

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

CRISTINA BIDESE

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE ABERTURAS EM PAREDES DE CONCRETO
ARMADO

BENTO GONÇALVES

2020

CRISTINA BIDESE

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE ABERTURAS EM PAREDES DE CONCRETO
ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade de Caxias do Sul – UCS
como requisito parcial à obtenção de título
de Engenheiro Civil.

Orientador Prof. Me. Luciano Zatti.

BENTO GONÇALVES

2020

CRISTINA BIDESE

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE ABERTURAS EM PAREDES DE CONCRETO
ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade de Caxias do Sul – UCS
como requisito parcial à obtenção de título
de Engenheiro Civil.

Orientador Prof. Me. Luciano Zatti.

Aprovado em / /

Banca Examinadora

Prof. Me. Luciano Zatti
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Gustavo Ribeiro da Silva
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Esp. Sergio Paulo da Silva Pacheco
Universidade de Caxias do Sul - UCS

RESUMO

Aberturas em paredes de concreto armado são soluções recorrentes, porém, quando não consideradas durante o dimensionamento do elemento, podem acarretar em inúmeras fissuras, bem como na redução da vida útil da estrutura. Deste modo, o presente trabalho objetiva analisar a influência da dimensão e posição de aberturas quanto à resistência de paredes de concreto armado, por meio da verificação de seu comportamento estrutural. Este trabalho expõe os fundamentos contidos na NBR 16055 (2012), abordando o dimensionamento das paredes de concreto armado, além do histórico do sistema construtivo, materiais empregados e vantagens e desvantagens do método. Além da norma brasileira, são comentadas algumas das principais normas estrangeiras que tratam do tema. Por fim, são apresentados os resultados do estudo, juntamente com análises, sobre a influência das aberturas quanto à resistência de paredes de concreto armado. Para isso, utiliza-se da ferramenta computacional ANSYS, de modo a verificar as paredes quando submetidas a diversas condições de dimensão e posição de aberturas. Uma matriz com 19 combinações de aberturas foi analisada, além de uma parede sem abertura, e conclui-se que as maiores tensões e deformações acontecem com o aumento da área total destas aberturas, procedida pelo aumento de seu comprimento e pelo aumento de sua altura. Ainda, quanto às aberturas que variam em posição, pode-se concluir que as maiores tensões acontecem quando estas estão dispostas nos vínculos superiores da parede e os maiores deslocamentos observam-se quando as mesmas se encontram centralizadas à parede.

Palavras-chave: Paredes de concreto armado. Aberturas. Resistência.

ABSTRACT

Openings in reinforced concrete walls are recurrent solutions, however, when not considered during the design of the element, they can result in numerous cracks and reduce the useful life of the structure. The present course conclusion thesis aims to analyze the influence of the dimension and position of openings regarding reinforced concrete walls' strength by verifying their structural behavior. The study exposes the fundamentals in NBR 16055 (2012), analyzing the design of reinforced concrete walls, the history of the construction system, materials used, and the advantages and disadvantages of the method. Moreover, the study also discusses some of the leading foreign standards, apart from the Brazilian. Finally, the study results are presented, together with analyzes of the influence of the openings on reinforced concrete walls' strength. It uses the computational tool ANSYS to check the walls when subjected to different conditions of dimension and position of openings. The study also analyzed a matrix with 19 combinations of openings and a wall without opening. It concludes that the most significant stresses and deformations occur at increased openings' total area due to increases in length and height. Regarding the openings' position, the study concludes that the most significant stresses occur when arranged in the wall's upper links. The most considerable displacements are observable when they in the center of the wall.

Keywords: Concrete walls. Openings. Resistance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cargas concentradas ou parcialmente distribuídas	30
Figura 2 - Comprimento equivalente l_e	33
Figura 3 - Diagrama dos esforços de compressão	37
Figura 4 - Padrão de fissuras e formas de deflexão de paredes de concreto armado carregadas axialmente.	41
Figura 5 - Armadura de reforço e método de montagem.....	42
Figura 6 - Distribuição horizontal de aberturas em uma parede de concreto	43
Figura 7 - Distribuição vertical de aberturas em uma parede de concreto	44
Figura 8 - Valores do coeficiente K_{ab}	45
Figura 9 - Esforço solicitante	46
Figura 10 - Armaduras de reforço	47
Figura 11 - Fissuração devido às aberturas	49
Figura 12 - Forças no plano e fora do plano.....	51
Figura 13 - Representação da parede.....	54
Figura 14 - Matriz de análise	57
Figura 15 - Esforços solicitantes de compressão	59
Figura 16 - Esforços solicitantes de tração.....	62
Figura 17 - Tensões de compressão MA-60	66
Figura 18 - Tensões de compressão MA-100	67
Figura 19 - Tensões de compressão MA-120	67
Figura 20 - Tensões de compressão MA-150	68
Figura 21 - Tensões de compressão GA-200.....	68
Figura 22 - Tensões de tração MA-60.....	69
Figura 23 - Tensões de tração MA-100.....	70
Figura 24 - Tensões de tração MA-120.....	70

Figura 25 - Tensões de tração MA-150.....	71
Figura 26 - Tensões de tração GA-200.....	71
Figura 27 - Deslocamentos MA-60.....	72
Figura 28 - Deslocamentos MA-100.....	73
Figura 29 - Deslocamentos MA-120.....	73
Figura 30 - Deslocamentos MA-150.....	74
Figura 31 - Deslocamentos MA-200.....	74
Figura 32 - Tensões de compressão ML-100.....	75
Figura 33 - Tensões de compressão ML-120.....	76
Figura 34 - Tensões de compressão ML-150.....	76
Figura 35 - Tensões de compressão GL-200.....	77
Figura 36 - Tensões de tração ML-100.....	78
Figura 37 - Tensões de tração ML-120.....	78
Figura 38 - Tensões de tração ML-150.....	79
Figura 39 - Tensões de tração GL-200.....	79
Figura 40 - Deslocamentos ML-100.....	80
Figura 41 - Deslocamentos ML-120.....	81
Figura 42 - Deslocamentos ML-150.....	81
Figura 43 - Deslocamentos GL-200.....	82
Figura 44 - Tensões de compressão MH-100.....	83
Figura 45 - Tensões de compressão MH-120.....	83
Figura 46 - Tensões de compressão MH-150.....	84
Figura 47 - Tensões de compressão GH-200.....	84
Figura 48 - Tensões de tração MH-100.....	85
Figura 49 - Tensões de tração MH-120.....	86
Figura 50 - Tensões de tração MH-150.....	86

Figura 51 - Tensões de tração GH-200.....	87
Figura 52 - Deslocamentos MH-100.....	88
Figura 53 - Deslocamentos MH-120.....	88
Figura 54 - Deslocamentos MH-150.....	89
Figura 55 - Deslocamentos GH-200.....	89
Figura 56 - Tensões de compressão PQ-20.....	90
Figura 57 - Tensões de compressão PC-20.....	91
Figura 58 - Tensões de compressão parede sem abertura.....	91
Figura 59 - Tensões de compressão PQVS.....	92
Figura 60 - Tensões de compressão PCVS.....	92
Figura 61 - Tensões de compressão PQVI.....	93
Figura 62 - Tensões de compressão PCVI.....	93
Figura 63 - Tensões de tração PQ-20.....	94
Figura 64 - Tensões de tração PC-20.....	95
Figura 65 - Tensões de tração parede sem abertura.....	95
Figura 66 - Tensões de tração PQVS.....	96
Figura 67 - Tensões de tração PCVS.....	96
Figura 68 - Tensões de tração PQVI.....	97
Figura 69 - Tensões de tração PCVI.....	97
Figura 70 - Deslocamentos PQ-20.....	98
Figura 71 - Deslocamentos PC-20.....	99
Figura 72 - Deslocamentos parede sem abertura.....	99
Figura 73 - Deslocamentos PQVS.....	100
Figura 74 - Deslocamentos PCVS.....	100
Figura 75 - Deslocamentos PQVI.....	101
Figura 76 - Deslocamentos PCVI.....	101

Figura 77 - Tensões médias de compressão	103
Figura 78 - Tensões máximas de compressão.....	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Esforços solicitantes.....	60
Tabela 2 - Dados de projeto	60
Tabela 3 - Comprimento equivalente e armadura mínima.....	61
Tabela 4 - Resistência à compressão	61
Tabela 5 - Limitação de tensão do concreto.....	63
Tabela 6 - Parâmetros e resistências	63
Tabela 7 - Armadura de reforço ao redor das aberturas	64
Tabela 8 – Tensões e deslocamentos nas paredes com abertura M e G	102
Tabela 9 -Tensões e deslocamentos nas paredes sem abertura e com abertura P102	

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens do sistema paredes de concreto armado	24
Quadro 2 - Comparativo entre os principais sistemas estruturais	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
cm	Centímetros
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
fck	Resistência característica à compressão do concreto
fyk	Resistência característica ao escoamento do aço
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
kN/m ²	Quilo Newton por metro quadrado
m	Metros
MPa	Mega Pascal
nº	Número
NBR	Norma Brasileira
pol	Polegadas
rad	Radianos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 TEMA DA PESQUISA	17
1.2 QUESTÃO DA PESQUISA.....	17
1.3 OBJETIVO GERAL.....	17
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.5 HIPÓTESE	17
1.6 PREMISSAS/DELIMITAÇÕES	18
1.7 LIMITAÇÕES.....	18
1.8 DELINEAMENTO	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
2.1 PAREDES DE CONCRETO ARMADO	20
2.1.1 Histórico	20
2.1.2 Materiais Empregados	21
2.1.2.1 Concreto.....	22
2.1.2.2 Aço	23
2.1.2.3 Formas	23
2.1.2.4. Instalações	24
2.1.3. Vantagens e Desvantagens	24
2.2 CONSIDERAÇÕES DE PROJETO	26
2.2.1 Ações.....	28
2.2.1.1 Esforços solicitantes.....	28
2.2.1.2. Cargas verticais nas paredes	29
2.2.1.3 Ações transversais ao plano da parede de concreto.....	30
2.2.2 Análise Estrutural.....	31
2.2.3 Condições de Contorno.....	31

2.3 DIMENSIONAMENTO DAS PAREDES DE CONCRETO ARMADO	32
2.3.1 Premissas básicas de dimensionamento.....	32
2.3.2 Armadura mínima.....	33
2.3.3 Reforços horizontais.....	34
2.3.4 Resistência - limite sob solicitação normal	35
2.3.4.1 Resistência de cálculo sob normal de compressão.....	35
2.3.4.2 Verificação à compressão	36
2.3.4.3 Dimensionamento à tração devido a momentos no plano da parede.....	37
2.3.5 Dimensionamento ao cisalhamento	37
2.3.6 Dimensionamento devido a cargas localizadas	39
2.3.7 Dimensionamento das aberturas - síntese	39
2.4 ANÁLISE DAS ABERTURAS.....	39
2.4.1 Dimensionamento ao redor das aberturas.....	42
2.4.1.1 Região de influência.....	43
2.4.1.2 Limitação de tensão no concreto.....	44
2.4.1.3 Armaduras de reforço ao redor das aberturas.....	46
2.4.2 Fissuração provocada pelas aberturas em paredes de concreto armado	48
2.4.3 Normas estrangeiras.....	50
2.4.3.1 ACI 318:2019 - Building Code Requirements for Structural Concrete.....	50
2.4.3.2 EN 1992 Eurocode 2:2004 - <i>Design of concrete structures</i>	51
2.4.3.3 AS 3600:2009 - <i>Concrete structures</i>	52
3 MÉTODO DE PESQUISA	53
3.1 DADOS DE PROJETO.....	53
3.2 CARACTERIZAÇÃO DA PAREDE.....	54
3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ABERTURAS	55
3.3.1 Aberturas pequenas.....	55

3.3.2 Aberturas médias	55
3.3.3 Aberturas grandes	56
3.3.4 Posição das aberturas	56
3.4 MATRIZ DE ANÁLISE	56
3.5 INTRODUÇÃO DAS PAREDES À FERRAMENTA ANSYS	58
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	59
4.1 DIMENSIONAMENTO DE UMA PAREDE SEGUNDO A NBR 16055 (2012)	59
4.1.1 Comprimento equivalente e armadura mínima	60
4.1.2 Resistência de cálculo sob solicitação normal de compressão	61
4.1.3 Dimensionamento à tração	62
4.1.4 Dimensionamento ao cisalhamento	62
4.1.5 Dimensionamento das aberturas	63
4.1.5.1 Armadura de reforço ao redor das aberturas	64
4.1.6 Discussões ao dimensionamento	64
4.2 ANÁLISE NUMÉRICA DAS ABERTURAS	65
4.2.1 Aumento da área total da abertura	66
4.2.1.1 Tensões de compressão	66
4.2.1.2 Tensões de tração.....	69
4.2.1.3 Deslocamentos.....	72
4.2.2 Aumento do comprimento da abertura mantendo altura constante	75
4.2.2.1 Tensões de compressão	75
4.2.2.2 Tensões de tração.....	77
4.2.2.3 Deslocamentos.....	80
4.2.3 Aumento da altura da abertura mantendo comprimento constante	82
4.2.3.1 Tensões de compressão	82
4.2.3.2 Tensões de tração.....	85

4.2.3.3 Deslocamentos.....	87
4.2.4 Variação no posicionamento das pequenas aberturas.....	90
4.2.4.1 Tensões de compressão	90
4.2.4.2 Tensões de tração.....	94
4.2.4.3 Deslocamentos.....	98
4.2.5 Discussões à análise numérica.....	102
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	105
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

1 INTRODUÇÃO

O déficit habitacional é um dos principais desafios para o Brasil no cenário atual da construção civil e, conseqüentemente, da economia. Um levantamento feito pela Associação Brasileira de Incorporadoras Imobiliárias (ABRAINC), juntamente com a Fundação Getúlio Vargas (FGV), mostra que a carência de moradias cresceu 7% no período entre 2007 e 2017, chegando a 7,78 milhões de unidades habitacionais (ABRAINC, 2019).

Neste quesito, busca-se por um método capaz de reduzir a inadequação de moradias, que seja rápido, eficaz e industrializado, além de racional e econômico. Desta forma, insere-se o conceito de paredes de concreto armado moldadas *in loco*. Segundo Morquecho (2016), este sistema construtivo propicia uma maior rapidez à execução, bem como uma padronização do processo, o que faz com que ele se torne mais confiável.

O sistema emprega um jogo de formas, telas de aço e o concreto que irá constituir a parede. É indicado para construção em grande escala e é usado, principalmente, em obras residenciais, embora não se limite a elas, assegura Corsini (2012). Para Carvalho (2012), existe grande aceitabilidade do sistema no mercado atual, pois, além de atender às normativas brasileiras, é capaz de suprir às necessidades de conforto térmico e acústico aos usuários.

Porém, conforme Popescu et al. (2015), os principais questionamentos sobre esta metodologia construtiva estão ligados à influência das aberturas nas paredes de concreto armado. Estes levam em consideração de que forma o tamanho e posicionamento das aberturas interferem na resistência da parede e se os esforços são distribuídos igualmente em paredes com e sem aberturas. Além disso, Da Fonseca (2016) explana o problema de fissuração, que é bastante recorrente, mesmo quando utilizado as armaduras de reforço indicadas pela norma ABNT NBR 16055:2012.

Diante disto, o presente trabalho objetiva analisar a influência da dimensão e posição de aberturas quanto à resistência de paredes de concreto armado. Novas abordagens e metodologias serão apresentadas, de modo a explicar os resultados obtidos.

1.1 TEMA DA PESQUISA

Paredes de concreto armado.

1.2 QUESTÃO DA PESQUISA

Considerando a distribuição dos esforços nas paredes de concreto armado, o tamanho e a posição das aberturas interferem na resistência das mesmas?

1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é analisar a influência da dimensão e posição de aberturas quanto à resistência de paredes de concreto armado, por meio da verificação do comportamento estrutural destas.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A partir da definição do objetivo geral, é possível elencar objetivos específicos que serão desenvolvidos no decorrer do presente trabalho:

- a) averiguar o comportamento estrutural das paredes de concreto armado, diferenciando-as quanto à existência ou não de aberturas nas mesmas;
- b) avaliar, por meio de modelagens numéricas, a distribuição de esforços para algumas condições de posição e dimensão de aberturas;
- c) analisar que tipo de abertura impacta de maneira mais significativa para a perda de resistência e, conseqüentemente, para a ocorrência de fissuração;
- d) verificar se as recomendações dadas pela norma podem ser aplicadas em todas as condições de aberturas abordadas.

1.5 HIPÓTESE

A resistência das paredes de concreto armado diminuiu proporcionalmente ao aumento do tamanho de suas aberturas. Deste modo, faz-se necessário a utilização de armaduras de reforço ao redor destas aberturas. A posição das aberturas também

interfere para a perda de resistência, principalmente aquelas próximas aos vínculos das paredes.

1.6 PREMISSAS/DELIMITAÇÕES

A análise da influência das aberturas nas paredes de concreto armado se dará a partir de modelos numéricos, variando dimensões e posições de aberturas. Com isto, será possível visualizar as diferentes distribuições de esforços e o comportamento estrutural de cada uma delas. Assim, pode-se avaliar a resistência destas paredes e a existência da possibilidade de fissuração.

Em paredes de concreto armado, segundo normativa, é indispensável que o f_{ck} seja menor ou igual a 40 MPa. Quanto ao aço empregado, não existem especificações, contanto que este apresente a mesma qualidade por toda a parede. Desta forma, o f_{ck} adotado para o presente trabalho é de 30 MPa, por ser bastante empregado na construção civil, e as categorias do aço são CA-60 para as telas soldadas e CA-50 para as armaduras de reforço. A parede apresentará dimensões únicas, variando apenas o tamanho e posicionamento das aberturas na mesma. Além disso, não será considerado o esforço horizontal, devido ao vento e desaprumo, na estrutura.

1.7 LIMITAÇÕES

O presente trabalho se limitará na utilização da malha padrão do próprio *software*, não sendo possível fazer um maior refinamento dos dados.

1.8 DELINEAMENTO

O trabalho será desenvolvido tomando como base revisão bibliográfica e normas técnicas vigentes. Serão elaboradas, através de *softwares*, modelagens numéricas que possibilitarão a visualização da estrutura como um todo, com a distribuição de esforços gerados e com a influência das aberturas sobre as paredes. Essas modelagens terão dimensões e posições de aberturas diversas, para possibilitar a visualização com diferentes esforços. A partir dos resultados obtidos,

será realizada uma análise dos modelos que melhor apresentaram sua função e serão feitas algumas comparações com o prescrito na norma ABNT NBR 16055:2012.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica referente ao uso de paredes de concreto armado na construção civil, bem como a influência que as aberturas têm sobre elas. Além disso, a revisão da literatura contempla o dimensionamento das paredes e das aberturas.

2.1 PAREDES DE CONCRETO ARMADO

A necessidade da modernização na construção civil vem se mostrando cada vez mais forte. Apesar de se construir da mesma forma há muitos anos, com o aumento do déficit habitacional, da alta competitividade e de um mercado com maiores exigências, busca-se por sistemas construtivos diferenciados aos métodos tradicionais (VIEIRA, 2014). De acordo com Vieira (2014), as atuais condições prezam por construções racionalizadas, limpas e rápidas, além de um planejamento que diminua a perda de material e aumente a produção.

Em definição dada pela Coletânea de Ativos (COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO, 2007/2008, não paginado), “parede de concreto é um sistema construtivo racionalizado, que oferece as vantagens da produção em alta escala sem perda de qualidade - condições técnicas e econômicas perfeitas para a atual demanda do mercado brasileiro da construção.” Ainda, consoante à Coletânea de Ativos (COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO, 2007/2008), este sistema é recomendado para empreendimentos com alta repetitividade, que exigem curtos prazos de entrega, economia e otimização da mão de obra.

2.1.1 Histórico

Com a criação do Banco Nacional de Habitação (BNH), em 1966, surgem os programas habitacionais, onde se fazia necessário exatamente as vantagens do sistema construtivo de paredes de concreto armado, como explicitado por Nunes (2011). Em meados de 2009, nasce o programa habitacional “Minha Casa, Minha Vida”, onde, segundo o autor, a busca por sistemas construtivos econômicos e produtivos, que não comprometessem a qualidade e o desempenho das edificações, mostrou-se ainda mais acirrada.

Sacht (2008) argumenta que a primeira utilização do método no Brasil se deu em 1979, em Minas Gerais, através da construção de 46 casas do Conjunto Habitacional Carreira Comprida. Ao final da obra, observou-se o pouco desperdício de materiais, a facilidade com o acabamento, sendo a pintura aplicada diretamente nas paredes, e o embutimento das instalações elétricas e hidráulicas, não sendo necessário efetuar quebras nas paredes. No entanto, as habitações apresentaram problemas com fissuração e dificuldade de ampliação das aberturas, o que impactaria na diminuição da resistência das paredes.

Pela crescente construção de casas populares e com os bons resultados desta metodologia, passou-se a utilizar cada vez mais do sistema de paredes de concreto armado no Brasil (SACHT, 2008). Conforme De Sousa e De Ávila (2014), este sistema mostra-se com maior qualidade quando comparado a outras técnicas, apresentando maior controle tecnológico em seu processo executivo.

Embora o método ter se difuso recentemente no Brasil, em países onde existe a ocorrência de abalos sísmicos, como o Chile, ele é amplamente utilizado. Isto se dá pelo fato de as paredes de concreto limitarem os danos causados pelos abalos, por sua real resistência e rigidez, além da efetiva reabilitação das paredes danificadas, como traz Massone, Muñoz e Rojas (2019).

Com o intuito de padronizar estes sistemas, no ano de 2012, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publica a ABNT NBR 16055: Parede de concreto moldada no local para a construção de edificações – Requisitos e procedimentos. A norma, que continua em revisão até os dias atuais, estabelece os requisitos básicos para as paredes de concreto moldadas *in loco*, tratando-as como um sistema monolítico, com formas removíveis.

2.1.2 Materiais Empregados

Os materiais utilizados para a construção de paredes de concreto armado são, segundo a ABNT NBR 16055:2012, o concreto e as armaduras de aço. As formas e as instalações elétricas e hidráulicas também ajudam a compor o sistema, sendo as formas provisórias, utilizadas somente em fase de execução. A seguir, são apresentados cada um deles, dando ênfase ao concreto e à armadura, materiais estes que serão comentados ao longo do presente trabalho.

2.1.2.1 Concreto

Carvalho (2012) exemplifica os principais tipos de concreto a serem utilizados, incluindo concreto celular, concreto com alto teor de ar incorporado, concreto com agregados leves ou com baixa massa específica e concreto autoadensável, sendo este último o mais indicado pelo autor. O concreto convencional, segundo Carvalho (2012), também pode ser utilizado, desde que o mesmo seja vibrado adequadamente até alcançar a trabalhabilidade necessária. Nos dizeres do autor, o concreto autoadensável possui dois atributos relevantes, que são sua rápida aplicação, feita por bombeamento, e mistura extremamente plástica, dispensando o uso de vibradores.

Razera (2012) apresenta como vantagens do concreto autoadensável, dentre outras, o aumento da vida útil das formas, melhor acabamento final e redução do custo global da obra, bem como a prerrogativa ecológica, pela possibilidade da utilização de resíduos industriais como adições. Braguim (2013) recomenda o uso deste concreto por apresentar grande fluidez e plasticidade para preencher todos os vazios da forma, além da alta viscosidade, esta que impede sua segregação, principalmente na parte inferior das paredes.

A norma ABNT NBR 16055:2012 traz o conceito de concreto autoadensável e, quando a não utilização deste, alguns cuidados que devem ser tomados quanto ao adensamento do concreto. Além disso, a norma também estabelece alguns critérios que são de extrema importância para o presente trabalho, como a resistência à compressão para desforma, resistência à compressão característica aos 28 dias (f_{ck}) e classes de agressividade, que variam de acordo com o local da estrutura. É importante ressaltar que a norma não traz o cobrimento a ser utilizado, de acordo com as classes de agressividade do concreto, sendo necessário buscar o prescrito na ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento (2014), conforme afirma Carvalho (2012). Ao que traz a norma, a trabalhabilidade do concreto também deve ser especificada. Porém, o concreto deve trabalhar de forma diferente ao que é empregado em estruturas convencionais, com elementos que provoquem menor retração (CORSINI, 2012).

No item que trata de resistências, a norma ABNT NBR 16055:2012 exige, ainda, que o f_{ck} seja igual ou menor a 40 MPa. Não existe explicação para essa limitação na norma, mas, do ponto de vista de Vieira (2014, p. 18), “acredita-se que

essa restrição exista por conta da reação exotérmica de hidratação do cimento, que, por liberar calor, pode provocar fissuras.”

Além disso, segundo Braguim (2013), em 14 horas após a concretagem, quando é feita a desforma das paredes, o concreto já alcança resistência de 3 MPa. Assim sendo, o autor alega que o fck não pode ser considerado menor do que 25 MPa.

2.1.2.2 Aço

A ABNT NBR 16055:2012 não traz especificações quanto ao uso do aço, somente cita as armaduras que podem ser utilizadas, sendo elas telas soldadas, barras ou treliças. No item que trata de armaduras mínimas, a norma menciona o aço CA-60, sem maiores descrições. Pressupõe-se que esta preferência se dá pelo fato de a maioria das telas soldadas, empregadas na construção civil, serem fabricadas com ele, conforme observado no catálogo de produtos da Gerdau (2020).

Geralmente, utiliza-se de telas soldadas simples ou duplas que, de acordo com Braguim (2013), trazem maior produtividade ao sistema, atrelada à maior velocidade de execução. Armaduras de barras/vergalhões também são utilizadas quando existe a necessidade de reforço, como no entorno de aberturas, balanços ou regiões com alta e localizada tensão de tração.

2.1.2.3 Formas

Em definição dada pela norma ABNT NBR 16055:2012, as formas são estruturas provisórias, que tem por objetivo moldar o concreto fresco. O sistema de formas compreende painéis de formas, cimbramento e escoramento, aprumadores e andaimes, além de seus apoios e uniões com os elementos. Ainda, segundo a ABNT NBR 16055:2012, o sistema de formas segue as recomendações para qualquer estrutura de concreto armado, conforme ABNT NBR 15696 - Formas e escoramento para estruturas de concreto – Projeto, dimensionamento e procedimentos executivos (2009).

2.1.2.4. Instalações

As instalações elétricas e hidráulicas, como citado, são embutidas nas paredes, já que as mesmas são estruturais e não podem ser “rasgadas”. A maior vantagem disto é a minimização do desperdício de materiais. No entanto, ao que traz a ABNT NBR 16055:2012, alguns cuidados devem ser tomados quanto aos diâmetros máximos e pressões internas.

Vale salientar que a norma não permite a existência de tubulações horizontais, salvo quando o trecho não é considerado estrutural e esta tenha comprimento máximo de até 1 m. Essa restrição se deve pelo fato de o trecho deixar de ser estrutural e as cargas serem suportadas somente pelo restante da parede. Além disso, é expressamente proibido a instalação de tubulações nos encontros de paredes.

2.1.3. Vantagens e Desvantagens

Conforme mencionado, o sistema construtivo em paredes de concreto armado traz inúmeras vantagens quando comparado a outros sistemas convencionais. Dentre elas, cita-se a agilidade e precisão nos processos, a racionalização de materiais e, conseqüentemente, uma maior qualidade final. Porém, por se tratar de uma metodologia ainda nova no mercado, possui algumas desvantagens intrínsecas ao sistema (SACHT, 2008). O Quadro 1, retirado e adaptado de Sacht (2008), apresenta algumas vantagens e desvantagens do método.

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens do sistema paredes de concreto armado
(continua)

Vantagens	Desvantagens
Racionalização da produção das vedações, com alta produtividade, baixo índice de perdas e mão de obra reduzida;	Elevado custo das formas que deve ser reduzido em diversas utilizações. Essa necessidade de alta reutilização ocorre apenas quando se tem uma demanda constante e uma tipologia habitacional definida e ainda é viável para um número de unidades superior a 50;
Ocorre o aumento da produtividade, devido à existência de uma sequência definida de tarefas (locação, montagem das formas, posicionamento das instalações, fixação dos negativos das esquadrias - com possibilidade dos batentes na própria forma, resultando na redução do custo global da obra);	Há, na maioria dos casos, necessidade de equipamentos de grande porte para o emprego das formas metálicas, que são, geralmente, pesadas e de grandes dimensões. Os mesmos são necessários para o transporte das formas ou do volume de concreto requerido;

Aumento da qualidade, tanto nos serviços de execução, quanto no acabamento superficial (final da parede);	Na execução com paredes monolíticas moldadas <i>in loco</i> , algumas limitações podem ser apontadas em relação ao projeto, principalmente em relação às modificações devido à função estrutural;
As formas são reutilizáveis e cada conjunto produz os painéis de vedação de uma habitação em 24 horas, podendo incluir a laje na cobertura;	No emprego de formas tipo túnel e mesa/parede, há restrições quanto ao emprego de lajes com diferentes níveis, devido ao deslocamento de formas em cada andar nos ciclos de produção;
Existe, por meio do sistema, a possibilidade de a vedação exercer função estrutural, onde as paredes são adotadas para distribuir carregamento;	No emprego de formas tipo túnel e mesa/parede, há paredes com função de vedação que não são determinadas pelo método construtivo e quando ocorre o emprego de alvenaria de blocos, não conseguem acompanhar a velocidade com que são executadas as paredes estruturais;
A uniformidade da parede permite a utilização de um revestimento de pequena espessura, sem necessidade de regularização, ou mesmo a eliminação do revestimento de regularização, como argamassas e pastas, antes da aplicação da pintura;	As patologias, principalmente as fissuras, a umidade e o desempenho insatisfatório decorrentes do inadequado emprego do passado contribuem para a pouca utilização no presente.
As atividades independem da habilidade do operário, não exigindo qualificação, apenas treinamento. O consumo de mão de obra é reduzido quando comparado ao processo construtivo tradicional;	
Existe uma sequência ordenada de trabalho que permite uma simplificação das tarefas;	
O emprego desse sistema construtivo exige organização e maior planejamento do processo de construção - as soluções devem ser tomadas previamente à execução;	
Proporciona o aumento da área útil de habitação, quando comparado aos sistemas convencionais, com paredes com espessura acima de 15 cm, pois as paredes de concreto usualmente apresentam espessura final entre 8 e 12 cm.	

Fonte: adaptado de Sacht (2008).

Sacht (2008) alega ainda a importância de estudos na área de desempenho do sistema paredes de concreto armado, principalmente em relação ao conforto térmico e durabilidade, pois, apesar do emprego inadequado do passado, este pode apresentar-se superior à alvenaria tradicional. Ao que traz Carvalho (2012), em confirmação ao exposto, o sistema é capaz de atender às necessidades de conforto térmico e acústico aos usuários.

Do ponto de vista de Da Fonseca (2016), os ganhos do método superam as desvantagens econômicas iniciais, que tratam do alto preço do sistema de formas, aliado ao uso de aditivos. Estes ganhos, segundo o autor, podem ser expressos em

produtividade, pois o aditivo acelerador de pega agiliza a desforma da estrutura em 14 horas, e exoneração de reboco e contrapiso, uma vez que o acabamento final apresenta rugosidade reduzida, dada pelo contato com a forma metálica, dispensando as regularizações. O autor menciona, também, o reaproveitamento de formas, quando manejadas e armazenadas corretamente. Porém, ainda segundo Da Fonseca (2016), o alto índice de fissuração e, a longo prazo, o deslocamento excessivo de elementos cerâmicos, dado pela falta de aderência, atrelada à ausência de reboco, são algumas das desvantagens mais cruciais do método.

Na visão de Nunes (2011, p. 28), as principais vantagens do método são: “redução de etapas construtivas do revestimento, grande mobilidade, redução do emprego de mão de obra, limpeza do canteiro de obras, controle de qualidade, industrialização, redução dos desperdícios e velocidade de execução”. Como desvantagens, o autor traz o elevado custo inicial de investimento com formas, condicionamento arquitetônico e, junto a ele, dificuldade de modificação da disposição das paredes.

Ao que exemplifica Carvalho (2012), dentre outras vantagens do método já mencionadas, tem-se o amplo uso de modulações, em função da variedade de tamanhos de formas, e o custo reduzido de mão de obra, dado pela agilidade no processo. Além disso, elenca vantagens intrínsecas como estabilidade sob ações do vento, variações térmicas, vibração acústica e resistência ao fogo, por ser o concreto um material maciço. Por sua vez, traz como desvantagens o baixo isolamento acústico, quando submetido a ruídos de impacto, e a necessidade de mão de obra especializada.

A Coletânea de Ativos (2007/2008), evidencia o sistema como sendo muito seguro aos operários. Isto se dá pelo fato de, além da mão de obra ser especializada e reduzida, existirem equipamentos incorporados às formas, como andaimes e guarda-corpos. O uso de maquinário e equipamentos industrializados e normatizados também garantem a segurança destes operários (DE SOUSA; DE ÁVILA, 2014).

2.2 CONSIDERAÇÕES DE PROJETO

Embora as paredes de concreto armado sejam elementos estruturais, elas não se comportam igualmente aos elementos de pórtico, especificados pela ABNT NBR 6118:2014, como é o caso de vigas e pilares com paredes, exemplifica Vieira (2014).

Neste sentido, em 2012, publica-se a ABNT NBR 16055, preocupando-se com as condições de contorno dos elementos e formas de tratamento das aberturas. O Quadro 2, retirado de Corsini (2012), aponta as principais diferenças entre os sistemas estruturais mais utilizados.

Quadro 2 - Comparativo entre os principais sistemas estruturais

	Paredes de concreto moldadas <i>in loco</i>	Estrutura convencional (pilar-viga-laje)	Alvenaria estrutural	Painéis pré-fabricados
Características	Estrutura única de concreto, moldada em formas metálicas, de madeira ou de plástico;	Formada por pilares, vigas e lajes de concreto. Os vãos são preenchidos com blocos de vedação;	Estruturas em blocos de concreto ou cerâmicos mais resistentes, adequados para alvenaria estrutural;	Peças pré-fabricadas (no canteiro ou em usinas), montadas normalmente com o auxílio de guas.
Distribuição de peso	O peso se distribui por toda a estrutura de concreto autoportante até a interface com as fundações;	O peso da construção é distribuído nos pilares, vigas e lajes para as fundações (as paredes não suportam cargas);	As paredes são autoportantes (capazes de suportar a carga da obra sem a necessidade de vigas e pilares);	Os painéis normalmente são autoportantes. Há modelos, porém, com função exclusiva de fechamento (sem função estrutural).
Armação	Concretada em tela soldada (no centro da parede ou próximas às duas faces);	Não há armação nas áreas de vedação, somente nos pilares, vigas e lajes;	Geralmente não há armação (embora haja alvenaria estrutural armada);	Normalmente os painéis são de concreto armado.
Revestimento	Normalmente não recebe revestimento;	Revestimento, base com chapisco;	Revestimento, base com chapisco;	Normalmente não recebe revestimento (ou recebe revestimentos incorporados na fabricação).
Instalações elétricas/ hidráulicas	Quando embutidas, são instaladas antes da concretagem;	Depois da construção das paredes, em geral é preciso "rasgá-las" para embutir as instalações hidráulicas e elétricas;	Instalações embutidas dentro dos blocos, que são cortados nos pontos de saída;	Já vem embutidas, normalmente, nos painéis pré-fabricados.

Fonte: adaptado de Corsini (2012).

Segundo Corsini (2012), uma vez que o comportamento estrutural diverge entre um sistema e outro, a distribuição de tensões também ocorre de forma distinta. Corsini

(2012) trata, também, dos pontos de concentração de tensão, dados pela retração, desvio de carga ou dilatação térmica, como é o caso dos cantos das aberturas e os cantos da própria estrutura, já que estes são muito rígidos.

Por definição da ABNT NBR 16055:2012, parede de concreto é um elemento autoportante, com comprimento maior que dez vezes a sua espessura e apto para o suporte de cargas no mesmo plano. A norma trata ainda de edifícios simplificados, sendo aqueles de até 5 pavimentos, com vão livre máximo de laje de 4 m, pé direito máximo de 3 m e dimensões em planta de no mínimo 8 m. Além disso, para qualquer edificação, a espessura das paredes deve ser maior ou igual a 10 cm, com altura de até 3 m, salvo paredes internas de até dois pavimentos, onde a espessura mínima pode ser igual a 8 cm. Para garantir a qualidade da estrutura, vãos de aberturas, independentemente de seu tamanho, devem ser previstos em fase de projeto, bem como a localização dos pontos de reforço, e todas as paredes devem ser moldadas em uma única etapa de concretagem.

2.2.1 Ações

As ações consideradas pela ABNT NBR 16055:2012 são as mesmas propostas pela ABNT NBR 6118:2014, classificadas em permanentes, variáveis e excepcionais, conforme a ABNT NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento (2004). Para edifícios simplificados, pode-se admitir hipóteses simplificadoras.

As ações a considerar são aquelas que possam produzir efeitos significativos e intervir na segurança da estrutura (ABNT NBR 6118, 2014). A norma ABNT NBR 16055:2012 acata a existência de esforços em função da ação de cargas verticais, que podem ser concentradas ou distribuídas, e de cargas horizontais, que correspondem às ações do vento e do desaprumo. Ações consequentes de abalos sísmicos não possuem ênfase na norma, já que no Brasil estes fenômenos não são comuns.

2.2.1.1 Esforços solicitantes

Segundo a ABNT NBR 16055:2012, seu cálculo deve ser realizado de acordo com a teoria das estruturas. Os edifícios devem ser contraventados, de modo que não haja deslocamentos relativos entre topo e base de grande significância. Ainda, para

que a condição seja atendida, devem existir paredes resistentes nas duas direções da edificação, de modo a assegurar rigidez na ligação entre as paredes, minimizando sua esbelteza, e as lajes devem ser tratadas como diafragmas rígidos, transferindo os esforços horizontais (ABNT NBR 16055, 2012).

Vieira (2014) assegura que as solicitações mais significativas, inclusive para a perda da capacidade portante da estrutura, são a flexão e o cisalhamento, mesmo que exista a compressão axial. A flexão, assim como a compressão axial, ocorre no plano da parede, devido ao carregamento distribuído, referente à carga acumulada das paredes dos pisos superiores. O cisalhamento, por sua vez, se deve à ação do vento e é ortogonal ao plano da parede. A ação do vento pode gerar também o esforço de flexão, igualmente ortogonal ao plano da parede.

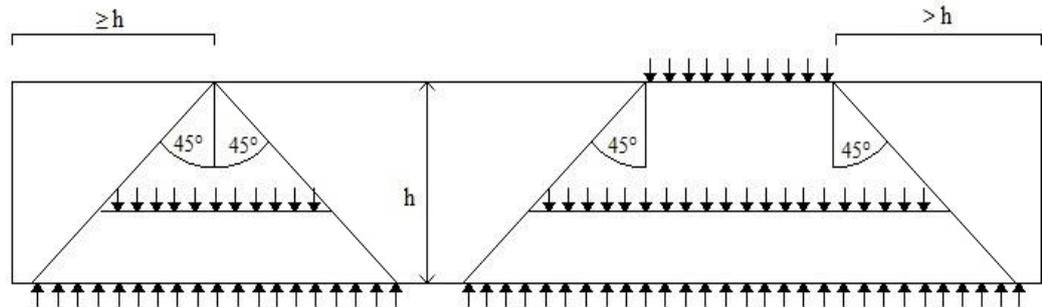
2.2.1.2. Cargas verticais nas paredes

De acordo com a ABNT NBR 16055:2012, o carregamento gravitacional das paredes considera o somatório de todas as cargas que atuam paralelamente ao plano médio da parede, conforme metodologia da ABNT NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações (2019). Estas cargas devem ser calculadas como estruturas de casca plana e podem ser concentradas, parcialmente distribuídas ou linearmente distribuídas, conforme segue:

- a) cargas linearmente distribuídas: no que diz respeito às cargas gravitacionais, a ABNT NBR 16055:2012 admite-as como sendo linearmente distribuídas, aplicadas às paredes (elementos de chapa). Estas cargas são constituídas pelo peso próprio da estrutura, peso das instalações permanentes e elementos fixos e das cargas acidentais, conforme ABNT NBR 6120:2019. Em certas situações, pode haver interação entre paredes adjacentes, por meio do caminhamento inclinado das cargas, que pode admitir angulação de até 45°. Na ocorrência deste fato, devem ser verificadas as tensões de cisalhamento nas paredes e entre elas (ABNT NBR 16055, 2012);
- b) cargas concentradas ou parcialmente distribuídas: como caracteriza a ABNT NBR 16055:2012, as cargas concentradas ou parcialmente distribuídas podem ser divididas de maneira uniforme, em seções horizontais limitadas por planos com inclinação de 45° a partir da vertical, passando pelo ponto

de aplicação da carga ou pelas extremidades da faixa de aplicação. Para melhor compreensão, a Figura 1 mostra como é feita a distribuição;

Figura 1 - Cargas concentradas ou parcialmente distribuídas



Fonte: adaptado de ABNT NBR 16055 (2012).

