4	-0.2	0.9
12	21	58	22	-0.3	0.0	0.2
13	24	55	21	-0.2	0.1	-0.1
14	51	29	21	0.0	0.9	-1.2

TABELA 17 - VARIAÇÕES DE FORÇAS DE CORTE ENTRE ELEMENTOS X PISOS - MODELO B+

Pisos	Distribuição de forças no piso por elemento (%)			Variação de forças em relação ao Modelo 0 (%)		
	Pilares	Paredes	Núcleo	Pilares	Paredes	Núcleo
1	0	91	9	-	3.1	-22.3
2	0	90	10	-	2.1	-15.8
3	7	82	11	6.2	11.4	-44.3
4	8	79	13	9.4	18.7	-49.3
5	10	76	14	7.2	20.4	-49.0
6	12	71	17	5.5	14.5	-36.0
7	15	51	35	-0.8	-16.6	41.6
8	16	52	32	-0.7	-13.7	35.5
9	17	56	27	-0.9	-6.7	18.2
10	19	57	24	-1.0	-2.5	7.4
11	19	59	22	-1.0	-0.6	2.4
12	21	58	22	-0.7	0.0	0.6
13	24	55	21	-0.3	0.2	-0.3
14	51	29	20	0.1	2.5	-3.6

M. A



M. B

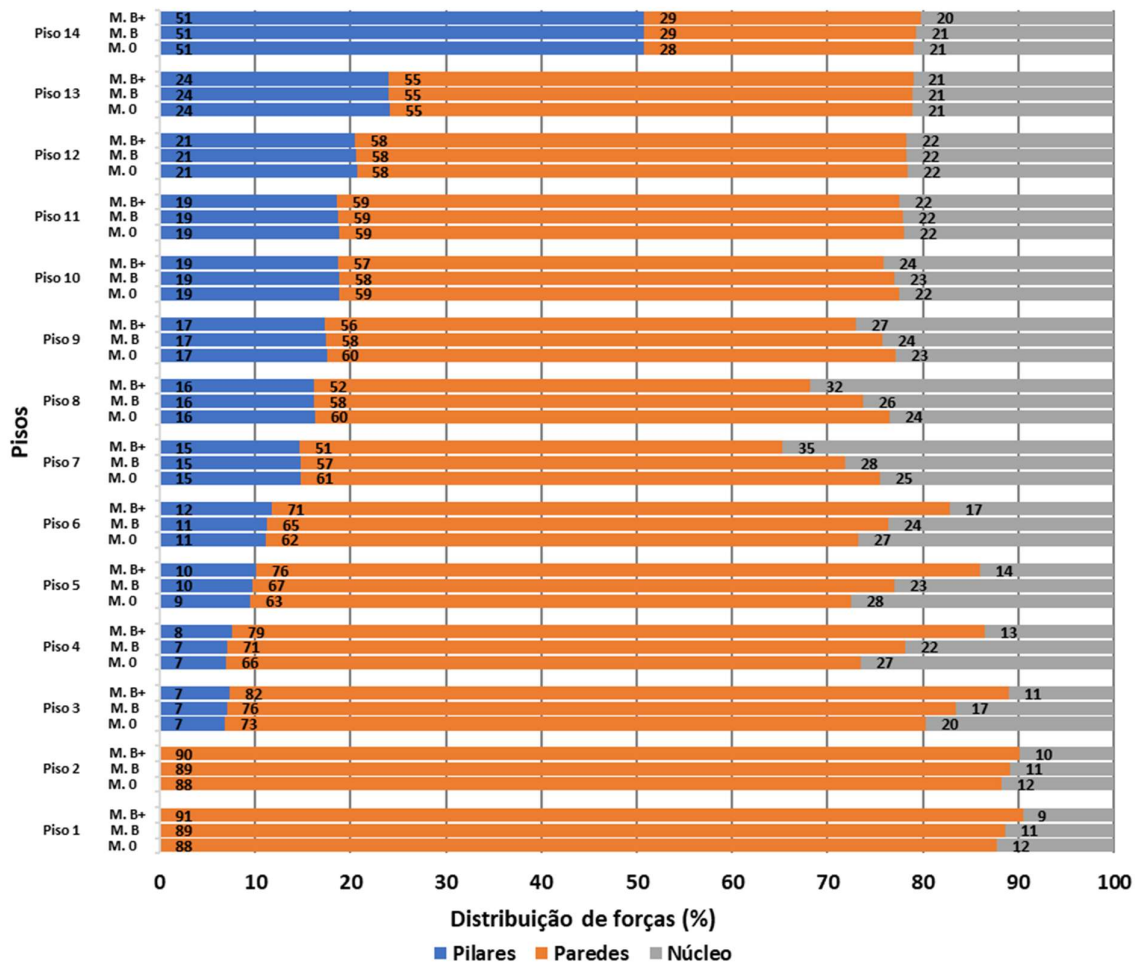


M. C



M. D



FIGURA 23 - DISTRIBUIÇÃO DE FORÇAS F_x COMBINAÇÃO X - MODELOS O/B/B+

Dentro da zona crítica, no piso 3, regista-se uma redução de aproximadamente 16% na contribuição do núcleo, que passa de 20% no modelo base para 17%. Esta perda, embora significativa, ainda é contida e é compensada principalmente pelas paredes, que absorvem um acréscimo de 4% da carga lateral. Já no Modelo B+, em que a parede correspondente é removida na totalidade, os efeitos tornam-se mais acentuados. O núcleo passa a absorver apenas 11% das forças (-44,3%), enquanto as paredes registam um acréscimo de 11% e os pilares aumentam a sua participação em 6%. Esta redistribuição evidencia os primeiros efeitos da assimetria introduzida pela abertura unilateral, com resposta estrutural desigual entre os lados do núcleo.

No piso 4, observa-se a continuidade da tendência de perda de rigidez no núcleo. No Modelo B, a contribuição do núcleo desce para 22%, representando uma redução de -18% face ao modelo de base, enquanto as paredes continuam a absorver a maior parte da carga redistribuída, com um aumento de 7%. No Modelo B+, a perda torna-se ainda mais expressiva, com o núcleo a cair para 13% (-49,34%), e as paredes a atingirem 79% da carga lateral (+18,74%). A remoção integral da parede resulta, portanto, numa redistribuição acentuada dos esforços, dando continuidade ao padrão observado no piso anterior.

No piso 5, a situação mantém-se estável. No Modelo B, o núcleo participa com 13% da carga (-16,67%), mantendo o nível de desempenho observado no piso anterior. As paredes e os pilares continuam a compensar a perda de rigidez de forma controlada. Já no Modelo B+, verifica-se nova redução da

contribuição do núcleo, que desce para 14% (-48,97%), enquanto as paredes continuam a absorver um acréscimo na ordem dos +20%, mantendo o padrão de redistribuição dominante observado nos pisos anteriores.

No piso 6, surgem os primeiros sinais de recuperação. No Modelo B, o núcleo recupera parte da sua rigidez, atingindo 24% (-11,76%), o que indica que a abertura unilateral não compromete completamente o comportamento resistente do núcleo. No entanto, no Modelo B+, apesar de ainda apresentar uma redistribuição significativa, observa-se uma tendência de estabilização: o núcleo sobe para 17% (-35,96%), sinalizando o início de um processo de recuperação vertical mesmo num cenário de remoção total da parede.

Nos pisos superiores (7 e 8), ambos os modelos continuam a refletir os efeitos da perda de rigidez observada nos pisos inferiores. No Modelo B, o núcleo assume entre 28% e 26% da carga lateral, valores ligeiramente superiores ao modelo de base, com diferenças próximas de +6%. Esta resposta traduz uma transferência progressiva de carga para os pisos superiores, fenómeno típico quando os pisos inferiores sofrem enfraquecimento localizado. A recuperação, neste caso, é gradual e coerente com a magnitude das alterações introduzidas.

No Modelo B+, a redistribuição vertical é mais evidente. O núcleo assume 35% no piso 7 e 32% no piso 8, o que representa aumentos superiores a +30% em relação ao modelo de base. Este comportamento indica que a perda de rigidez nos pisos 3 a 6 exige uma resposta mais acentuada dos pisos superiores, que passam a compensar diretamente a debilidade introduzida. A partir do piso 9, os valores tendem a convergir lentamente para os do modelo de referência, com as diferenças no contributo do núcleo a reduzir-se para valores em torno de +5%. A contribuição das paredes e dos pilares estabiliza, reforçando a dissipação progressiva dos efeitos ao longo da altura da estrutura.

A abertura unilateral posterior (Modelo B) mostra-se estruturalmente menos intrusiva do que as aberturas bilaterais, mantendo a participação do núcleo acima dos 20% nos pisos críticos. A redistribuição de forças é relativamente contida e não compromete o equilíbrio estrutural, sendo eficazmente compensada pelas paredes e, em menor grau, pelos pilares. Por outro lado, a versão com remoção total da parede (Modelo B+) conduz a perdas de participação mais relevantes. O núcleo perde até metade da sua participação resistente nos pisos 3 a 5, forçando os pisos superiores a absorver essa carga remanescente, com aumentos de mais de 30% no contributo do núcleo nos pisos 7 e 8.

Apesar de os efeitos se propagarem verticalmente, observa-se um amortecimento gradual a partir do piso 9, com desaparecimento quase completo após 4 a 5 pisos acima da zona crítica. A assimetria introduzida pela abertura unilateral influencia diretamente a redistribuição estrutural, mas com menor severidade do que as aberturas bilaterais observadas no Modelo A, como seria de esperar.