- c) distribuição de cargas devidas às aberturas: na existência de aberturas, a ABNT NBR 16055:2012 traz que a distribuição das cargas deve ser feita horizontalmente acima e abaixo das mesmas. As zonas limitadas por planos inclinados a 45°, tangentes às bordas das aberturas, devem ser exclusas. O dimensionamento ao redor das aberturas em paredes de concreto armado será tratado em 2.4.1 do presente trabalho.

2.2.1.3 Ações transversais ao plano da parede de concreto

As ações horizontais que, segundo a norma ABNT NBR 16055:2012, devem ser obrigatoriamente consideradas, são as originadas pelo vento e desaprumo e, em determinadas condições, outras cargas que impactem esforços significativos. Leva-se em consideração, em favor da segurança, aquela que proporcionar valor mais desfavorável, ou seja, mais elevado.

A ação do vento deve ser determinada a partir da ABNT NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações (1988). O desaprumo é calculado de forma global, através da Equação 1, conforme prescrições da ABNT NBR 16055:2012.

$$\theta = \frac{1}{170\sqrt{H}} \quad (1)$$

Onde:

θ ângulo de desaprumo (rad);

H altura da edificação (m).

2.2.2 Análise Estrutural

A análise estrutural é uma etapa muito importante a considerar na concepção de projeto, pois é nesta etapa em que se observa o equilíbrio da estrutura como um todo, bem como de seus componentes (ABNT NBR 16055, 2012). De acordo com a ABNT NBR 16055:2012, o caminho de todas as ações deve estar claramente definido, desde o ponto de aplicação até o final da estrutura, de modo a contemplar a interferência com os demais subsistemas, dentre eles as aberturas.

Além disso, o Estado Limite Último (ELU), que prevê a segurança da estrutura, e o Estado Limite de Serviço (ELS), relacionado à durabilidade, conforto, aparência e boa utilização funcional da estrutura, devem ser corretamente verificados. Os coeficientes utilizados para as combinações das ações são adotados de acordo com a ABNT NBR 8681:2004 e ABNT NBR 6118:2014.

2.2.3 Condições de Contorno

As condições de contorno são responsáveis por variações no dimensionamento da estrutura e influenciam predominantemente nos modos de falha das paredes tencionadas, segundo Popescu et al. (2015). Ainda, conforme descrito por Popescu et al. (2015), as paredes com restrições nas bordas superior e inferior são chamadas de paredes sólidas unidirecionais, enquanto que as paredes contidas em três ou quatro lados são denominadas paredes sólidas bidirecionais. Estas restrições são elaboradas de modo a impedir a translação, sem restringir a rotação do elemento.

Paredes sólidas do tipo unidirecionais tendem a desenvolver curvatura única fora do plano, paralela à direção da carga. Estas são encontradas, geralmente, em estruturas de concreto inclinada. As paredes que representam o sistema em estudo, ou seja, uma estrutura monolítica, são as paredes sólidas bidirecionais. Esta tipologia, na maioria dos casos, se deforma ao longo das direções horizontais e verticais (POPESCU ET AL., 2015).

Em sua obra, Popescu et al. (2015) alega que as restrições podem reduzir a deformação e aumentar a resistência máxima das paredes. Desta forma, paredes vinculadas em seus quatro lados, com ações nas duas direções, apresentam maior rigidez do que as paredes restritas em somente dois lados.

A ABNT NBR 16055:2012 considera, para fins de dimensionamento, os vínculos da parede para a determinação do comprimento equivalente. Este conceito é utilizado para definição da parede e será analisado em 2.3.1 do presente trabalho.

2.3 DIMENSIONAMENTO DAS PAREDES DE CONCRETO ARMADO

Em seu item 17, a ABNT NBR 16055:2012 elenca as etapas do dimensionamento de um sistema de paredes de concreto armado. Ao que traz a norma, as paredes devem ser construídas de forma monolítica, ou seja, devem se comportar como um conjunto rígido – indivisível, e apresentar armadura de ligação e armadura para resistir aos esforços. As mesmas devem possuir extremidades com travamento mínimo de três vezes a sua espessura. Existe, também, a necessidade de travamento quando o comprimento da parede entre os travamentos for maior que duas vezes a sua altura geométrica e, na impossibilidade de travá-la, a parede deve ser considerada como um pilar ou pilar-parede (ABNT NBR 16055:2012).

Pelo fato de as paredes suportarem todo o carregamento da estrutura e transferirem os esforços, não são permitidas aberturas adicionais nestes elementos ou sua remoção, uma vez que podem comprometer a estabilidade da estrutura. Qualquer eventual mudança de execução deve ser aprovada pelo projetista e estas informações devem ser documentadas e, posteriormente, repassadas para o manual de uso da edificação (ABNT NBR 16055, 2012).

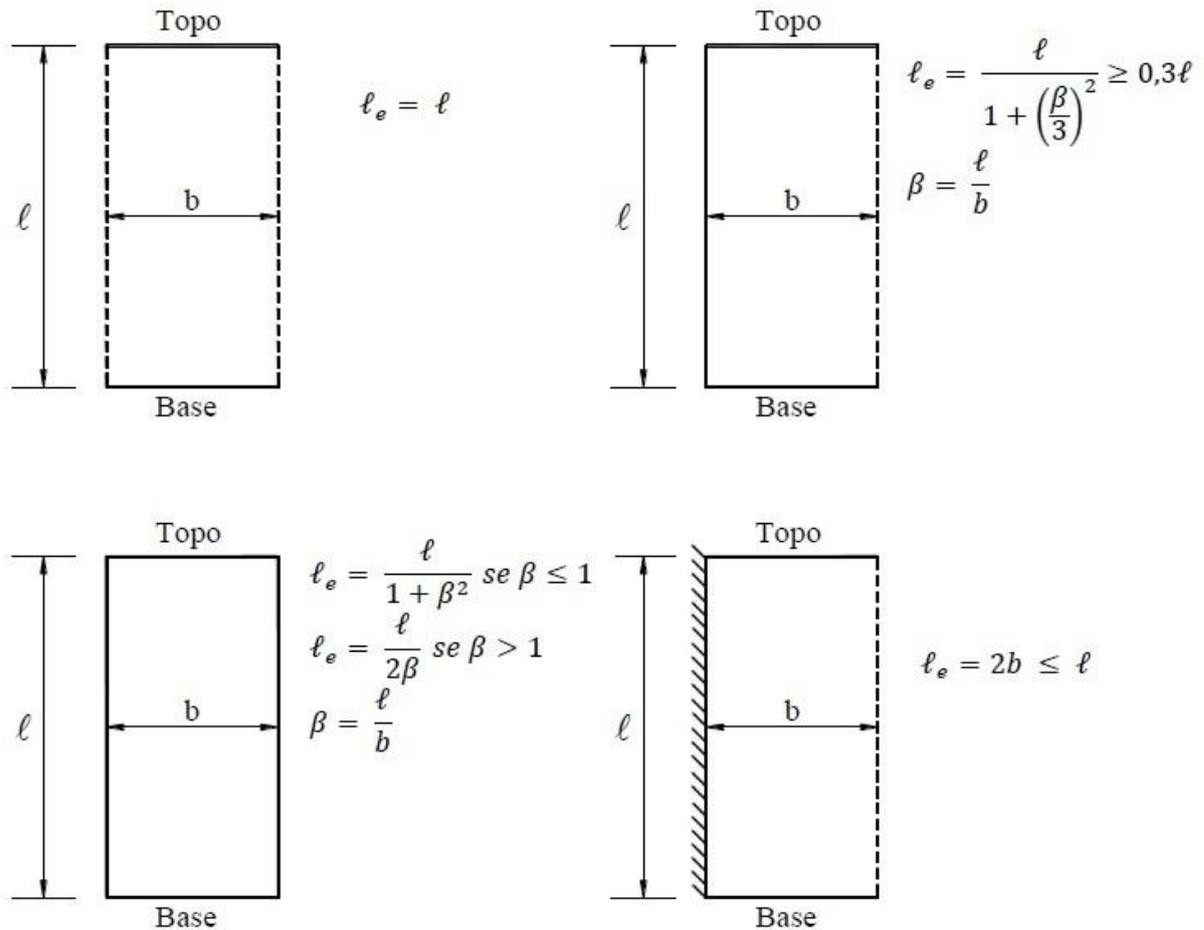
2.3.1 Premissas básicas de dimensionamento

Ao que traz a norma ABNT NBR 16055:2012, trechos de parede com comprimento menor que dez vezes a sua espessura devem ser dimensionados como pilar ou pilar-parede. Para as demais paredes, deve-se efetuar o dimensionamento à flexocompressão para os esforços atuantes, utilizando-se da maior excentricidade entre:

- a) excentricidade mínima, dada por $1,5 + 0,03t$ (cm), sendo t a espessura da parede;
- b) excentricidade decorrente da pressão lateral do vento nas paredes externas.

O comprimento equivalente (ℓ_e), como mencionado em 2.2.3 deste trabalho e segundo a ABNT NBR 16055:2012, é obtido a partir das condições de contorno da parede, considerando-se, ainda, a possibilidade de continuidade lateral com outras paredes. A Figura 2 ilustra as formulações para ℓ_e , de acordo com as condições de contorno, sendo a última engastada na linha lateral contínua (BRAGUIM, 2013).

Figura 2 - Comprimento equivalente ℓ_e



Fonte: adaptado de ABNT NBR 16055 (2012).

2.3.2 Armadura mínima

De acordo com o prescrito na ABNT NBR 16055:2012, para armaduras verticais, a seção mínima de aço deve corresponder a 0,09% da seção de concreto (A_c). Ao se tratar de edificações com até dois pavimentos, é permitido o uso de 66% deste valor. Já para as armaduras horizontais, a seção mínima de aço deve representar 0,15% da seção de concreto. Igualmente, para construções de até dois pavimentos, permite-se o uso de 40% deste valor e, em paredes externas com até 6

metros de comprimento horizontal, entre juntas ou paredes internas, permite-se a utilização de 60% do respectivo valor. Ainda, segundo a mesma norma, nos cruzamentos de paredes, onde exista armadura de ligação, esta deve obedecer ao mínimo requerido para armaduras horizontais, enquanto que na continuidade de paredes entre pavimentos, deve ser respeitado o mínimo requerido para armaduras verticais.

Consoante a ABNT NBR 16055:2012, as paredes podem contar com apenas uma tela soldada, disposta no centro geométrico da parede, ou com duas telas soldadas, em ambas as faces da parede. Esta última deve ser obrigatoriamente utilizada quando a espessura (t) for maior que 15 cm ou em paredes térreas e paredes engastadas em marquises e balanços. Em paredes onde a espessura (t) for menor que 15 cm, no caso da utilização de armaduras duplas, a armadura mínima vertical deve ser empregada em ambas as faces. Sendo a espessura (t) maior ou igual a 15 cm, permite-se a utilização de 67% da armadura mínima em cada face, devido à maior eficiência apresentada pelas armaduras para estas espessuras. Para as armaduras horizontais, o valor total mínimo permanece constante (ABNT NBR 16055, 2012).

A ABNT NBR 16055:2012 menciona, ainda, que ao se utilizar de barras de aço, o espaçamento máximo ($S_{m\acute{a}x}$) entre elas deverá contemplar o menor valor dentre: duas vezes a espessura da parede ($2t$) ou 30 cm. As barras geralmente são empregadas nos entornos das aberturas e quando existe a necessidade de reforço.

2.3.3 Reforços horizontais

Segundo a ABNT NBR 16055:2012, no caso de as paredes apresentarem borda superior livre, deve-se prever armadura horizontal de reforço de no mínimo 0,5 cm². Esta armadura deve ser alojada junto à borda, a uma distância máxima de duas vezes a espessura da parede.

Para as aberturas com dimensão horizontal não menor que 40 cm, devem existir armaduras horizontais de reforço, de no mínimo 0,5 cm², em suas faces superior e inferior, determinadas por modelo elástico ou biela-tirante. O comprimento destas armaduras deve ultrapassar a face lateral da abertura, com o comprimento de ancoragem da barra acrescido de $\frac{1}{4}$ do vão horizontal desta abertura (ABNT NBR 16055, 2012). Outra metodologia para o dimensionamento das aberturas está disposta em 2.4.1 do presente trabalho, de forma mais completa e abrangente.

2.3.4 Resistência - limite sob solicitação normal

Assim como nos elementos de concreto armado de pórtico, especificados pela ABNT NBR 6118:2014, as paredes de concreto armado também devem respeitar as condições de que as resistências devam ser maiores ou iguais às solicitações (ABNT NBR 16055, 2012). A única diferença entre as normas é a metodologia de cálculo empregada e a forma de comparação dos resultados obtidos.

2.3.4.1 Resistência de cálculo sob normal de compressão

Segundo a ABNT NBR 16055:2012, a Equação 2 mede a resistência de cálculo para a pressão máxima de vento, que é de 1 kN/m². Leva em conta, também, as excentricidades e a minoração por instabilidade localizada.

$$n_{d, \text{resist}} = \frac{(0,85f_{cd} + \rho \cdot f_{scd}) \cdot t}{k_1[1 + 3k_2(2 - k_2)]} \leq \frac{(0,85f_{cd} + \rho \cdot f_{scd}) \cdot t}{1,643} \leq 0,4f_{cd} \cdot A_c \quad (2)$$

Onde:

$n_{d, \text{resist}}$ normal resistente de cálculo, por unidade de comprimento, admitida no plano médio da parede;

f_{cd} resistência à compressão de cálculo do concreto, sendo:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{30}{1,68} = 17,86 \text{ MPa}$$

ρ taxa geométrica da armadura vertical da parede, até 1%;

t espessura da parede;

A_c área de concreto da seção transversal da parede.

No qual:

f_{scd} compatibilização da deformação do aço com a do concreto adjacente, dada por:

$$f_{scd} = E_s \cdot \frac{0,002}{\gamma_s}$$

γ_s coeficiente de ponderação da resistência do aço;

γ_c coeficiente de ponderação da resistência do concreto:

$$\gamma_c = 1,4 \cdot 1,2 = 1,68$$

k_1 e k_2 coeficientes de minoração da resistência última à compressão por instabilidade localizada.

$$\text{para } 35 \leq \lambda \leq 86 \rightarrow k_1 = \frac{\lambda}{35}, k_2 = 0$$

$$\text{para } 86 \leq \lambda \leq 120 \rightarrow k_1 = \frac{\lambda}{35}, k_2 = \frac{\lambda - 86}{35}$$

Sendo:

λ índice de esbeltez da parede, dado por:

$$\lambda = \frac{le}{i} = \frac{\sqrt{12} \cdot le}{h}$$

h altura da seção transversal da parede;

i raio de giração que, para seção retangular, equivale a:

$$i = \frac{h}{\sqrt{12}}$$

Em situações onde a pressão do vento seja maior do que 1 kN/m², análises devem ser feitas nas paredes de periferia, submetidas à flexão simples. Deve-se considerar as paredes do último pavimento como engastadas na face inferior e apoiadas na laje de cobertura em sua face superior e, para os demais pavimentos, estas devem ser calculadas como biengastadas (ABNT NBR 16055, 2012).

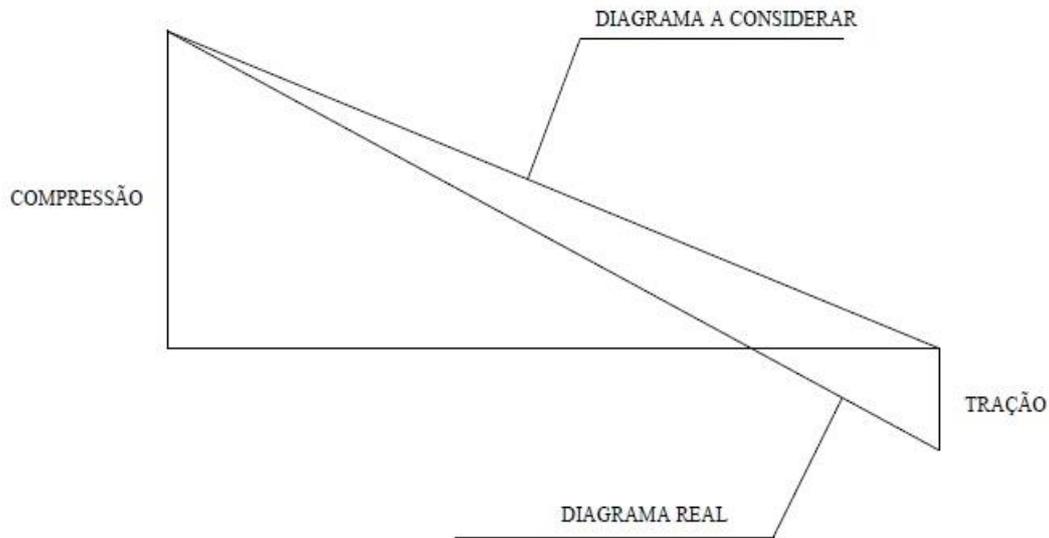
2.3.4.2 Verificação à compressão

Conforme a ABNT NBR 16055:2012, o dimensionamento da parede é atendido quando os resultados obtidos pela Equação 2 forem iguais ou superiores que os esforços solicitantes, para cada um dos trechos. O ELU, por sua vez, é atendido, para cada trecho de parede, caso e combinação de carregamento, quando respeitar a verificação da Equação 3.

$$n_{d, \text{resist}} \geq \frac{3 \cdot n_{d, \text{máx}} + n_{d, \text{mín}}}{4} \quad (3)$$

Sendo $n_{d, \text{máx}}$ e $n_{d, \text{mín}}$, respectivamente, o maior e o menor valor normal, por unidade de comprimento, para o carregamento considerado no trecho. Estes valores representam os extremos da seção, com sinais constantes. Caso haja tração em algum extremo, como exemplifica a Figura 3, por se tratar de uma verificação à compressão, $n_{d, \text{mín}}$ deverá ser igual a zero (ABNT NBR 16055, 2012).

Figura 3 - Diagrama dos esforços de compressão



Fonte: ABNT NBR 16055 (2012).

2.3.4.3 Dimensionamento à tração devido a momentos no plano da parede

A tração total na parede, segundo a ABNT NBR 16055:2012, ocorre devido a presença de momentos em seu plano e, do mesmo modo que a compressão, todos os carregamentos e possíveis combinações devem ser verificados para cada trecho. Não havendo formulação mais precisa e adequada, a ABNT NBR 16055:2012 permite a utilização da Equação 3 para a sua verificação. Entretanto, deve-se tomar um cuidado especial quanto ao dimensionamento das armaduras, para que a resultante das tensões de tração seja precisa.

2.3.5 Dimensionamento ao cisalhamento

Condizente à ABNT NBR 16055:2012, para o cálculo do cisalhamento, os carregamentos e suas combinações também devem ser considerados. Além disso, o esforço solicitante horizontal em uma direção é distribuído para as demais paredes resistentes na mesma direção.

A verificação da resistência é tratável da mesma maneira, onde a força cortante solicitante de cálculo deve ser inferior à cortante resistente de cálculo, para cada uma das paredes. As Equações 4, 5 e 6, especificadas na ABNT NBR 16055:2012, possibilitam obter os resultados.

$$f_{vd} = 0,3 \cdot f_{ct,d} \cdot \left(1 + \frac{3\sigma_{cmd}}{f_{ck}}\right) \sum t \cdot l \quad (4)$$

$$\left(1 + \frac{3\sigma_{cmd}}{f_{ck}}\right) \leq 2 \quad (5)$$

$$f_{ct,d} = \frac{0,21 \cdot (f_{ck})^{2/3}}{\gamma_c} \quad (6)$$

Em que:

σ_{cmd}	tensão média de cálculo no concreto comprimido (MPa);
t	largura de cada trecho que compõe uma mesma parede (m);
l	comprimento de cada trecho que compõe uma mesma parede, sempre na direção do esforço cortante (m);
f_{ck}	resistência característica à compressão do concreto (MPa);
$f_{ct,d}$	resistência de cálculo à tração do concreto (MPa).

Quando a condição não é atendida, ou seja, a força resistente é menor do que o solicitado, então deve-se armar a parede para que esta resista ao esforço cisalhante (ABNT NBR 16055, 2012). A área de aço deve ser obtida a partir das Equações 7 e 8, prescritas na ABNT NBR 16055:2012.

$$\frac{A_{sh}}{s} = \frac{V_d}{f_{yd}} \quad (7)$$

$$\frac{A_{sv}}{s} = \frac{(V_d - n_d/2)}{f_{yd}} \quad (8)$$

Sendo:

A_{sh}	armadura horizontal;
A_{sv}	armadura vertical;
s	espaçamento;
V_d	força cortante por unidade de comprimento;
n_d	compressão por unidade de comprimento;
f_{yd}	tensão de cálculo de escoamento do aço.

2.3.6 Dimensionamento devido a cargas localizadas

Consoante à ABNT NBR 16055:2012, elementos descontínuos, isto é, que possuem interrupções em alguma das suas dimensões, provocam uma tensão de contato. Esta tensão não pode ultrapassar o valor obtido pela Equação 9.

$$\sigma_{\text{cont,d}} \leq 0,85 \times f_{\text{cd}} \quad (9)$$

No qual $\sigma_{\text{cont,d}}$ representa a tensão de contato de cálculo e f_{cd} a resistência à compressão de cálculo do concreto.

2.3.7 Dimensionamento das aberturas - síntese

O último item apresentado no dimensionamento das paredes de concreto armado, explanado pela ABNT NBR 16055:2012, trata do dimensionamento ao redor das aberturas. Esta etapa dispõe de maior ênfase, por fazer parte do objetivo principal do presente trabalho, e será tratada com maiores detalhes em 2.4.1.

2.4 ANÁLISE DAS ABERTURAS

Em definição dada pela ABNT NBR 6118:2014, furos são considerados vazados de pequenas dimensões, enquanto que aberturas são vazados com dimensões maiores e que carecem de um maior cuidado no dimensionamento. O conjunto de furos muito próximos deve ser avaliado como abertura.

Ainda no que caracteriza a ABNT NBR 6118:2014, qualquer estrutura que necessitar de furos ou aberturas, deverá ser projetada e detalhada de modo a absorver as mudanças no fluxo de tensões, que ocorrem no entorno destes locais. Desta forma, além das armaduras necessárias para a estabilidade do elemento quanto aos esforços de tração, deve-se prever armaduras de reforço, dispostas no contorno e nos cantos das aberturas. Tanto em vigas, como em lajes, é imprescindível a verificação, na região de abertura, da redução da capacidade portante ao cisalhamento e à flexão.

As paredes de concreto armado, apesar de se comportarem distintamente aos elementos de concreto armado aporricados, possuem algumas semelhanças quanto

ao seu desempenho devido às aberturas. Taylor, Cote e Wallace (1998) afirmam que o tamanho das aberturas impacta diretamente na resistência à flexão, diminuindo o seu valor, principalmente quando estas se encontram próximas aos vínculos das paredes. Taylor, Cote e Wallace (1998) trazem, também, que as aberturas de pequenas dimensões, ou seja, os furos, podem ser desprezados. No entanto, se estiverem no meio da parede, irão diminuir o momento resistente ao plano médio e reduzirão significativamente a força cortante resistente. Da mesma forma que a flexão, a perda de capacidade quanto ao cisalhamento será ainda maior se as aberturas se encontrarem próximas aos vínculos das paredes. Em seu estudo, Taylor, Cote e Wallace (1998) concluem que o cisalhamento contribui com 25% do deslocamento lateral máximo em paredes de concreto com aberturas e 10% em paredes sólidas.

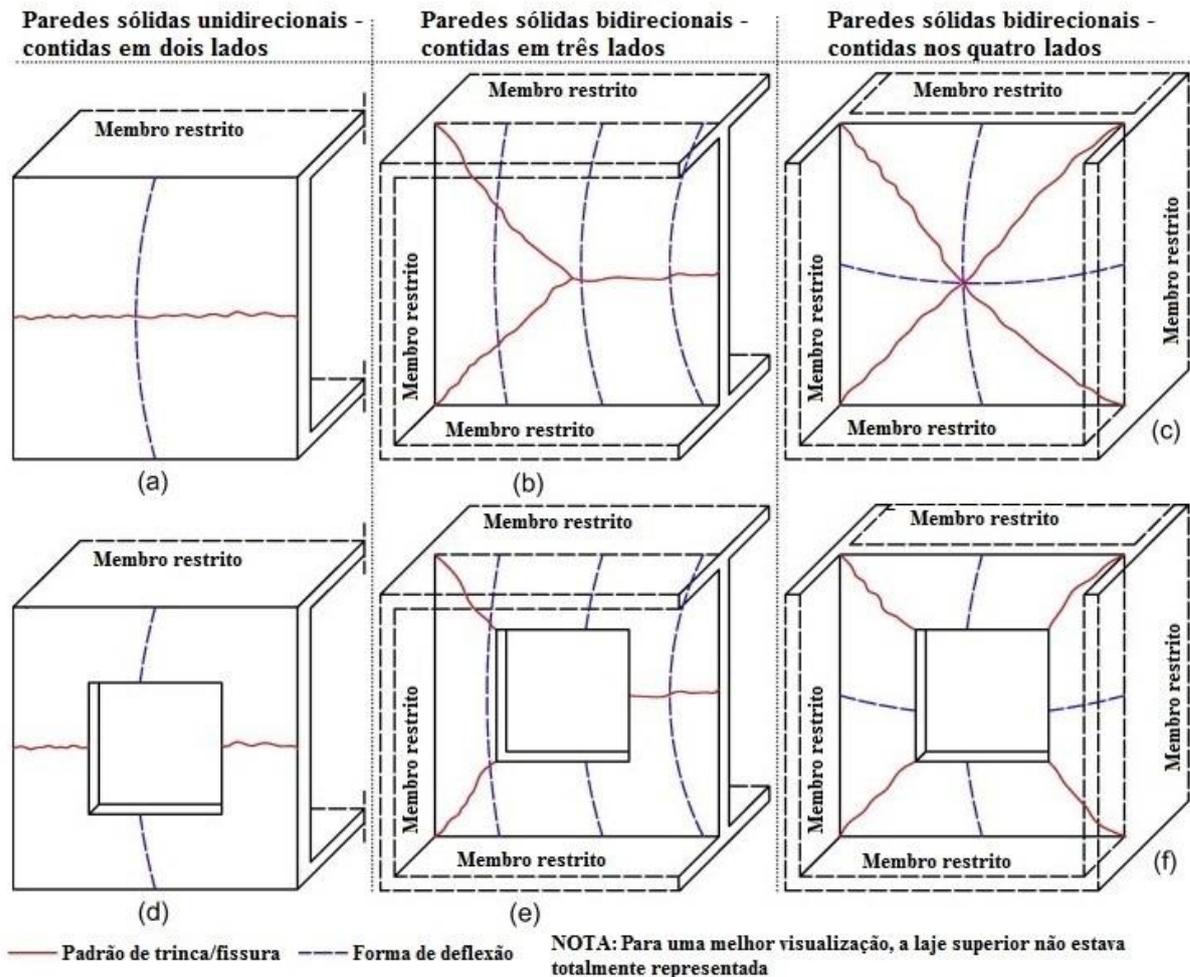
Popescu et al. (2015), igualmente a Taylor, Cote e Wallace (1998), instrui que os efeitos das pequenas aberturas podem ser desconsiderados e que a presença de grandes aberturas altera de maneira significativa o sistema estrutural. Em contrapartida, tanto a norma, quanto a literatura, não delimitam claramente as dimensões para consideração de grandes aberturas. Popescu et al. (2015), ainda, divide as aberturas em três tipos, sendo aberturas já existentes, aberturas existentes ampliadas e aberturas recém-criadas. Porém, como mencionado inclusive pela ABNT NBR 16055:2012, qualquer alteração feita nas paredes requer um aval do projetista, uma vez que criar ou modificar aberturas altera a distribuição de tensões dentro da parede, influenciando adversamente em seu comportamento.

Como mencionado em 2.2.3, as condições de contorno têm papel fundamental e influência dominante nos modos de falha e nos padrões de trinca. As fissuras se apresentam de forma distinta nas paredes, bem como o modo de deflexão das mesmas, dependendo das ações (DOH E FRAGOMENI, 2006).

De acordo com o estudo realizado por Doh e Fragomeni (2006), nas paredes sem aberturas e com restrições nas laterais verticais, as fissuras ocorrem perpendicular ao carregamento, com ruptura próxima ao centro, o que demonstra ruptura devida ao momento fletor. Já nas paredes sem aberturas e com restrições nas duas direções, horizontal e vertical, a fissuração se dá a partir dos cantos das paredes, de forma semelhante às charneiras plásticas. Para as paredes com aberturas e restrições em uma única direção, as fissuras se desenvolveram no local de redução de seção transversal, ou seja, na região ao lado das aberturas. Por outro lado, as

paredes com aberturas e restrições nas duas direções, também se apresentaram de forma semelhante às charneiras plásticas, o que sugere, segundo Doh e Fragomeni (2006), uma concentração de tensões nas quinas das aberturas. A Figura 4, retirada de Popescu et al. (2015), esboça o padrão de fissuração de acordo com as ações.

Figura 4 - Padrão de fissuras e formas de deflexão de paredes de concreto armado carregadas axialmente.

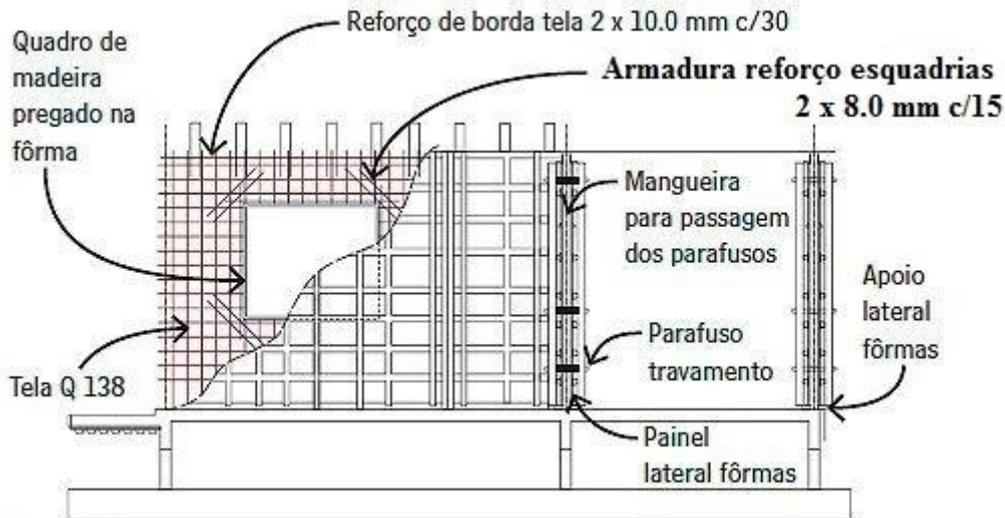


Fonte: adaptado e traduzido de Popescu et al. (2015).

Doh e Fragomeni (2006) comentam sobre uma metodologia de reforço não explicitada na ABNT NBR 16055:2012. Enquanto que na ABNT NBR 16055:2012 as armaduras são distribuídas paralelamente à própria abertura, os autores sugerem que a armadura de reforço seja acomodada transversalmente às quinas, conforme ilustrado na Figura 5. É importante ressaltar, ainda, que as principais normas internacionais não indicam ou falam brevemente sobre o uso de armadura de reforço ao redor das aberturas, mostrando-se incompletas quando comparadas a norma brasileira, como é o caso das normas citadas em 2.4.2.

A Figura 5, além de demonstrar a armadura de reforço sugerida por Doh e Fragomeni (2006), exemplifica o método de montagem da parede de concreto armado. Ademais, indica alguns dos materiais necessários para a execução.

Figura 5 - Armadura de reforço e método de montagem



Fonte: adaptado de Silva (2011).

Na visão de Popescu et al. (2015), o índice de esbeltez também está relacionado à resistência das paredes. Paredes de concreto com baixa esbeltez podem falhar, esmagando a face comprimida. Por outro lado, paredes de concreto com alta esbeltez podem falhar por flambagem. No caso da presença de aberturas, pode haver ruptura brusca por flambagem e fissuração excessiva, o que demonstra, mais uma vez, a importância do uso de armaduras de reforço.

Popescu et al. (2015) cita ainda a possibilidade de diferentes métodos para fortalecer as paredes de concreto armado com aberturas. O primeiro, semelhante ao utilizado pela ABNT NBR 16055:2012, trata da criação de uma estrutura em torno da abertura, usando elementos de aço. O segundo método visa aumentar a espessura da seção transversal. Por fim, o terceiro, e mais indicado pelo autor, aponta a utilização de polímeros reforçados com fibras, colados à superfície da estrutura, de modo a formar um material compósito.

2.4.1 Dimensionamento ao redor das aberturas

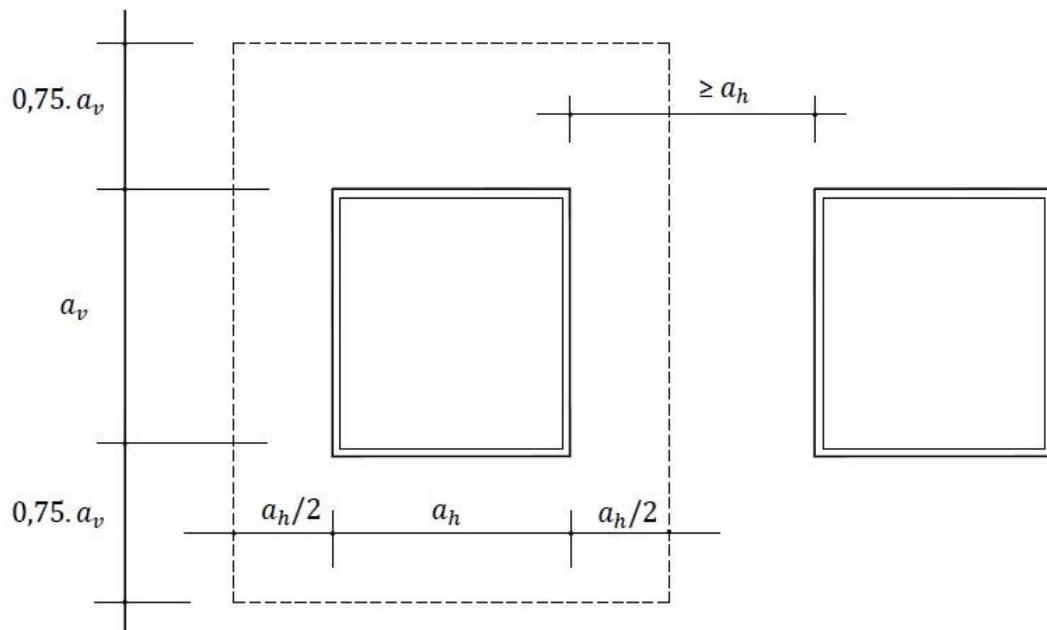
Em seu item 17.8, a ABNT NBR 16055:2012 aborda o dimensionamento ao redor das aberturas. O posicionamento e a região de cada uma das aberturas devem

estar especificados em projeto, de forma a evitar ao máximo alterações futuras e garantir que o reforço seja disposto corretamente. Por se tratar de um ponto impactante e que, na maioria dos casos, é o precursor de possíveis problemas, esta etapa é trazida de forma bem detalhada pela norma.

2.4.1.1 Região de influência

De acordo com a ABNT NBR 16055:2012, a região de influência delimitada para uma abertura com dimensão horizontal a_h e dimensão vertical a_v é de $0,5a_h$ em cada um dos lados horizontalmente e $0,75a_v$ nos lados superior e inferior da respectiva abertura. Existindo mais do que uma abertura na mesma parede, estas devem estar distantes em no mínimo a_h , caso contrário, o trecho será tratado como pilar-parede. Estes espaçamentos podem ser verificados de acordo com a Figura 6.

Figura 6 - Distribuição horizontal de aberturas em uma parede de concreto



Fonte: ABNT NBR 16055 (2012).

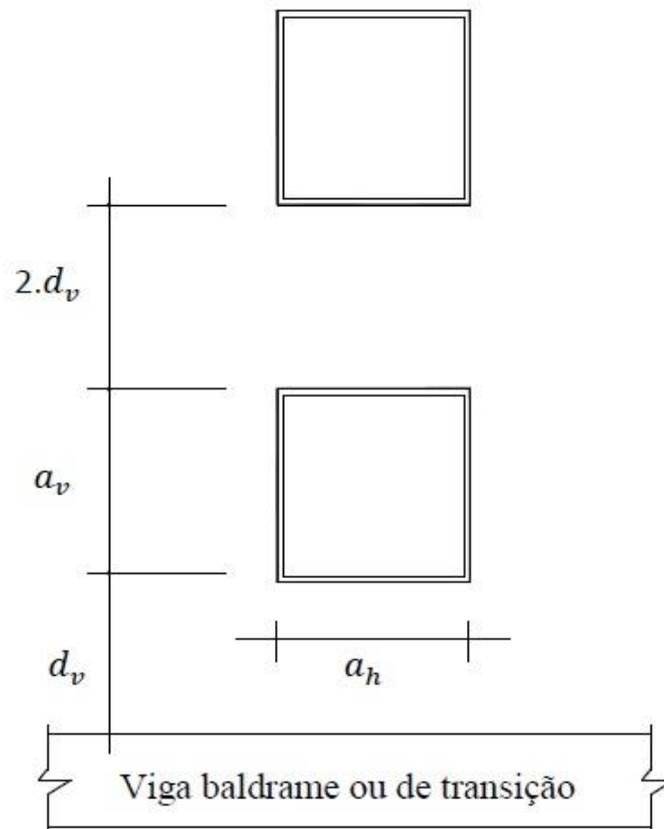
Ainda, segundo a mesma norma, furos ou aberturas com tamanho máximo de duas vezes a espessura da parede podem ser desconsiderados, por serem considerados pequenos. Quando consecutivos, seu espaçamento mínimo deve ser de quatro vezes a espessura da parede.

2.4.1.2 Limitação de tensão no concreto

A limitação de tensão no concreto é dada através das definições da distância de influência, do coeficiente K_{ab} e do esforço solicitante. Por fim, é feita a verificação da resistência (ABNT NBR 16055, 2012).

A distância de influência d_v , segundo a ABNT NBR 16055:2012, compreende a distância onde as tensões são consideradas uniformes ao longo de toda a parede, sem a influência da abertura, e é dada entre uma abertura e uma estrutura fixa de apoio. A distância vertical entre duas aberturas pode ser descrita em $2d_v$, a fim de uniformizar as tensões, conforme a Figura 7.

Figura 7 - Distribuição vertical de aberturas em uma parede de concreto



Fonte: adaptado de ABNT NBR 16055 (2012).

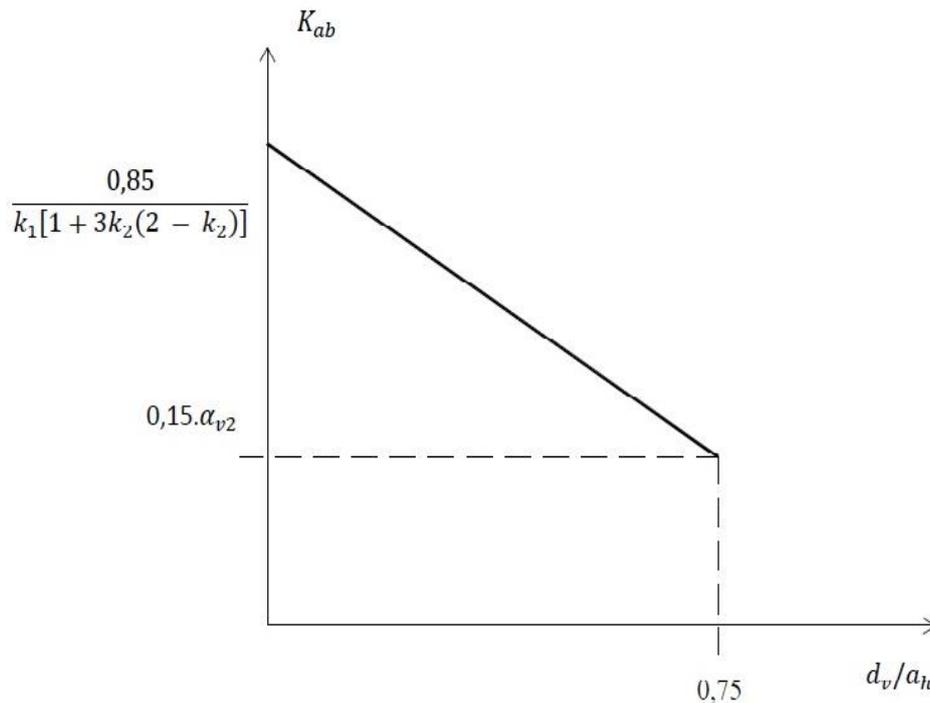
O coeficiente K_{ab} , trazido pela ABNT NBR 16055:2012, indica a parcela de carga que se desvia sob a abertura e depende da distância de influência d_v . Em aberturas contínuas, ou seja, onde d_v é igual a zero, o valor do coeficiente é nulo. Para $d_v = 0,75a_h$, o valor do coeficiente é total. Ainda, os valores de K_{ab} variam de acordo com:

a) quando $d_v \geq 0,75a_h \rightarrow K_{ab} = 0,15 \cdot \alpha_{v2}$

onde $\alpha_{v2} = 1 - \frac{f_{ck}}{250}$ e f_{ck} é a resistência característica do concreto (MPa);

b) quando $d_v < 0,75a_h \rightarrow$ interpolação pelo gráfico da Figura 8, com k_1 e k_2 conforme 2.3.4.1.

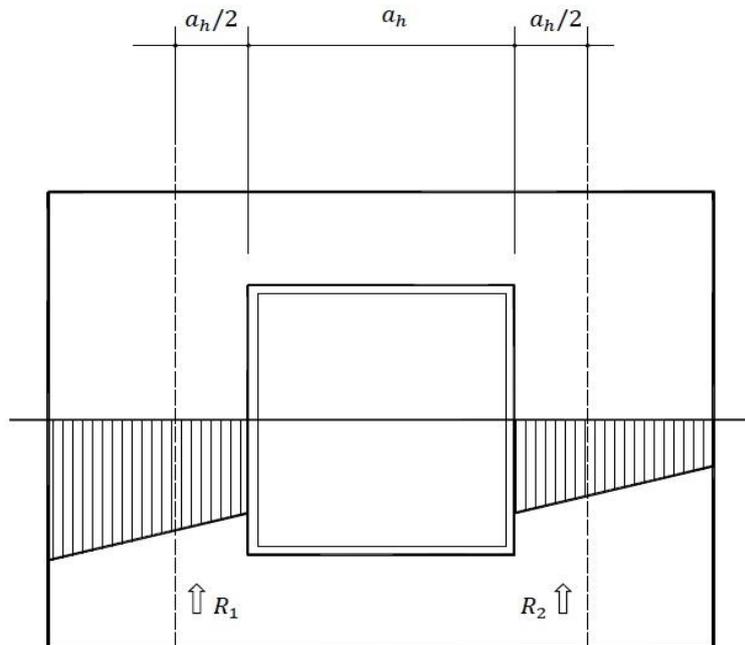
Figura 8 - Valores do coeficiente K_{ab}



Fonte: ABNT NBR 16055 (2012).

Pelo prescrito na ABNT NBR 16055:2012, em uma parede de concreto com aberturas, o esforço solicitante a ser considerado é a maior resultante vertical que contemple as aberturas. Neste sentido, opta-se pela maior resultante entre R_1 e R_2 , obtidas pela integração das tensões normais que atuam numa região maior ou igual do que $a_h/2$, em cada um dos lados das aberturas, conforme exposto na Figura 9.

Figura 9 - Esforço solicitante



Fonte: ABNT NBR 16055 (2012).

Por fim, faz-se a verificação da resistência, aplicando-se a Equação 10, como descrito pela ABNT NBR 16055:2012. $R_{d,máx}$ é dado pelo maior valor entre as resultantes R_1 e R_2 , majorado por γ_f .

$$R_{d,máx} \leq k_{ab} \cdot f_{cd} \cdot t \cdot a_h \quad (10)$$

Sendo:

- t espessura da parede;
- f_{cd} resistência à compressão de cálculo do concreto;
- a_h dimensão horizontal da abertura;
- γ_f coeficiente de majoração das forças.

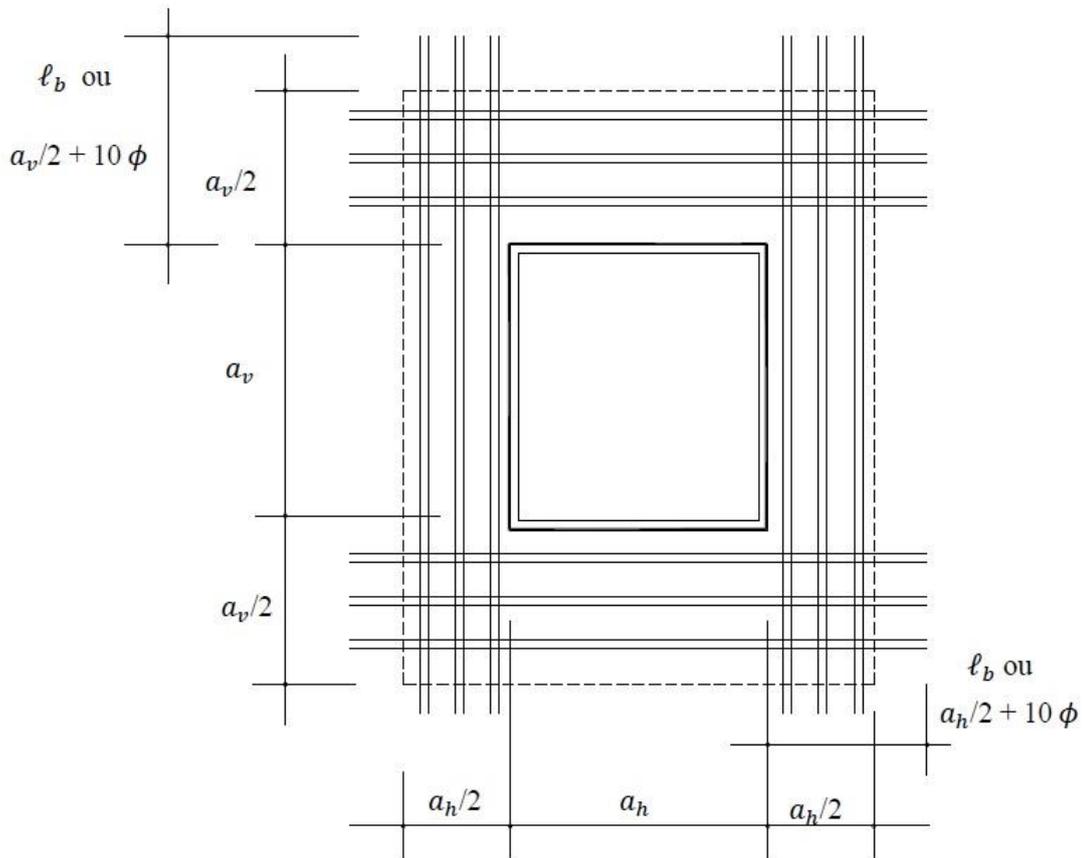
2.4.1.3 Armaduras de reforço ao redor das aberturas

A ABNT NBR 16055:2012 evidencia que todas as aberturas com $a_h \geq 40$ cm devem ter armaduras de reforço horizontais em suas faces superior e inferior. A norma estabelece, também, os requisitos para todas as armaduras de reforço. Estas devem ser espaçadas em faixas com dimensões de $a_h/2$ e seu comprimento mínimo deve contemplar o somatório da dimensão da abertura e o maior valor entre $a_h/2 + 10\phi$ e

ℓ_b , onde ℓ_b representa o comprimento de ancoragem (m), de acordo com a ABNT NBR 6118:2014.

A Figura 10, retirada da ABNT NBR 16055:2012, mostra representativamente como deve ser feita a distribuição das armaduras de reforço ao redor de uma abertura. Além disso demonstra as formulações para determinação dos seus comprimentos.

Figura 10 - Armaduras de reforço



Fonte: ABNT NBR 16055 (2012).

A armadura vertical, em cada um dos lados da abertura, é disposta conforme ilustrado na Figura 10. Seu cálculo é dado através da Equação 11, como traz a ABNT NBR 16055:2012.

$$\frac{A_{slv}}{s} \geq \frac{\frac{2R_{d,máx}}{a_h} - k_{ab} \cdot f_{cd} \cdot t}{f_{yd}} \quad (11)$$

Para a armadura horizontal, também ilustrada na Figura 10, deve ser considerado o somatório entre a armadura de verga e a armadura necessária para equilibrar o desvio da força vertical. Esta última é obtida através da Equação 12, também presente na ABNT NBR 16055:2012.

$$A_{slh} \geq \frac{R_{d,m\acute{a}x}}{2f_{yd}} \cdot \frac{d_v}{0,75a_h} \quad (12)$$

sendo $d_v \leq 0,75a_h$.

Como contraverga, na parte inferior da abertura, deve-se prever uma armadura mínima igual a ΔA_{slh} . Assim, por simplificação, tanto a armadura superior à abertura, quanto a inferior, podem ser calculadas de maneiras iguais.

Outra forma para determinar as armaduras de reforço é através do modelo elástico ou biela-tirante. Esta metodologia foi mencionada em 2.3.3 do presente trabalho, tratando dos reforços horizontais.

2.4.2 Fissuração provocada pelas aberturas em paredes de concreto armado

Por ser o concreto armado um material não homogêneo e, ainda, pela falta de cuidados em fase de projeto, execução e até mesmo na manutenção, Da Fonseca (2016) elenca as principais causas da fissuração no compósito. Para o autor, o pior caso de fissuras são as decorrentes de cargas diretas, onde o erro construtivo ocorre ainda em fase de projeto e pode comprometer a estabilidade global de todo o elemento. Estas se originam, principalmente, pelo mau dimensionamento ou detalhamento incorreto, além da insuficiência ou comprimento inadequado das armaduras de reforço e ancoragem.

A retração do concreto, ou seja, a diminuição de seu volume pela eliminação da água em seu interior, também é responsável pela fissuração, mencionada por Da Fonseca (2016). Esta deformação independe do carregamento e é devida exclusivamente à variação de umidade do concreto. Um dos principais motivos da fissuração por retração se deve ao fato da adição excessiva de água no concreto, a fim de melhorar a sua trabalhabilidade, gerando uma posterior concentração de tensão na massa de concreto. Ainda, na visão de Da Fonseca (2016), outro fator contribuinte para o aparecimento das fissuras, neste caso, é a falta ou a insuficiência da cura no concreto armado. Este processo consiste na hidratação contínua do concreto em seu estágio inicial, desacelerando a evaporação da água do compósito.

De acordo com Da Fonseca (2016), outra forma de fissuração é a originada por deslocamentos impostos, que ocorrem, geralmente, por falhas de fundação. Conforme o autor, o recalque diferencial da fundação no solo gera esforços de cisalhamento,

muitas vezes não previstos em projeto. Estes deslocamentos na fundação são transmitidos para o restante da estrutura, resultando em fissuras.

A última causa de fissuração, elencada por Da Fonseca (2016), decorre de fenômenos químicos deletérios. Segundo o autor, a reação álcali-agregado tem trazido muitos problemas de fissuração no Brasil ao longo dos últimos anos. Nesta reação, o cimento e seus agregados, em presença de umidade, expandem, gerando fissuras e deslocamentos que podem comprometer a estrutura. (HASPARYK, 2005). Também citada em Da Fonseca (2016), a corrosão da armadura, atrelada à umidade do meio, faz com que a estrutura perca a sua capacidade de resistência aos esforços solicitantes, acarretando em fissuras e trincas.

Popescu et al. (2015) evidencia que, em uma parede de concreto armado, a presença de aberturas reduz consideravelmente sua capacidade de carga final quando comparado à parede sólida equivalente, aumentando a fissuração. Doh e Fragomeni (2006) afirmam a tendência de fissuração a partir das quinas das aberturas, evidenciando o acúmulo de tensões nesta região. Concordante a Doh e Fragomeni (2006), Corsini (2012) também trata dos pontos de concentração de tensão nos cantos das aberturas, bem como da própria estrutura, dados pela retração, desvio de carga ou dilatação térmica. A Figura 11, retirada de Da Fonseca (2016), permite visualizar as fissuras a partir da presença de aberturas em paredes de concreto armado.

Figura 11 - Fissuração devido às aberturas



Fonte: adaptado de Da Fonseca (2016).

2.4.3 Normas estrangeiras

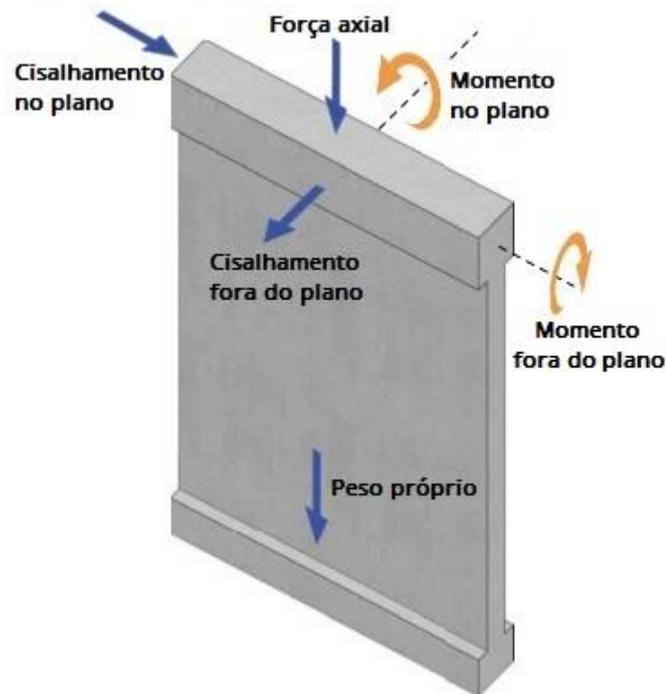
Cada país aborda de maneira distinta as metodologias de cálculo para o dimensionamento de paredes de concreto armado. Braguim (2013) considera como sendo as principais normas estrangeiras o ACI 318:2019, o Eurocode 2:2004 e o AS 3600:2009.

Ambas as normas tratam de elementos estruturais de concreto, com um capítulo específico para paredes de concreto armado, diferente das normas brasileiras, onde os assuntos são tratados em normativas diversas. Doh e Fragomeni (2006) alegam que o ACI 318 e o AS 3600 são restritos a paredes com índice de esbeltez menor do que 30 e que não podem dar conta do dimensionamento de aberturas, como portas e janelas.

2.4.3.1 ACI 318:2019 - Building Code Requirements for Structural Concrete

Segundo o ACI 318:2019, Código Americano, as disposições para paredes de concreto são aplicáveis somente em paredes apoiadas lateralmente, impedindo o deslocamento lateral superior e inferior de elementos individuais da parede. As paredes que não obedecem a esta condição, devem ser projetadas como outros membros de concreto armado, de acordo com o Código. As paredes, ainda, devem resistir a todos os carregamentos aos quais estão submetidas, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Forças no plano e fora do plano



Fonte: adaptado e traduzido de ACI 318 (2019).

Quanto às aberturas, o Código ACI 318:2019 traz que, ao redor de portas, janelas e aberturas em geral, deve-se utilizar armadura de reforço. Para paredes com duas camadas de reforço, em ambas as direções, utiliza-se no mínimo duas barras nº 5, que apresentam um diâmetro de 5/8 pol, o que corresponde a 16 mm por barra. Em paredes com uma única camada de reforço, nas duas direções, utiliza-se de no mínimo uma barra nº 5. Estas barras devem estender-se, além do vão da abertura, em não menos do que 24 pol, ou seja, aproximadamente 61 cm, ou devem ser ancoradas nos cantos das aberturas, de modo a desenvolver tensão.

O ACI 318:2019 menciona, ainda, que a implantação de diversas portas e/ou janelas consecutivas em uma parede estrutural, faz com que ela se torne um membro pilar-parede, por ser um elemento vertical estreito. Nestes casos, o cisalhamento real pode exceder o cisalhamento indicado pela análise de cargas, sendo obrigatório tomar um cuidado redobrado no dimensionamento.

2.4.3.2 EN 1992 Eurocode 2:2004 - *Design of concrete structures*

O Eurocode 2:2004, Código Europeu, trata brevemente do tema paredes de concreto armado. Considera como paredes os elementos com uma relação

comprimento / espessura resultante a um valor igual ou maior a 4 e onde o reforço é levado em consideração na análise da força. A quantidade e o detalhamento deste reforço podem ser obtidos a partir de um modelo biela-tirante e, em paredes onde o carregamento predominante é a flexão, pode-se calcular como lajes.

Esta norma não aborda nenhum tópico específico sobre as aberturas em paredes de concreto, somente induz à ideia de que grandes aberturas em paredes acarretam em maiores deformações por cisalhamento e, no caso de aberturas com pequenas dimensões, o cisalhamento não causa impacto global significativo. No entanto, o Eurocode 2:2004 não demonstra parâmetros para a delimitação do tamanho das aberturas.

O Eurocode 2:2004 comenta, ainda, sobre as particularidades para projeto e detalhamento. Neste subcapítulo, trata sobre as concentrações de tensão nas aberturas e conexões, que devem ser levadas em conta no detalhamento do reforço. Todavia, essa regra não é especificamente para paredes, mas sim para todos os elementos de concreto armado.

2.4.3.3 AS 3600:2009 - *Concrete structures*

O AS 3600:2009, norma australiana, trata as paredes de concreto como elementos verticais não espessos, onde o comprimento deve ter, no mínimo, quatro vezes a sua espessura. De acordo com a norma, dependendo da função a que são submetidas, as paredes podem agir como uma coluna para as cargas verticais, uma laje resistente às cargas horizontais, vigas em balanço resistindo à flexão ou a combinação entre elas.

Segundo o AS 3600:2009, quando duas ou mais paredes, ou uma parede com um grande número de aberturas, são unidas por uma viga, a combinação destas paredes aumenta a rigidez do sistema, como resultado da transferência de cisalhamento e flexão através destas vigas. No entanto, as bordas verticais das paredes devem ser verificadas. Ademais, a presente norma não traz maiores detalhes sobre o dimensionamento das aberturas.

3 MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo apresenta a metodologia de pesquisa utilizada para a obtenção dos resultados, de modo a analisar o comportamento de uma parede de concreto armado quando submetida a alguns tipos de aberturas. Ademais, elenca as propriedades dos materiais utilizados, bem como as características da parede e das aberturas.

A escolha do método se deu pelo dimensionamento designado na ABNT NBR 16055:2012, uma vez que, além de ser uma norma brasileira, se mostra mais completa diante das normas estrangeiras, principalmente no que diz respeito ao dimensionamento ao redor das aberturas. Para analisar a influência que o posicionamento e as dimensões das aberturas têm sobre a resistência da parede, utilizou-se de modelagens numéricas, com a ajuda da ferramenta computacional ANSYS, que atua com o Método dos Elementos Finitos.

O carregamento adotado, as dimensões da parede, as posições e dimensões das aberturas e as demais características pertinentes ao estudo são hipotéticas, respeitando as definições requeridas pela norma. Ao final deste capítulo, são apresentados, em uma matriz de análise, 19 protótipos da parede, variando o posicionamento e geometria das aberturas.

3.1 DADOS DE PROJETO

Por se tratar de uma parede de concreto armado, os materiais que a constituem são, respectivamente, o concreto e o aço. As propriedades destes insumos foram adotadas obedecendo-se as prescrições presentes na ABNT NBR 16055:2012, bem como as informações da literatura.

O concreto a ser utilizado no dimensionamento das paredes pertence à classe C30, com resistência característica à compressão (f_{ck}) de 30 MPa, por ser este usualmente empregado na construção civil, além de respeitar os limites máximo e mínimo requeridos. Ainda, este concreto deve ser preferencialmente autoadensável.

O aço empregado no dimensionamento da parede pertence à categoria CA-60, apresentando resistência característica ao escoamento (f_{yk}) de 600 MPa, sendo este o mencionado pela norma para as telas soldadas. Quanto às barras utilizadas para

reforço, estas pertencem à categoria CA-50, com f_{yk} de 500 MPa, por apresentar maiores diâmetros.

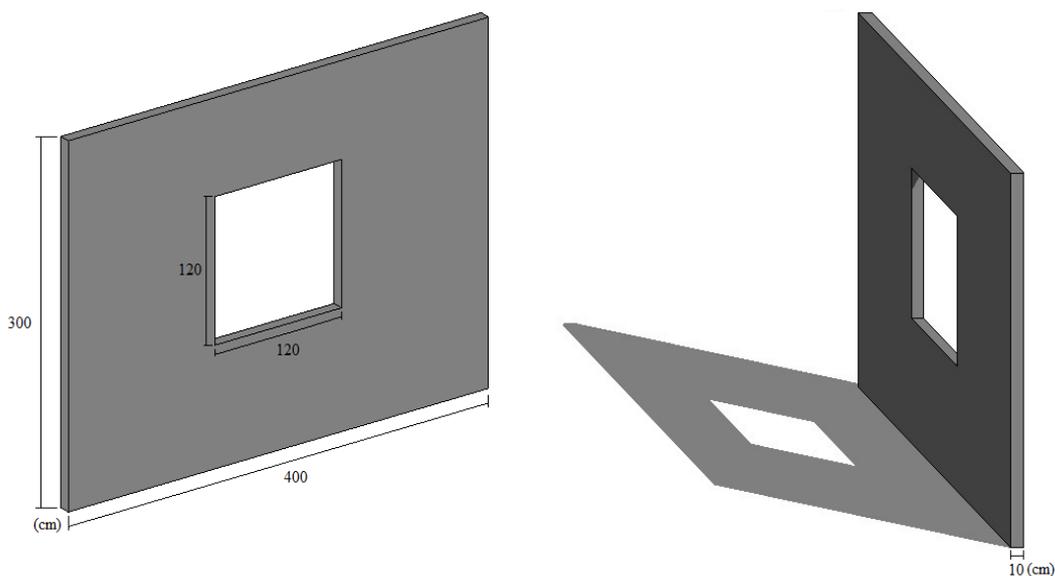
Além disso, as paredes estão expostas à classe de agressividade ambiental II, considerando que esta estrutura esteja implantada em um ambiente urbano. Neste caso, a agressividade é considerada moderada e o risco de deterioração da estrutura é pequeno, conforme ABNT NBR 6118:2014. Sendo esta norma para elementos de concreto armado aperticados e não apresentando informações sobre paredes, o cobrimento nominal adotado foi de 30 mm, referente a vigas e pilares, por ser o mais elevado, em favor da segurança.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA PAREDE

As paredes que melhor representam o sistema em estudo são as paredes sólidas bidirecionais, que se deformam nas duas direções. Desta forma, a parede avaliada no presente trabalho será tratada igualmente, com restrições em três de seus lados, a fim de reduzir a deformação e aumentar a resistência.

Para efeitos de estudo, considera-se que a parede seja retangular. Com isso, será adotado o pé direito máximo de 3 metros e comprimento de 4 metros, com espessura de 10 cm, sendo a mínima requerida para esta altura. A Figura 13 ilustra a parede em questão, com uma abertura quadrada de 120 cm de lado.

Figura 13 - Representação da parede



Fonte: o autor (2020).

Considerou-se, também, que a parede em estudo seja do primeiro pavimento de uma edificação residencial. O carregamento distribuído uniformemente no topo da parede é de 150 kN/m, simulando a transferência de carga dos pavimentos superiores. Estimou-se este valor a partir do que geralmente ocorre em uma edificação de 10 pavimentos de alvenaria estrutural, acrescido em favor da segurança. Além disso, leva-se em conta que as lajes sejam apoiadas nas paredes.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ABERTURAS

A fim de verificar como se comporta uma parede de concreto armado com a inserção de uma abertura, em termos de resistência, modelou-se a parede caracterizada em 3.2, analisou-se a sua resistência quando totalmente preenchida por concreto e, posteriormente, quando submetida a alguns tipos de aberturas. As tipologias de aberturas que contemplam o estudo em questão são tratadas nos itens que segue e podem ser visualizadas na matriz de análise disposta em 3.4.

3.3.1 Aberturas pequenas

A ABNT NBR 16055:2012 considera como pequenas aberturas aquelas com tamanho máximo de duas vezes a espessura da parede. A mesma norma, bem como a literatura, traz que pequenas aberturas ou furos podem ser desconsiderados.

Assim sendo, e de modo a validar o descrito, serão analisadas duas pequenas aberturas, sendo uma de geometria quadrada e outra circular, comumente encontradas em furos. A abertura quadrada terá 20 cm de lado e será nomeada por PQ. A abertura circular, por sua vez, contará com diâmetro de 20 cm e será nomeada como PC.

3.3.2 Aberturas médias

Como aberturas médias, serão avaliados os vãos de janelas tradicionais, utilizando-se de tamanhos padrão de janelas encontrados no mercado. Para melhor visualização e entendimento do comportamento das paredes, estas aberturas serão variáveis em área, altura e comprimento e nomeadas, respectivamente, por MA, MH e ML.

As aberturas apresentarão dimensões de 60x60 cm, 100x100 cm, 120x120 cm e 150x150 cm. Para efetuar as combinações, todas as aberturas irão variar em altura ou comprimento pela menor dimensão de modelo médio, ou seja, por 60 cm.

3.3.3 Aberturas grandes

Tanto a norma, quanto a literatura, não delimitam claramente as dimensões para consideração de grandes aberturas. Desta forma, adotou-se como grande abertura o vão de uma janela de varanda de 200 cm de lado, nomeada como G. Esta também irá variar em altura e comprimento pela dimensão de 60 cm.

3.3.4 Posição das aberturas

Quanto ao posicionamento das aberturas, optou-se por considerá-las centralizadas ou dispostas nos vínculos das paredes. Por usualidade, somente as pequenas aberturas irão variar de posição, uma vez que é comum os furos se encontrarem próximos aos cantos das paredes, enquanto que as demais permanecerão centralizadas à parede em questão. Por simplificação, serão avaliadas aberturas em um dos vínculos superiores e um dos vínculos inferiores, pois, teoricamente, o comportamento é o mesmo para os lados direito e esquerdo, visto que a parede apresenta simetria.

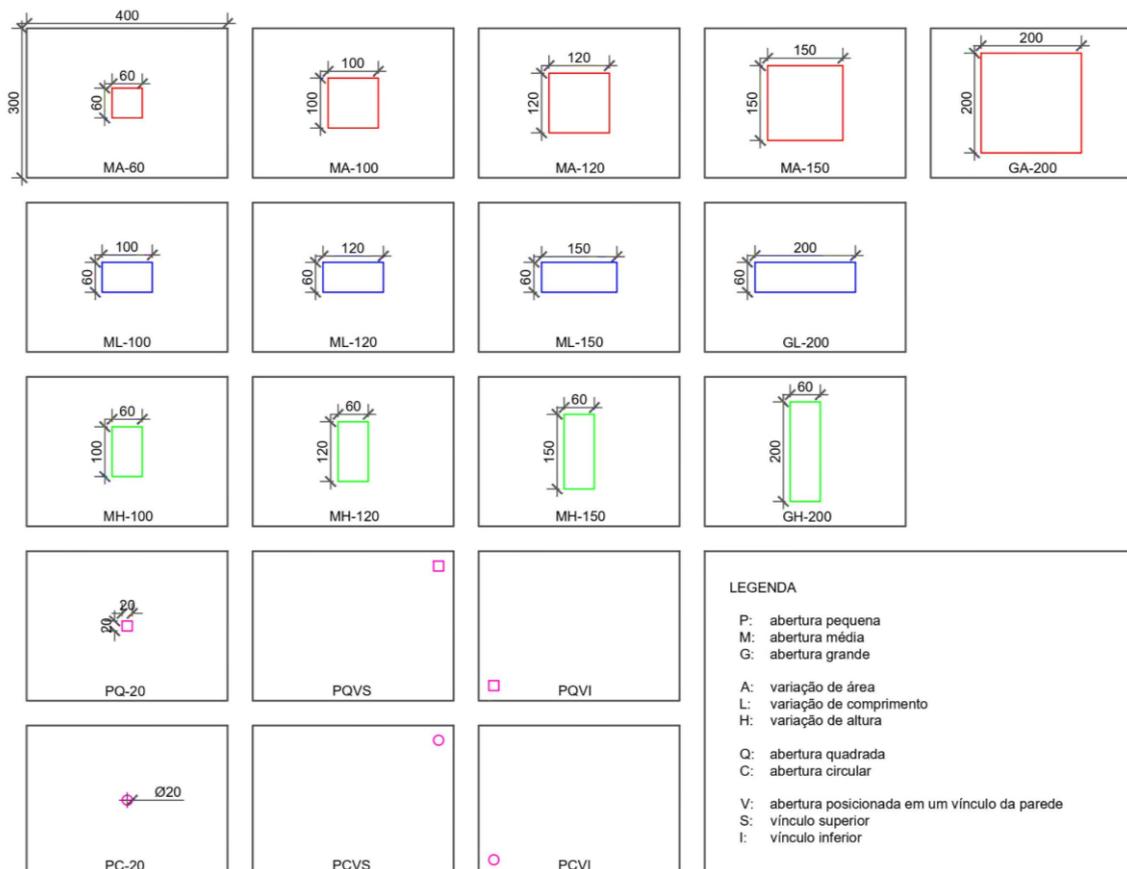
A nomenclatura da parede com aberturas nos vínculos irá depender da geometria do furo, bem como da sua disposição. As aberturas quadradas serão nomeadas como PQVS ou PQVI, de acordo com a sua localização, superior ou inferior. O mesmo acontece para as aberturas circulares, sendo estas chamadas de PCVS ou PCVI.

3.4 MATRIZ DE ANÁLISE

De maneira a facilitar a compreensão quanto às nomenclaturas utilizadas para cada parede, bem como a disposição das aberturas e suas dimensões, foi elaborada uma matriz de análise. Esta matriz é apresentada na Figura 14 e contempla as 19 paredes que serão abordadas neste estudo.

A primeira linha de paredes trata das aberturas que variam em área, ou seja, aumentam de tamanho proporcionalmente em altura e comprimento, e são nomeadas de acordo com seu tamanho, médias (MA) ou grande (GA). A segunda linha de paredes é composta pelas aberturas que variam em comprimento, mantendo a altura de 60 cm constante, e nomeadas como ML e GL. A terceira linha de paredes abrange as aberturas que variam em altura, mantendo o seu comprimento constante, também de 60 cm, nomeadas por MH e GH. Por fim, a quarta e quinta linhas de aberturas contemplam os furos, isto é, as pequenas aberturas, que variam em posição, sendo estas centralizadas ou dispostas nos vÃnculos da parede. As pequenas aberturas centralizadas sÃo chamadas de PQ e PC, tratando, respectivamente, de quadrada e circular, enquanto que as aberturas dispostas nos vÃnculos sÃo chamadas de PQV e PCV. AlÃm disso, as aberturas nos vÃnculos sÃo denominadas, tambÃm, por S ou I, de acordo com a sua localizaÃÃo, superior ou inferior. No canto inferior direito da Figura 14, Ã possÃvel visualizar a legenda, que colabora para o entendimento das nomenclaturas expostas.

Figura 14 - Matriz de anÃlise



Fonte: o autor (2020).

3.5 INTRODUÇÃO DAS PAREDES À FERRAMENTA ANSYS

Primeiramente, com o auxílio da ferramenta Ansys Discovery SpaceClaim, modelou-se as paredes dispostas na matriz de análise, com suas respectivas dimensões e aberturas, e, posteriormente, aplicando-as à ferramenta Ansys Discovery Live, foi possível realizar as análises estruturais pertinentes ao estudo. Ambas as ferramentas são de caráter educacional, com versão gratuita.

A análise desenvolvida neste trabalho foi linear e contempla, principalmente, a verificação à tração e à compressão de paredes de concreto armado quando submetidas a aberturas, bem como o seu deslocamento. A malha aplicada no estudo é a malha padrão do próprio *software*. Os coeficientes referentes ao concreto, alimentados no *software*, foram retirados da ABNT NBR 6118:2014, como o coeficiente de Poisson igual a 0,2, relativo às deformações elásticas do concreto, a massa específica (ρ_c), que para o concreto armado é igual a 2500 kg/m³ e o módulo de elasticidade longitudinal (E_{ci}), sendo para a categoria C30 igual a 31 GPa.

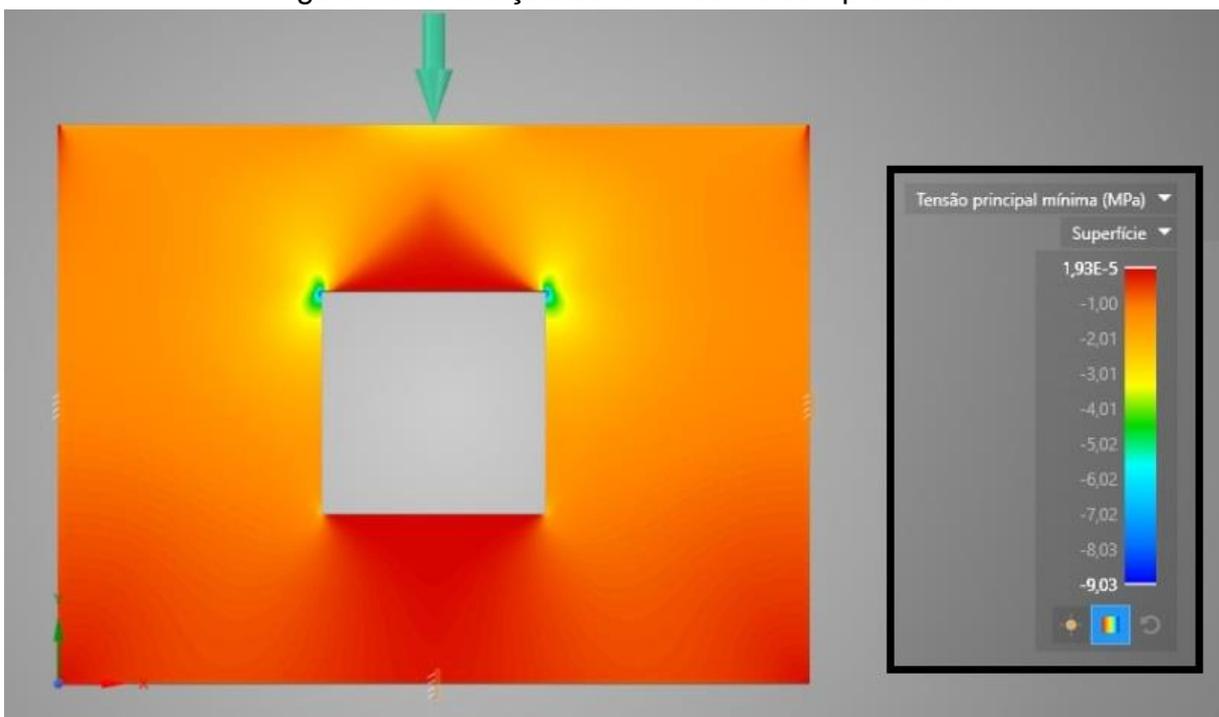
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados e as análises provenientes da aplicação dos processos abordados no método de pesquisa. Esta etapa do estudo está estruturada em duas componentes: o dimensionamento de uma parede de concreto armado, segundo a ABNT NBR 16055:2012, e a simulação dos protótipos apresentados na matriz de análise, com o auxílio da ferramenta computacional ANSYS. Desta forma, os procedimentos de cálculo e simulações efetuados são expostos e, conjuntamente, são apresentadas as análises dos resultados obtidos.

4.1 DIMENSIONAMENTO DE UMA PAREDE SEGUNDO A NBR 16055 (2012)

No intuito de verificar as recomendações expostas pela norma, escolheu-se uma das paredes modeladas e realizou-se todo o seu dimensionamento, englobando, inclusive, o dimensionamento ao redor das aberturas. A parede escolhida para esta análise foi a parede MA-120, por apresentar dimensão intermediária dentre as aberturas que aumentam proporcionalmente em área. Os esforços solicitantes de compressão desta parede foram obtidos através da análise gerada pelo ANSYS, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 - Esforços solicitantes de compressão



Fonte: o autor (2020).

A partir do maior valor normal resultante definiu-se o valor normal médio, disposto na região lateral das aberturas, considerando faixas de 1m. Para a determinação da sollicitação da parede, multiplicou-se o valor médio de compressão pela espessura da parede, de modo a transformar a tensão obtida em força por metro. Por fim, para a definição da sollicitação normal de cálculo, aplicou-se a Equação 3. A ação do vento não foi considerada para o estudo, portanto, não há força cortante sollicitante de cálculo. A Tabela 1 apresenta os valores definidos.

Tabela 1 - Esforços sollicitantes

Maior valor normal	Menor valor normal	Sollicitação normal de cálculo	Força cortante sollicitante de cálculo	Sollicitação da parede com abertura
$n_{d,máx}$ (kN/m)	$n_{d,mín}$ (kN/m)	$(3 \cdot n_{d,máx} + n_{d,mín})/4$ (kN/m)	V_d (kN)	$R_{d,máx}$ (kN/m)
301	0	225,75	0	225,75

Fonte: o autor (2020).

Em seguida, aplicou-se os coeficientes utilizados para os demais cálculos do dimensionamento, a partir das recomendações dadas pela ABNTNBR 6118:2014. São eles: coeficientes de ponderação da resistência do concreto (γ_c) e do aço, módulo de elasticidade do aço, taxa geométrica da armadura vertical (em favor da segurança), resistência ao escoamento do aço de cálculo e resistência de aderência de cálculo da armadura passiva. Estes coeficientes podem ser verificados na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados de projeto

Coeficientes	
γ_c	1,68
γ_s	1,15
E_s (MPa)	210000
ρ (%)	1
f_{yd} (MPa)	521,74
f_{bd} (MPa)	2,72

Fonte: o autor (2020).

4.1.1 Comprimento equivalente e armadura mínima

Através das equações dispostas na Figura 2 e considerando a existência de continuidade lateral, pôde-se encontrar o comprimento equivalente da parede,

apresentado na Tabela 3. Ainda, a norma define valores distintos de armação mínima vertical e horizontal. Com base no exposto em 2.3.2, obteve-se os valores de armadura mínima da parede, bem como o espaçamento máximo, também apresentados na Tabela 3. A armadura utilizada se deu em uma tela de aço nervurada disposta no centro da parede, uma vez que esta parede apresenta espessura menor do que 15 cm.

Tabela 3 - Comprimento equivalente e armadura mínima

Comprimento equivalente (m)		Armadura mínima (cm ²)		Espaçamento máximo (cm)	
β	0,75	$A_{Smín,ver}$	2,7	$S_{máx}$	20
l_e	1,92	$A_{Smín,hor}$	6		

Fonte: o autor (2020).

4.1.2 Resistência de cálculo sob solicitação normal de compressão

Para obter a resistência de cálculo sob solicitação normal, primeiramente definiu-se os parâmetros necessários, conforme 2.3.4.1 e, em seguida, aplicou-se a Equação 2. Os resultados encontrados podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resistência à compressão

Compressão (MPa)	
f_{cd} (MPa)	17,86
f_{scd} (MPa)	365,22
λ	66,51
k_1	1,90
k_2	0
$n_{d,resist}$ (kN/m)	990,93
condição 1 (kN/m)	1146,12
condição 2 (kN/m)	2857,14

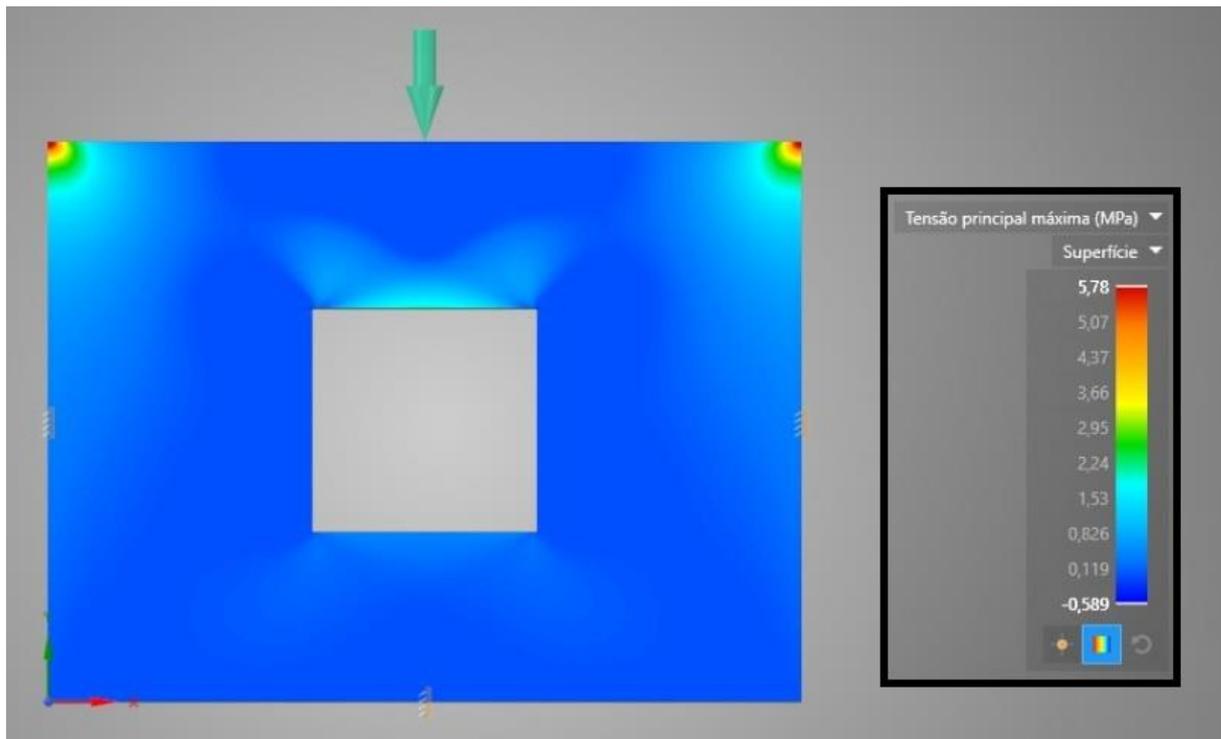
Fonte: o autor (2020).