4.4.3. MODELO C

O Modelo C introduz aberturas escalonadas no núcleo estrutural, alternando a sua localização entre os dois lados posteriores nos pisos 3 a 6. Esta configuração foi concebida para evitar perdas contínuas de rigidez numa única linha vertical, que permite avaliar os efeitos de uma geometria mais distribuída e descontínua. O Modelo C+, por sua vez, representa a versão mais crítica desta proposta, na qual a parede onde se localizaria a abertura é completamente removida, mantendo o mesmo padrão escalonado.

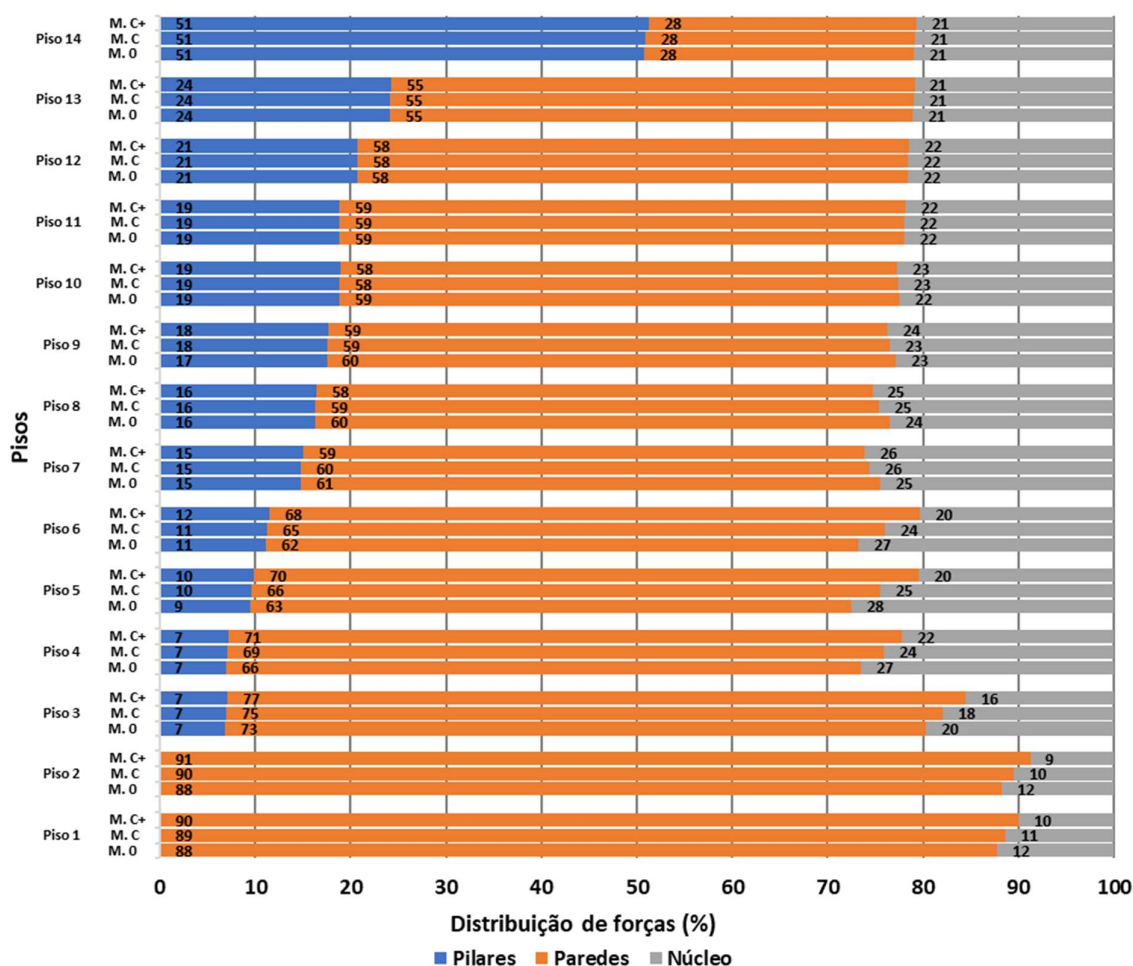
TABELA 18 - VARIAÇÕES DE FORÇAS DE CORTE ENTRE ELEMENTOS X PISOS - MODELO C

Pisos	Distribuição de forças no piso por elemento (%)			Variação de forças em relação ao Modelo 0 (%)		
	Pilares	Paredes	Núcleo	Pilares	Paredes	Núcleo
1	0	89	11	-	1.0	-7.0
2	0	90	10	-	1.5	-11.1
3	7	75	18	1.1	2.4	-9.2
4	7	69	24	1.8	3.5	-9.2
5	10	66	25	1.6	4.6	-11.1
6	11	65	24	1.5	4.2	-10.4
7	15	60	26	0.2	-1.9	4.6
8	16	59	25	0.2	-1.8	4.6
9	18	59	23	0.1	-0.9	2.3
10	19	58	23	0.0	-0.3	0.8
11	19	59	22	0.0	0.0	0.1
12	21	58	22	0.1	0.0	-0.2
13	24	55	21	0.2	0.1	-0.3
14	51	28	21	0.3	-0.2	-0.5

TABELA 19 - VARIAÇÕES DE FORÇAS DE CORTE ENTRE ELEMENTOS X PISOS - MODELO C+

Pisos	Distribuição de forças no piso por elemento (%)			Variação de forças em relação ao Modelo 0 (%)		
	Pilares	Paredes	Núcleo	Pilares	Paredes	Núcleo
1	0	90	10	-	2.5	-18.2
2	0	91	9	-	3.4	-25.6
3	7	77	16	2.9	5.4	-21.2
4	7	71	22	4.3	6.0	-16.2
5	10	70	20	4.4	10.6	-25.8
6	12	68	20	3.9	9.6	-23.9
7	15	59	26	1.4	-3.0	6.7
8	16	58	25	1.1	-3.3	7.7
9	18	59	24	0.8	-1.7	3.8
10	19	58	23	0.6	-0.6	1.0
11	19	59	22	0.5	-0.1	-0.2
12	21	58	22	0.6	0.0	-0.6
13	24	55	21	0.8	0.0	-0.9
14	51	28	21	1.1	-1.1	-1.1



FIGURA 24 - DISTRIBUIÇÃO DE FORÇAS F_x COMBINAÇÃO X - MODELOS 0/C/C+

Nos pisos críticos, o comportamento do Modelo C revela-se equilibrado. No piso 3, o núcleo absorve 18% dos esforços, uma redução de aproximadamente 9% face ao modelo de base. Esta perda é compensada com um ligeiro aumento da carga absorvida pelas paredes (+2,36%). No Modelo C+, a redução da participação do núcleo é mais expressiva (16%, o que representa menos 21%), mas a redistribuição permanece bem distribuída: os pilares aumentam a sua participação em +3% e as paredes em +5%. Mesmo com a remoção da parede de um dos lados, o núcleo mantém um contributo relevante, superior ao observado nos modelos A+ e B+.

No piso 4, a resposta mantém-se estável. O Modelo C apresenta uma participação do núcleo de 24% (–9,2%), com redistribuições suaves para paredes (+3,49%) e pilares (+1,78%). O Modelo C+ regista uma redução de cerca de 16%, resultando numa participação de 22%. Ainda assim, trata-se de um valor superior aos obtidos nos modelos com aberturas contínuas. Estes resultados sugerem que a alternância na posição das aberturas entre pisos contribui para mitigar a concentração localizada de esforços nos elementos adjacentes.

No piso 5, o núcleo mantém uma participação de 25% no Modelo C (–11,1%), enquanto as paredes absorvem o acréscimo de esforço (+4,61%). No Modelo C+, o núcleo cai para 20% (–25,77%), valor ainda significativo e suficiente para garantir participação estrutural. A redistribuição mantém-se bem

controlada, com ausência de transferências excessivas para os pilares, o que reforça a eficácia da estratégia adotada.

No piso 6, observa-se a continuidade deste padrão. O Modelo C apresenta um contributo do núcleo de 24% (-10,37%), em linha com os pisos anteriores. Já o Modelo C+ regista um valor de 20% (-23,95%), mantendo a consistência do comportamento. A alternância das aberturas entre pisos permite preservar a continuidade global da rigidez do núcleo, reduzindo significativamente a sensibilidade à remoção pontual de uma das paredes.

Nos pisos superiores, a recuperação é visível. No Modelo C, o núcleo absorve entre 25% e 23% das forças laterais entre os pisos 7 e 10, com diferenças reduzidas em relação ao modelo base (até +4%). No Modelo C+, a resposta é ligeiramente mais intensa nos pisos 7 e 8, com diferenças de até +7,7%, refletindo a redistribuição de esforços dos pisos inferiores. No entanto, esta diferença diminui gradualmente até ao piso 10, sinalizando uma recuperação progressiva e estável. Em ambos os modelos, a propagação dos efeitos das aberturas é limitada a poucos pisos acima da zona crítica, sem que se observe um impacto vertical cumulativo, como se verificou nos modelos com aberturas contínuas, nomeadamente o A+.

O Modelo C indica ter o melhor desempenho entre todos os modelos com aberturas introduzidas no núcleo analisados até agora. O núcleo mantém uma participação superior a 17% em todos os pisos críticos, mesmo na presença de alterações geométricas. A estratégia de alternância das aberturas entre os pisos revela-se eficaz para conter a redistribuição de esforços e favorecer uma recuperação mais rápida e uniforme nos níveis superiores. No Modelo C+, ainda que se verifique a remoção completa das paredes alternadas, as perdas de rigidez permanecem moderadas e dentro de um intervalo estrutural previsível. A combinação entre variação espacial e descontinuidade vertical das aberturas reduz substancialmente os efeitos negativos sobre a rigidez do núcleo e contribui para a preservação da estabilidade global da estrutura.

4.4.4. MODELO D

O Modelo D introduz aberturas posteriores em ambos os lados do núcleo, de forma alternada, apenas nos pisos 3 e 5. Nos pisos 4 e 6, não existem aberturas, criando uma descontinuidade vertical deliberada. Esta configuração foi desenvolvida com o objetivo de avaliar se a interrupção das aberturas em pisos intercalados poderia promover uma dissipação mais equilibrada das perturbações introduzidas na rigidez do núcleo. O Modelo D+ representa a versão mais severa desta proposta, com a remoção completa das paredes onde estariam localizadas as aberturas nos pisos 3 e 5.

TABELA 20 - VARIAÇÕES DE FORÇAS DE CORTE ENTRE ELEMENTOS X PISOS - MODELO D

Pisos	Distribuição de forças no piso por elemento (%)			Variação de forças em relação ao Modelo 0 (%)		
	Pilares	Paredes	Núcleo	Pilares	Paredes	Núcleo
1	0	89	11	-	1.9	-13.9
2	0	90	10	-	2.1	-15.5
3	7	82	11	4.7	11.4	-43.8
4	7	64	29	-0.2	-3.1	7.9
5	10	75	15	5.8	19.6	-46.8
6	11	60	29	0.1	-4.1	9.4
7	15	58	27	0.4	-4.8	11.5
8	16	59	25	0.3	-2.6	6.5
9	18	59	24	0.2	-1.1	2.6
10	19	58	23	0.1	-0.3	0.7
11	19	59	22	0.1	0.0	0.0
12	21	58	22	0.2	0.1	-0.4
13	24	55	21	0.4	0.1	-0.6
14	51	28	21	0.6	-0.4	-0.9

TABELA 21 - VARIAÇÕES DE FORÇAS DE CORTE ENTRE ELEMENTOS X PISOS - MODELO D+

Pisos	Distribuição de forças no piso por elemento (%)			Variação de forças em relação ao Modelo 0 (%)		
	Pilares	Paredes	Núcleo	Pilares	Paredes	Núcleo
1	0	92	8	-	4.6	-33.2
2	0	93	7	-	5.3	-39.8
3	8	89	3	9.6	21.5	-83.3
4	7	63	30	0.7	-4.6	11.2
5	11	85	4	11.7	35.8	-85.8
6	11	59	30	1.6	-5.1	11.2
7	15	56	29	1.6	-8.1	19.1
8	16	57	26	1.2	-4.6	10.9
9	18	58	24	1.0	-1.9	4.2
10	19	58	23	0.7	-0.6	0.9
11	19	59	22	0.6	0.0	-0.4
12	21	58	21	0.8	0.1	-0.9
13	24	55	21	1.1	0.0	-1.3
14	52	28	21	1.6	-1.5	-1.7

M. A



M. B



M. C



M. D



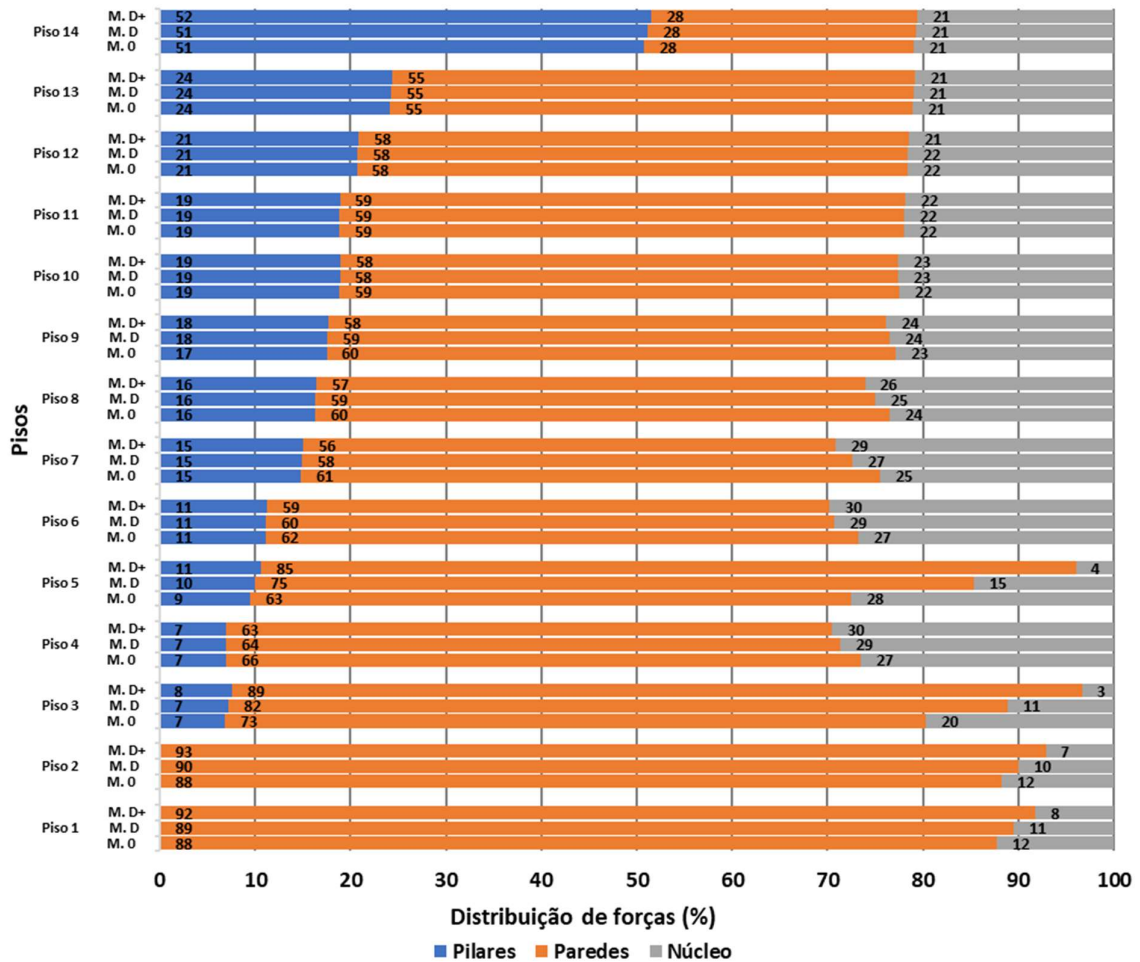


FIGURA 25 - DISTRIBUIÇÃO DE FORÇAS Fx COMBINAÇÃO X - MODELOS 0/D/D+

No piso 3, onde se localiza uma abertura posterior dupla, o Modelo D apresenta uma redução significativa da contribuição do núcleo, que desce para 11% (−43,81%). As paredes aumentam a sua participação em +11%, com um ligeiro reforço adicional nos pilares. No Modelo D+, o impacto é ainda mais acentuado: o núcleo absorve apenas 3% da carga lateral, o que representa uma variação negativa de −83% em relação ao modelo base. Estes resultados evidenciam que a abertura bilateral, mesmo em apenas um piso, tem um impacto profundo sobre a rigidez do núcleo, comparável ao verificado no Modelo A. A comparação entre os modelos A, B e D confirma que, apesar da alternância vertical, os efeitos locais da abertura bilateral são intensos.

No piso 4, onde não existe abertura, observa-se um comportamento inverso. O núcleo no Modelo D assume a maior participação registada entre todos os modelos para este nível: 29% (+7,87%). No Modelo D+, a resposta é semelhante, com o núcleo a contribuir com 30% (+11,20%). Esta recuperação da rigidez é particularmente significativa e sugere uma forma de compensação vertical: os pisos não afetados pelas aberturas assumem um papel estabilizador, contribuindo de forma mais efetiva para a resistência lateral da estrutura e absorvendo parte dos esforços que, de outra forma, sobrecarregariam os pisos enfraquecidos.

O piso 5, com nova abertura bilateral, volta a revelar perdas acentuadas. No Modelo D, o núcleo absorve apenas 15% da carga (−46,77%), enquanto as paredes registam um crescimento de +20%. No Modelo

D+, este piso apresenta a menor contribuição do núcleo entre todos os modelos analisados: apenas 4%, o que representa uma redução de -85,77%. A combinação da abertura no piso 5 com a já existente no piso 3, mesmo separadas por um piso sem abertura, resulta numa configuração desfavorável, o que faz que a continuidade da rigidez do núcleo seja prejudicada.

No piso 6, sem abertura, observa-se nova recuperação. O núcleo no Modelo D atinge 29% (+9,43%), superando inclusive o valor do modelo de base. No Modelo D+, o valor é semelhante: 30% (+11,19%). Assim como no piso 4, a ausência de aberturas permite o retorno imediato da rigidez do núcleo. A alternância entre pisos afetados e não afetados promove, portanto, uma recuperação localizada, ainda que os impactos nos pisos enfraquecidos não sejam totalmente neutralizados.

Nos pisos superiores, a partir do piso 7, os valores de participação do núcleo oscilam entre 27% e 23% tanto no Modelo D como no D+, aproximando-se gradualmente dos valores do modelo base. A diferença entre os dois modelos torna-se cada vez menor, desaparecendo praticamente por completo a partir do piso 11. Esta recuperação é ligeiramente mais lenta do que a observada no Modelo C, mas apresenta-se de forma mais eficiente e controlada do que nos modelos A+ e B+, cujos efeitos estruturais se propagavam de forma mais prolongada.

Em termos gerais, o Modelo D apresenta um comportamento misto, com perdas relevantes de rigidez nos pisos com abertura bilateral (até -44%), mas com forte recuperação nos pisos sem abertura adjacentes. Esta alternância piso a piso promove uma redistribuição vertical localizada, limitando os efeitos estruturais a apenas um ou dois níveis. No caso do Modelo D+, como esperado, as perdas são mais expressivas, com o núcleo a participar com apenas 3% a 4% da carga lateral nos pisos afetados. No entanto, mesmo com remoções completas, observa-se uma tendência clara de recuperação rápida nos pisos não alterados, o que indica um amortecimento vertical eficiente.