Com isso, tem-se que $n_{d,resist}$ é menor do que seus limites, descritos na Tabela 4 como condição 1 e 2, portanto, adota-se o valor calculado. No entanto, a verificação à compressão também deve ser levada em consideração, conforme Equação 3, a partir das máxima e mínima tensões de compressão, mencionadas na Tabela 1 e resultando em um valor igual a 225,75 kN/m. Neste caso, como a solicitante de cálculo é menor do que a resistente, a resistência de cálculo sob solicitação normal permanece em 990,93 kN/m.

4.1.3 Dimensionamento à tração

A partir da demonstração feita pelo *software*, têm-se que o maior valor de tensão normal de tração nos entornos da abertura é de 1,53 MPa que, multiplicado pela espessura da parede, resulta em 153 kN/m, conforme ilustrado na Figura 16. O menor valor, por sua vez, é igual a zero.

Figura 16 - Esforços solicitantes de tração



Fonte: o autor (2020).

Não havendo metodologia mais precisa para o cálculo da solicitação de tração, a ABNT NBR 16055:2012 permite utilizar a Equação 3 para tal. Esta resultou em um valor de 114,75 kN/m, também atendendo à verificação de solicitante < resistente.

4.1.4 Dimensionamento ao cisalhamento

Conforme definido, não há força cortante solicitante de cálculo. Deste modo, a resistência ao cisalhamento, calculada a partir da Equação 4 e resultando em 403,44 kN, atende à condição.

4.1.5 Dimensionamento das aberturas

A primeira etapa do dimensionamento ao redor das aberturas traz a definição da região de influência da própria abertura. Para o caso em questão, a região de influência delimitada para a abertura de 120 cm, é de 60 cm em cada um dos seus lados horizontalmente e 90 cm verticalmente.

Em seguida, determinou-se a limitação de tensão do concreto, que está diretamente relacionada com a distância entre a base da parede e a base da abertura. Os parâmetros de definição e os resultados de d_v e K_{ab} são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Limitação de tensão do concreto

Limitação de tensão do concreto				
Abertura (cm)	Coeficiente K_{ab}		Resistência da parede com abertura (kN)	
	120	d_v parede (m)	0,9	$R_{d,máx}$
d_v calculado (m)		0,9	$K_{ab} \cdot f_{cd} \cdot t \cdot a_h$	282,86
K_{ab}		0,132	ok	

Fonte: o autor (2020).

É importante ressaltar que, para este caso, K_{ab} é total, pois d_v da parede e d_v calculado são iguais. A condição foi atendida, visto que $R_{d,máx}$ é menor do que $K_{ab} \cdot f_{cd} \cdot t \cdot a_h$.

A Tabela 6 traz de forma sintetizada todos os parâmetros e resistências da parede em estudo. Estes se mostram necessários para o detalhamento completo da parede.

Tabela 6 - Parâmetros e resistências

Valores dos parâmetros e resistências						
Comprimento equivalente	Área de aço mínima		Resistência-limite sob solicitação normal	Força cortante resistente de cálculo	Parcela de carga que se desvia na abertura	Resistência da parede com abertura
	A_s , mín hor (cm ²)	A_s , mín ver (cm ²)				
l_e (cm)			$n_{d,resist}$ (kN/m)	f_{vd} (kN)	K_{ab}	$K_{ab} \cdot f_{cd} \cdot t \cdot a_h$ (kN)
192	6	2,7	990,93	403,44	0,132	282,86

Fonte: o autor (2020).

Analisando estes valores, pôde-se perceber que todas as resistências foram maiores do que as suas solicitações, atendendo às verificações e satisfazendo o princípio da manutenção do equilíbrio. Sendo a cortante solicitante igual a zero, não houve a necessidade do uso de armaduras de reforço para tal. Assim, para atender à flexão, foi utilizada a maior área mínima de aço, que corresponde à área mínima horizontal, com valor de 6 cm². Isso resultou em uma armação formada por 5 barras de 12,5 mm, com espaçamento de 20 cm.

4.1.5.1 Armadura de reforço ao redor das aberturas

Por fim, por conta da existência de uma abertura na parede, fez-se necessário calcular a armadura de reforço a ser disposta ao redor de seu vão, bem como o seu comprimento de ancoragem. Neste caso, para o cálculo das armaduras de reforço, utilizou-se das equações 11 e 12, sendo possível definir as armaduras verticais e horizontais. Para definição do comprimento da armadura, por sua vez, utilizou-se da recomendação dada em 2.3.3, por resultar em um valor maior, em favor da segurança. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 - Armadura de reforço ao redor das aberturas

Armadura de reforço ao redor das aberturas					
Armaduras		Região de distribuição (cm)		Ancoragem (cm)	
Vertical	Horizontal	Horizontal	60	l_b	40,03
$A_{slv/s}$ (cm ² /cm)	A_{slh} (cm ²)	Vertical	60	L ancoragem	70,03
0,0269	2,16	$S_{máx}$	20	Distribuição	60

Fonte: o autor (2020).

Assim, para satisfazer as condições de armadura, tanto vertical, quanto horizontal, utilizou-se de 3 barras de 10 mm, espaçadas a cada 20 cm e com comprimento total de 260,06 cm. Em ambos os casos, a região de distribuição da armadura é a mesma, visto que a_h e a_v são iguais.

4.1.6 Discussões ao dimensionamento

A ABNT NBR 16055:2012 trata de maneira coerente o dimensionamento das paredes de concreto armado, considerando o aumento de tensões ao redor das

aberturas. No entanto, a mesma norma não especifica o trecho de parede a ser analisado. Porém, por se tratar da influência que as aberturas têm sobre as paredes, o ideal é que se utilize para análise a região ao lado das aberturas, por ser esta a responsável por suportar o carregamento em que a parede está submetida.

Outro ponto a destacar é que a norma apresenta somente armaduras de reforço paralelamente ao vão da abertura, nos sentidos horizontal e vertical. Entretanto, o maior acúmulo de tensões de compressão, como se pôde perceber, acontece nos cantos das aberturas, se mostrando até 3 vezes maior do que quando comparado ao entorno. Deste modo, seria correta, também, a utilização de armaduras acomodadas transversalmente às quinas das aberturas, principalmente às superiores, como sugerido por Doh e Fragomeni (2006), de modo a evitar a fissuração.

Além disso, as maiores solicitações de tração da parede podem ser observadas em seus cantos superiores, podendo haver a necessidade de reforços transversais às quinas da própria parede. A norma não apresenta nenhuma menção sobre tal, o que poderia ser sugerido como um adendo, visto que o concreto, por si só, não apresenta resistência à tração.

4.2 ANÁLISE NUMÉRICA DAS ABERTURAS

Apesar da ABNT NBR 16055:2012 abordar a existência de aberturas em paredes de concreto armado, cabe, ainda, a análise da influência que estas têm sobre o maciço. De modo a analisar de que forma a dimensão e posicionamento das aberturas implica na resistência da parede, as paredes representadas na matriz de análise foram ensaiadas com a ajuda da ferramenta Ansys Discovery Live.

Os resultados obtidos a partir da análise numérica estão divididos em quatro categorias: aumento da área total da abertura, aumento do comprimento da abertura mantendo altura constante, aumento da altura da abertura mantendo comprimento constante e variação no posicionamento das pequenas aberturas. Além disso, uma parede sem nenhuma abertura também foi analisada, de modo a visualizar o seu comportamento e compará-lo às demais.

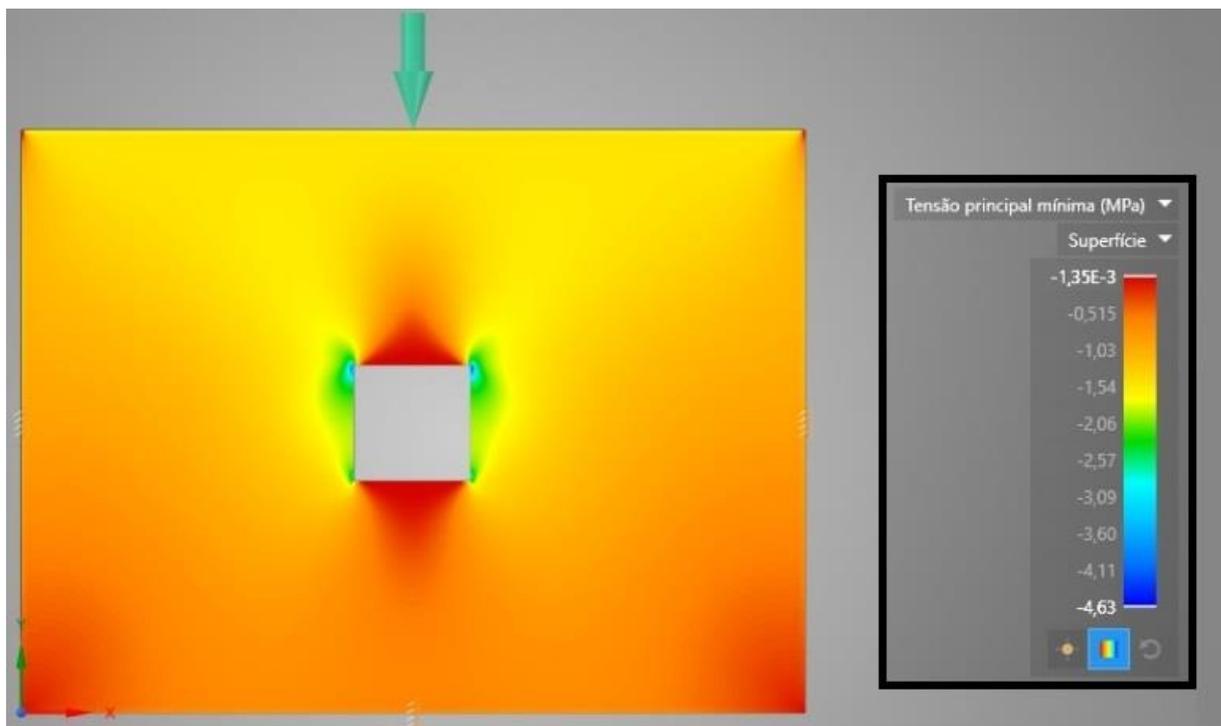
4.2.1 Aumento da área total da abertura

Para cada uma das aberturas que variam em área proporcionalmente, foram avaliadas as tensões de compressão e tração na parede, bem como o seu máximo deslocamento. Os itens a seguir explanam os resultados obtidos.

4.2.1.1 Tensões de compressão

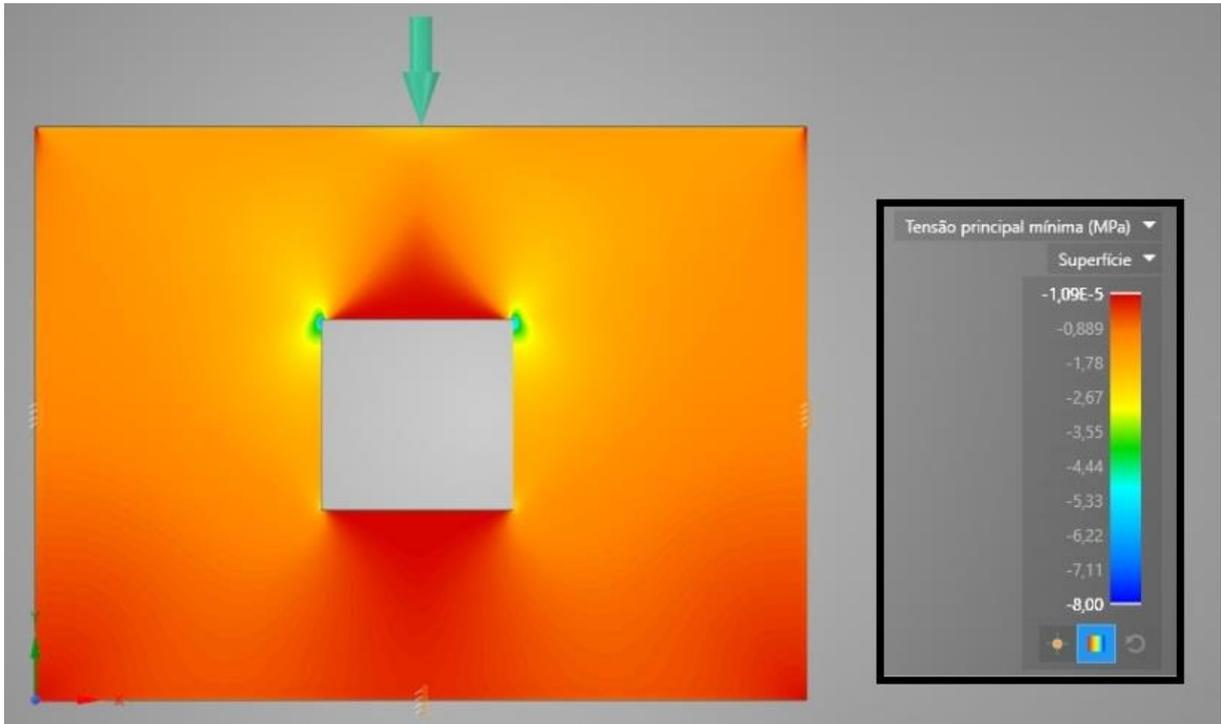
As Figuras 17, 18, 19, 20 e 21 ilustram as tensões de compressão em cada uma das paredes, onde as aberturas variam em área total. Em seguida, são feitas algumas considerações.

Figura 17 - Tensões de compressão MA-60



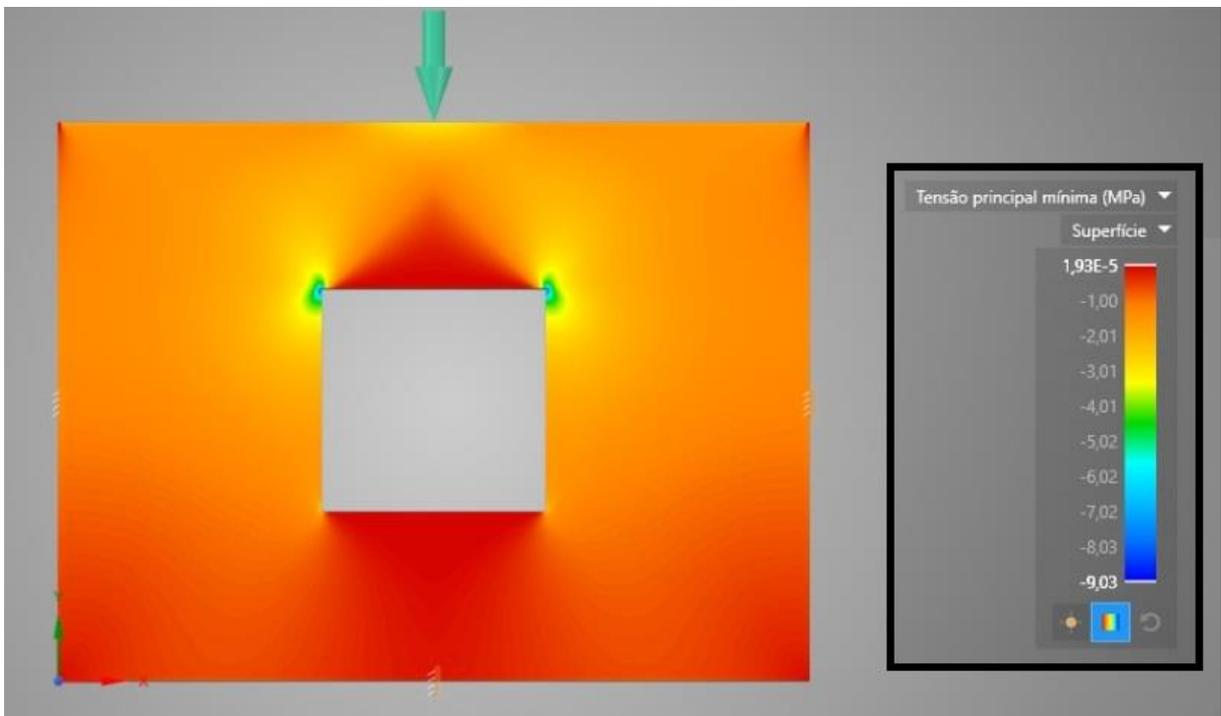
Fonte: o autor (2020).

Figura 18 - Tensões de compressão MA-100



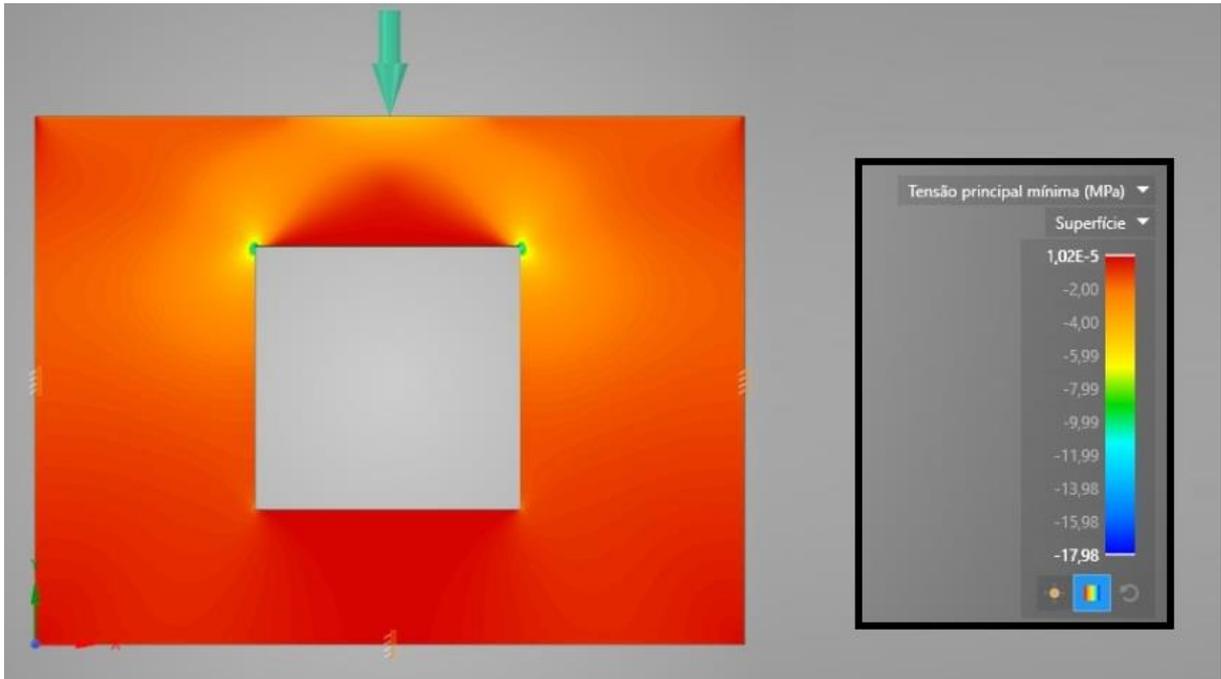
Fonte: o autor (2020).

Figura 19 - Tensões de compressão MA-120



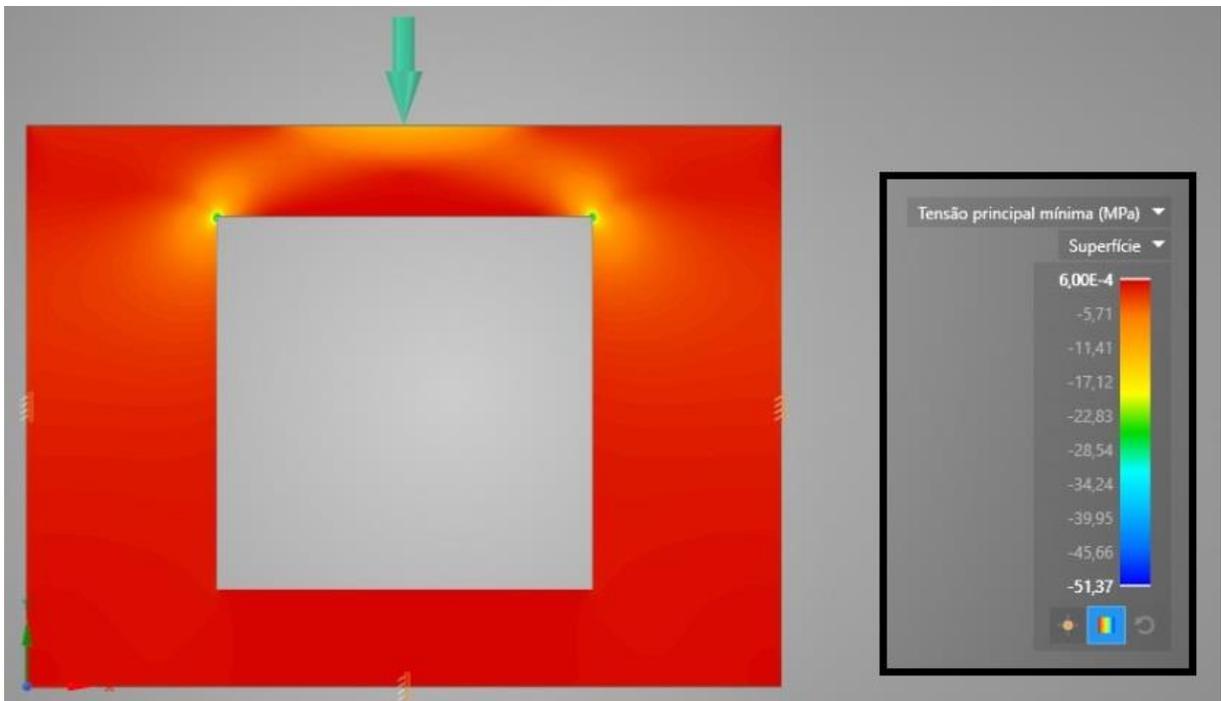
Fonte: o autor (2020).

Figura 20 - Tensões de compressão MA-150



Fonte: o autor (2020).

Figura 21 - Tensões de compressão GA-200



Fonte: o autor (2020).

Como observado nas Figuras listadas acima, o aumento da área total das aberturas em uma parede de concreto armado, implica em maiores valores de tensão de compressão. Tanto as tensões máximas das paredes, visualizadas nos cantos das

aberturas, quanto as tensões médias, visualizadas nos entornos do vão, tiveram seus valores aumentados quando aumentada a área total da abertura.

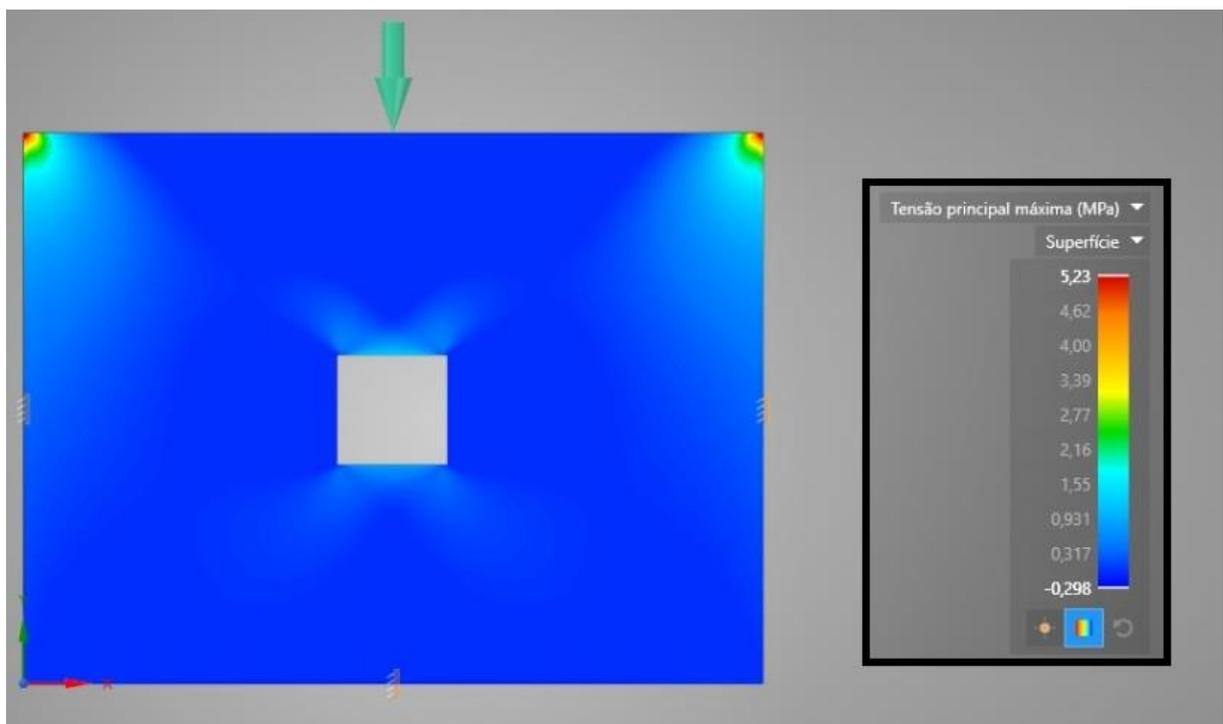
Enquanto que as máximas tensões de compressão das paredes foram visualizadas nos cantos superiores das aberturas, a parede MA-60 foi a única a apresentar valores elevados de tensão por toda a lateral desta abertura. Acredita-se que o acontecido pôde se dar em razão das pequenas dimensões do vão, fazendo com que as tensões se distribuam mais facilmente.

No caso da parede GA-200, o valor de máxima compressão ficou bastante elevado quando comparado às demais. Isso se deve pelo grande vão da abertura, deixando-a de ser considerada uma parede e passando a ser tratada como pilar-parede. De qualquer forma, para verificar o exposto pela norma no que diz respeito às grandes aberturas, essa parede permaneceu no estudo.

4.2.1.2 Tensões de tração

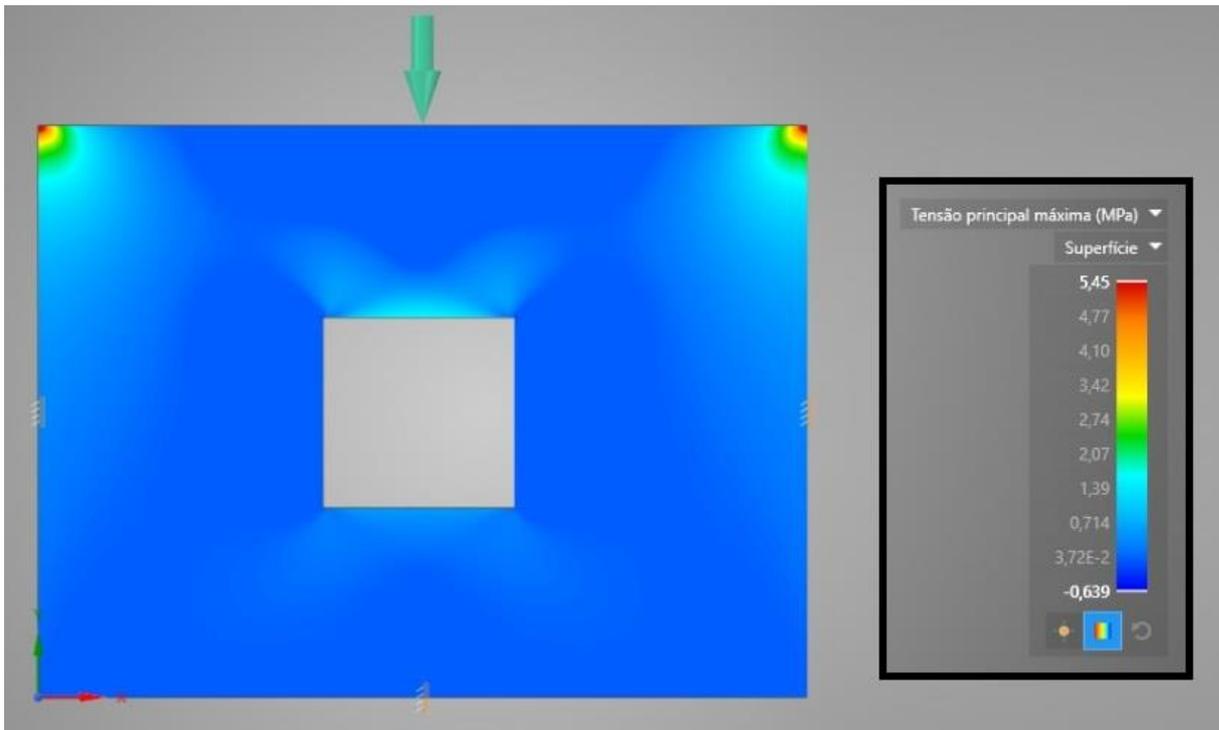
As Figuras 22, 23, 24, 25 e 26 ilustram as tensões de tração em cada uma das paredes que, igualmente, têm seu aumento de abertura em área total. Na sequência, são feitas algumas considerações.

Figura 22 - Tensões de tração MA-60



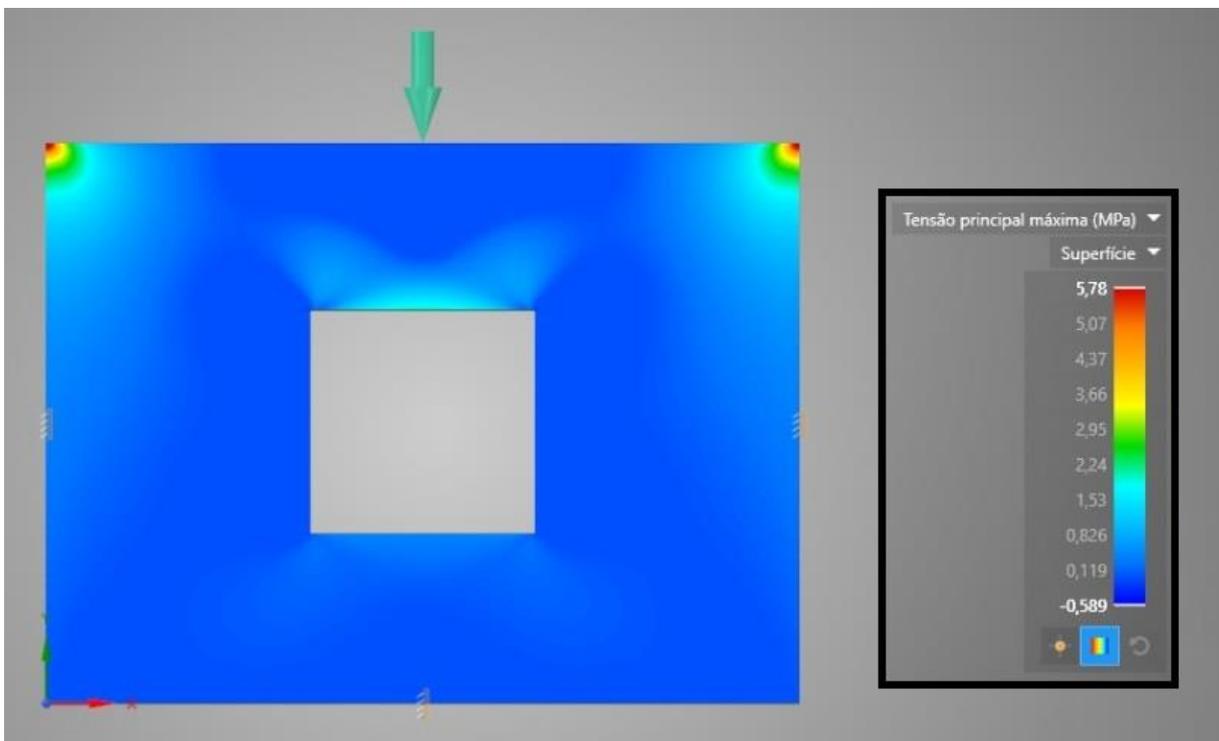
Fonte: o autor (2020).

Figura 23 - Tensões de tração MA-100



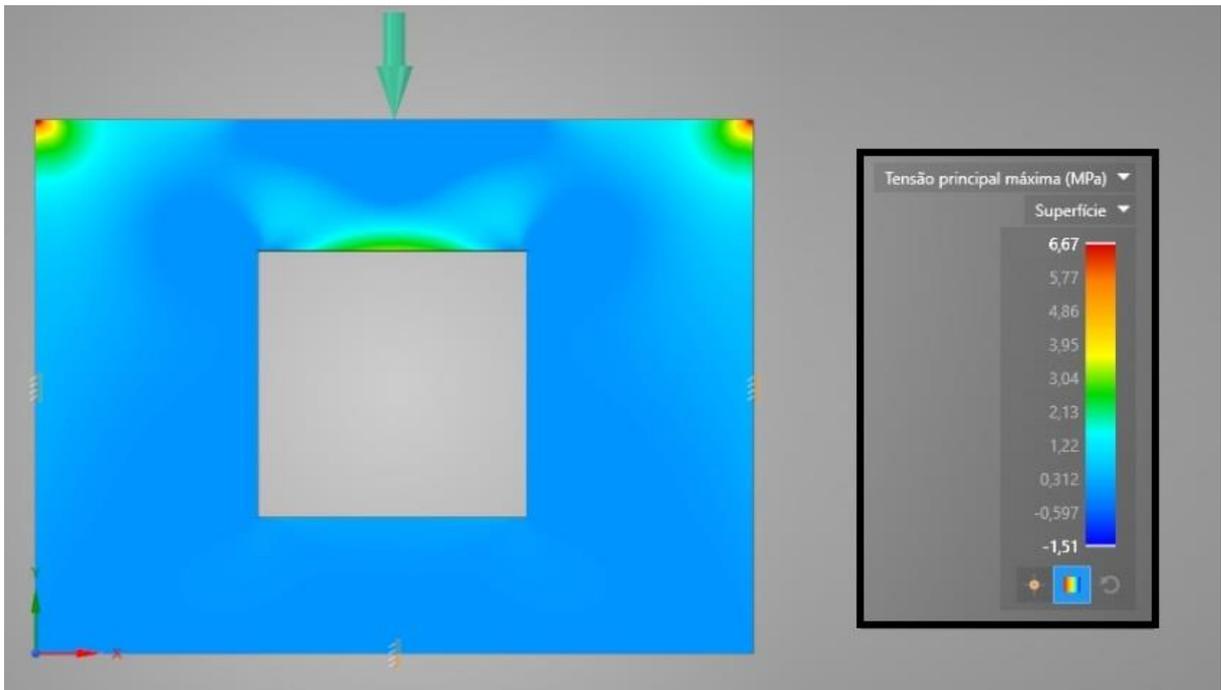
Fonte: o autor (2020).

Figura 24 - Tensões de tração MA-120



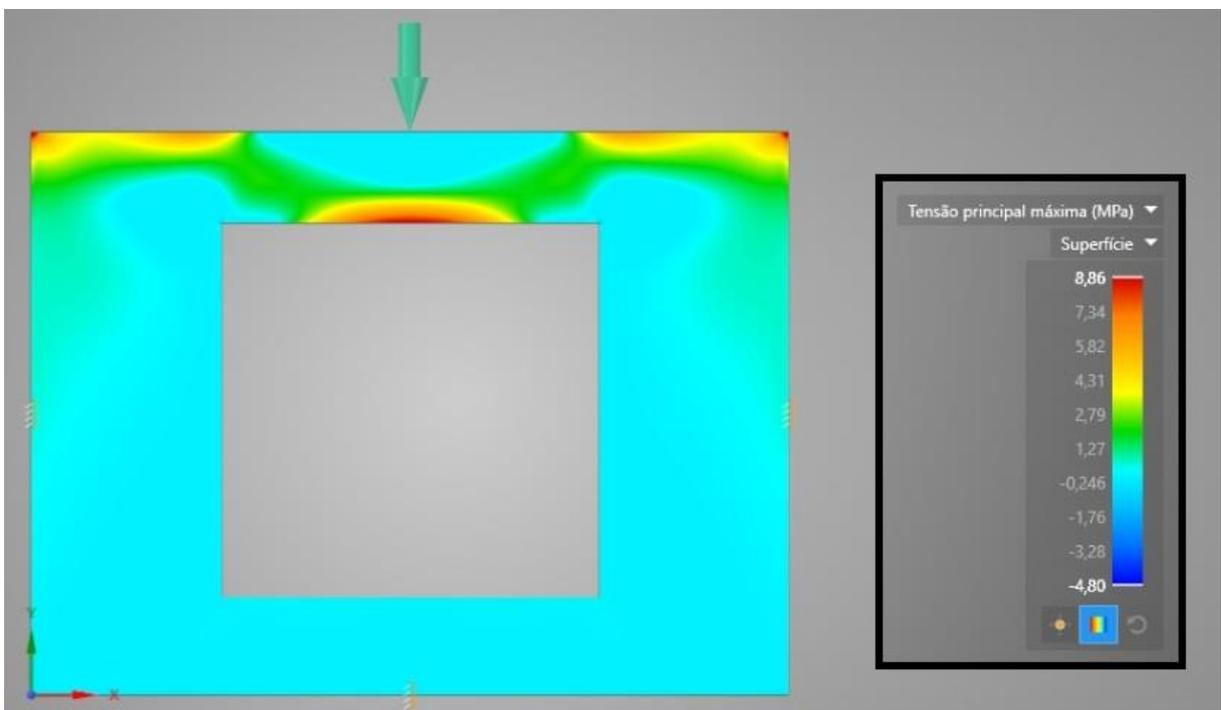
Fonte: o autor (2020).

Figura 25 - Tensões de tração MA-150



Fonte: o autor (2020).

Figura 26 - Tensões de tração GA-200



Fonte: o autor (2020).

Conforme analisado nas Figuras, e igualmente à compressão, o aumento da área total das aberturas influencia no aumento da tensão de tração em cada uma das paredes. Em todas as situações de aberturas, a maior solicitação à tração acontece

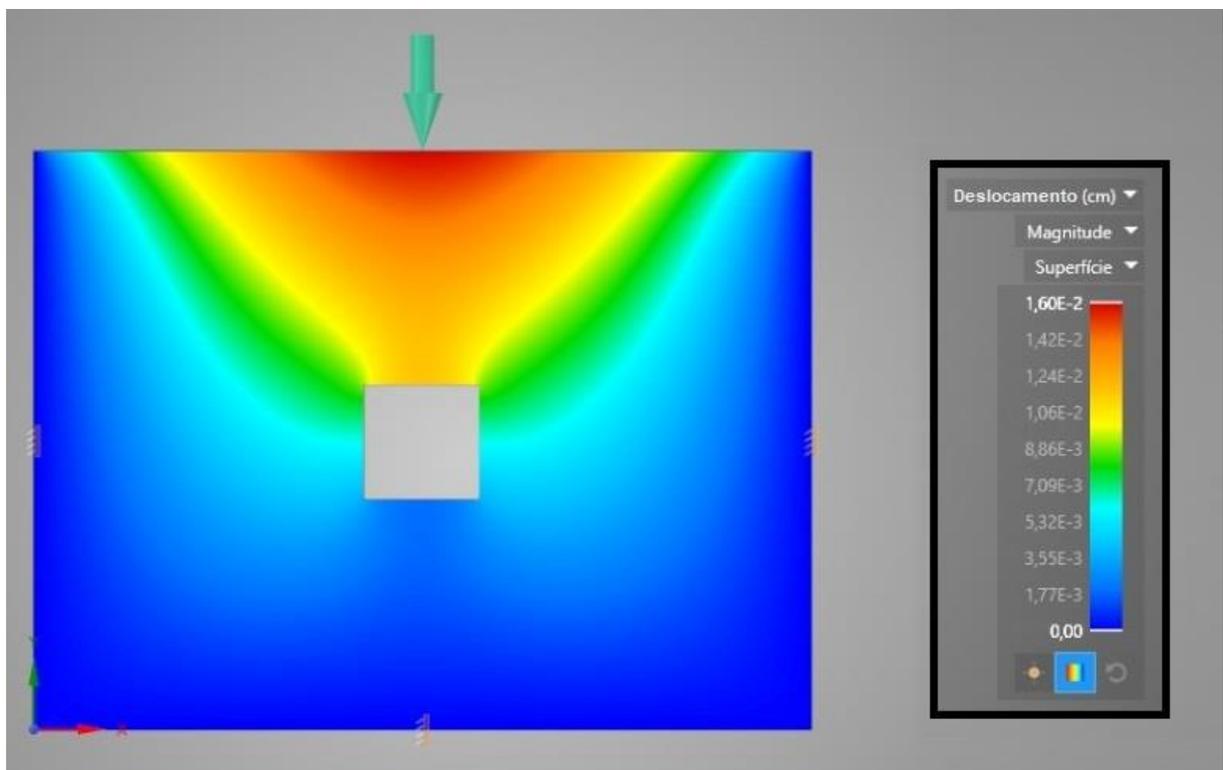
nos cantos superiores das paredes, inclusive apresentando acúmulo de tensões. Porém, conforme o crescimento da abertura, pode-se perceber um aumento de tensão de tração também na parte superior desta.