Comparativamente aos modelos com aberturas contínuas — como o Modelo A e o A+ — o Modelo D mostra-se estruturalmente menos penalizante. A estratégia de alternância, ainda que parcial, contribui para manter a rigidez global do sistema e oferece uma solução intermédia para cenários onde a presença de aberturas seja inevitável. Esta abordagem pode, portanto, ser considerada uma alternativa viável para mitigar os efeitos negativos da perda de rigidez no núcleo, sem comprometer significativamente a estabilidade geral da estrutura.

4.4.5. SÍNTESE GERAL DO COMPARATIVO ENTRE FORÇAS DE CORTE NOS PISOS E MODELOS

A análise dos modelos modificados em comparação com o modelo de referência (Modelo 0), sob a ação sísmica na direção X (Combinação 1), permitiu identificar padrões consistentes quanto à redistribuição dos esforços verticais e à capacidade do núcleo em manter a continuidade da rigidez ao longo da altura do edifício.

Verificou-se que os modelos com aberturas posteriores em ambos os lados do núcleo, distribuídas de forma contínua pelos pisos críticos — nomeadamente os Modelos A e A+ — apresentaram as maiores reduções percentuais na participação do núcleo. Esses modelos demonstraram ainda efeitos de propagação vertical mais prolongados, com perturbações estruturais que se estendem por vários níveis acima das zonas modificadas. Em contraste, os modelos com aberturas unilaterais (Modelos B e B+) ou escalonadas (Modelos C e C+) revelaram um desempenho mais favorável, com perdas localizadas e recuperação progressiva do contributo do núcleo nos pisos superiores. O Modelo C destacou-se como a configuração geométrica mais equilibrada, conjugando perdas moderadas com uma oscilação vertical reduzida e um retorno célere à condição estrutural de base.

Os modelos com aberturas alternadas piso a piso (Modelos D e D+) apresentaram um comportamento misto. Apesar de registarem perdas acentuadas de rigidez nos pisos com abertura, evidenciaram também uma capacidade notável de compensação nos pisos adjacentes não modificados. Esta resposta vertical imediata limita a propagação dos efeitos adversos mesmo em situações de remoção completa das paredes, reforçando a importância da alternância como estratégia mitigadora.

De forma geral, os resultados indicam que a performance sísmica do núcleo estrutural está fortemente condicionada pela disposição, continuidade e lateralidade das aberturas. Não é apenas a quantidade de área aberta que determina a resposta estrutural, mas também a regularidade com que essas descontinuidades ocorrem e a forma como se distribuem ao longo da altura do edifício. A geometria das intervenções assume, assim, um papel central na forma como os esforços são absorvidos, mobilizados e redistribuídos pelo sistema resistente.

Estas tendências oferecem uma base para a análise aprofundada que se seguirá no próximo capítulo, centrada no comportamento interno do núcleo estrutural. Essa avaliação será conduzida a partir das razões normalizadas entre momento fletor e esforço cortante (R_x e R_y), permitindo não apenas aferir a rigidez efetiva por piso, mas também compreender os mecanismos internos de resposta estrutural perante diferentes cenários de descontinuidade geométrica.

4.5. ANÁLISE LOCAL DO NÚCLEO COM BASE NAS RAZÕES R_x E R_y

Dando continuidade à avaliação do desempenho estrutural do núcleo, este subcapítulo apresenta a análise das razões adimensionais entre momento fletor e esforço cortante — R_x (M_y/F_x) e R_y (M_x/F_y) — normalizadas pela altura dos pisos ao longo da estrutura. Estes parâmetros, previamente introduzidos no estudo do modelo de base (Modelo 0), são aqui retomados com o intuito de oferecer uma leitura mais precisa sobre o comportamento interno do núcleo sob diferentes configurações geométricas impostas pelas aberturas.

As razões R_x e R_y funcionam como indicadores da natureza da resposta estrutural do núcleo: valores mais elevados apontam para uma atuação predominantemente flexionada, enquanto valores mais baixos sugerem domínio de esforços de corte.

Esta análise concentra-se na evolução vertical destes rácios, com atenção especial para os pisos 3 a 6 — zona crítica onde foram implementadas as aberturas — bem como nos pisos imediatamente superiores, que tendem a sofrer os efeitos de redistribuição de esforços causados pelas descontinuidades. Ao confrontar os padrões observados nos diferentes modelos — com aberturas contínuas, unilaterais, escalonadas ou alternadas — pretende-se entender de que modo cada tipologia interfere na integridade do regime resistente do núcleo e na sua capacidade de manter uma resposta estrutural coerente ao longo da altura.

Mais do que apontar valores absolutos, esta abordagem permite identificar tendências e mudanças de comportamento, oferecendo uma leitura aprofundada sobre como o núcleo absorve, transmite e redistribui os esforços ao ser modificado geometricamente. Para complementar, a análise da distribuição média de forças, os fatores R_x e R_y ajudam a localizar zonas de maior solicitação relativa, a identificar pontos críticos no dimensionamento e a avaliar o grau de propagação vertical das perturbações introduzidas pelas intervenções no núcleo.

4.5.1. MODELO A

A configuração adotada no Modelo A apresenta a introdução de aberturas posteriores em ambos os lados do núcleo, distribuídas de forma contínua entre os pisos 3 e 6. Esta solução geométrica gera alterações significativas no comportamento estrutural do núcleo, refletidas diretamente nas variações dos fatores R_x e R_y — parâmetros adimensionais que traduzem a relação entre momento fletor e esforço cortante por piso. A sua leitura permite identificar mudanças na rigidez relativa do núcleo e na forma como os esforços são mobilizados internamente.

TABELA 22 - VARIAÇÕES FATORES R ENTRE PISOS - MODELO A

Modelo A								
Piso	Comb. X				Comb. Y			
	$\Delta\% F_x$ (Modelo 0)	$\Delta\% M_y$ (Modelo 0)	R_x	$\Delta\% R_x$ (Modelo 0)	$\Delta\% F_y$ (Modelo 0)	$\Delta\% M_x$ (Modelo 0)	R_y	$\Delta\% R_y$ (Modelo 0)
1	-26%	-14%	5.85	17%	-25%	-1%	1.34	32%
2	-32%	-16%	7.67	22%	-43%	-13%	2.87	54%
3	-37%	-20%	5.54	27%	11%	-1%	2.03	-11%
4	-41%	-16%	4.11	43%	-8%	-10%	1.62	-2%
5	-40%	-7%	3.62	56%	-17%	-12%	1.46	6%
6	-38%	4%	3.37	68%	-27%	-4%	1.60	31%
7	26%	12%	1.98	-12%	-21%	-24%	1.27	-4%
8	23%	0%	1.83	-18%	-8%	-8%	1.31	-1%
9	11%	-5%	1.90	-14%	-2%	-2%	1.30	-1%
10	4%	-4%	1.95	-8%	0%	1%	1.32	1%
11	1%	-5%	1.83	-5%	0%	1%	1.09	1%
12	-1%	-4%	1.62	-3%	0%	1%	0.88	1%
13	-2%	-3%	1.42	-1%	0%	1%	0.72	1%
14	-3%	-2%	1.27	2%	-1%	1%	0.85	2%

TABELA 23 - VARIAÇÕES FATORES R ENTRE PISOS - MODELO A+

Modelo A+								
Piso	Comb. X				Comb. Y			
	$\Delta\% F_x$ (Modelo 0)	$\Delta\% M_y$ (Modelo 0)	R_x	$\Delta\% R_x$ (Modelo 0)	$\Delta\% F_y$ (Modelo 0)	$\Delta\% M_x$ (Modelo 0)	R_y	$\Delta\% R_y$ (Modelo 0)
1	-52%	-32%	7.14	42%	-78%	-1%	4.57	350%
2	-36%	-38%	6.06	-4%	-57%	-40%	2.64	42%
3	-80%	-46%	11.57	166%	29%	-18%	1.44	-37%
4	-83%	-37%	10.83	277%	-32%	-47%	1.29	-22%
5	-82%	-19%	10.72	362%	-45%	-52%	1.18	-14%
6	-81%	7%	11.25	461%	-64%	-43%	1.92	58%
7	51%	31%	1.94	-14%	-75%	-97%	0.16	-88%
8	50%	5%	1.58	-30%	-34%	-38%	1.24	-6%
9	26%	-10%	1.60	-28%	-10%	-11%	1.30	-1%
10	9%	-12%	1.72	-19%	-2%	2%	1.37	5%
11	1%	-10%	1.72	-11%	-1%	2%	1.11	3%
12	-2%	-8%	1.57	-6%	-1%	2%	0.90	4%
13	-5%	-6%	1.42	-1%	-2%	2%	0.74	4%
14	-7%	-3%	1.30	4%	-3%	2%	0.88	5%



Nos pisos 1 e 2, correspondentes às caves — zonas de elevada rigidez — já se observa um aumento dos fatores R_x e R_y , da ordem de +16% e +31%, respetivamente. Estas variações não decorrem de alterações diretas nesses níveis, mas sim da redução das forças cortantes resultante da descontinuidade estrutural introduzida nos pisos superiores. A diminuição de corte nestes pisos inferiores reflete um mecanismo compensatório, no qual o sistema redireciona os esforços para zonas mais rígidas, antecipando uma perda de continuidade no núcleo. Desde logo, evidencia-se uma tendência de flexibilidade induzida, que afeta os pisos abaixo das intervenções.