A parede que apresentou maiores valores de tensão e de forma distinta das demais, foi a parede GA-200. Nesta, o aumento de tensão envolve toda a parte superior da parede e apresenta acúmulo destas tensões tanto nos cantos da parede, quanto acima do vão da abertura. Essa parede ficou muito próxima de um modelo reticulado, com a parte superior da abertura tendenciando a um comportamento de viga.

4.2.1.3 Deslocamentos

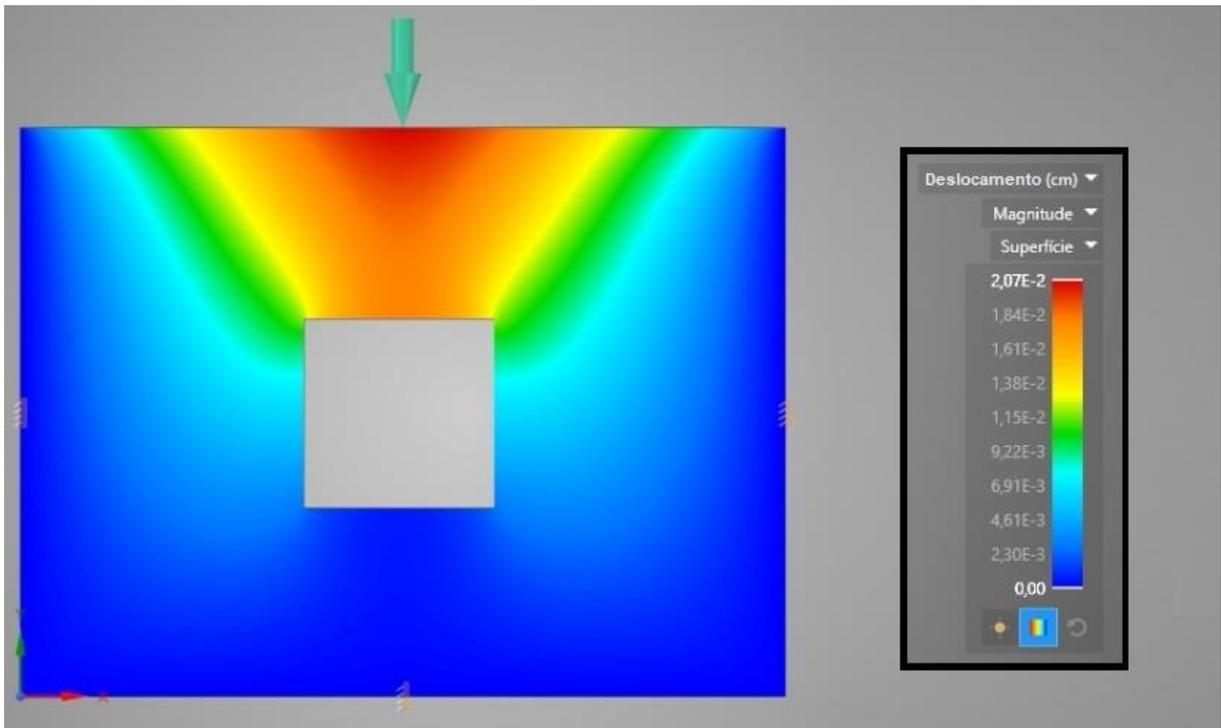
As Figuras 27, 28, 29, 30 e 31 demonstram os deslocamentos que acontecem em cada uma das paredes, a partir do carregamento aos quais estão expostas e a depender do tamanho das dimensões de suas aberturas.

Figura 27 - Deslocamentos MA-60



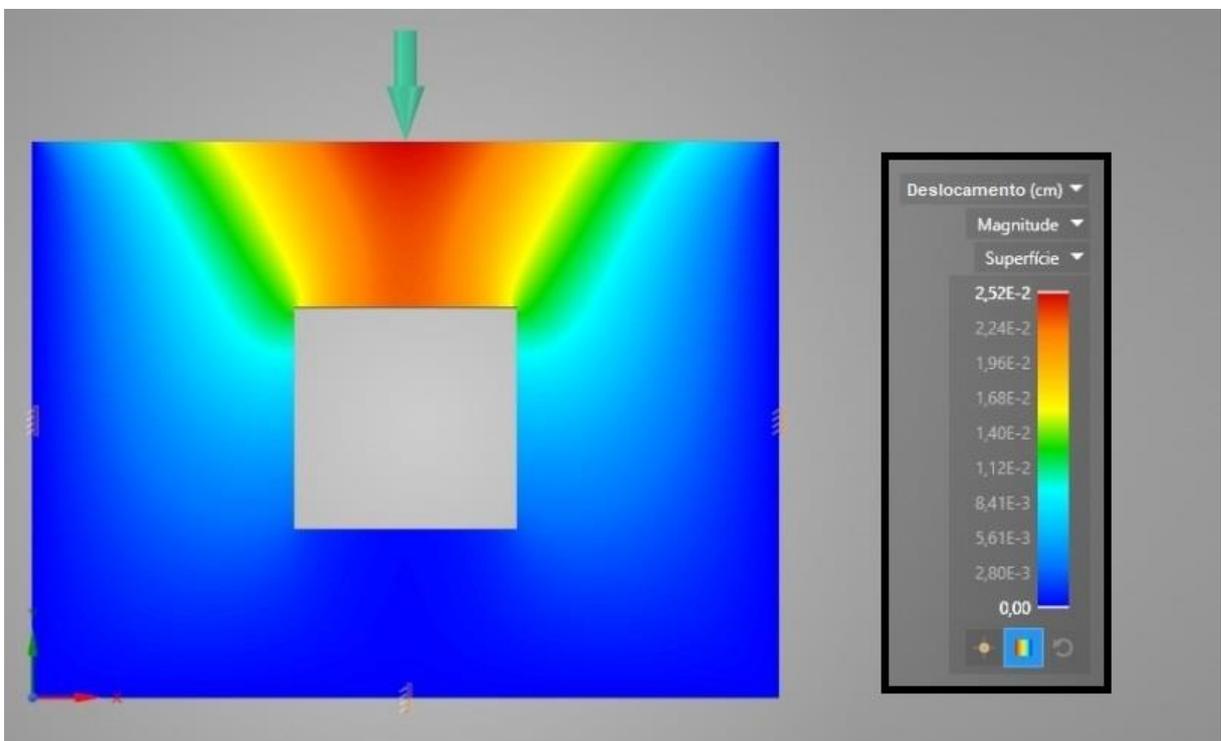
Fonte: o autor (2020).

Figura 28 - Deslocamentos MA-100



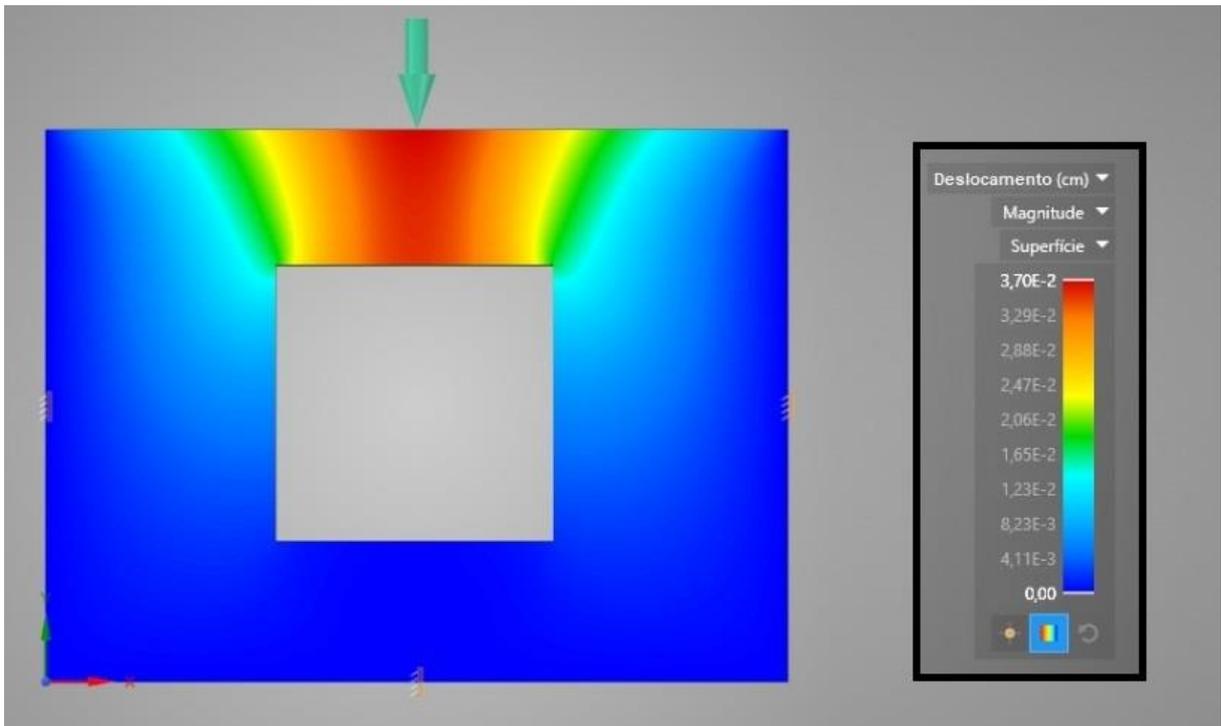
Fonte: o autor (2020).

Figura 29 - Deslocamentos MA-120



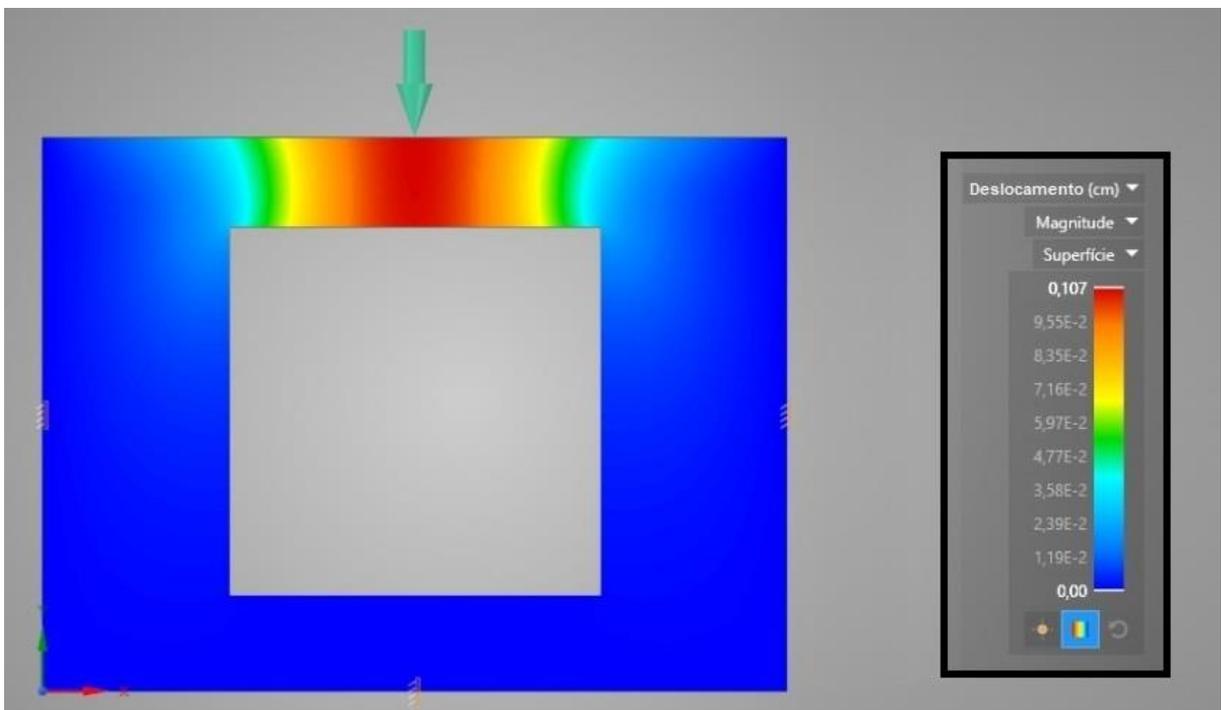
Fonte: o autor (2020).

Figura 30 - Deslocamentos MA-150



Fonte: o autor (2020).

Figura 31 - Deslocamentos MA-200



Fonte: o autor (2020).

No que concerne aos deslocamentos, a sua ocorrência se deu de forma semelhante em todas as paredes, partindo de seu topo em direção às aberturas. Os

máximos valores de deslocamento, igualmente aos de tensão, cresceram proporcionalmente ao aumento das aberturas. Estes valores distribuem-se de forma que os máximos deslocamentos registrados acontecem no centro superior da parede e seguem em direção à abertura.

Essa tendência de aumento do descolamento era esperada, visto que quanto maior o vão, maior a ocorrência de deslocamento. No caso da parede GA-200, o deslocamento obtido foi um tanto quanto maior que as demais, uma vez que a abertura é mais significativa, em razão de sua grande distância sem apoio.

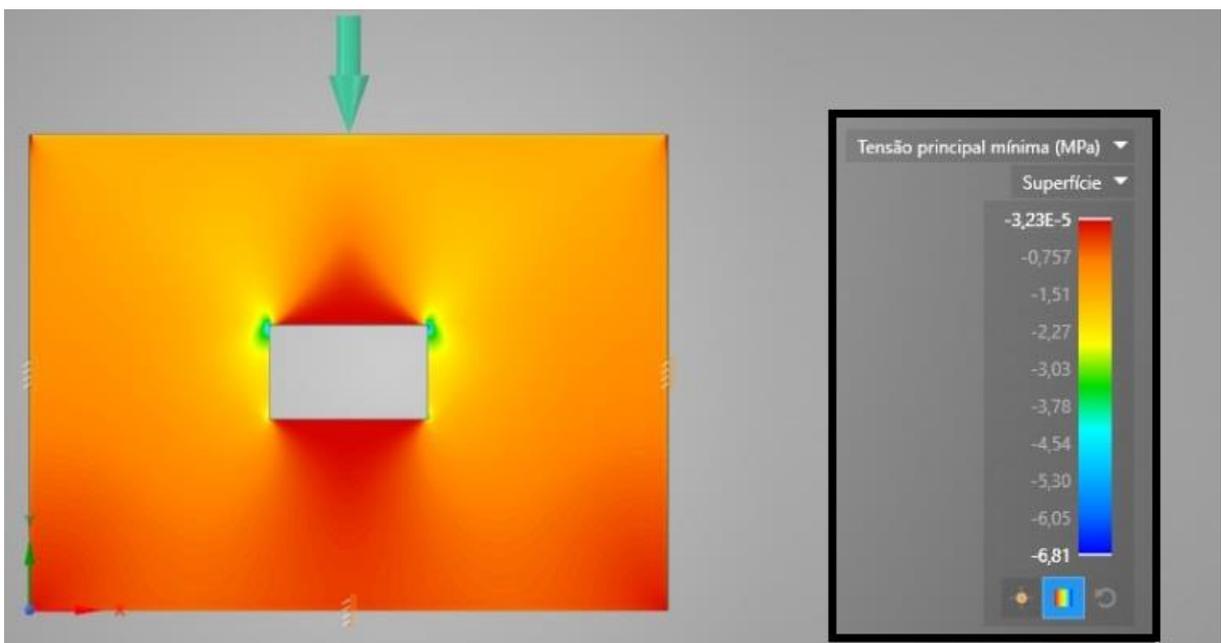
4.2.2 Aumento do comprimento da abertura mantendo altura constante

Para cada uma das aberturas que aumentam em comprimento e mantém a altura de 60 cm constante, avaliou-se as tensões de compressão e tração na parede, além de seu máximo deslocamento. Os itens a seguir explanam os resultados obtidos.

4.2.2.1 Tensões de compressão

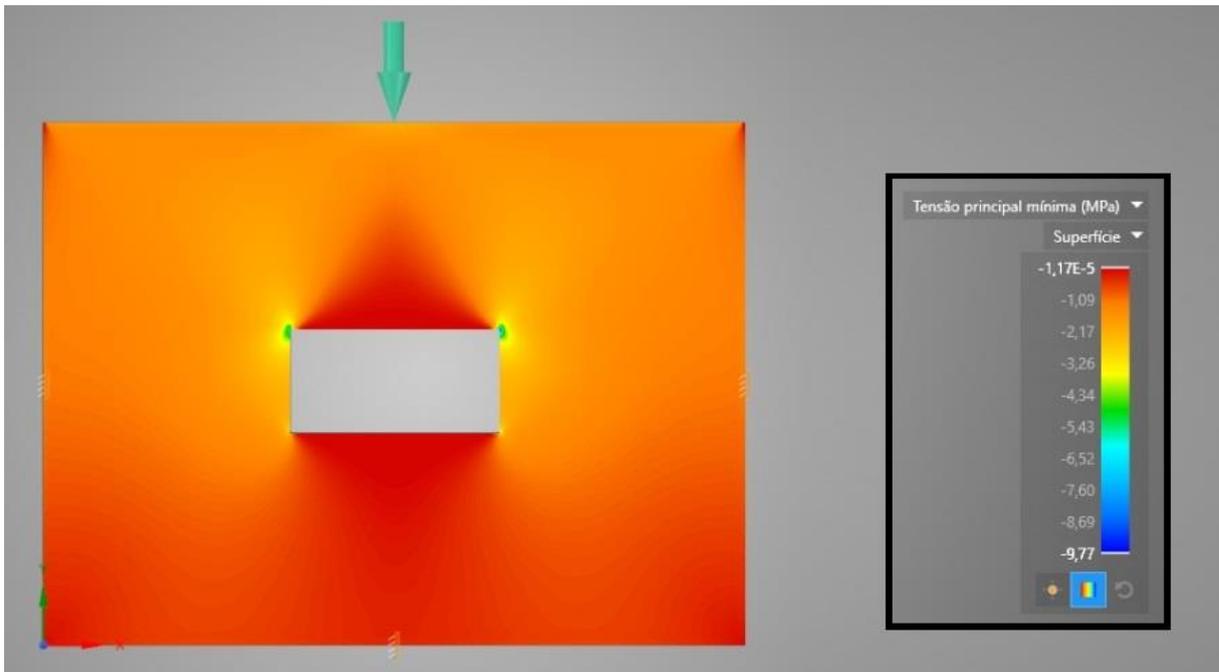
As Figuras 32, 33, 34 e 35 apresentam as tensões de compressão em cada uma das paredes em que as aberturas aumentam somente em comprimento. Em seguida, são feitas algumas discussões.

Figura 32 - Tensões de compressão ML-100



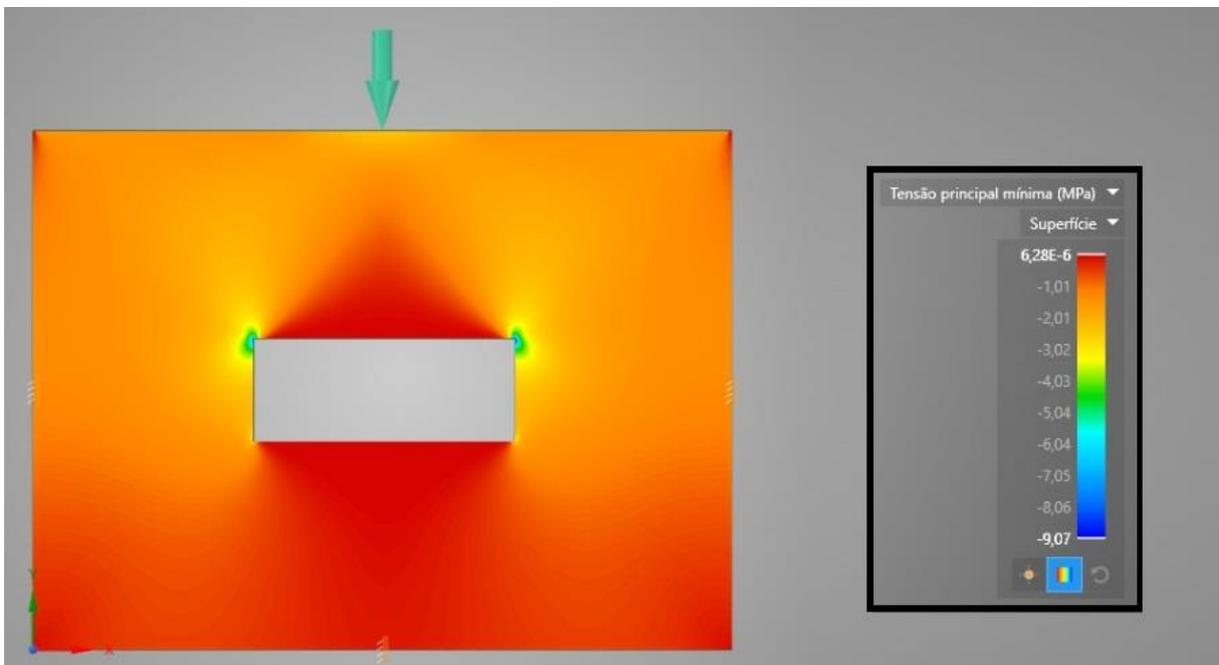
Fonte: o autor (2020).

Figura 33 - Tensões de compressão ML-120



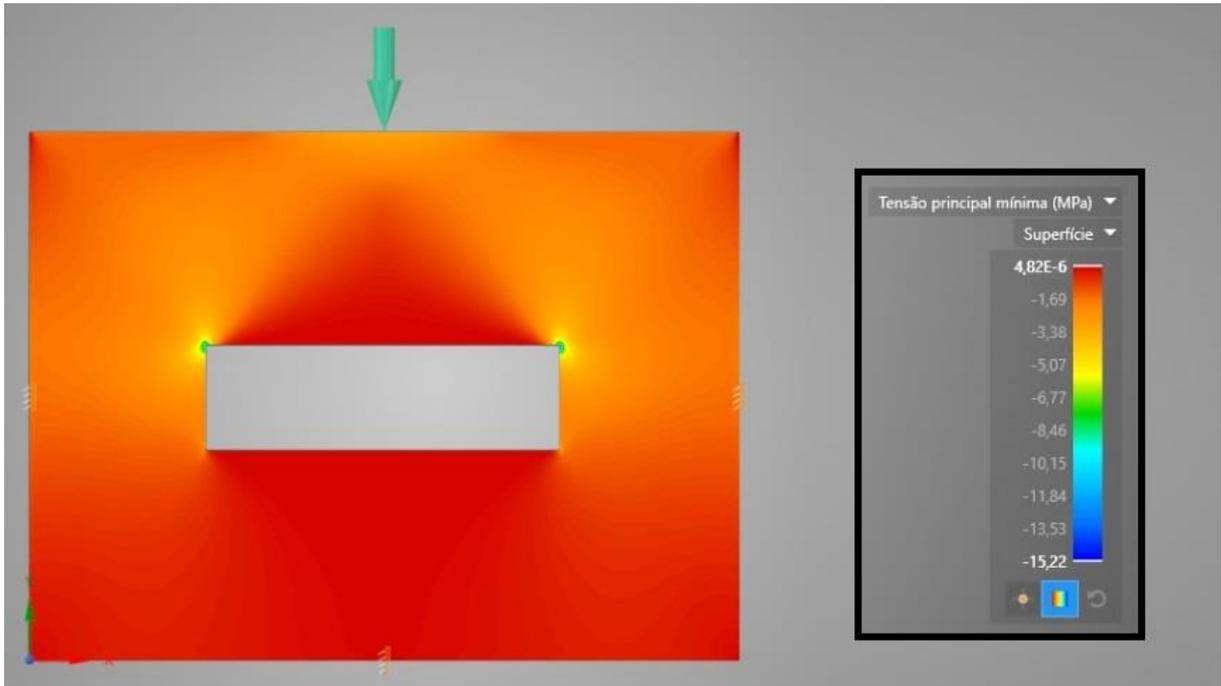
Fonte: o autor (2020).

Figura 34 - Tensões de compressão ML-150



Fonte: o autor (2020).

Figura 35 - Tensões de compressão GL-200



Fonte: o autor (2020).

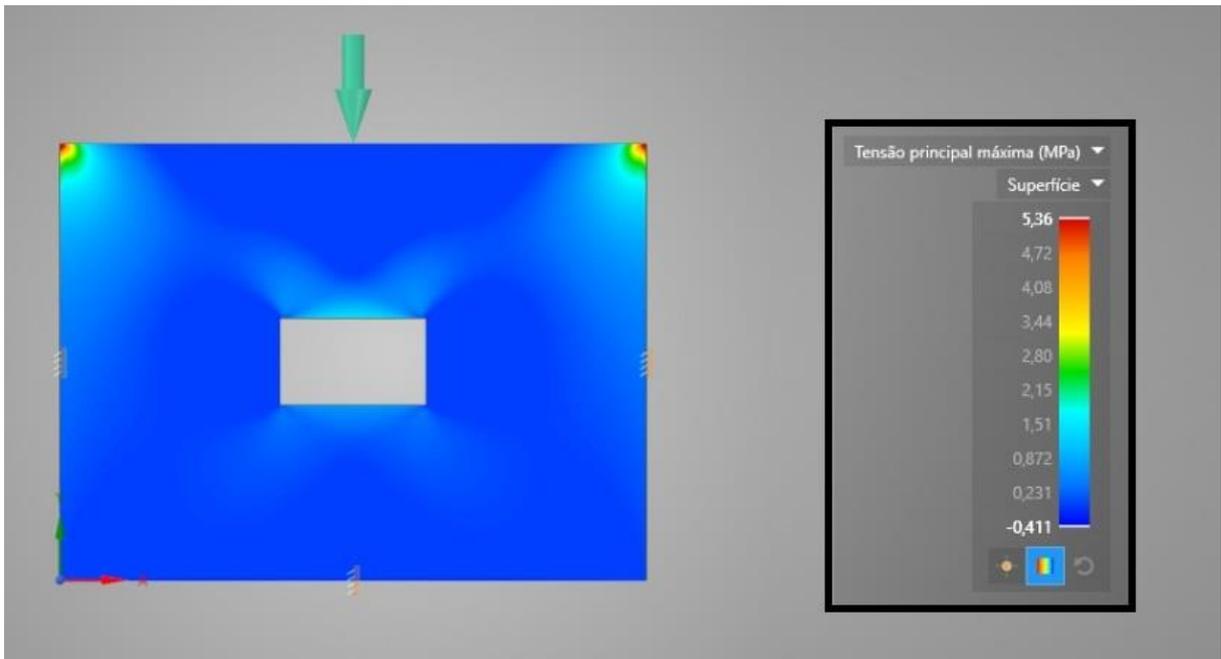
Conforme demonstrado nas Figuras, a tensão de compressão na parede aumenta ao passo que se aumenta o comprimento das aberturas. A distribuição de tensões se dá de forma semelhante às primeiras paredes analisadas, com os máximos valores próximos aos cantos superiores das aberturas. No entanto, as máximas e médias tensões observadas são menores do que quando há o aumento da área total da abertura.

É importante destacar que a parede ML-120 apresentou máximo valor de tensão de compressão maior do que o encontrado para a parede ML-150 e maior também do que o encontrado quando existe o aumento total da área. Estimou-se que exista alguma discrepância, por se tratar de algo bem pontual e específico, que pouco é aparente no gráfico.

4.2.2.2 Tensões de tração

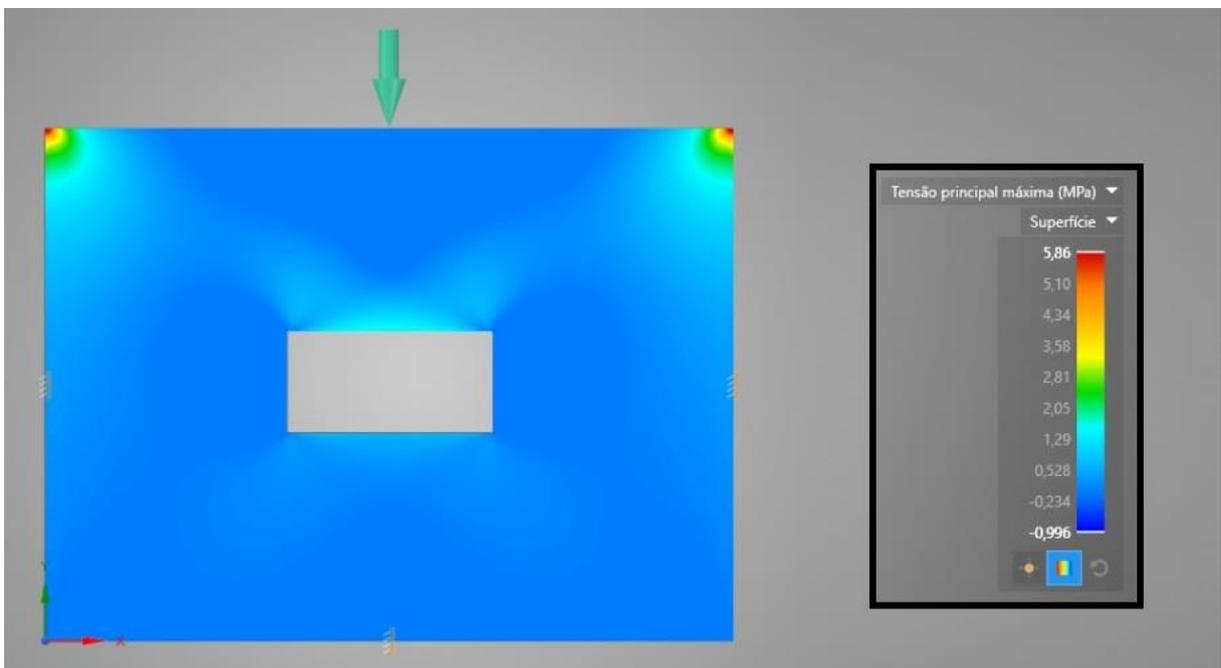
As Figuras 36, 37, 38 e 39 ilustram as tensões de tração em cada uma das paredes onde existe variação somente no comprimento das aberturas. Posteriormente, são feitas algumas considerações.

Figura 36 - Tensões de tração ML-100



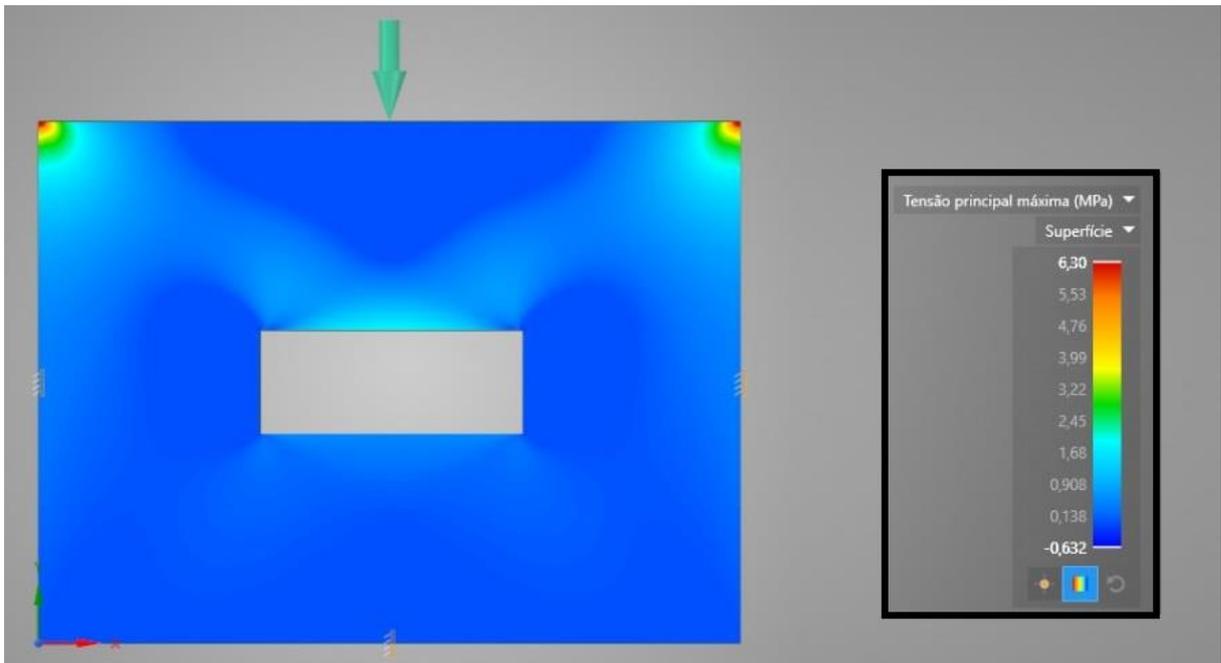
Fonte: o autor (2020).

Figura 37 - Tensões de tração ML-120



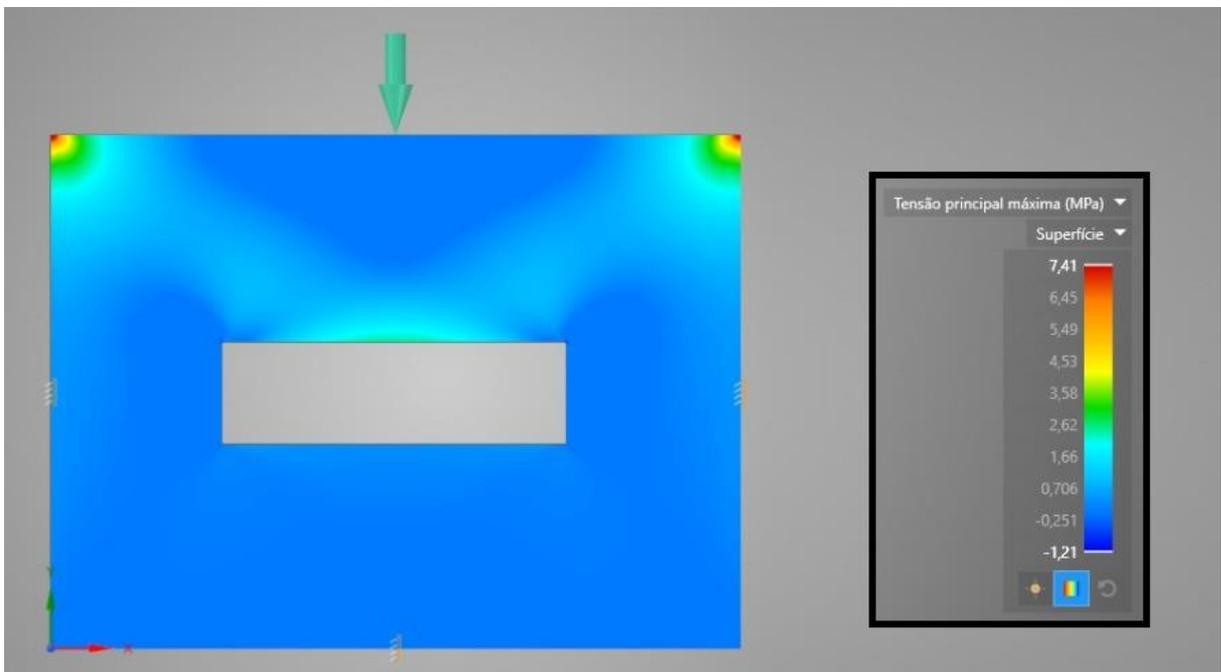
Fonte: o autor (2020).

Figura 38 - Tensões de tração ML-150



Fonte: o autor (2020).

Figura 39 - Tensões de tração GL-200



Fonte: o autor (2020).

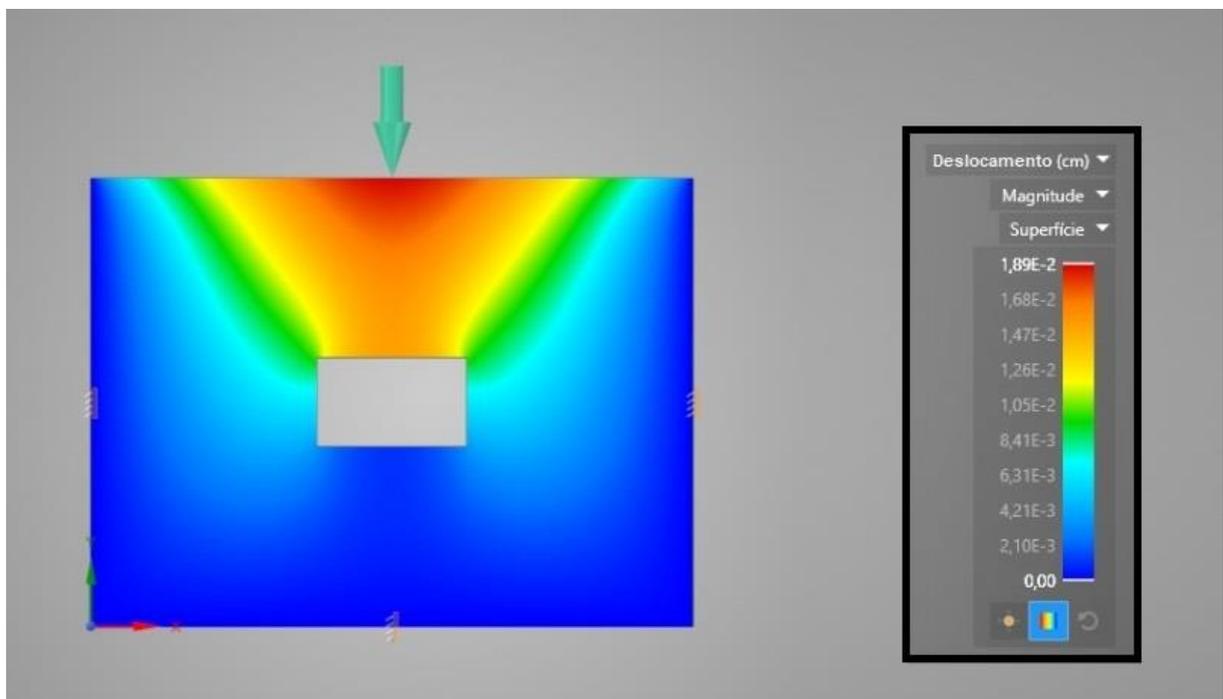
A distribuição das tensões de tração, como pode ser observado nas Figuras acima, seguiu o mesmo padrão visto anteriormente, com os máximos valores ocorrendo nos cantos superiores da parede e logo acima do vão da abertura. Igualmente às anteriores, pode-se perceber, também, um acúmulo de tensões nos

cantos superiores da parede. Neste caso, porém, e de forma conjunta às tensões de compressão, as máximas e médias tensões observadas são menores do que quando há o aumento da área total da abertura.

4.2.2.3 Deslocamentos

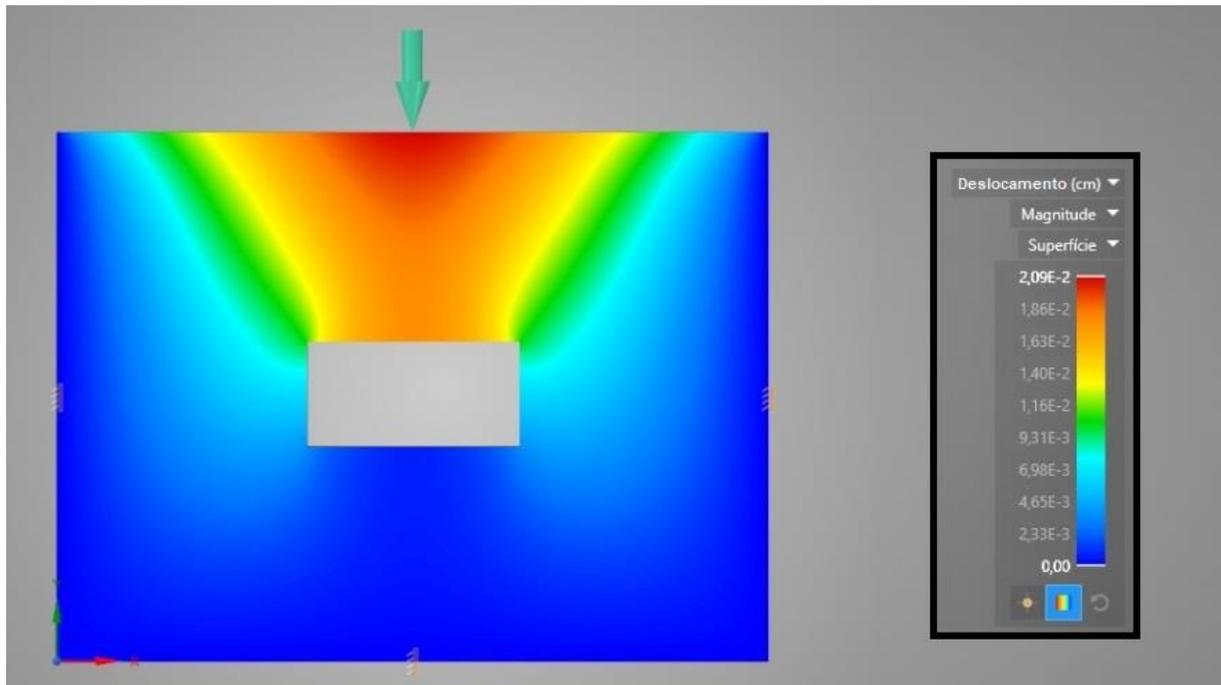
As Figuras 40, 41, 42 e 43 demonstram os deslocamentos que acontecem em cada uma das paredes, a partir do carregamento aos quais estão expostas e do aumento do comprimento de suas aberturas.

Figura 40 - Deslocamentos ML-100



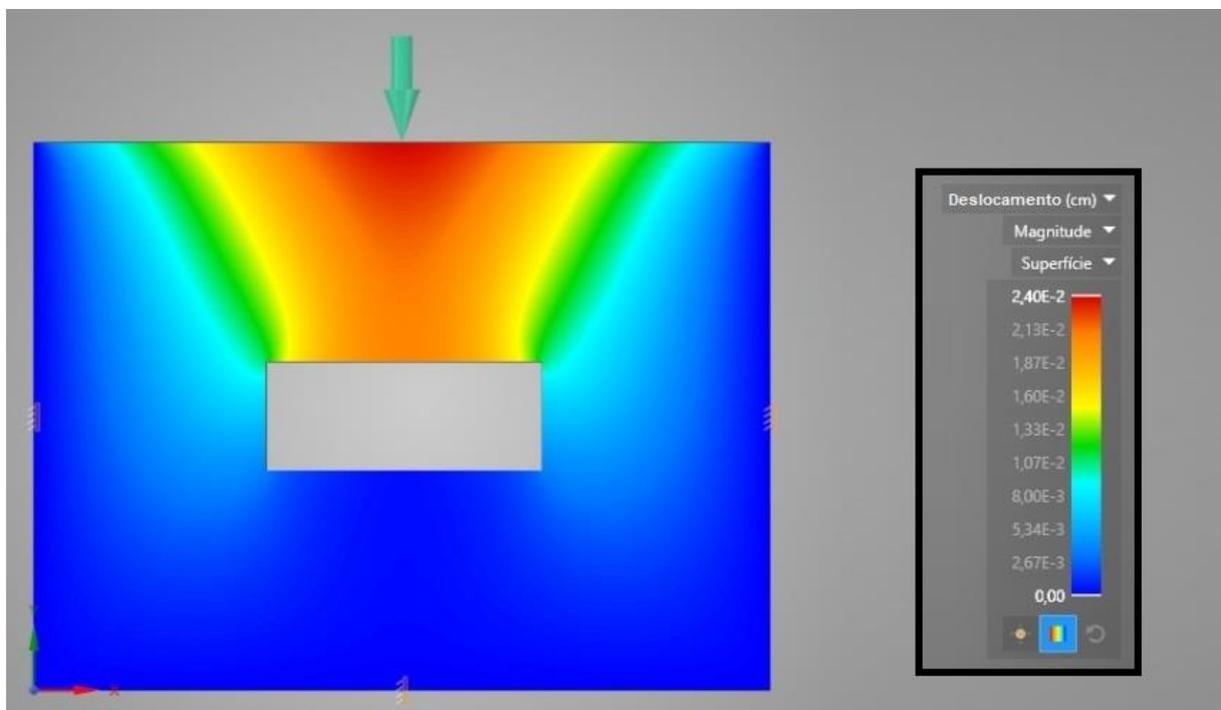
Fonte: o autor (2020).

Figura 41 - Deslocamentos ML-120



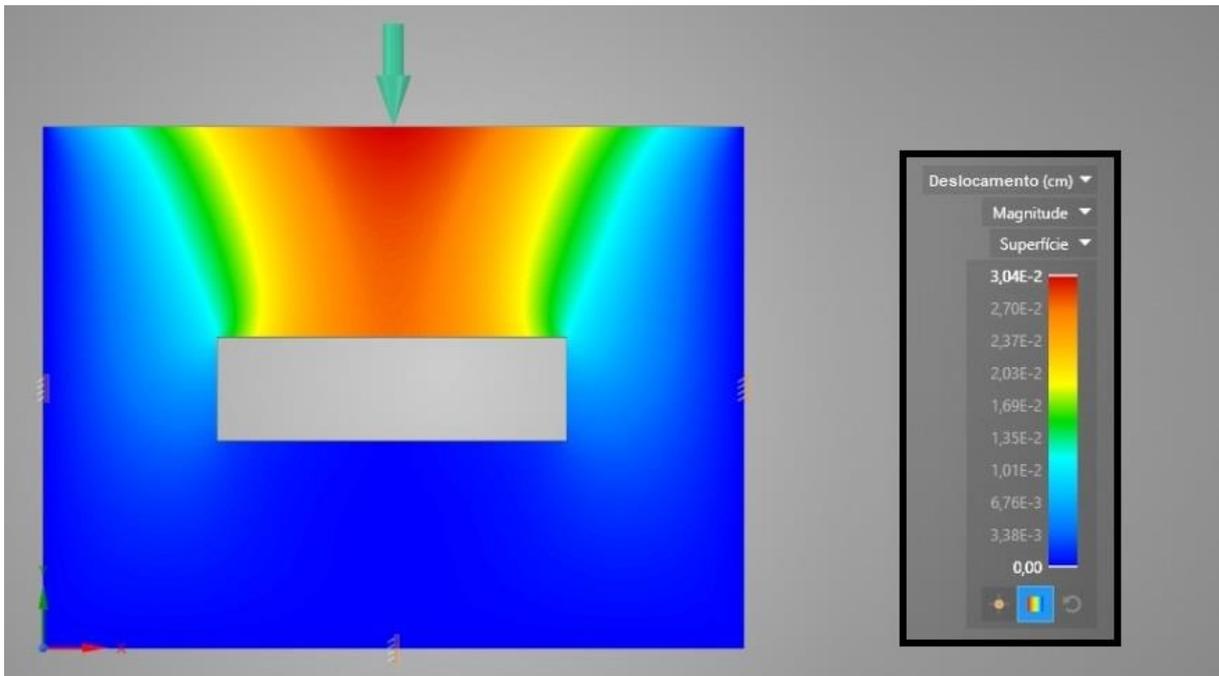
Fonte: o autor (2020).

Figura 42 - Deslocamentos ML-150



Fonte: o autor (2020).

Figura 43 - Deslocamentos GL-200



Fonte: o autor (2020).

Os deslocamentos, segundo as Figuras, ocorreram de maneira análoga aos apresentados anteriormente, com os máximos deslocamentos registrados no centro superior da parede em direção à abertura. Porém, os valores encontrados foram relativamente menores do que aqueles observados nas paredes em que a área das aberturas cresce proporcionalmente.

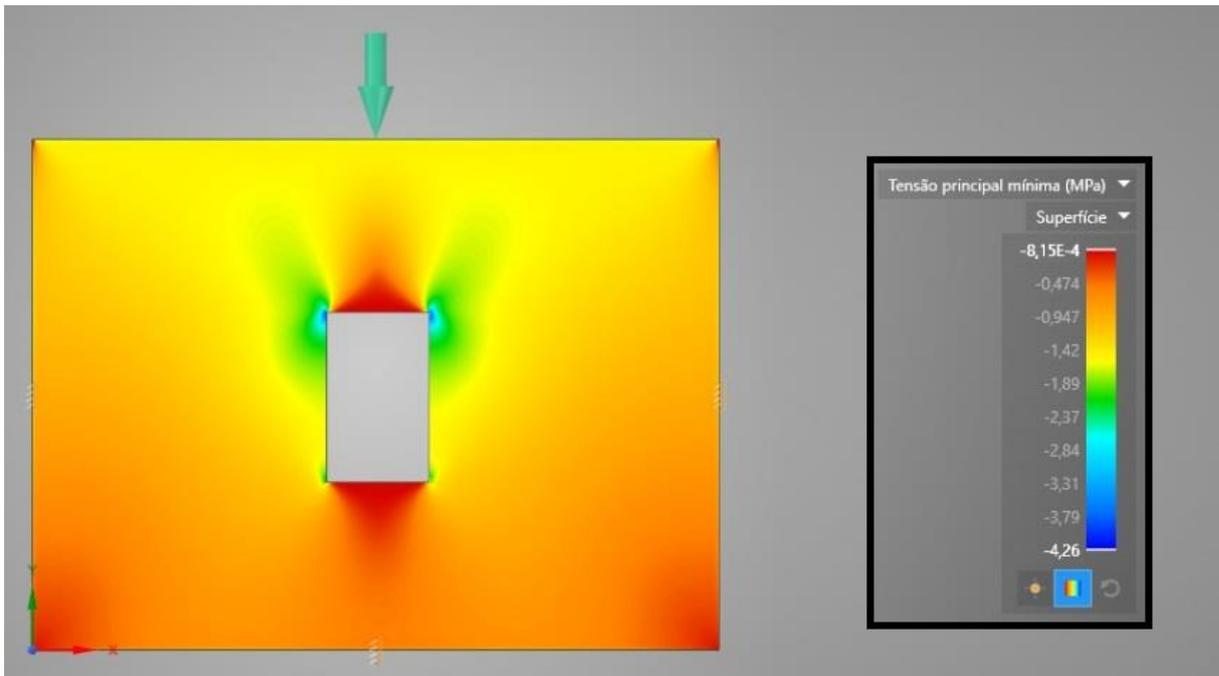
4.2.3 Aumento da altura da abertura mantendo comprimento constante

Para cada uma das aberturas que aumentam em altura e mantêm o comprimento de 60 cm constante, foram avaliadas as tensões de compressão e tração na parede, assim como o seu máximo deslocamento. Os itens a seguir explanam os resultados obtidos.

4.2.3.1 Tensões de compressão

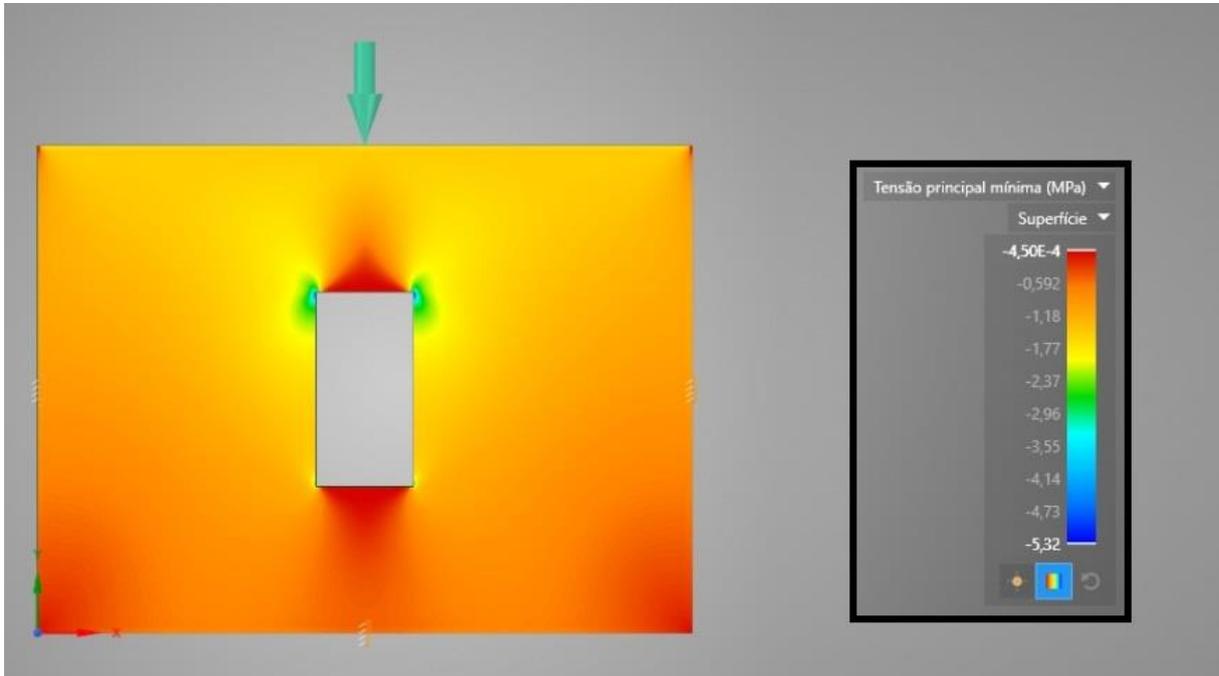
As Figuras 44, 45, 46 e 47 apresentam as tensões de compressão em cada uma das paredes em que as aberturas aumentam somente em altura. Logo após, estas são discutidas.

Figura 44 - Tensões de compressão MH-100



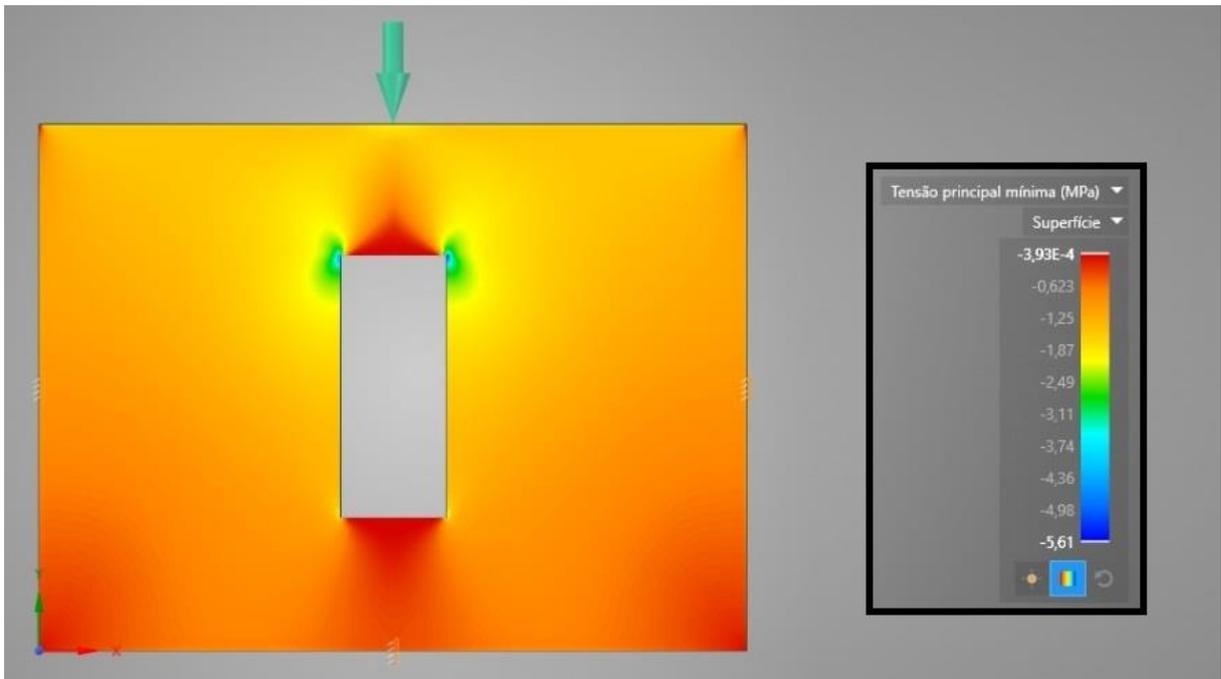
Fonte: o autor (2020).

Figura 45 - Tensões de compressão MH-120



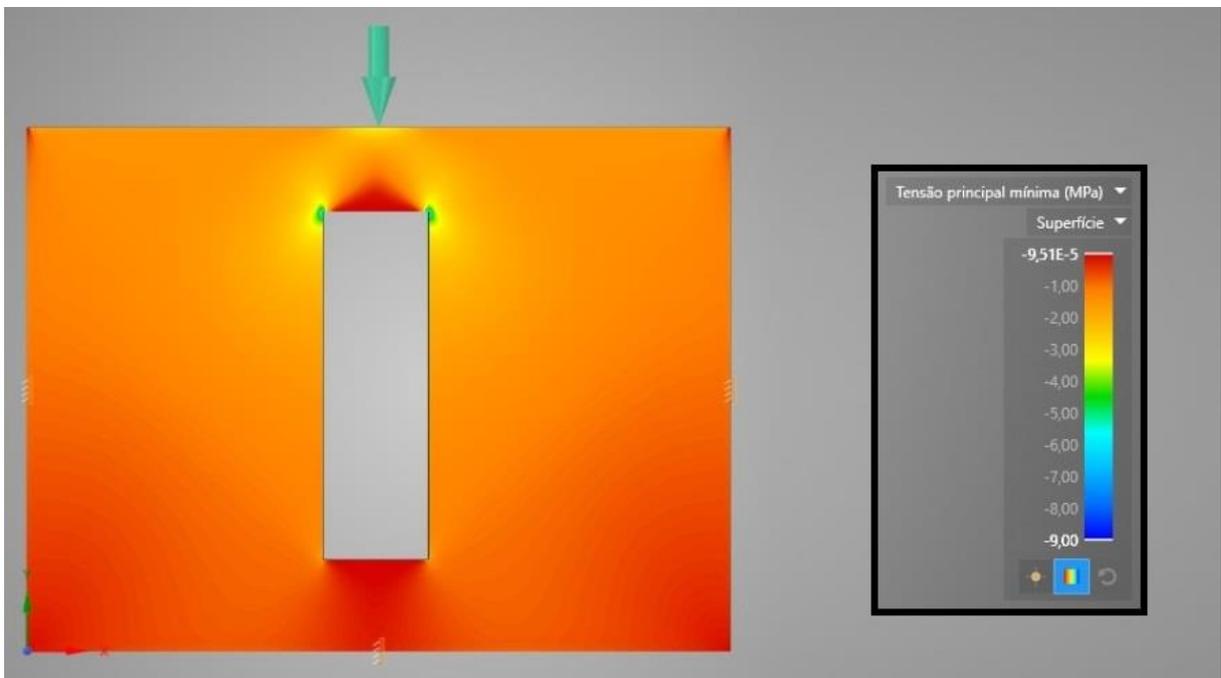
Fonte: o autor (2020).

Figura 46 - Tensões de compressão MH-150



Fonte: o autor (2020).

Figura 47 - Tensões de compressão GH-200



Fonte: o autor (2020).

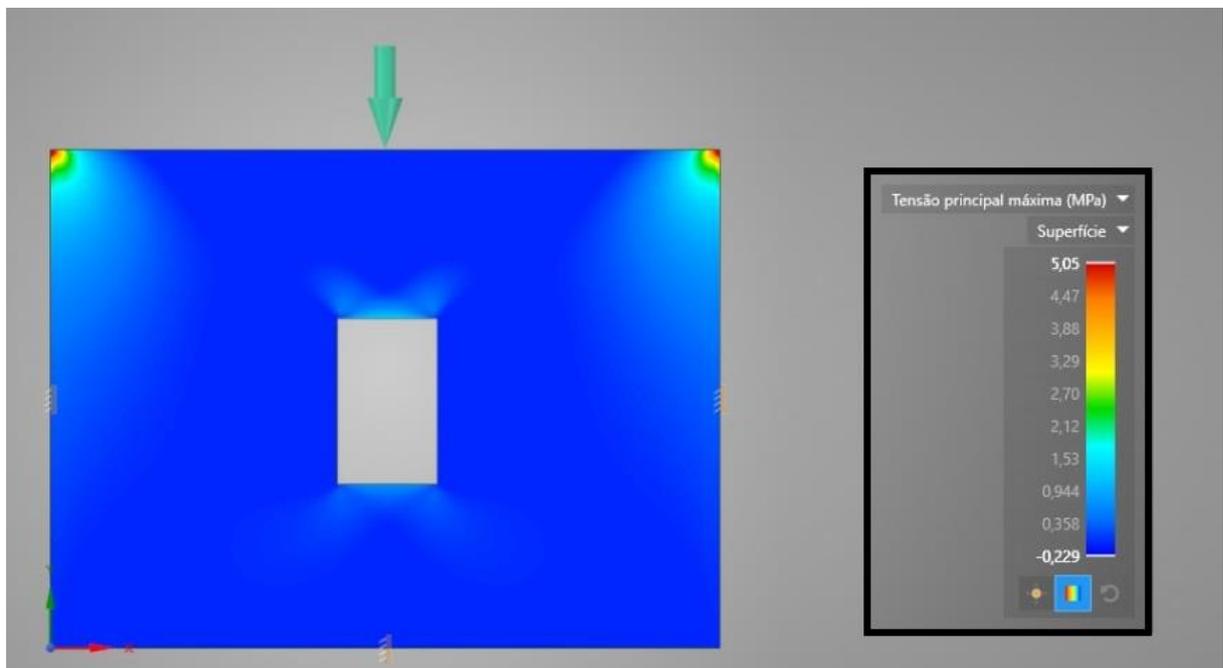
Análogo às paredes expostas, conforme as aberturas crescem em altura, as tensões de compressão aumentam. Porém, neste caso, os valores máximos e médios de tensão são bem inferiores aos observados anteriormente e se mostram, em geral,

bem próximos uns aos outros, com exceção ao GH-200. Isso indica que a altura da abertura apresenta pouca influência nos valores de sollicitação à compressão, para somente carregamento uniformemente distribuído, uma vez que a região da parede na lateral das aberturas, que vai transmitir e resistir estes esforços, pouco se modifica.

4.2.3.2 Tensões de tração

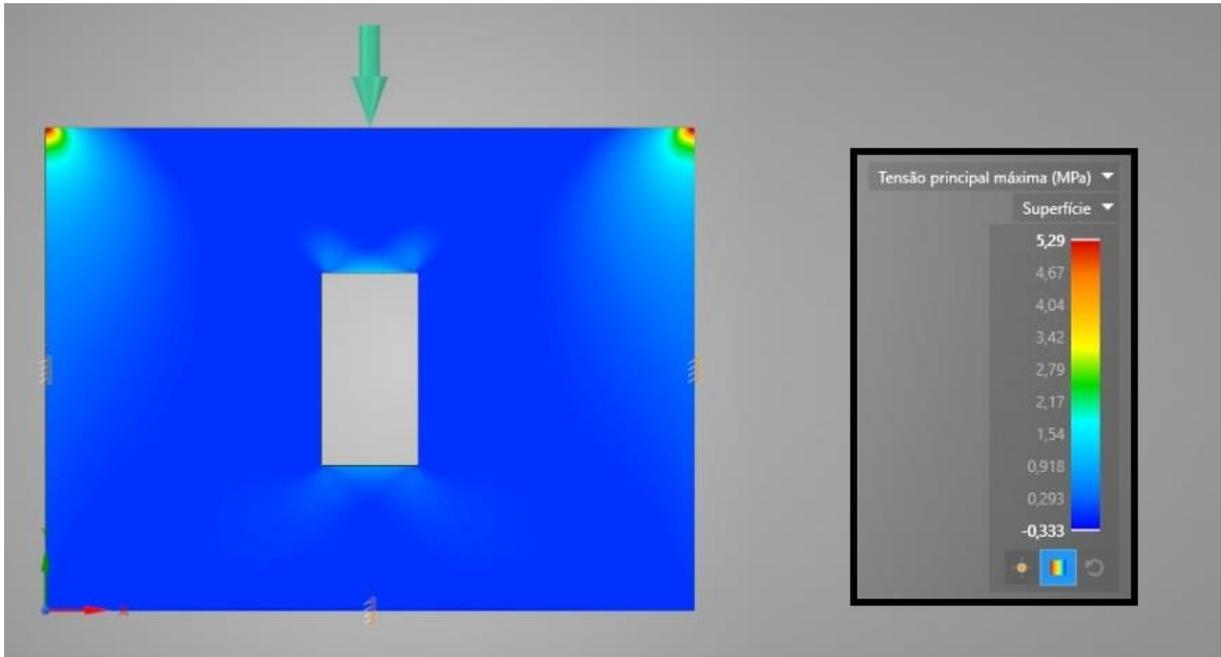
As Figuras 48, 49, 50 e 51 ilustram as tensões de tração em cada uma das paredes em que existe variação somente na altura das aberturas. Imediatamente após, são feitos alguns comentários.

Figura 48 - Tensões de tração MH-100



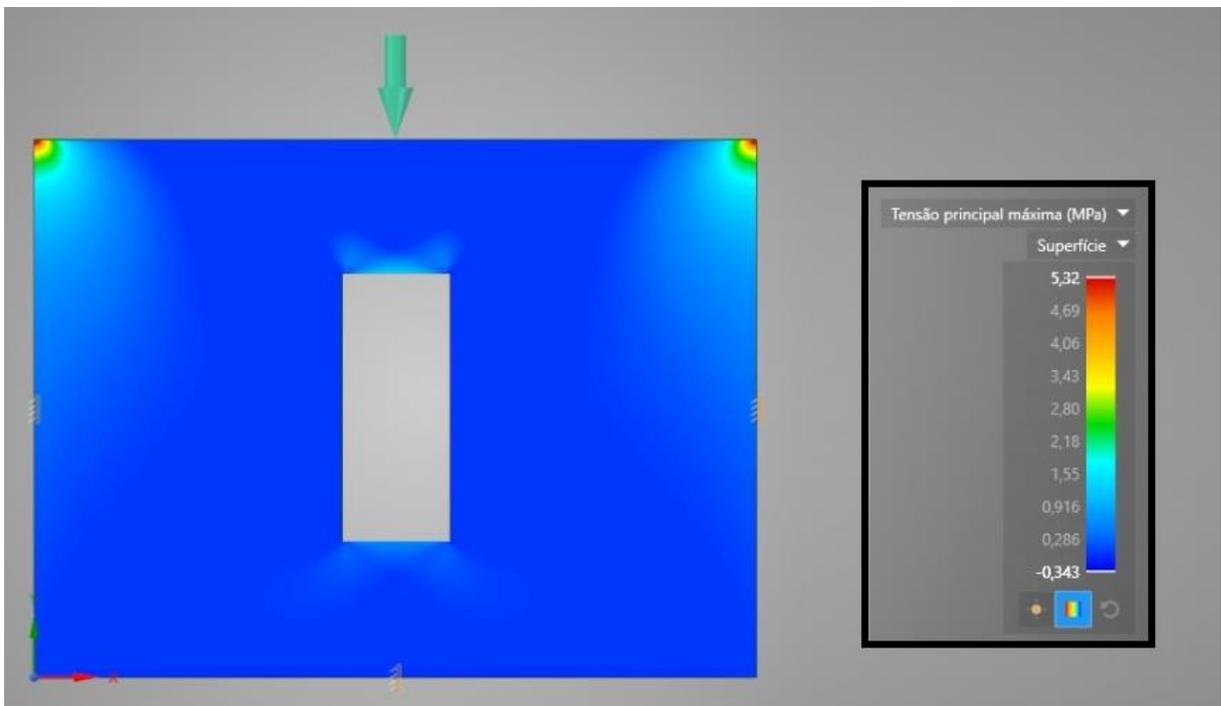
Fonte: o autor (2020).

Figura 49 - Tensões de tração MH-120



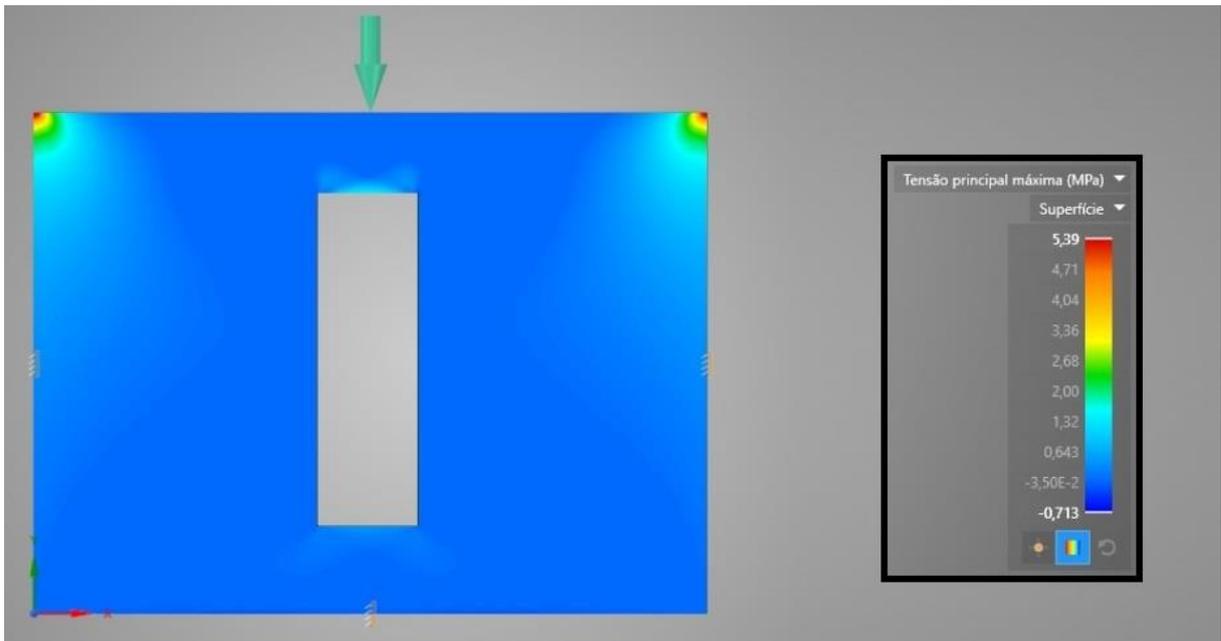
Fonte: o autor (2020).

Figura 50 - Tensões de tração MH-150



Fonte: o autor (2020).

Figura 51 - Tensões de tração GH-200



Fonte: o autor (2020).

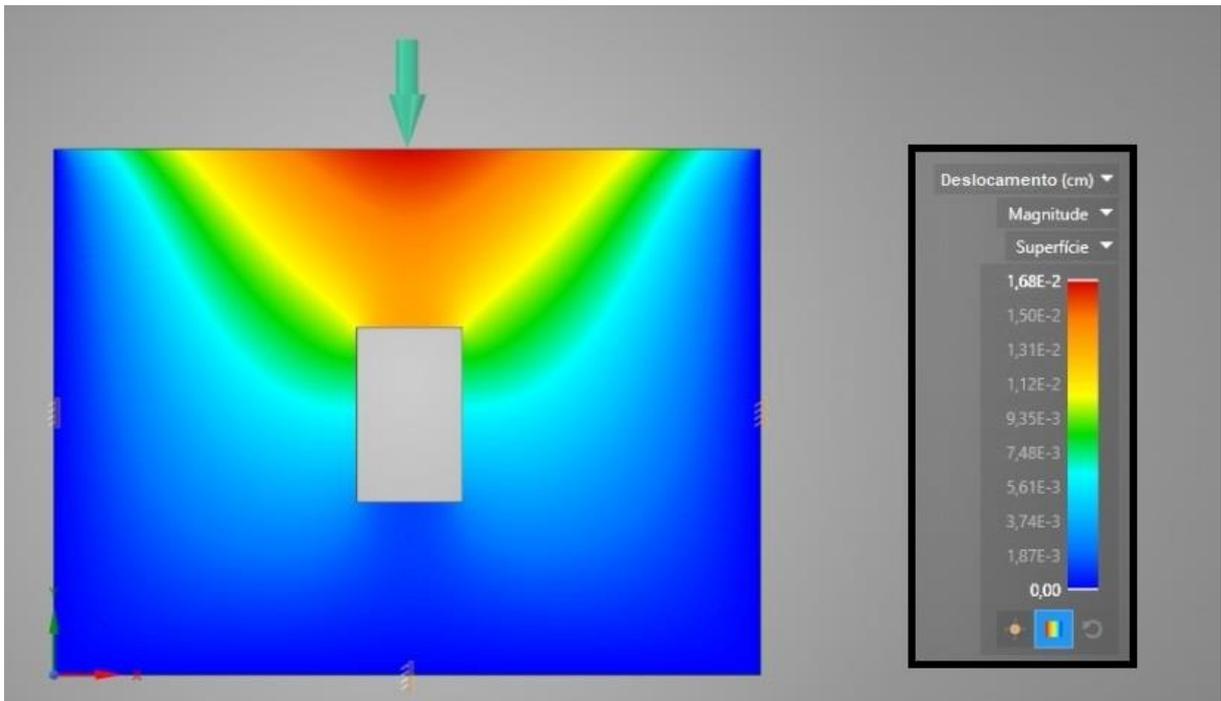
Em todas as paredes, as tensões de tração também se mostraram bem próximas, aumentando seu valor de acordo com o aumento das aberturas. Ainda, estas tensões se mostraram igualmente inferiores que as observadas nas demais paredes, mantendo o mesmo padrão de ocorrência, porém, com os maiores valores em cima e embaixo da abertura e com acúmulo de tensões nos cantos superiores da parede.

Como a base das aberturas é constante, com valor de 60 cm, é compreensível que as tensões de tração tenham valores muito próximos, visto que todas as regiões para a determinação do esforço solicitante possuem a mesma ordem de grandeza. Portanto, neste caso, as recomendações normativas se mostram válidas, deixando a desejar somente quanto ao reforço nos cantos das paredes.

4.2.3.3 Deslocamentos

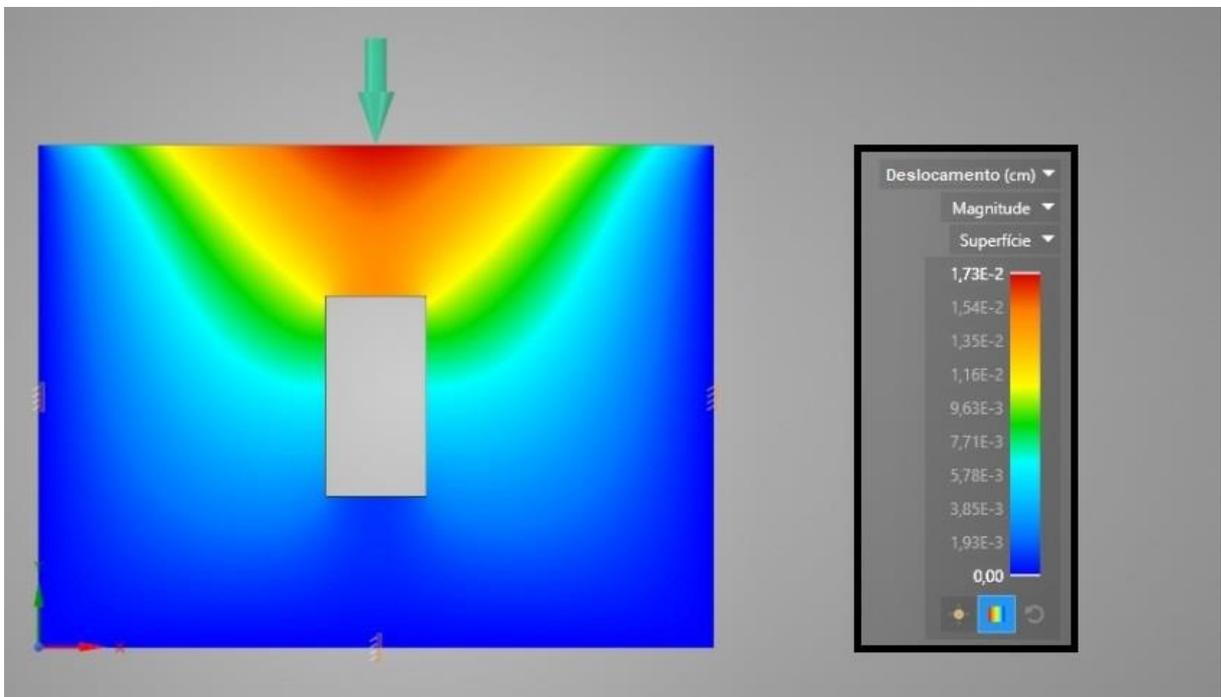
As Figuras 52, 53, 54 e 55 demonstram os deslocamentos que acontecem em cada uma das paredes, a partir do carregamento aos quais estão expostas e do aumento da altura de suas aberturas.

Figura 52 - Deslocamentos MH-100



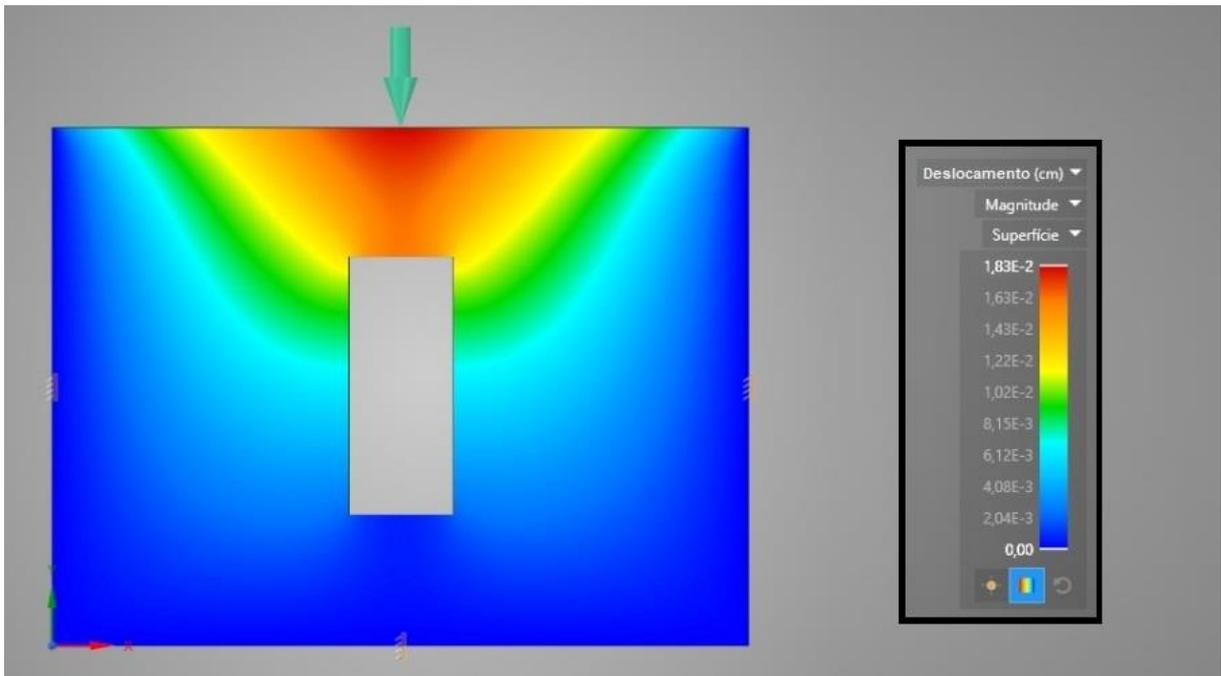
Fonte: o autor (2020).