Nos pisos diretamente afetados pelas aberturas (3 a 6), os efeitos tornam-se significativamente mais marcados. O fator R_x apresenta aumentos progressivos, variando de +27% no piso 3 até +68% no piso 6. Esta evolução acompanha uma redução expressiva do esforço de corte, que chega a atingir -41%, e uma diminuição mais moderada dos momentos fletores (até -15%). Tal comportamento indica que a perda da capacidade de resistência ao corte obriga os momentos fletores a concentrarem-se em zonas onde já não existe um caminho contínuo de dissipação, originando rácios elevados de M_y/F_x . No que respeita ao fator R_y , embora as variações também estejam presentes, mantêm-se em níveis mais discretos — com um máximo de +31% no piso 6 — sugerindo uma menor sensibilidade à geometria adotada, o que é coerente com a orientação das aberturas, predominantemente na direção X.

A análise do Modelo A+ — correspondente à remoção total das paredes nos pisos 3 a 6 — evidencia um agravamento acentuado das tendências já observadas. O fator R_x atinge valores expressivos, com aumentos de +166% no piso 3, +362% no piso 5 e culminando em +460% no piso 6. Esta intensificação decorre de uma combinação crítica: a drástica redução do esforço cortante (até -83%) e a manutenção — ou até incremento — dos momentos fletores, como observado no piso 6. Como resultado, o núcleo deixa de funcionar como um elemento eficaz na resistência ao corte e passa a concentrar esforços flexurais em regiões estruturalmente frágeis. Esta mudança de regime de solicitação exige atenção redobrada no projeto, nomeadamente na forma como se detalham as ligações com as lajes, os apoios entre pisos e a continuidade dos elementos verticais.

Nos pisos superiores (7 a 10), observa-se um processo de reequilíbrio. No Modelo A, os fatores R_x começam a regressar a valores próximos do modelo de base, com variações entre -18% e -5%, sinalizando a retoma progressiva da rigidez e da continuidade das paredes. No entanto, no Modelo A+, esta recuperação é visivelmente mais lenta: os valores de R_x mantêm-se entre -29% e -7%, revelando que os efeitos da remoção total de paredes se prolongam por três a quatro pisos acima da zona modificada, com impacto residual na resposta flexural do núcleo.

Nos pisos superiores (11 a 14), regista-se uma estabilização clara dos fatores R_x e R_y em ambos os modelos. As variações passam a ser residuais, inferiores a $\pm 5\%$, e o comportamento do núcleo volta a aproximar-se da condição de projeto do modelo de referência. Esta tendência confirma que, apesar da severidade das alterações nos pisos inferiores, os seus efeitos permanecem relativamente localizados em altura, dissipando-se de forma progressiva ao longo da estrutura.

A análise das razões adimensionais M_y/F_x (R_x) e M_x/F_y (R_y) nos Modelos A e A+ evidencia os efeitos profundos das aberturas contínuas e simétricas no núcleo. Os pisos diretamente afetados registam elevações significativas destes fatores, refletindo uma mudança no comportamento resistente do núcleo, que passa a atuar de forma predominantemente flexionada. O Modelo A+, em particular, acentua estas tendências, com reduções marcadas no esforço cortante e concentrações de momento que comprometem a função original do núcleo enquanto elemento de rigidez lateral.

Os efeitos verticais das alterações propagam-se até cerca do piso 10, com estabilização observada apenas nos níveis superiores. A direção X — associada a R_x — é claramente mais afetada, em coerência com a orientação das aberturas introduzidas. Do ponto de vista estrutural, estas variações apontam para zonas críticas que requerem especial atenção no dimensionamento, nomeadamente quanto à redistribuição interna de esforços, à continuidade das paredes resistentes e à eficácia das ligações entre os elementos verticais da estrutura.

4.5.2. MODELO B

O Modelo B adota uma configuração assimétrica de abertura no núcleo, com remoção parcial de painéis estruturais apenas em um dos lados, entre os pisos 3 e 6. Esta solução permite avaliar o impacto de uma perda de continuidade localizada, contrastando com a configuração mais severa e simétrica do Modelo A. O Modelo B+, por sua vez, representa a versão mais crítica desta proposta, simulando a remoção total das paredes no mesmo lado, mantendo a assimetria, mas intensificando a descontinuidade estrutural.

TABELA 24 - VARIAÇÕES FATORES R ENTRE PISOS - MODELO B

Modelo B								
Piso	Comb. X				Comb. Y			
	$\Delta\% F_x$ (Modelo 0)	$\Delta\% M_y$ (Modelo 0)	R_x	$\Delta\% R_x$ (Modelo 0)	$\Delta\% F_y$ (Modelo 0)	$\Delta\% M_x$ (Modelo 0)	R_y	$\Delta\% R_y$ (Modelo 0)
1	-8%	-5%	5.19	3%	-10%	0%	1.13	12%
2	-8%	-5%	6.46	3%	-18%	-5%	2.16	16%
3	-17%	-12%	4.61	6%	4%	1%	2.19	-4%
4	-18%	-10%	3.16	10%	-3%	-3%	1.66	1%
5	-17%	-6%	2.62	13%	-7%	-3%	1.43	5%
6	-12%	-2%	2.24	11%	-11%	1%	1.38	13%
7	14%	7%	2.11	-6%	-8%	-9%	1.31	-2%
8	11%	2%	2.06	-8%	-3%	-3%	1.31	0%
9	5%	-1%	2.10	-6%	0%	-1%	1.30	0%
10	2%	0%	2.08	-2%	0%	0%	1.31	0%
11	0%	-3%	1.87	-3%	0%	0%	1.08	0%
12	0%	-2%	1.63	-2%	0%	1%	0.88	1%
13	-1%	-2%	1.42	-1%	0%	1%	0.72	1%
14	-2%	-2%	1.25	0%	0%	1%	0.85	1%

TABELA 25 - VARIAÇÕES FATORES R ENTRE PISOS - MODELO B+

Modelo B+								
Piso	Comb. X				Comb. Y			
	$\Delta\% F_x$ (Modelo 0)	$\Delta\% M_y$ (Modelo 0)	Rx	$\Delta\% R_x$ (Modelo 0)	$\Delta\% F_y$ (Modelo 0)	$\Delta\% M_x$ (Modelo 0)	Ry	$\Delta\% R_y$ (Modelo 0)
1	-24%	-15%	5.64	12%	-28%	1%	1.43	41%
2	-18%	-17%	6.33	1%	-53%	-14%	3.41	83%
3	-45%	-32%	5.40	24%	15%	-4%	1.90	-17%
4	-50%	-27%	4.19	46%	-12%	-15%	1.60	-3%
5	-50%	-17%	3.86	66%	-18%	-15%	1.43	4%
6	-37%	-3%	3.10	54%	-25%	-9%	1.48	22%
7	39%	23%	2.00	-11%	-24%	-33%	1.17	-12%
8	33%	7%	1.81	-19%	-10%	-12%	1.29	-2%
9	16%	-1%	1.89	-15%	-2%	-3%	1.30	-1%
10	6%	-2%	1.97	-7%	0%	1%	1.32	1%
11	1%	-8%	1.75	-10%	0%	1%	1.08	1%
12	-1%	-7%	1.56	-6%	0%	2%	0.88	1%
13	-2%	-6%	1.38	-4%	0%	2%	0.73	2%
14	-6%	-5%	1.26	1%	-1%	2%	0.86	3%



Nos pisos inferiores (1 e 2), observa-se uma elevação moderada dos fatores Rx e Ry, com aumentos inferiores a +3% no Modelo B e até +13% no Modelo B+. Tais variações resultam da redução dos esforços de corte nestes níveis — especialmente F_x — que chega a cair até 24% no Modelo B+. Como já verificado noutras configurações, a perda de continuidade nos pisos superiores induz redistribuições de esforços que se manifestam logo nos primeiros níveis da estrutura, ainda que de forma contida.

Nos pisos críticos (3 a 6), a atuação do Modelo B reflete o carácter moderado da intervenção. O fator Rx apresenta crescimentos progressivos, atingindo um máximo de +13% no piso 5, enquanto Ry sobe até +13% no piso 6. Estas variações estão associadas a uma redução de esforço cortante (F_x) até -18%, superior à diminuição dos momentos fletores, o que resulta no aumento das razões M_y/F_x e M_x/F_y . A magnitude relativamente baixa destes valores indica que a intervenção unilateral preserva em grande medida o equilíbrio do núcleo, limitando o impacto ao mínimo necessário e demonstrando uma boa capacidade de recuperação estrutural.

No Modelo B+, as tendências observadas no modelo com abertura parcial acentuam-se. O fator Rx sobe para +66% no piso 5 e +54% no piso 6, enquanto os esforços de corte apresentam quedas superiores a 45%. Este comportamento indica uma atuação mais flexionada do núcleo, na sequência da redução significativa da sua capacidade de resistência ao corte. O fator Ry, embora menos afetado, regista variações até +22% no piso 6, sugerindo que a abertura unilateral, mesmo localizada, também gera efeitos secundários na direção transversal — especialmente quando a parede afetada é completamente removida. Ainda assim, o comportamento mantém-se estruturalmente mais equilibrado do que o observado em modelos com aberturas simétricas contínuas.

Nos pisos intermédios (7 a 10), ambos os modelos demonstram sinais evidentes de recuperação. Os fatores Rx tendem a aproximar-se dos valores do modelo de base, com variações de até -15% no Modelo B e -19% no Modelo B+. O fator Ry estabiliza entre -2% e +1% nos dois casos, indicando que o comportamento na direção Y retoma rapidamente o padrão de rigidez inicial. Esta resposta confirma

que, embora existam perturbações locais significativas, a propagação vertical dos efeitos negativos é limitada, especialmente em configurações assimétricas de abertura.

Nos pisos superiores (11 a 14), as diferenças tornam-se residuais. Os fatores R_x e R_y apresentam variações inferiores a $\pm 5\%$, confirmando que os efeitos provocados pelas aberturas se restringem, em grande medida, aos pisos modificados e a um máximo de três pisos superiores. A estabilização precoce do modelo B em comparação ao Modelo A reforça a hipótese de que a assimetria na abertura reduz a severidade e a extensão dos impactos verticais.