Figura 53 - Deslocamentos MH-120



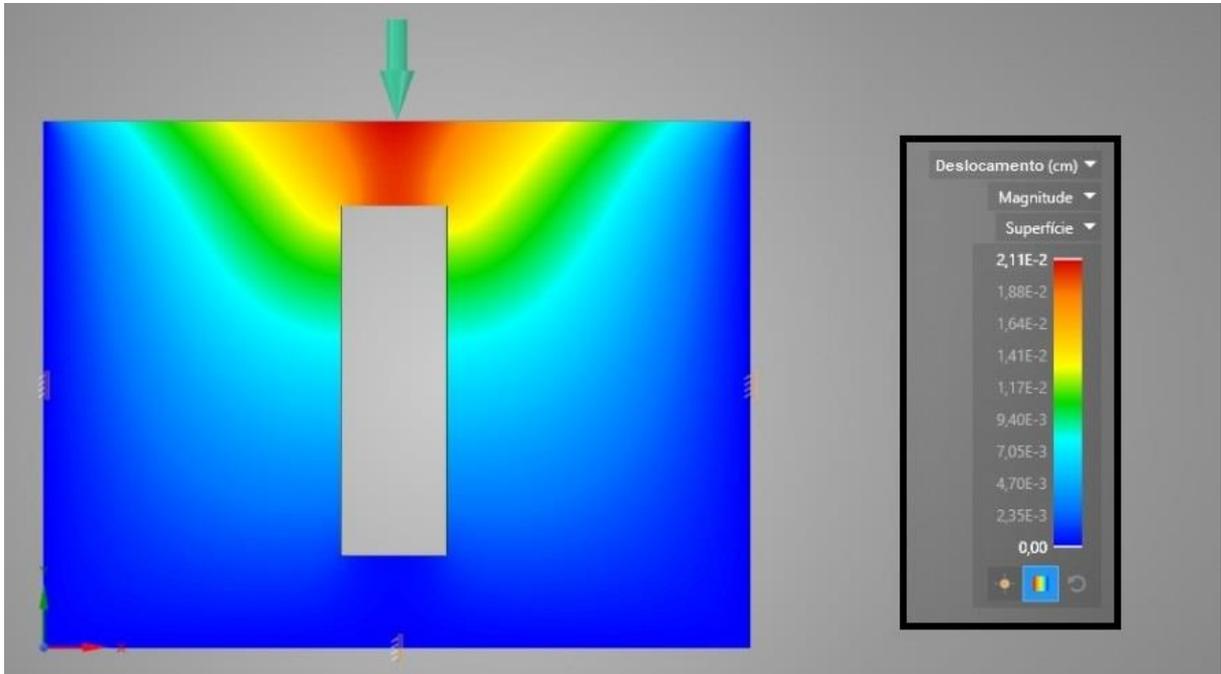
Fonte: o autor (2020).

Figura 54 - Deslocamentos MH-150



Fonte: o autor (2020).

Figura 55 - Deslocamentos GH-200



Fonte: o autor (2020).

Como é perceptível, a distribuição dos deslocamentos também segue o mesmo padrão que as demais paredes, com os máximos valores registrados no centro superior da parede em direção à abertura. Neste caso, os valores de deslocamento

observados nas Figuras foram muito menores do que os valores obtidos para as paredes explanadas anteriormente.

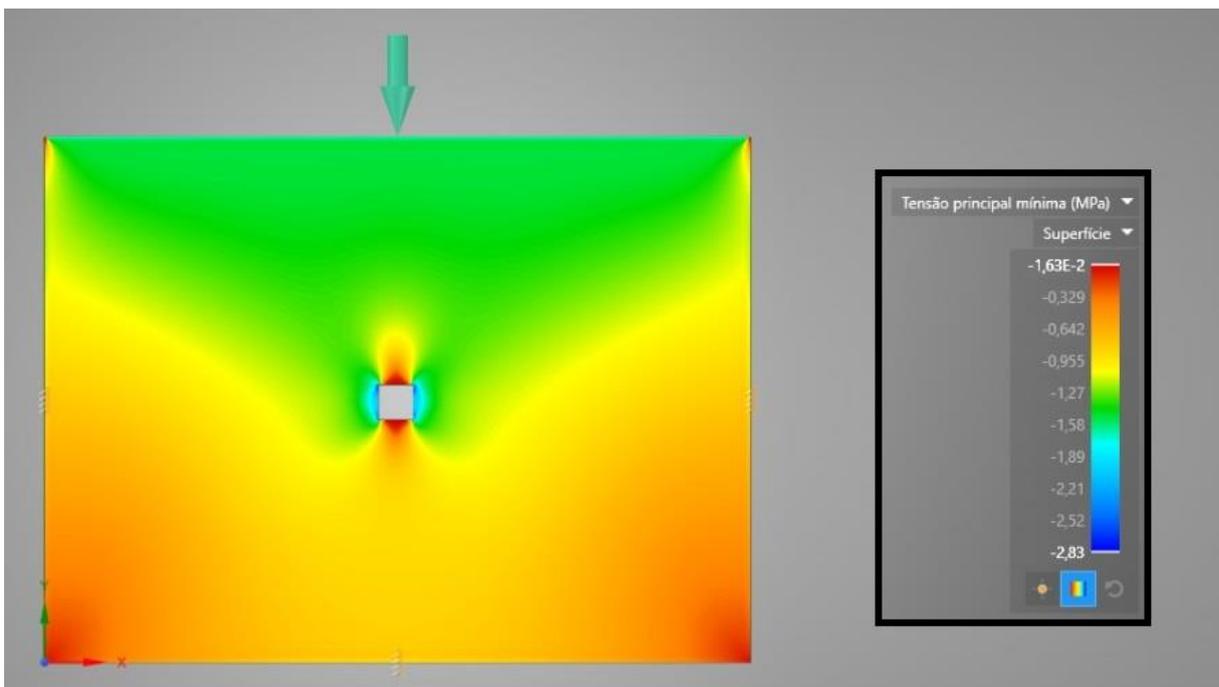
4.2.4 Variação no posicionamento das pequenas aberturas

Neste item foram avaliadas as tensões de compressão e tração, além do deslocamento, de paredes que apresentam variação no posicionamento das pequenas aberturas. Também, avaliou-se uma parede sem nenhuma abertura, de modo a analisar o seu comportamento e verificar o exposto pela norma. Em seguida, são explanados os resultados obtidos.

4.2.4.1 Tensões de compressão

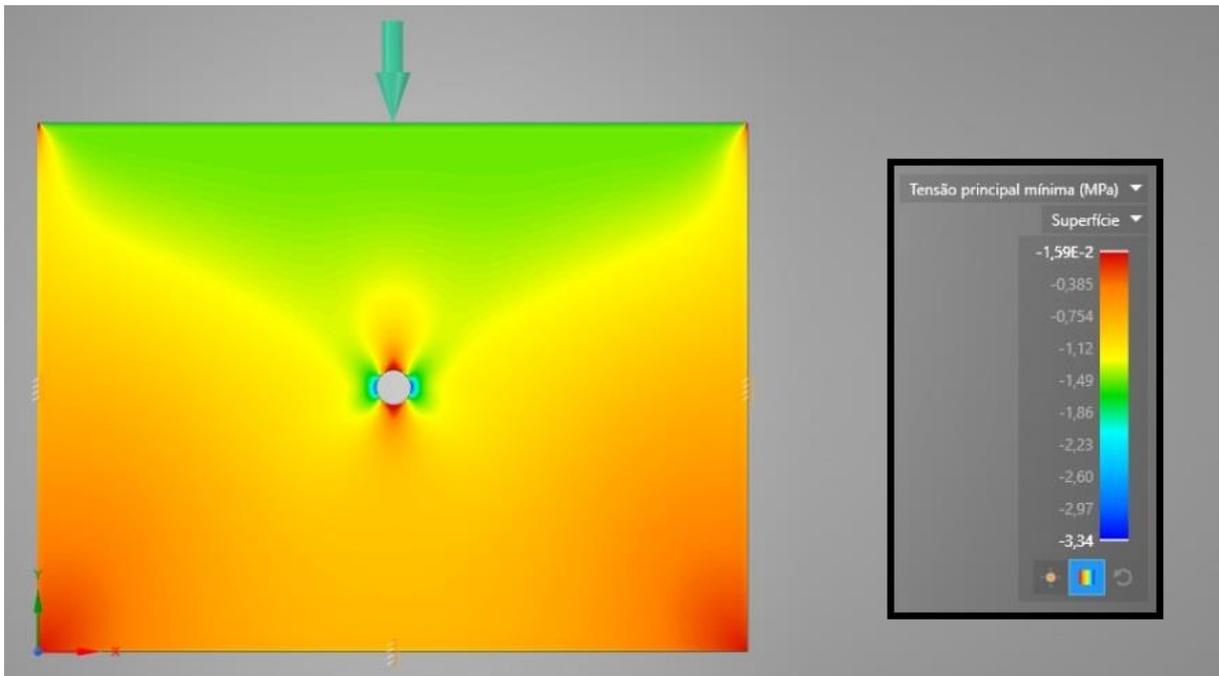
As Figuras 56 e 57 ilustram as tensões de compressão nas paredes com abertura quadrada e abertura circular centralizadas e a Figura 58 ilustra as tensões de compressão em uma parede sem abertura. As Figuras 59, 60, 61 e 62 apresentam as tensões de compressão nas paredes onde as aberturas estão dispostas em seus vínculos superior e inferior.

Figura 56 - Tensões de compressão PQ-20



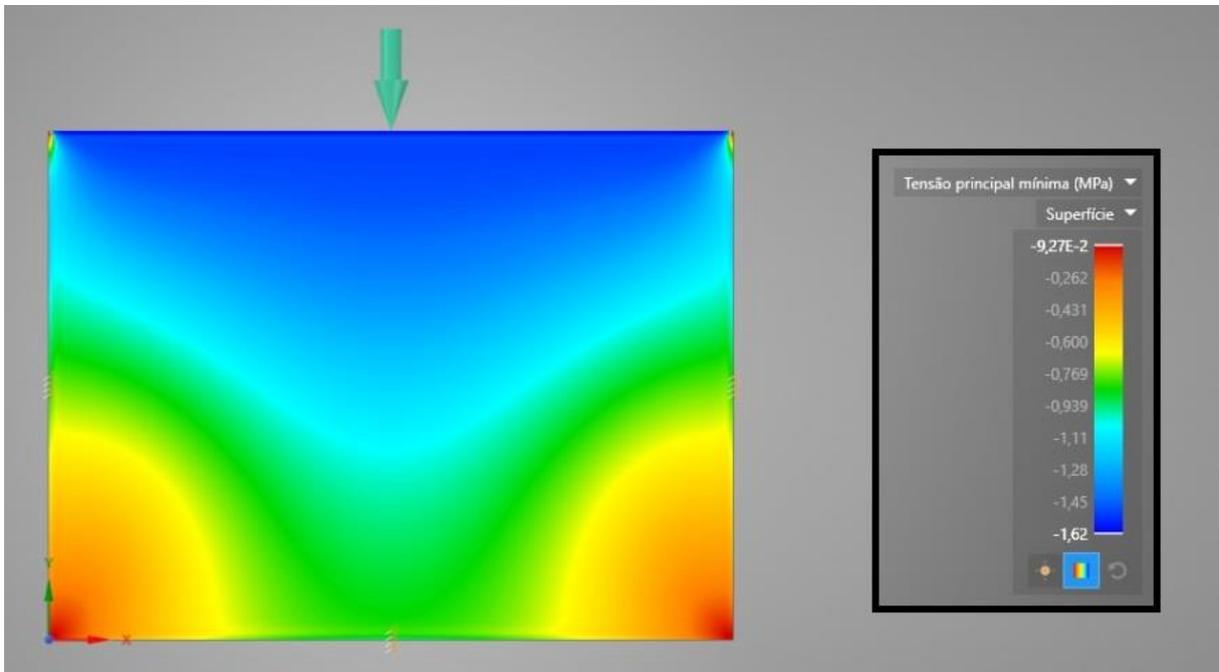
Fonte: o autor (2020).

Figura 57 - Tensões de compressão PC-20



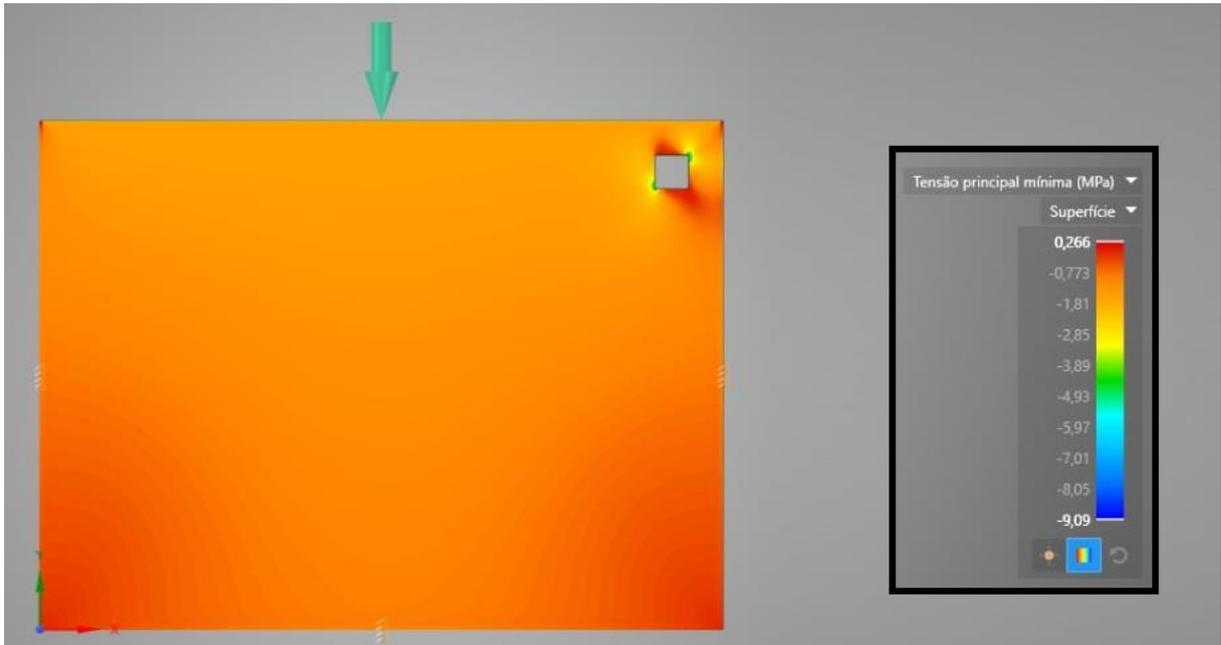
Fonte: o autor (2020).

Figura 58 - Tensões de compressão parede sem abertura



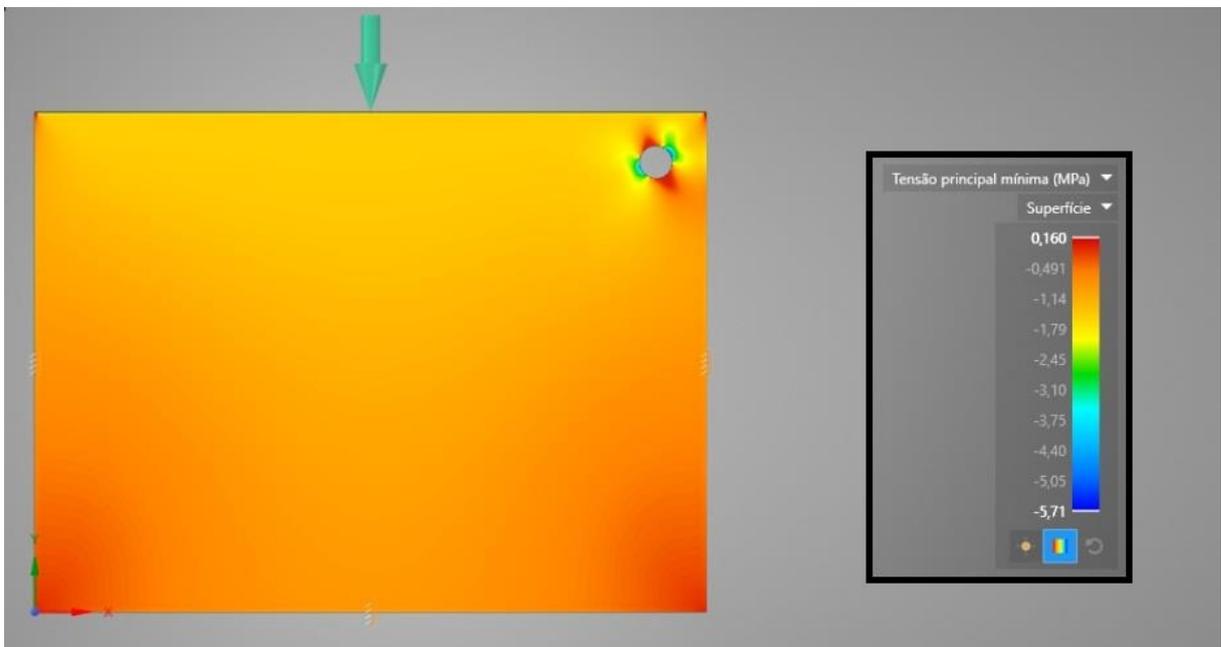
Fonte: o autor (2020).

Figura 59 - Tensões de compressão PQVS



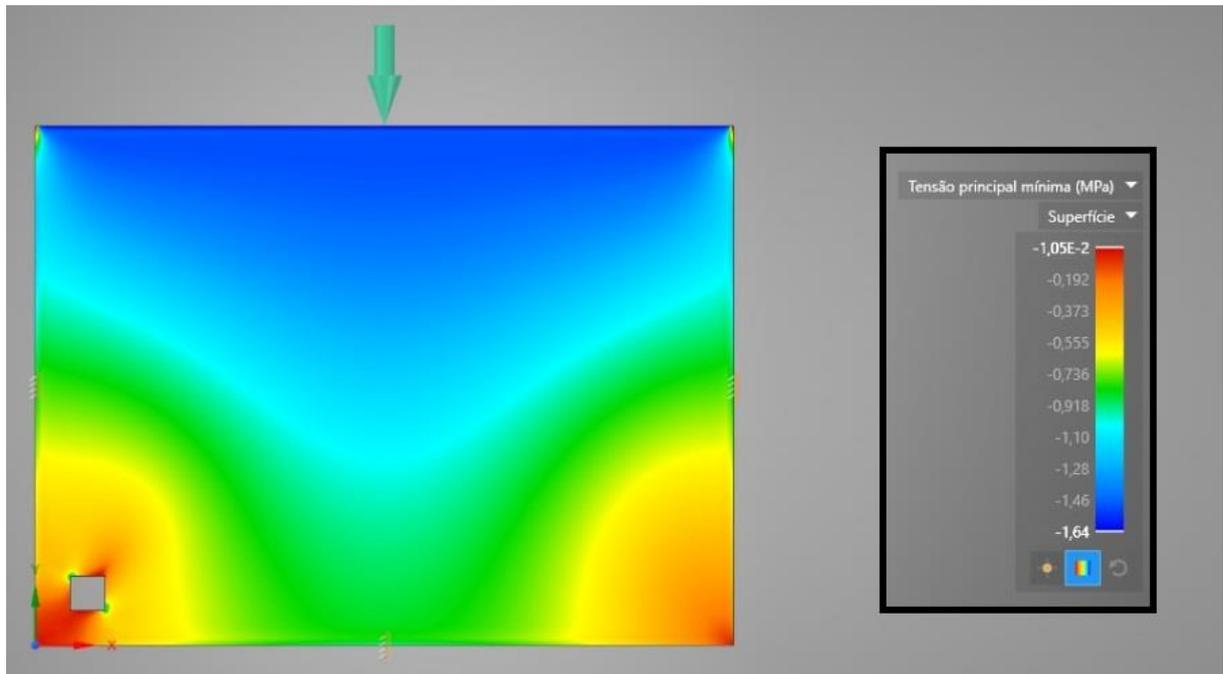
Fonte: o autor (2020).

Figura 60 - Tensões de compressão PCVS



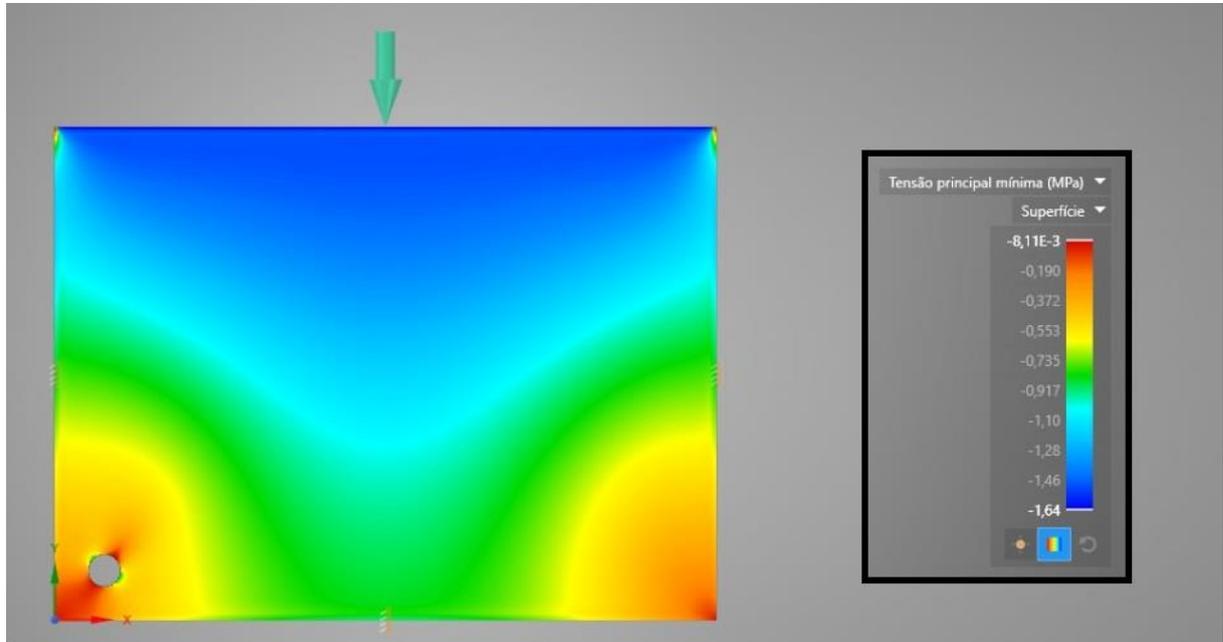
Fonte: o autor (2020).

Figura 61 - Tensões de compressão PQVI



Fonte: o autor (2020).

Figura 62 - Tensões de compressão PCVI



Fonte: o autor (2020).

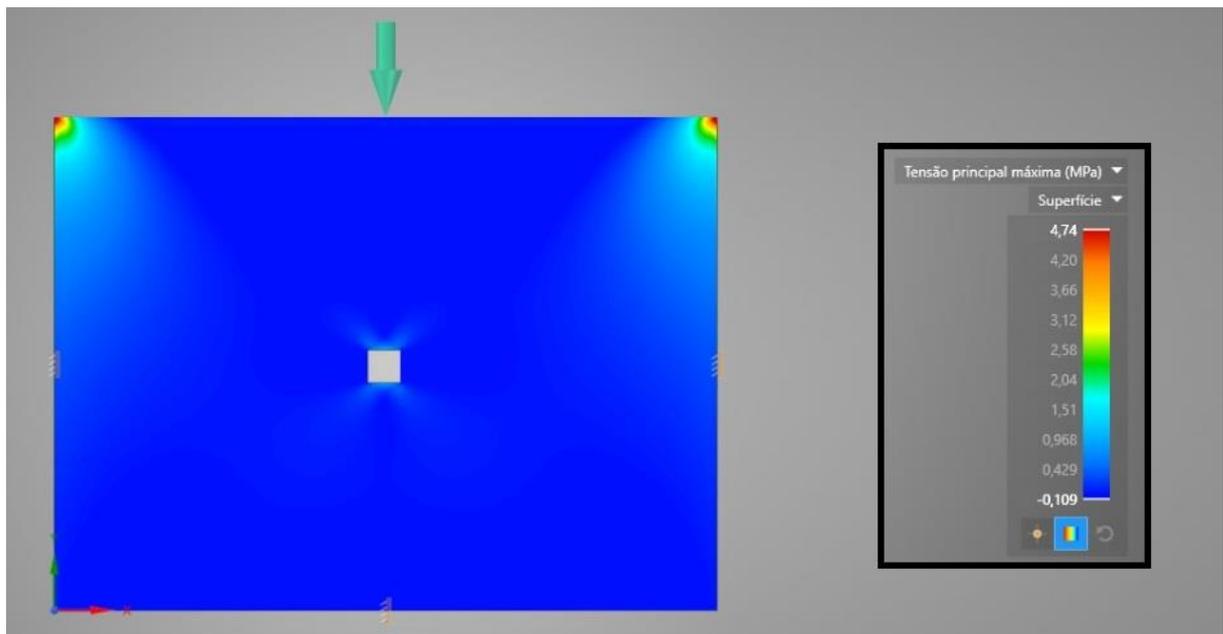
A partir da análise das Figuras, tem-se que a maior tensão de compressão é registrada quando as aberturas se encontram próximas aos vínculos superiores da parede, o que é válido, visto que o carregamento incide diretamente sobre elas. Já para a menor tensão de compressão, essa é registrada quando as aberturas estão

próximas aos vínculos inferiores da parede, não apresentando grande variação quando comparadas às paredes sem abertura. Quanto às aberturas centralizadas, o maior valor de compressão é encontrado na abertura circular, diferente do que acontece quando estas estão próximas aos vínculos superiores, onde a abertura quadrada se mostra muito mais impactante do que a circular.

4.2.4.2 Tensões de tração

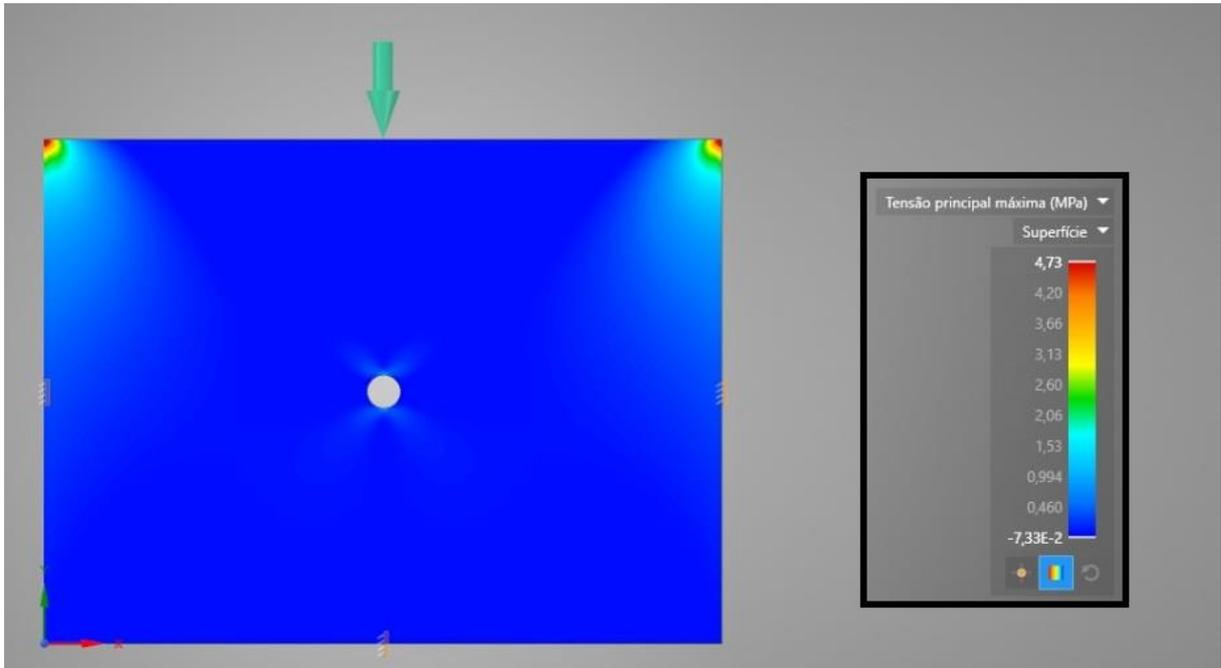
As Figuras 63 e 64 ilustram as tensões de tração nas paredes com abertura quadrada e abertura circular centralizadas e a Figura 65 ilustra as tensões de tração em uma parede sem abertura. As Figuras 66, 67, 68 e 69 apresentam as tensões de tração nas paredes onde as aberturas estão dispostas em seus vínculos superior e inferior.

Figura 63 - Tensões de tração PQ-20



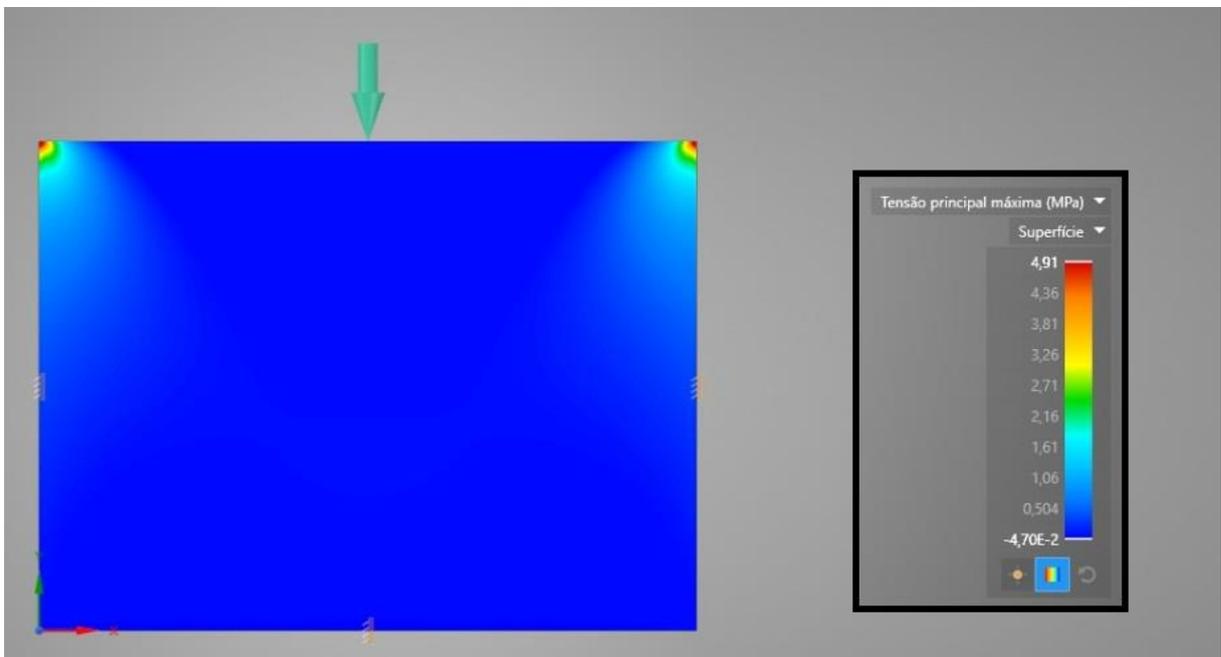
Fonte: o autor (2020).

Figura 64 - Tensões de tração PC-20



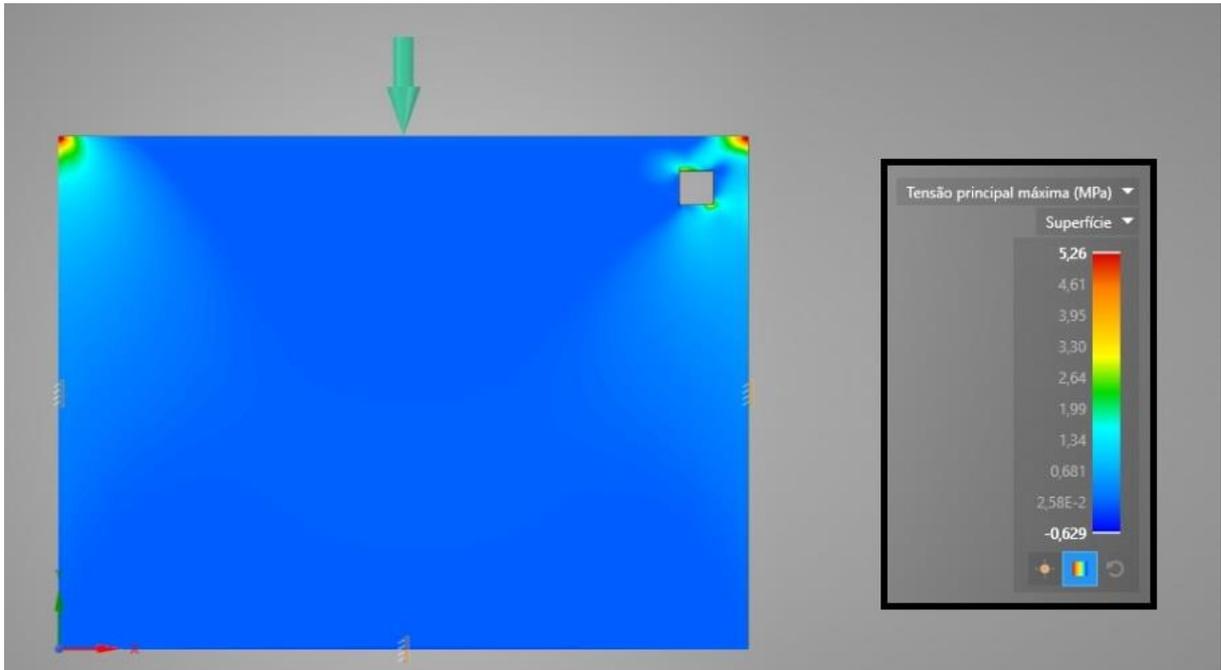
Fonte: o autor (2020).

Figura 65 - Tensões de tração parede sem abertura



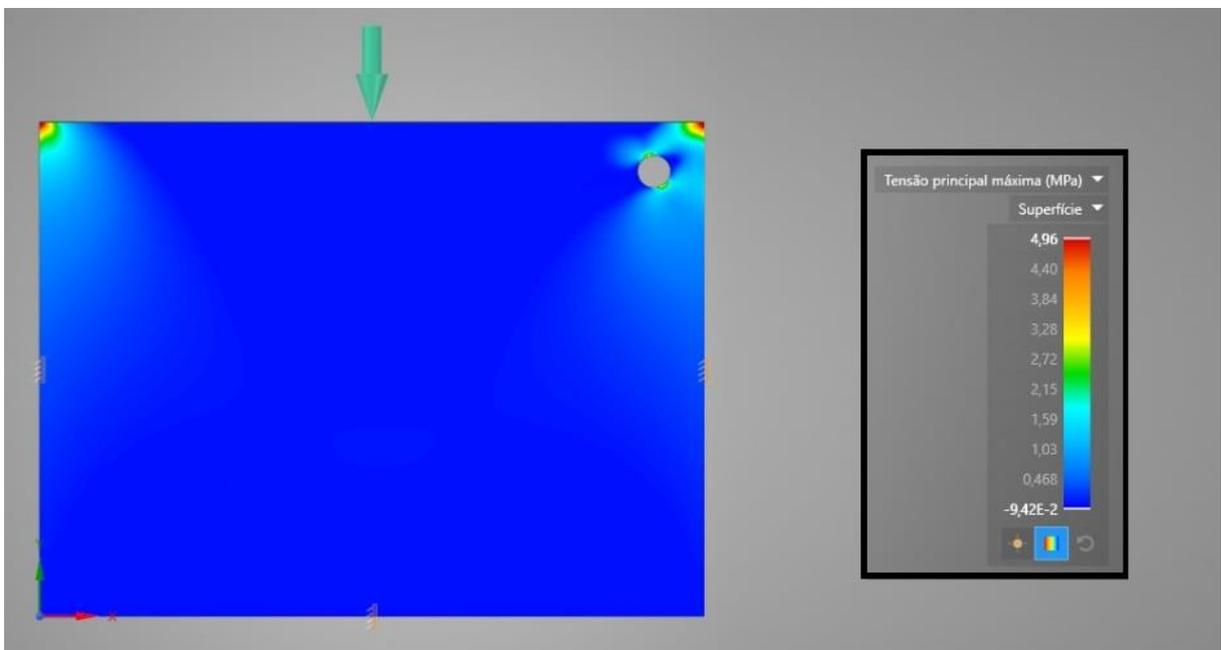
Fonte: o autor (2020).

Figura 66 - Tensões de tração PQVS



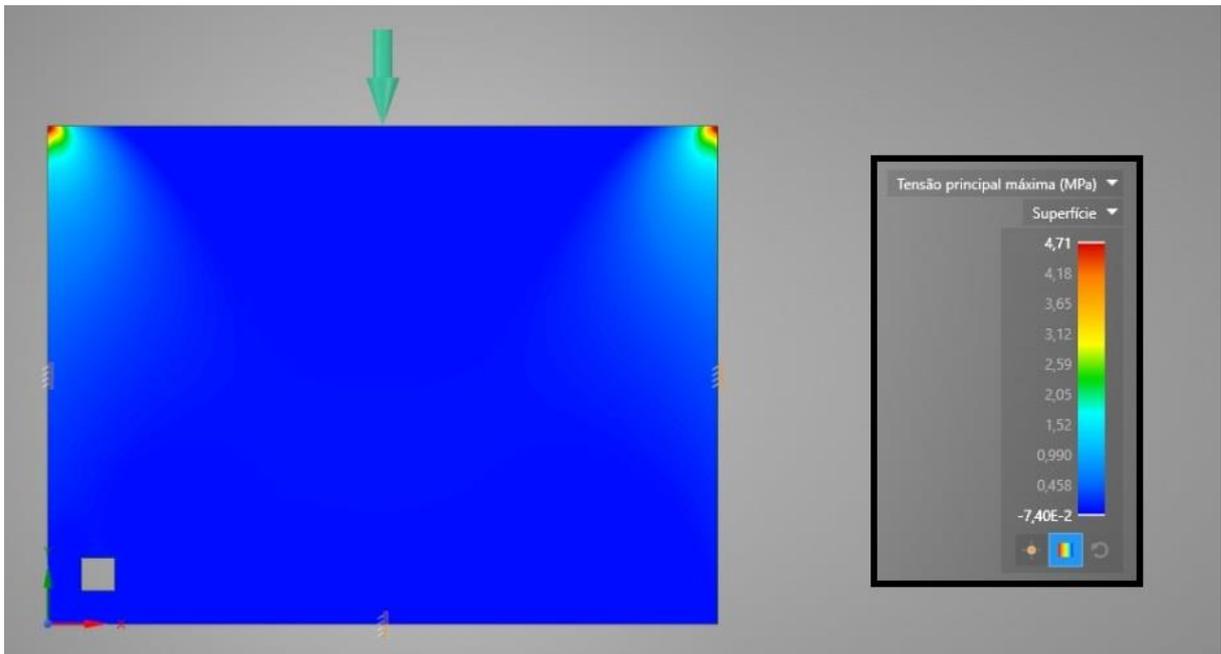
Fonte: o autor (2020).

Figura 67 - Tensões de tração PCVS



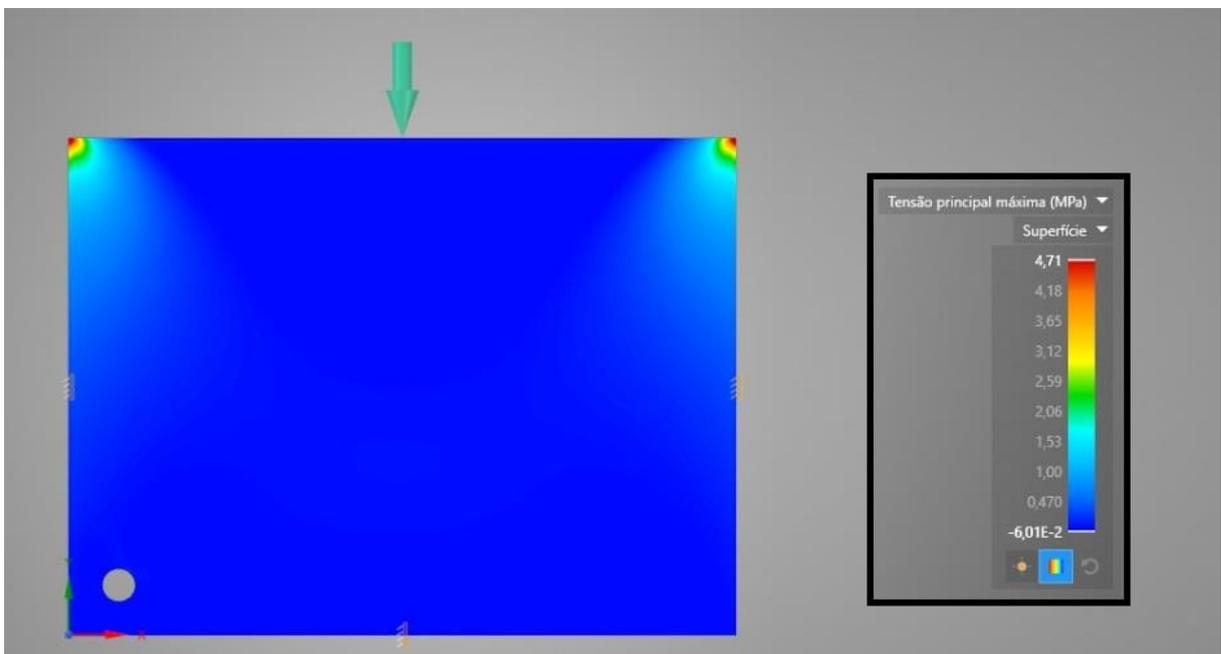
Fonte: o autor (2020).

Figura 68 - Tensões de tração PQVI



Fonte: o autor (2020).

Figura 69 - Tensões de tração PCVI



Fonte: o autor (2020).