A análise das razões adimensionais M_y/F_x (R_x) e M_x/F_y (R_y) nos Modelos B e B+ revela que configurações com abertura unilateral provocam alterações estruturais mais suaves, quando comparadas às configurações simétricas e contínuas. A redução de corte nos pisos críticos gera aumentos moderados nos fatores R , que não ultrapassam $+13\%$ no Modelo B, e atinge um máximo de $+66\%$ no Modelo B+. Ainda que este último apresente agravamento claro das tendências, o seu comportamento permanece estruturalmente mais contido do que no Modelo A+, com recuperação mais rápida da rigidez ao longo da altura da estrutura.

A direção X (R_x) continua a ser a mais impactada, em conformidade com a orientação das aberturas, embora o comportamento em Y (R_y) apresente oscilações discretas em situações de remoção total da parede. De forma geral, os resultados sugerem que configurações assimétricas de abertura, mesmo quando intensificadas, provocam menor perturbação na continuidade do núcleo e constituem soluções mais eficientes do ponto de vista do desempenho sísmico.

4.5.3. MODELO C

O Modelo C introduz uma configuração escalonada de aberturas no núcleo estrutural, a alternar a sua posição entre os dois lados posteriores ao longo dos pisos críticos (3 a 6). Esta estratégia visa avaliar a eficácia da descontinuidade vertical como mecanismo de mitigação estrutural, ao evitar concentrações excessivas de tensões e preservar caminhos alternativos de transmissão de esforços. O Modelo C+ corresponde à versão mais severa desta proposta, com a remoção total das paredes nos mesmos pisos, mantendo o padrão escalonado e, consequentemente, acentuando a perda de rigidez localizada.

TABELA 26 - VARIAÇÕES FATORES R ENTRE PISOS - MODELO C

Modelo C								
Piso	Comb. X				Comb. Y			
	$\Delta\% F_x$ (Modelo 0)	$\Delta\% M_y$ (Modelo 0)	Rx	$\Delta\% R_x$ (Modelo 0)	$\Delta\% F_y$ (Modelo 0)	$\Delta\% M_x$ (Modelo 0)	Ry	$\Delta\% R_y$ (Modelo 0)
1	-7%	-4%	5.22	4%	-12%	0%	1.15	14%
2	-11%	-4%	6.78	8%	-21%	-6%	2.23	20%
3	-9%	-11%	4.27	-2%	8%	-1%	2.07	-9%
4	-9%	1%	3.20	11%	-3%	-8%	1.57	-5%
5	-11%	-11%	2.33	0%	-9%	-10%	1.36	-1%
6	-11%	6%	2.39	19%	-15%	-6%	1.34	10%
7	4%	0%	2.15	-4%	-12%	-14%	1.30	-2%
8	4%	-2%	2.12	-6%	-4%	-5%	1.32	0%
9	2%	-2%	2.14	-4%	-1%	-1%	1.30	-1%
10	1%	-1%	2.10	-1%	0%	0%	1.31	1%
11	0%	-1%	1.91	-1%	0%	0%	1.08	1%
12	0%	-1%	1.66	-1%	0%	1%	0.88	1%
13	-1%	-1%	1.44	0%	0%	1%	0.72	1%
14	-1%	0%	1.26	1%	0%	1%	0.85	1%

TABELA 27 - VARIAÇÕES FATORES R ENTRE PISOS - MODELO C+

Modelo C+								
Piso	Comb. X				Comb. Y			
	$\Delta\% F_x$ (Modelo 0)	$\Delta\% M_y$ (Modelo 0)	Rx	$\Delta\% R_x$ (Modelo 0)	$\Delta\% F_y$ (Modelo 0)	$\Delta\% M_x$ (Modelo 0)	Ry	$\Delta\% R_y$ (Modelo 0)
1	-19%	-10%	5.56	11%	-37%	2%	1.65	62%
2	-26%	-13%	7.47	19%	-73%	-18%	5.72	207%
3	-22%	-28%	4.00	-8%	41%	-14%	1.39	-39%
4	-17%	-2%	3.39	18%	-9%	-46%	0.97	-41%
5	-26%	-29%	2.23	-4%	-37%	-64%	0.79	-42%
6	-25%	9%	2.91	45%	-52%	-56%	1.13	-7%
7	6%	-5%	2.02	-10%	-47%	-58%	1.05	-21%
8	7%	-7%	1.97	-12%	-19%	-21%	1.30	-2%
9	3%	-6%	2.04	-8%	-4%	-6%	1.28	-2%
10	0%	-3%	2.05	-4%	-1%	2%	1.34	3%
11	-1%	-3%	1.89	-2%	0%	2%	1.10	2%
12	-1%	-2%	1.65	-1%	0%	2%	0.89	2%
13	-2%	-2%	1.44	0%	-1%	2%	0.73	3%
14	-2%	-1%	1.27	2%	-1%	2%	0.87	3%



Nos pisos inferiores (1 e 2), ambos os modelos registam aumentos pouco expressivos nos fatores Rx e Ry. No Modelo C, as variações permanecem abaixo de +8% para Rx e +20% para Ry. Já no Modelo C+, verifica-se um incremento mais acentuado em Rx (+19% no piso 2) e um aumento significativo em Ry, que atinge +206% — valor este condicionado por uma redução abrupta da força de corte e que, por isso, deve ser interpretado com reserva. Em termos estruturais, estas observações sugerem que os efeitos das aberturas escalonadas exercem menor influência nos níveis inferiores, contrastando com o comportamento verificado nos modelos com aberturas contínuas, nos quais os efeitos se propagavam com maior intensidade desde a base.

Nos pisos diretamente afetados (3 a 6), o Modelo C destaca-se pela suavidade nas variações dos fatores R. Os aumentos máximos de Rx ocorrem nos pisos 4 e 6, com variações de +11% e +19%, respetivamente. O fator Ry, por sua vez, apresenta pequenas reduções, oscilando entre -5% e -8%. Estes resultados estão associados a uma ligeira redução dos esforços cortantes (Fx e Fy), enquanto os momentos fletores (My e Mx) se mantêm relativamente constantes. Este equilíbrio indica que, mesmo com a presença de aberturas, o núcleo continua a comportar-se de forma predominantemente cortante. Em outras palavras, a alternância entre lados contribui para manter vias eficazes de transmissão de esforço, diluindo os impactos negativos das descontinuidades estruturais.

No Modelo C+, os efeitos tornam-se mais pronunciados, mas ainda dentro de limites aceitáveis. O fator Rx atinge +45% no piso 6, enquanto Ry apresenta oscilações significativas, com máximos de +62% (piso 1) e mínimos de -42% (piso 5). Esta instabilidade decorre da sensibilidade do sistema ao padrão de remoção adotado, mas não atinge os níveis críticos observados em modelos como o A+. Estes resultados confirmam que o escalonamento, mesmo em cenários mais agressivos, permite um controlo eficaz da resposta estrutural e limita a severidade dos distúrbios provocados pelas aberturas.

Nos pisos intermédios (7 a 10), observa-se uma recuperação rápida dos fatores Rx e Ry. As variações não ultrapassam $\pm 12\%$, e a aproximação ao comportamento do modelo de base torna-se evidente a partir do piso 9. Esta tendência indica que os efeitos das aberturas escalonadas permanecem localizados e que a continuidade estrutural é restabelecida de forma célere nos níveis superiores. A regularização do comportamento confirma a eficácia da solução em evitar a propagação vertical prolongada das perturbações.

Nos pisos superiores (11 a 14), os desvios dos fatores R tornam-se residuais, mantendo-se dentro de $\pm 5\%$. Esta estabilização demonstra que a configuração escalonada não compromete o desempenho global do núcleo a médio e longo prazo, mesmo nos casos de remoção total das paredes alternadas.

A análise dos fatores Rx e Ry nos Modelos C e C+ permite concluir que a estratégia de escalonamento das aberturas é altamente eficaz na preservação da rigidez e da continuidade estrutural do núcleo. Mesmo nos pisos diretamente afetados, os valores mantêm-se próximos dos registados no modelo de base, revelando uma atuação mais equilibrada e menos penalizadora do que nas configurações com aberturas contínuas. A distribuição alternada ao longo dos pisos impede a formação de zonas de concentração excessiva de momentos ou cortes, favorecendo uma resposta estrutural difusa e estável.

O Modelo C+ confirma esta tendência: mesmo com remoção total das paredes, os distúrbios permanecem mais controlados do que nos modelos A+ e B+. Estes resultados reforçam a ideia de que o padrão geométrico das aberturas é, em muitos casos, mais determinante do que o volume total removido. A alternância entre lados permite preservar parcialmente os caminhos de carga, proteger a integridade do núcleo e mitigar os efeitos negativos na relação entre esforços fletores e cortantes. Esta solução mostra-se particularmente promissora em contextos onde a introdução de aberturas no núcleo seja inevitável, oferecendo uma alternativa de compromisso entre requisitos funcionais e desempenho sísmico.

4.5.4. MODELO D

O Modelo D implementa um padrão intercalado de aberturas ao longo dos pisos críticos (3 a 6), com remoções em ambos os lados do núcleo nos pisos ímpares (3 e 5) e manutenção das paredes nos pisos pares (4 e 6). Esta solução foi concebida para testar a hipótese de que a alternância entre pisos abertos e pisos íntegros pode atenuar a perda de rigidez e favorecer a recuperação da continuidade estrutural do

núcleo. O Modelo D+, por sua vez, representa a versão extrema desta configuração, na qual as paredes com aberturas são totalmente removidas, mantendo-se o mesmo padrão intercalado.