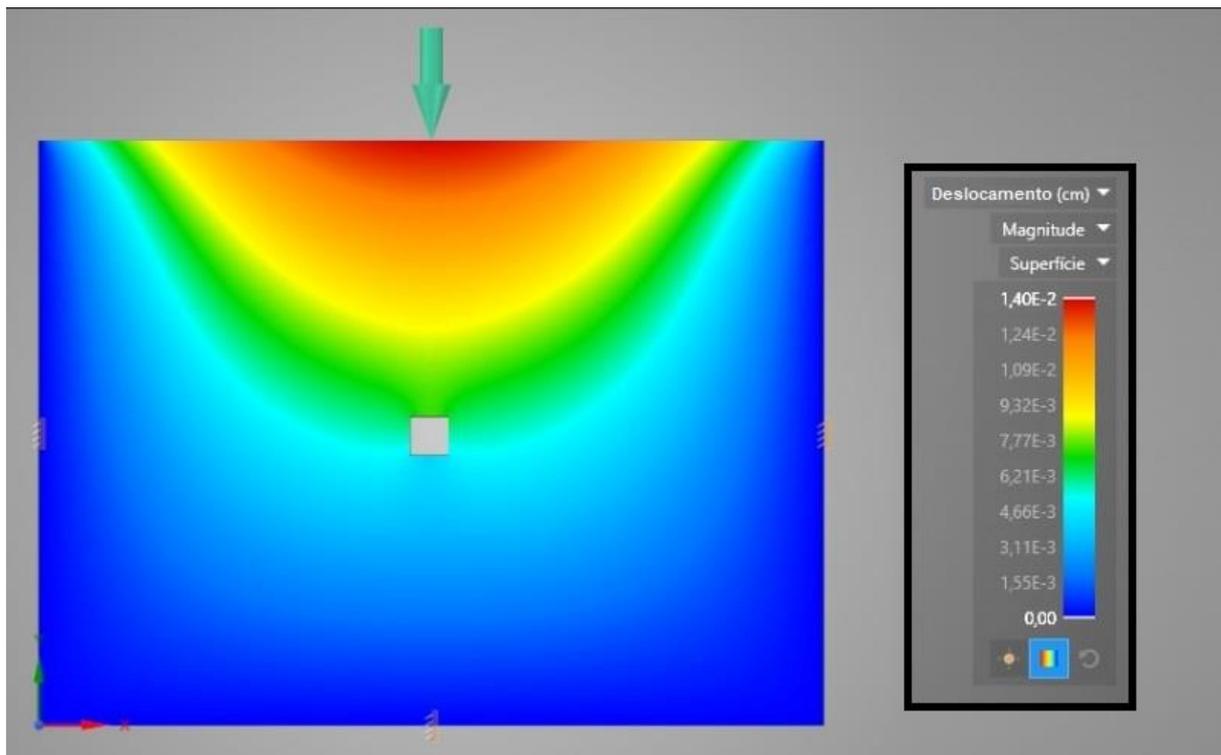
De acordo com o exposto nas Figuras, e igualmente à compressão, os maiores valores de tensão de tração acontecem nas paredes com aberturas próximas aos vínculos superiores da parede e os menores valores de tensão de tração próximos aos vínculos inferiores, sendo estes pouco impactantes na tensão total da parede.

Tanto os resultados obtidos para tensão de tração em paredes com aberturas em seus vínculos inferiores, quanto em paredes com aberturas centralizadas, se mostraram inferiores ao valor máximo obtido para uma parede sem nenhuma abertura. Nesta última, ainda, o maior valor de tensão de tração se deve ao acúmulo de tensões nos cantos superiores da parede.

4.2.4.3 Deslocamentos

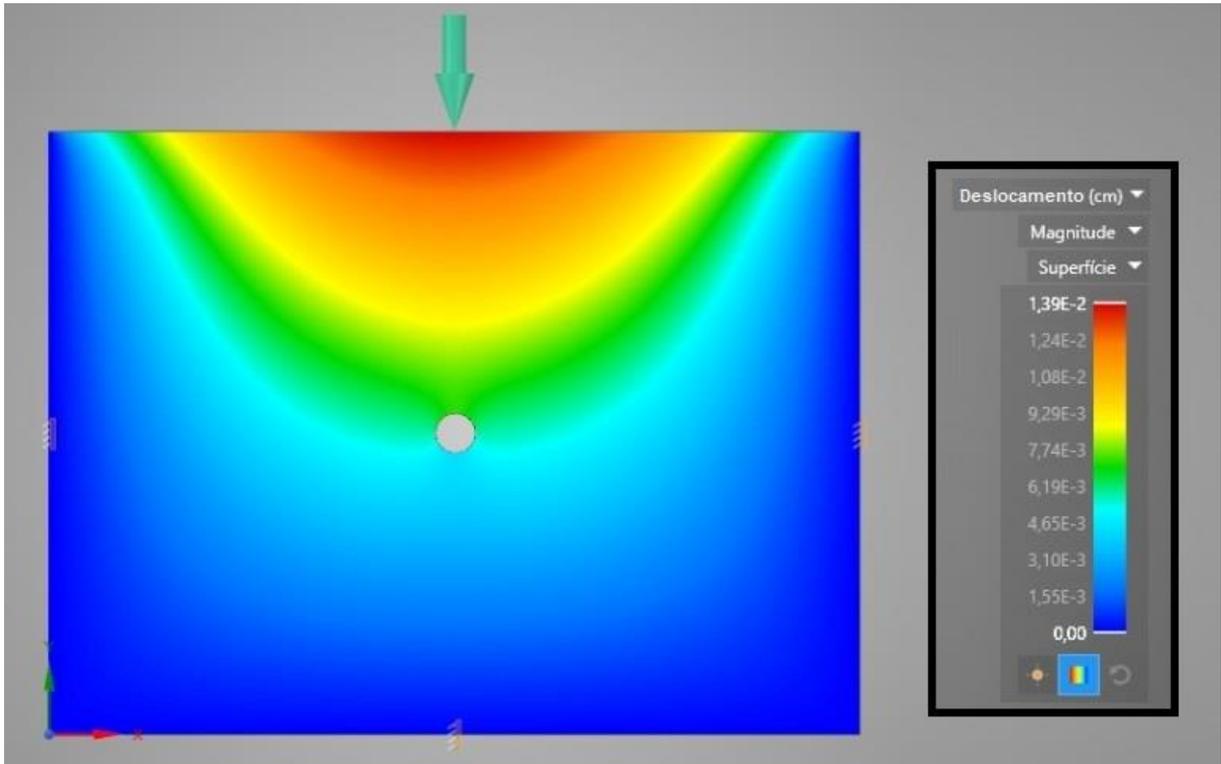
As Figuras 70 e 71 demonstram os deslocamentos nas paredes com abertura quadrada e abertura circular centralizadas e a Figura 72 demonstra os deslocamentos em uma parede sem abertura. As Figuras 73, 74, 75 e 76 apresentam os deslocamentos nas paredes onde as aberturas estão dispostas em seus vínculos superior e inferior.

Figura 70 - Deslocamentos PQ-20



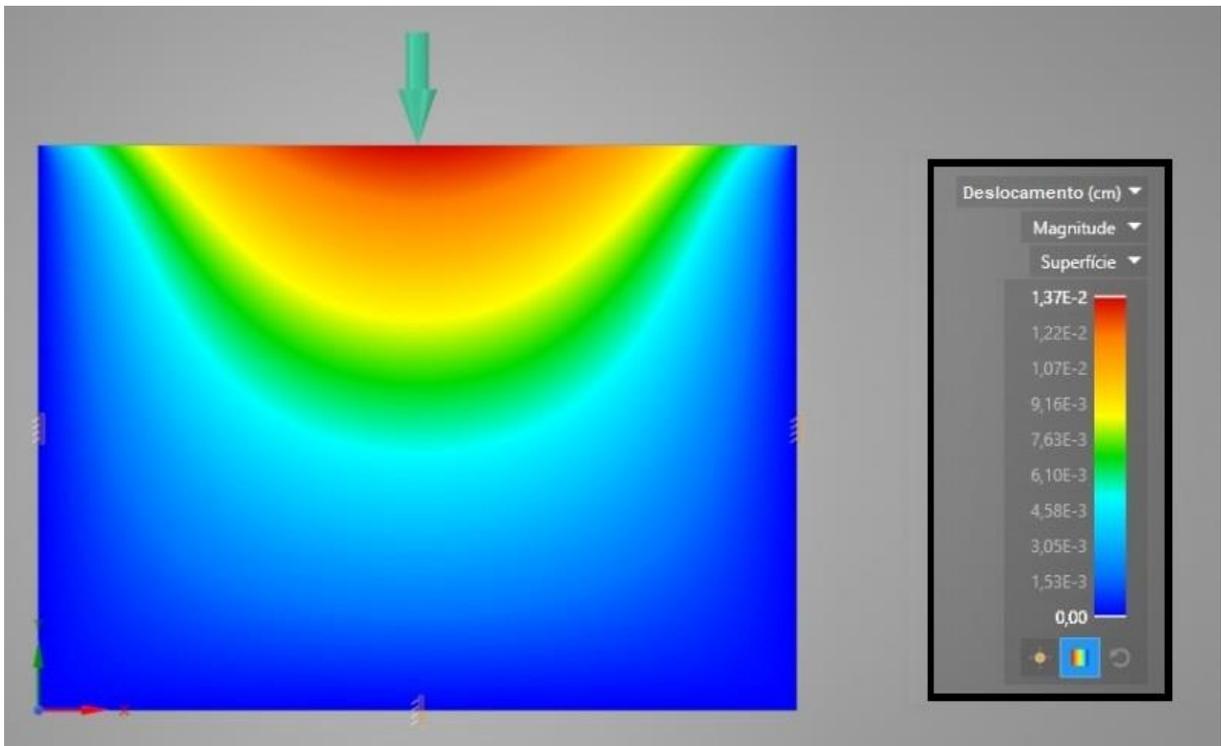
Fonte: o autor (2020).

Figura 71 - Deslocamentos PC-20



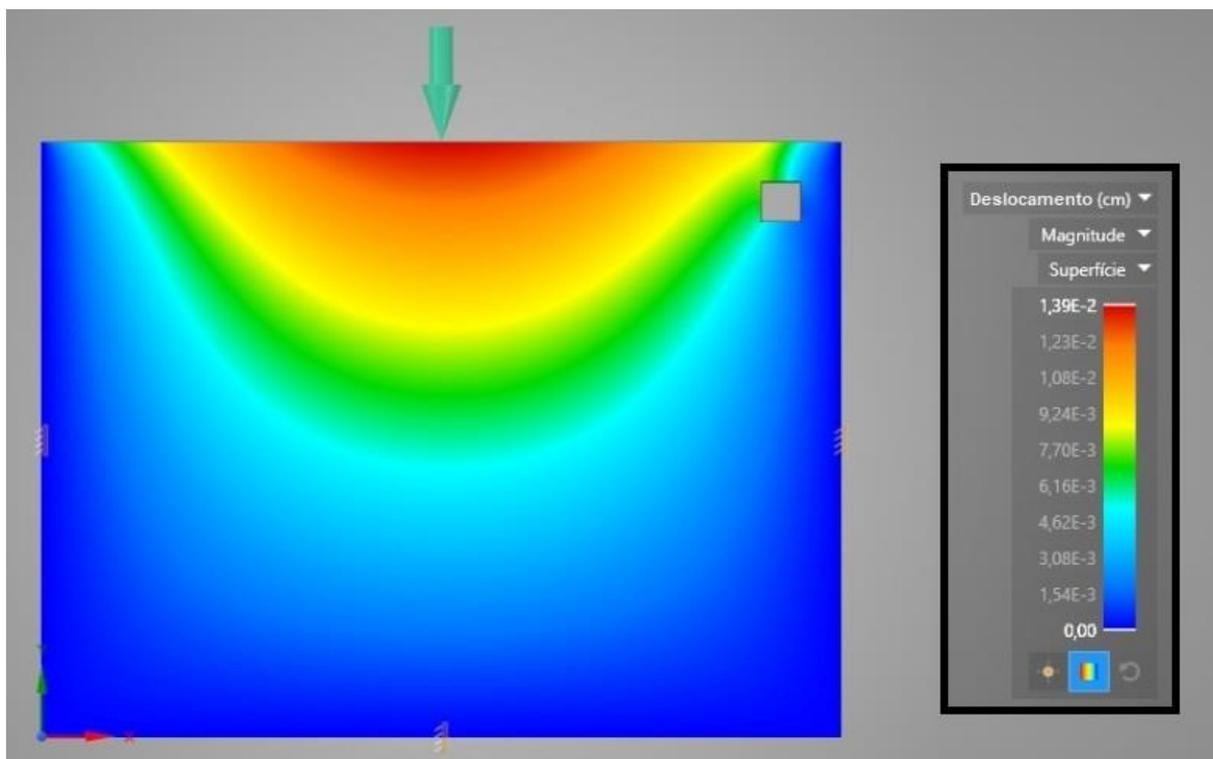
Fonte: o autor (2020).

Figura 72 - Deslocamentos parede sem abertura



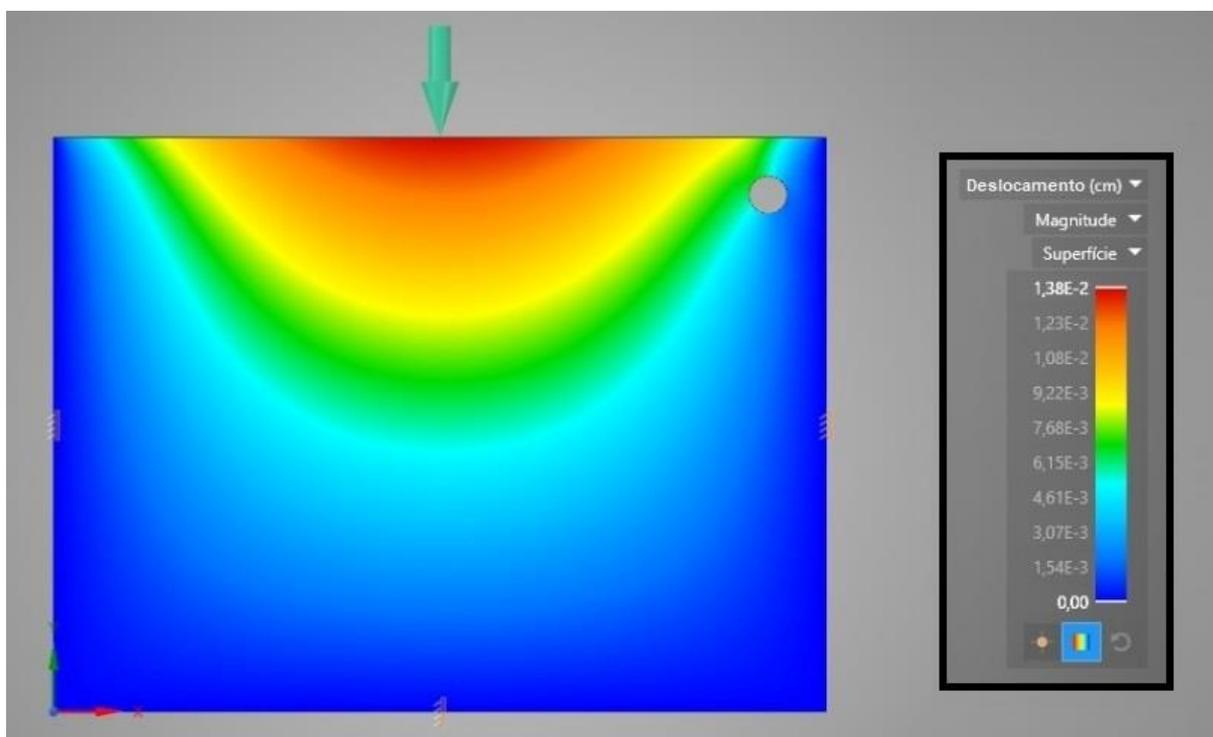
Fonte: o autor (2020).

Figura 73 - Deslocamentos PQVS



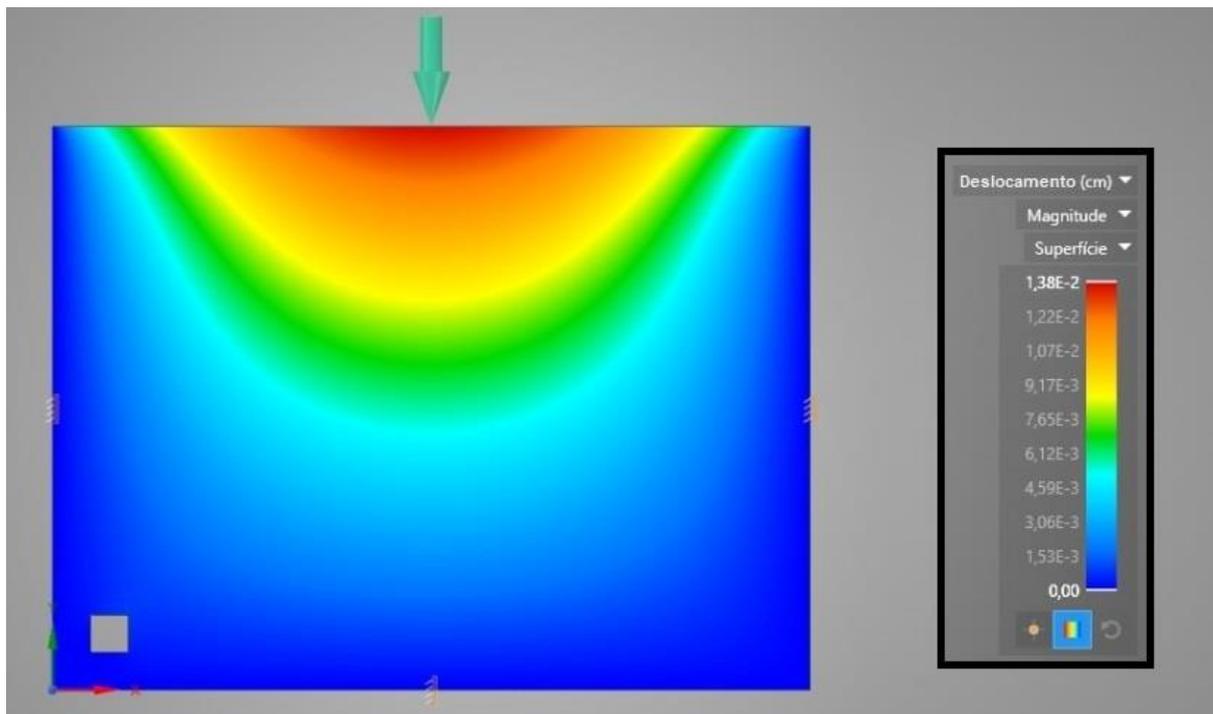
Fonte: o autor (2020).

Figura 74 - Deslocamentos PCVS



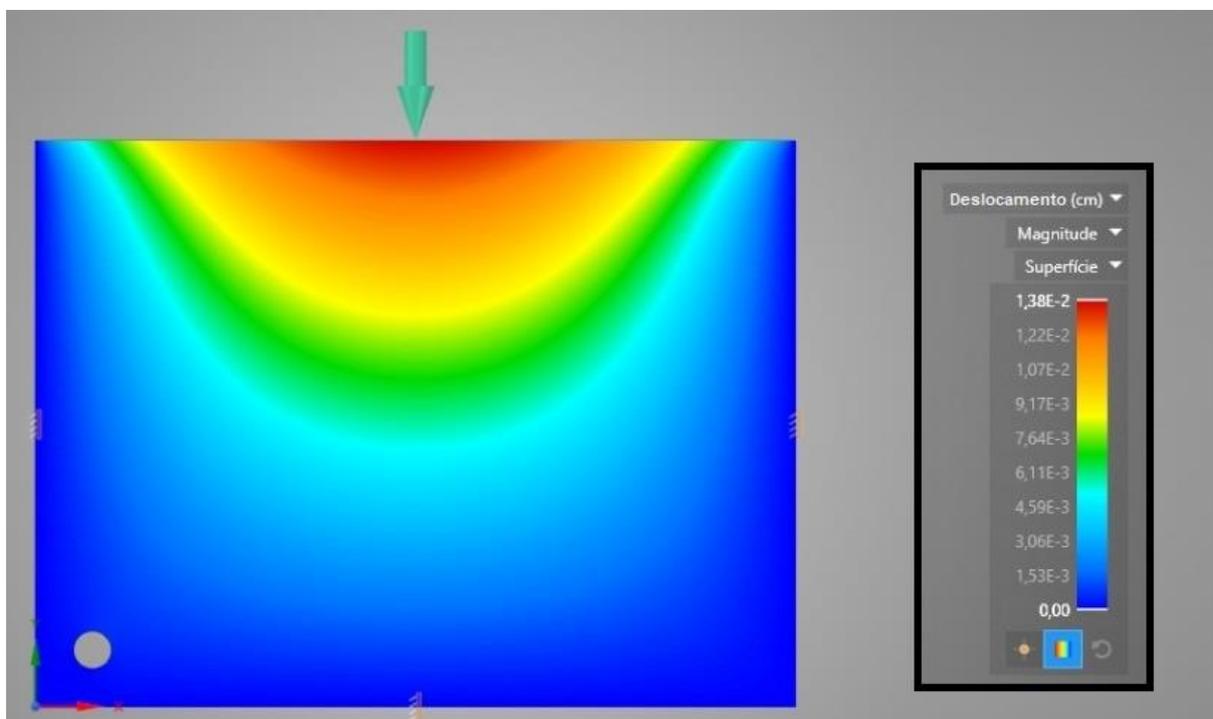
Fonte: o autor (2020).

Figura 75 - Deslocamentos PQVI



Fonte: o autor (2020).

Figura 76 - Deslocamentos PCVI



Fonte: o autor (2020).

Para todas as Figuras, o padrão de deslocamento se mostra exatamente o mesmo, com os máximos valores registrados no centro superior da parede e seguindo

em direção ao seu centro geométrico. Os resultados obtidos apresentam pequena ordem de grandeza e não variam com relevância para paredes com pequenas aberturas e sem nenhuma abertura, o que valida a negligência definida pela norma.

4.2.5 Discussões à análise numérica

De modo a sintetizar o exposto, as Tabelas 8 e 9 demonstram os valores resultantes dos itens elencados acima. Estas apresentam o modelo de cada parede e suas respectivas tensões e deslocamentos máximos.

Tabela 8 – Tensões e deslocamentos nas paredes com abertura M e G

Dados	Resultados				
Modelo de parede	MA-60	MA-100	MA-120	MA-150	GA-200
Tensão de compressão (MPa)	4,63	8	9,03	17,98	51,37
Tensão de tração (MPa)	5,23	5,45	5,78	6,67	8,86
Deslocamento (cm)	0,016	0,0207	0,0252	0,037	0,107
Modelo de parede		ML-100	ML-120	ML-150	GL-200
Tensão de compressão (MPa)		6,81	9,77	9,07	15,22
Tensão de tração (MPa)		5,36	5,86	6,3	7,41
Deslocamento (cm)		0,0189	0,0209	0,024	0,0304
Modelo de parede		MH-100	MH-120	MH-150	GH-200
Tensão de compressão (MPa)		4,26	5,32	5,61	9
Tensão de tração (MPa)		5,05	5,29	5,32	5,39
Deslocamento (cm)		0,0168	0,0173	0,0183	0,0211

Fonte: o autor (2020).

Tabela 9 - Tensões e deslocamentos nas paredes sem abertura e com abertura P

Parede sem abertura e parede com pequenas aberturas			
Modelo de parede	Tensão de compressão (MPa)	Tensão de tração (MPa)	Deslocamento (cm)
Sem abertura	1,62	4,91	0,0137
PQ-20	2,83	4,74	0,0140
PQVS	9,09	5,26	0,0139
PQVI	1,64	4,71	0,0138
PC-20	3,34	4,73	0,0139
PCVS	5,71	4,96	0,0138
PCVI	1,64	4,71	0,0138

Fonte: o autor (2020).

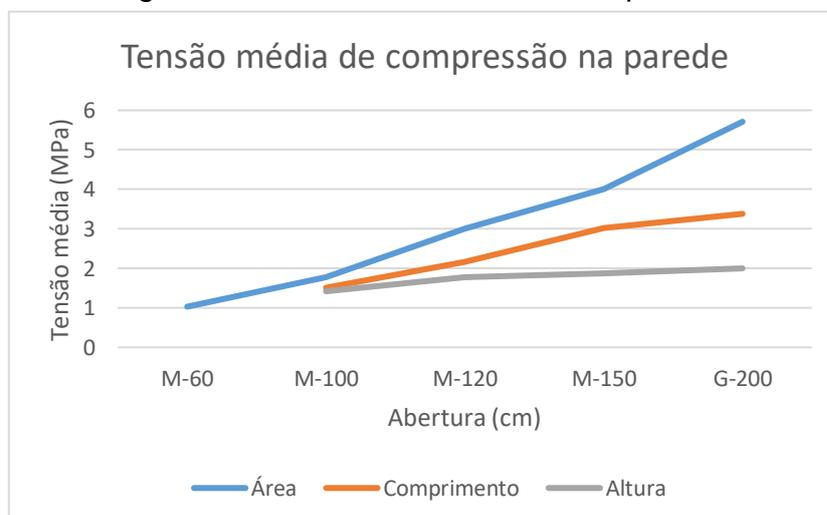
Como se pode perceber, tanto para as tensões de tração e compressão, quanto para os deslocamentos, no caso das médias e grandes aberturas, estes aumentam proporcionalmente ao aumento do vão da abertura nas paredes, salvo a parede ML-120, como mencionado anteriormente. As aberturas que mais se mostram impactantes são as que aumentam proporcionalmente em área, sendo procedidas pelo aumento de sua largura e, por fim, pelo aumento de sua altura.

Para as pequenas aberturas, nota-se que as maiores tensões de tração e compressão acontecem quando estas encontram-se dispostas nos vínculos superiores das paredes. Já os deslocamentos máximos acontecem quando as aberturas se encontram centralizadas à parede. Além disso, a tensão de tração máxima em uma parede sem abertura é maior do que quando a abertura se encontra em um de seus vínculos inferiores, podendo estas serem desprezadas.

Em razão da consideração somente do carregamento vertical, a compressão nas paredes com aberturas M e G é muito mais expressiva do que a tração. Isso era esperado, visto que o carregamento é acumulativo e transferido de parede para parede.

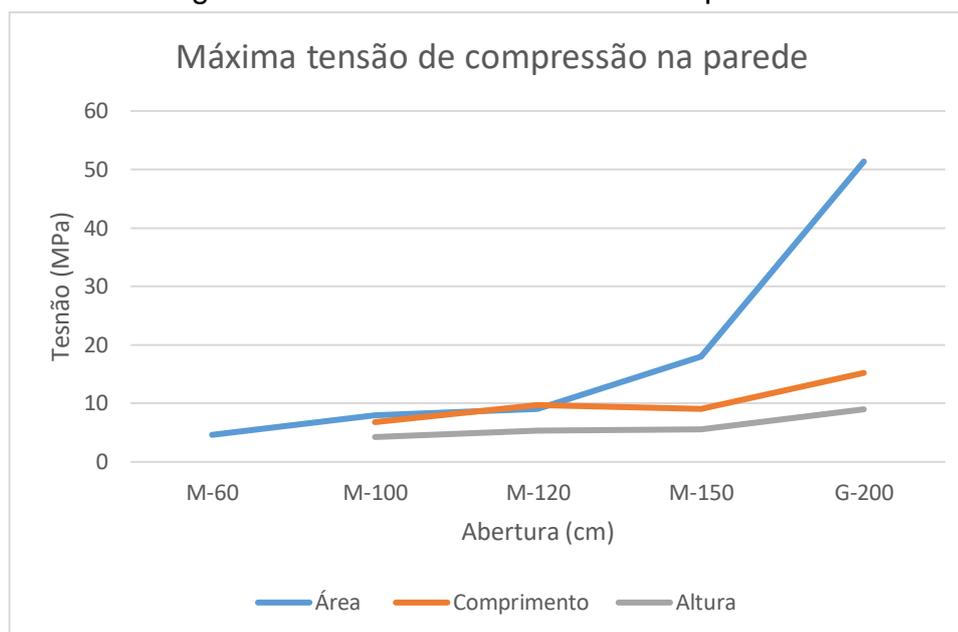
A região mais solicitada à compressão é a parcela lateral das aberturas, por ser esta a região que suporta o carregamento a que a parede está submetida. Porém, as máximas tensões acontecem nos cantos superiores das aberturas. A Figura 77 apresenta o gráfico das tensões de compressão nas laterais das aberturas, denominadas tensões médias de compressão, e a Figura 78 apresenta o gráfico das máximas tensões de compressão nas paredes.

Figura 77 - Tensões médias de compressão



Fonte: o autor (2020).

Figura 78 - Tensões máximas de compressão



Fonte: o autor (2020).

A região mais solicitada à tração, por sua vez, é a parcela superior à abertura, exatamente por existir um vão sem apoio. No entanto, as maiores tensões de tração acontecem nos cantos superiores das paredes, onde existe um acúmulo de tensões.

Com os resultados obtidos, para as paredes com aberturas M e G, é necessário o uso de armadura de reforço para suportar as tensões de tração. Já para as paredes P, as suas aberturas podem ser desconsideradas, conforme mencionado pela norma. Para essa situação, a tela soldada com a armadura mínima definida pela norma já deverá ser o suficiente para suprir a resistência à tração necessária, de modo a evitar a fissuração, uma vez que os valores são relativamente baixos.

No que diz respeito ao emprego de reforço nas regiões tracionadas acima e abaixo das aberturas, as recomendações normativas se mostram coerentes. Porém, salienta-se que a utilização de armadura de reforço nos cantos superiores da parede se mostra importante, visto que nessas regiões é que ocorrem as máximas tensões de tração. Caso não sejam reforçados, provavelmente, esses cantos apresentarão fissuração.

Quanto aos deslocamentos, em geral, a sua pequena ordem de grandeza já era esperada, uma vez que a parede de concreto é um elemento estrutural bastante rígido. Além disso, como a parede apresenta dimensões únicas, é correto que o padrão de deslocamentos permaneça semelhante em todas elas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como premissa analisar a influência da dimensão e posição de aberturas quanto à resistência de paredes de concreto armado, por meio da verificação de seu comportamento estrutural. Para isso, modelou-se uma parede de concreto armado, de dimensões únicas, e analisou-se a quando submetida a diversas situações de posição e dimensão de aberturas, através do dimensionamento presente na norma e por modelagens numéricas.

Ao concluir este estudo é possível ratificar que a presença de aberturas em uma parede de concreto armado e o seu tamanho têm grande influência no que diz respeito às solicitações e, conseqüentemente, à resistência desta parede. Para todas as paredes analisadas, observou-se que, quanto maior a dimensão da abertura, maiores foram as máximas tensões de tração e compressão resultantes, bem como os máximos deslocamentos, implicando na diminuição de sua resistência.

As aberturas mais impactantes foram as que tiveram um aumento total de sua área, procedidas pelo aumento de seu comprimento e, por fim, pelo aumento de sua altura. Isto indica que o exposto pela NBR 16055:2012, mencionado no item 2.4.1.2 deste trabalho, em que trata da limitação de tensão no concreto está correto. Quanto maior o comprimento de uma abertura, maior a sua região de influência e, conseqüentemente, maior o esforço solicitante.

No que diz respeito às pequenas aberturas e seu posicionamento, estas apresentaram valores de tensão de tração e compressão relativamente baixos e seu deslocamento é irrisório, tanto para as aberturas quadradas, quanto para as aberturas circulares. Deste modo, também é possível validar o mencionado pela norma, onde traz que as pequenas aberturas em uma parede de concreto armado podem ser desconsideradas. De qualquer forma, havendo a necessidade de se realizar uma pequena abertura em uma parede de concreto armado, é preferível que esta seja circular, por apresentar menores deslocamentos, e que se faça em um de seus vínculos inferiores, onde não haverá mudanças significativas em sua tensão.

Quanto às grandes aberturas, representadas pela abertura de tamanho G-200, analisou-se uma diferenciação expressiva dentre seus valores resultantes de tensão e deslocamento, quando comparados às paredes com aberturas de tamanho M. Estima-se que esta discrepância se deve pelo fato de a parede deixar de ser tratada como tal e se tornar um elemento pilar-parede. Assim, seria de extrema relevância

que a norma expandisse as opções de abertura, indicando de que forma a armadura de reforço deve ser dimensionada para estes casos e se os parâmetros necessários podem ser determinados igualmente para este tipo de abertura.

Em geral, as paredes sofrem mais compressão do que tração, o que era esperado, visto que o carregamento é acumulativo e transferido de parede para parede. A NBR 16055:2012 não especifica o trecho da parede a ser analisado, porém, por ser a lateral da abertura a região que suporta todo o carregamento da parede, é ideal que este seja considerado.

No que se refere ao deslocamento da parede, por esta apresentar dimensões únicas, é correto que o padrão de deslocamentos permaneça, em geral, semelhante em todas elas. Em aferição à parede sem abertura, pode-se perceber um aumento de deslocamento de 116,8% para MA-60, 270% para MA-150 e 781% para MA-200, demonstrando, mais uma vez, que o tamanho da abertura tem grande influência na resistência da parede.

Em todas as paredes analisadas, pode-se perceber que existe um acúmulo de tensões de tração em seus cantos superiores e que, no caso das paredes com aberturas, existe, ainda, concentração de tensões nas quinas das mesmas. Neste caso, é plausível que, além dos reforços indicados pela norma, sejam utilizados reforços transversalmente aos cantos das paredes, de modo a evitar a fissuração e, apesar de o concreto resistir bem à compressão, o mesmo deveria ser feito para as quinas das aberturas.

Isto posto, tem-se que a norma se mostra congruente e bastante completa, podendo ser aplicada em todas as situações de aberturas. No entanto, faz-se necessária a utilização dos devidos reforços sugeridos, de modo a evitar a fissuração, bem como, em casos extremos, o comprometimento da estrutura.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Além das variações apresentadas neste estudo, trabalhos futuros podem avaliar outros quesitos que não foram abrangidos por esta análise, para que exista maior conhecimento sobre aberturas em paredes de concreto armado. Uma avaliação interessante pode ser realizada a partir da consideração do efeito do vento em paredes de concreto armado com aberturas. A força do vento é considerada uma das

principais ações que podem atuar em uma estrutura, proporcionando basicamente tração e compressão na mesma.

Outro ponto que se mostra bastante válido, podendo ser abordada em trabalhos futuros, é a utilização de um *software* com a possibilidade de escolha de uma malha mais refinada. Quanto maior o refino da malha a ser analisada, maior, também, a exatidão e confiabilidade dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318**: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Estados Unidos: ACI, 2019. 628 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INCORPORADORAS IMOBILIÁRIAS. Déficit habitacional é recorde no País. São Paulo, 07 jan. 2019. Disponível em: <<https://www.abrainc.org.br/noticias/2019/01/07/deficit-habitacional-e-recorde-no-pais/>>. Acesso em: 19 mar. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 238 p.

_____. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 6 p.

_____. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988. 66 p.

_____. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 18 p.

_____. **NBR 15696**: Formas e escoramento para estruturas de concreto – Projeto, dimensionamento e procedimentos executivos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 27 p.

_____. **NBR 16055**: Parede de concreto moldada no local para a construção de edifícios – Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 35 p.

AUSTRALIAN STANDARDS. **AS 3600**: Concrete Structures. Austrália: AS, 2009. 225 p.

BRAGUIM, Thales Couto. **Utilização de modelos de cálculo para projeto de edifícios de paredes de concreto armado moldadas no local**. 2013. 188 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3144/tde-18082014-144751/publico/Diss_THALES_Braguim.pdf> Acesso em 31 mar. 2020.

CARVALHO, Leandro Faria. **Sistema construtivo em paredes de concreto para edifícios: dimensionamento da estrutura e aspectos construtivos**. 2012. 112 p. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9JTK7S/1/253.pdf>>. Acesso em: 12 mar. 2020.

COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO. Parede de concreto. **Coletânea de Ativos**, 2007/2008. Disponível em: <http://abesc.org.br/pdf/coletanea_ativos.pdf>. Acesso em 19 mar. 2020.

CORSINI, Rodnei. Paredes Normatizadas. **Revista Técnica**, São Paulo, v. 20, n. 183, p. 40-46, jun. 2012.

DA FONSECA, Eduardo Fabian. **Análise do aparecimento de fissuras em regiões de aberturas de paredes de concreto armado – estudo de caso.** 2016. 77 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) – Centro Universitário de Brasília. Brasília, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.uniceub.br/jspui/bitstream/235/9454/1/21113129.pdf>>. Acesso em 13 mar. 2020.

DE SOUSA, J. V. L.; DE ÁVILA, R. A. G. **Análise comparativa da viabilidade econômica entre os sistemas construtivos “parede de concreto” e “alvenaria estrutural” – estudo de caso.** 2014. 128 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2014. Disponível em: <https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/140/o/AN%C3%81LISE_COMPARATIVA_DA_VIABILIDADE_ECON%C3%94MICA_ENTRE_OS_SISTEMAS_CONSTRUTIVOS_%E2%80%9CPAREDE_DE_CONCRETO%E2%80%9D_E_%E2%80%9CALVENARIA_ESTRUTURAL%E2%80%9D_%E2%80%93_ESTUDO_DE_CASO.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2020.

DOH, J. H.; FRAGOMENI, S. **Ultimate Load Formula for Reinforced Concrete Wall Panels with Openings.** Austrália, 01 mar. 2006. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/143855859.pdf>>. Acesso em 04 abr. 2020.

EUROPEAN STANDARD. **Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.** Londres: EN 1992, 2004. 227 p.

Gerdau. Gerdau: o futuro se molda. São Paulo, 13 mar. 2020. Disponível em: <https://www2.gerdau.com.br/produtos/telas-gerdau?gclid=EAlaIqobChMliuOpld3C6QlVlYWRCh0IoAZVEAAYAiAAEgK5MPD_BwE>. Acesso em: 13 mar. 2020.

HASPARYK, Nicole Pagan. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado.** 2005. 326 p. Tese (Pós-graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/6350/000528715.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em 02 mai. 2020.

MASSONE, L. M.; MUÑOZ, G. ROJAS, F. Experimental and numerical cyclic response of RC walls with openings. **Science Direct**, [s. l.], v. 178, p. 318-330, jan. 2019. Disponível em: <<https://www-sciencedirect.ez314.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0141029618327019?via%3Dihub>>. Acesso em: 10 abr. 2020.

MORQUECHO, Fernando Bezerra Galvão. **Análise de edifícios em paredes de concreto moldadas in loco.** 2016. 77 p. Monografia (Curso de Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2016. Disponível em: <https://monografias.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/2450/1/MONOGRRAFIA%20FERNANDO%20MORQUECHO_AN%C3%81LISE%20DE%20EDIF%C3%8dCIOS%20EM%20PAREDES%20DE%20CONCRETO%20MOLDADAS%20IN%20LOCO.pdf> Acesso em: 12 mar. 2020.

NUNES, Valmiro Quéfren Gameleira. **Análise estrutural de edifícios de paredes de concreto armado**. 2011. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011. Disponível: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-18072011-133137/publico/2011ME_ValmiroQuefrenGameleiraNunes.pdf>. Acesso em 19 mar. 2020.

POPESCU, C.; SAS, G.; BLANKSVÄRD, T.; Täljsten, B. Concrete walls weakened by openings as compression members: A review. **Science Direct**, [s. l.], v. 89, p. 172-190, abr. 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029615000802?via%3Dihub>>. Acesso em 04 abr. 2020.

RAZERA, Jucelem. **Avaliação comparativa dos custos de produção e aplicação de concretos autoadensável e convencional**. 2012. 70 p. Monografia (Especialização em Projeto de Estruturas) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2012. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/3711/1/TD_COEST_I_2012_05.pdf>. Acesso em: 4 abr 2020.

SACHT, Helenice Maria. **Painéis de vedação de concreto moldado *in loco*: avaliação do desempenho térmico e desenvolvimento de concretos**. 2008. 286 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo. São Carlos, 2008. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18141/tde-17102008-114925/publico/HeleniceSacht.pdf>>. Acesso em: 13 mar. 2020.

SILVA, F. B. Paredes de concreto armado moldadas *in loco*. **Revista Técnica**, São Paulo, v. 19, n. 167, fev. 2011.

TAYLOR, C. P.; COTE, P. A.; WALLACE, J. W. Design of Slender Reinforced Concrete Walls with Openings. **ACI Structural Journal**, [s. l.], v. 95, n. 4, jul. - ago. 1998. Disponível em: <<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/51685452>>. Acesso em 10 abr. 2020.

VIEIRA, Luara Batalha. **Projeto de paredes de concreto armado: apresentação das recomendações normativas e avaliação da influência das aberturas**. 2014. 127 p. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/ri/bitstream/ri/16209/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Luara_Batalha_Vieira.pdf>. Acesso em 20 mar. 2020.