TABELA 28 - VARIAÇÕES FATORES R ENTRE PISOS - MODELO D

Modelo D								
Piso	Comb. X				Comb. Y			
	$\Delta\%$ Fx (Modelo 0)	$\Delta\%$ My (Modelo 0)	Rx	$\Delta\%$ Rx (Modelo 0)	$\Delta\%$ Fy (Modelo 0)	$\Delta\%$ Mx (Modelo 0)	Ry	$\Delta\%$ Ry (Modelo 0)
1	-14%	-8%	5.35	7%	-21%	-2%	1.27	25%
2	-16%	-10%	6.74	7%	-34%	-11%	2.52	35%
3	-44%	-10%	6.97	60%	-3%	4%	2.44	7%
4	8%	-4%	2.56	-11%	-6%	-23%	1.36	-18%
5	-47%	-6%	4.08	76%	-14%	7%	1.72	25%
6	9%	7%	1.96	-2%	-18%	-22%	1.17	-4%
7	11%	2%	2.06	-9%	-7%	-7%	1.33	0%
8	6%	-1%	2.09	-7%	-2%	-2%	1.32	0%
9	3%	-2%	2.13	-4%	0%	-1%	1.30	0%
10	1%	-2%	2.07	-2%	0%	0%	1.31	1%
11	0%	-1%	1.90	-2%	0%	0%	1.08	1%
12	0%	-1%	1.65	-1%	0%	1%	0.88	1%
13	-1%	-1%	1.43	0%	0%	1%	0.72	1%
14	-1%	-1%	1.26	1%	0%	0%	0.85	1%

TABELA 29 - VARIAÇÕES FATORES R ENTRE PISOS - MODELO D+

Modelo D+								
Piso	Comb. X				Comb. Y			
	$\Delta\%$ Fx (Modelo 0)	$\Delta\%$ My (Modelo 0)	Rx	$\Delta\%$ Rx (Modelo 0)	$\Delta\%$ Fy (Modelo 0)	$\Delta\%$ Mx (Modelo 0)	Ry	$\Delta\%$ Ry (Modelo 0)
1	-34%	-19%	6.16	23%	-77%	-2%	4.26	320%
2	-40%	-22%	8.19	30%	-64%	-40%	3.10	66%
3	-83%	-25%	19.70	353%	6%	-14%	1.84	-19%
4	11%	-13%	2.27	-21%	-36%	-96%	0.09	-94%
5	-86%	-18%	13.45	480%	-43%	-23%	1.85	35%
6	11%	8%	1.95	-3%	-79%	-98%	0.11	-91%
7	18%	1%	1.91	-15%	-34%	-35%	1.31	-1%
8	10%	-4%	1.96	-13%	-9%	-9%	1.31	-1%
9	4%	-4%	2.05	-8%	-2%	-3%	1.29	-1%
10	1%	-3%	2.03	-4%	-1%	2%	1.34	3%
11	0%	-3%	1.88	-2%	-1%	2%	1.11	3%
12	-1%	-2%	1.65	-1%	-1%	2%	0.90	3%
13	-2%	-2%	1.44	0%	-1%	2%	0.74	3%
14	-3%	-1%	1.27	2%	-2%	2%	0.87	4%



Nos pisos de base (1 e 2), ambos os modelos já revelam aumentos nos fatores Rx e Ry, superiores aos observados nas configurações B e C, mas ainda dentro de limites moderados. No Modelo D+, o fator Rx sobe para +22% no piso 1 e +30% no piso 2, enquanto Ry atinge +320% no piso 1. Este último valor, contudo, deve ser interpretado com cautela, dado que decorre de uma queda significativa do esforço de

corte F_y (-76%), o que distorce a razão entre momento e corte. Estas variações iniciais demonstram que, embora o padrão intercalado contenha parte da propagação vertical, os efeitos das aberturas duplas ainda se fazem sentir nos pisos inferiores, embora com menor severidade do que em modelos com descontinuidades contínuas.

Nos pisos diretamente afetados, os efeitos tornam-se mais evidentes. No piso 3, com abertura bilateral, o Modelo D regista um aumento de R_x de $+60\%$, valor que traduz uma mudança clara no regime interno do núcleo. Já no piso 4, onde não há abertura, o fator R_x reduz-se para apenas -10% em relação ao modelo de base, sugerindo uma recuperação parcial da rigidez. Este padrão repete-se nos pisos 5 e 6, com R_x a atingir $+76\%$ no piso 5 e a regredir para -2% no piso 6, evidenciando que os trechos sem abertura funcionam como zonas de compensação estrutural, capazes de estabilizar temporariamente a transmissão de esforços verticais.

No Modelo D+, os efeitos são substancialmente mais intensos nos pisos com abertura. O fator R_x atinge $+353\%$ no piso 3 e eleva-se ainda mais no piso 5, que chega a $+480\%$. Estas variações refletem uma acentuada perda de capacidade cortante e uma concentração de esforços fletores no núcleo remanescente. Apesar disso, os pisos sem abertura (4 e 6) continuam a demonstrar um comportamento de recuperação, com valores de R_x significativamente inferiores, o que reforça a utilidade do padrão intercalado como mecanismo de mitigação, mesmo quando a intervenção é total. Quando comparado aos Modelos A+ e B+, o Modelo D+ revela-se estruturalmente mais equilibrado, com distúrbios menos persistentes nos pisos superiores.

Nos níveis 7 a 10, ambos os modelos demonstram uma tendência clara de estabilização. O fator R_x aproxima-se gradualmente dos valores do modelo de base, oscilando entre 2.05 e 2.13, enquanto R_y permanece entre 1.29 e 1.33. No Modelo D+, as variações em R_x e R_y tornam-se residuais a partir do piso 8, com desvios inferiores a $\pm 13\%$. Este comportamento confirma que os efeitos das aberturas intercaladas se dissipam mais rapidamente ao longo da altura da estrutura, em comparação com as configurações com cortes verticais contínuos.

Nos pisos superiores (11 a 14), as diferenças entre os modelos D, D+ e o modelo base são praticamente nulas. As variações nos fatores R_x e R_y mantêm-se abaixo de $\pm 5\%$, demonstrando que, apesar das intervenções significativas nos pisos inferiores, a resposta estrutural global do núcleo retoma os padrões originais nos níveis mais altos.

A análise dos fatores R_x e R_y nos Modelos D e D+ confirma que a alternância entre pisos com e sem aberturas é eficaz na limitação da propagação vertical dos efeitos adversos. Nos pisos com abertura, os aumentos nos fatores R_x são significativos, embora menos pronunciados do que nos modelos com aberturas contínuas. Já nos pisos intermédios intactos (4 e 6), observa-se uma recuperação parcial da rigidez, funcionando como “zonas de resgate estrutural” que estabilizam a transmissão de esforços.

Mesmo na sua versão extrema (D+), o modelo confirma uma atenuação dos efeitos negativos quando comparado a soluções como A+, evidenciando que o padrão intercalado de remoção permite reduzir a severidade e a extensão vertical das perturbações. Em suma, os Modelos D e D+ demonstram que a distribuição vertical das aberturas é um fator determinante para o comportamento do núcleo. Ao evitar a continuidade das descontinuidades, esta abordagem permite maior capacidade de redistribuição e recuperação de esforços, restabelecendo a estabilidade em menos níveis. Esta configuração mostra-se especialmente útil em contextos onde a introdução de aberturas seja inevitável, oferecendo uma alternativa viável que concilia requisitos funcionais com desempenho sísmico aceitável.

4.5.5. SÍNTESE GERAL ANÁLISE DOS FATORES R ENTRE MODELOS

A análise comparativa dos diferentes cenários de abertura no núcleo permitiu identificar padrões estruturais consistentes, com implicações relevantes para o projeto de edifícios submetidos a ações sísmicas. Independentemente da configuração específica, tornou-se evidente que o desempenho do núcleo não é determinado apenas pela quantidade de material removido, mas sobretudo pela lógica geométrica de distribuição das aberturas — tanto na vertical (ao longo dos pisos) como na planta (em termos de simetria e lateralidade).

Verificou-se que a continuidade vertical das aberturas — quando presente em todos os pisos críticos — constitui o fator mais penalizador para a rigidez do núcleo. Configurações que mantêm aberturas sucessivas no mesmo alinhamento criam zonas de fragilidade acumulada, favorecendo a concentração de esforços flexionais e promovendo a perda de capacidade resistente ao corte. Esta condição acarreta um comportamento mais deformável, com efeitos que se propagam verticalmente e afetam negativamente até os pisos superiores.

Por contraste, estratégias que interrompem ou alternam a localização das aberturas, seja por meio de escalonamento lateral ou intercalamento vertical, revelaram-se eficazes na contenção dos efeitos negativos. Estas soluções atuam como mecanismos de fragmentação das descontinuidades, limitando a propagação dos distúrbios e promovendo zonas de recuperação estrutural. Em termos de comportamento global, estas alternativas preservam melhor a continuidade dos caminhos de carga e favorecem uma redistribuição mais difusa e controlada dos esforços.

A orientação das aberturas também se demonstrou determinante: os efeitos mais relevantes ocorreram na direção paralela à posição das remoções (direção X), enquanto a direção ortogonal (Y) foi menos sensível, confirmando o caráter direcional da rigidez do núcleo. Isto sublinha a importância de considerar a orientação das aberturas não apenas do ponto de vista funcional, mas também estrutural, uma vez que pequenas variações no posicionamento podem resultar em alterações substanciais na forma como o núcleo responde às ações laterais.

De forma geral, os resultados apontam para uma premissa central: não é apenas “quanto se abre”, mas “como se abre” que define o impacto estrutural de uma intervenção no núcleo. A localização, a regularidade e a alternância das aberturas revelam-se variáveis de projeto tão importantes quanto a espessura ou o comprimento das paredes.

5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÕES GERAIS

O estudo desenvolvido teve como objetivo central compreender o impacto estrutural da introdução de aberturas em núcleos de betão armado, com enfoque em edifícios de médio porte submetidos a ações horizontais. Por meio da modelação e comparação de diferentes configurações geométricas, foi possível identificar padrões claros de alteração no comportamento do núcleo e na redistribuição de esforços entre os elementos verticais da estrutura.

Os resultados demonstraram que a presença de aberturas compromete significativamente a rigidez do núcleo, o que conduz a uma transferência considerável de forças para as paredes periféricas — que, em alguns casos, absorveram aumentos superiores a 40% face ao modelo de referência. Os pilares também registaram incrementos, embora com menor expressão, confirmando o papel secundário que estes elementos assumem na resistência lateral.

Entre os cenários analisados, as configurações com aberturas duplas contínuas revelaram o efeito mais penalizador. A quebra simultânea de continuidade em ambos os lados do núcleo resultaram em valores elevados dos rácios R_x e R_y , o que sinaliza uma atuação mais flexionada e uma significativa redução da capacidade cortante do sistema. Este comportamento não só agravou os esforços locais nos pisos afetados, como também gerou efeitos de propagação vertical, que afetam negativamente a rigidez em níveis superiores.

Em contraste, soluções com aberturas unilaterais mostraram desempenho estrutural mais favorável. A manutenção de uma parede íntegra no núcleo permitiu limitar as perdas de rigidez e preservar a coerência do regime resistente, com impactos mais localizados e menor redistribuição de esforços. Já os modelos com aberturas escalonadas destacaram-se como a alternativa mais equilibrada: a alternância entre os lados do núcleo nos diferentes pisos evitou acumulações críticas de tensões, o que favoreceu uma resposta mais estável e a mitigar a propagação vertical das perturbações.

As configurações com aberturas alternadas em altura, por sua vez, mostraram-se eficazes na contenção pontual dos efeitos negativos. Apesar de registarem perdas relevantes nos pisos diretamente afetados, os níveis adjacentes intactos atuaram como zonas de recuperação estrutural, o que permitiu uma estabilização mais rápida do sistema. Este comportamento reforça a importância de considerar não apenas a posição das aberturas, mas também a sua distribuição vertical no processo de projeto.

De forma transversal, verificou-se que as variantes com remoção total das paredes (modelos “+”) amplificaram todas as tendências identificadas. A ausência completa de continuidade em determinados trechos do núcleo resultou em agravamento significativo da resposta flexionada, exigindo maior redistribuição para os restantes elementos e tornando evidente a importância da integridade vertical dos painéis resistentes.

Em síntese, este estudo contribui com uma base técnica para auxiliar as decisões de projeto em edifícios com núcleos estruturais. As evidências apontam para a necessidade de limitar a agressividade geométrica das aberturas e de privilegiar soluções assimétricas ou alternadas que promovam a continuidade parcial do sistema resistente. Quando a introdução de aberturas contínuas for inevitável, devem ser consideradas medidas complementares de reforço e verificação detalhada do comportamento local, de modo a garantir a segurança estrutural e o desempenho sísmico da edificação.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A partir dos resultados alcançados neste trabalho, identificam-se diversas possibilidades de investigação que poderão contribuir para o aprofundamento do conhecimento sobre o comportamento estrutural de núcleos com aberturas. Uma continuidade direta deste estudo consistiria na análise de uma gama mais alargada de configurações geométricas, incluindo variações combinadas e mais complexas, com o intuito de estabelecer diretrizes práticas de dimensionamento adaptadas a diferentes contextos arquitetónicos e estruturais.

Paralelamente, torna-se pertinente avançar para análises numéricas mais sofisticadas, incorporando modelos não lineares que permitam considerar os efeitos de fissuração, plastificação e outras não-linearidades relevantes. A realização de ensaios laboratoriais, mesmo à escala reduzida, poderia complementar essas simulações, fornecendo dados experimentais para validação dos modelos e aferição da precisão dos resultados numéricos obtidos.

Outra linha de investigação relevante seria o estudo do desempenho sísmico de núcleos com aberturas sob ações reais, por meio de análises dinâmicas não lineares. Este tipo de abordagem permitiria avaliar a resposta da estrutura face a excitações complexas, estimando a ductilidade global, a capacidade de dissipação de energia e a resistência residual do edifício após eventos extremos.

Por fim, recomenda-se explorar o papel de elementos estruturais complementares — como vigas de acoplamento, reforços locais ou sistemas de dissipação — na mitigação dos efeitos negativos das aberturas. A análise integrada desses dispositivos poderá contribuir para o desenvolvimento de soluções técnicas viáveis, capazes de compatibilizar exigências arquitetónicas com o desempenho estrutural exigido em zonas sísmicas.

Estas perspetivas reforçam o potencial prático e académico da temática, sublinhando a sua relevância para o projeto de estruturas seguras e eficientes em contextos urbanos cada vez mais condicionados por requisitos funcionais e arquitetónicos específicos.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

- Al-Hamaydeh, M., & Hussain, A. (2021). *Influence of Opening Size and Configuration on the Lateral Stiffness of RC Core Wall Systems*. Structures, 33, 2076–2089.
- Aristizábal-Ochoa, J. D. (1987). *Analysis of Coupled Shear Walls with Openings Subjected to Lateral Loads*. Journal of Structural Engineering, 113(11), 2348–2361.
- Chopra, A. K. (2020). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering* (5th ed.). Wiley.
- Chowdhury, P., Patnaik, D., & Deb, S. K. (2012). *Finite-Element Modelling of Reinforced Concrete Shear Walls with Openings under Lateral Load*. International Journal of Civil and Structural Engineering, 3(4), 858–872.
- CEN. (2021). EN 1998-1:2021 + Anexo Nacional a Portugal – *Projeto de Estruturas para Resistência a Sismos*. Brussels: Comité Européen de Normalização.
- Dashti, F., & Pinho, R. (2018). *Modelling the In-Plane Flexibility of RC Floor Systems in Seismic Analysis*. Engineering Structures, 173, 719–736.
- Fardis, M. N. (2009). *Seismic Design of Concrete Buildings to Eurocode 8*. CRC Press.
- FEMA. (2009). P-695: *Quantification of Building Seismic Performance Factors*. Federal Emergency Management Agency.
- Itware, P., & Kalwane, P. P. (2015). *Parametric Study of High Rise RC Core Walls with Various Opening Configurations*. International Journal of Engineering Research & Technology, 4(7), 254–259.
- Kišiček, T., Haladin, I., & Bičanić, Z. (2020). *Compressive Shear Strength of RC Walls at High Ductility Levels*. Sustainability, 12(11), 4434.
- Kolozvari, K., Orakcal, Ö., & Wallace, J. W. (2015). *Modeling of RC Walls for Nonlinear Seismic Analysis. Part I: Shear–Flexure Interaction*. Journal of Structural Engineering, 141(5), 04014137.
- Masi, A., Chiauszi, L., Santarsiero, F., & Nigro, G. (2014). *Seismic Behaviour of Reinforced Concrete Shear Walls with Regular and Staggered Openings after the Strong Earthquakes between 2009 and 2011*. Bulletin of Earthquake Engineering, 12(5), 2111–2139.
- Moehle, J. P. (2014). *Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings*. McGraw Hill.
- Paulay, T. (2001). *Torsional Response of Open Section Reinforced Concrete Walls*. Engineering Structures, 23(11), 1301–1311.
- Paulay, T., & Priestley, M. J. N. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. Wiley.
- Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., & Kowalsky, M. J. (2007). *Displacement Based Seismic Design of Structures*. IUSS Press.
- Priestley, M. J. N., Verma, R., & Xiao, Y. (1994). *Seismic Shear Strength of Reinforced Concrete Walls*. Journal of Structural Engineering, 120(8), 2310–2329.
- Smith, B. S., & Coull, A. (1991). *Tall Building Structures: Analysis and Design*. McGraw Hill.

- Taranath, B. S. (2016). *Structural Analysis and Design of Tall Buildings: Steel and Composite Construction* (2nd ed.). CRC Press.
- Tso, W. K., & Sadek, F. (1985). *Modal Coupling Effects in Torsionally Asymmetric Buildings*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 13(1), 1–12.
- Wallace, J. W. (2012). *Behavior of Reinforced Concrete Structural Walls*. Earthquake Spectra, 28(1), 281–299.
- Coull, A., & Bensmail, L. (1991). *Stiffened, coupled shear walls*. Journal of Structural Engineering, 117(8), 2205–2223.
- Ronagh, H. R., Eslami, A., & Xue, M. (2017). *Nonlinear analysis of reinforced concrete shear walls with irregular openings using advanced modelling techniques*. Journal of Earthquake Engineering, 21(7), 1010–1034.
- Gandhi, B. H. (2015). *Effect of opening on behaviour of shear wall*. International Journal for Technological Research in Engineering, 3(4), 875–878.
- Wang, J., Sakashita, M., & Kono, S. (2012). *Shear behaviour of reinforced concrete structural walls with eccentric openings under cyclic loading: experimental study*. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 21(7), 522–541.
- Koliou, M., & Filiatrault, A. (2017). *Development of wood and steel diaphragm hysteretic connector database for performance-based earthquake engineering*. Bulletin of Earthquake Engineering, 15(8), 3379–3402.
- Li, B., Qian, K., & Wu, H. (2016). *Flange effects on seismic performance of reinforced concrete squat walls with irregular or regular openings*. Engineering Structures, 110, 127–144.
- Najm, H. M., Hassan, A., Sabri, M. M. S., et al. (2022). *A comprehensive study on the effect of regular and staggered openings on the seismic performance of shear walls*. Buildings, 12(9), 1293.