UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF

LUIZ HENRIQUE BENTO BARBOSA JUNIOR

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E ANÁLISE DE VERGAS E CONTRAVERGAS EM SISTEMAS DE ALVENARIA ESTRUTURAL DE BLOCO CERÂMICO

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

2026

LUIZ HENRIQUE BENTO BARBOSA JUNIOR

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E ANÁLISE DE VERGAS E CONTRAVERGAS EM SISTEMAS DE ALVENARIA ESTRUTURAL DE BLOCO CERÂMICO

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: D.Sc. Niander Aguiar Cerqueira

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
2026

FICHA CATALOGRÁFICA
UENF - Bibliotecas
Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

B238 Barbosa Junior, Luiz Henrique Bento.

Simulação computacional e análise de vergas e contravergas em sistemas de alvenaria estrutural de bloco cerâmico / Luiz Henrique Bento Barbosa Junior. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2026.

206 f. : il.
Bibliografia: 101 - 105.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2026.
Orientador: Niander Aguiar Cerqueira.

1. Alvenaria estrutural. 2. Simulação numérica. 3. Vergas e contravergas. 4. Blocos cerâmicos. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 624

LUIZ HENRIQUE BENTO BARBOSA JUNIOR

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E ANÁLISE DE VERGAS E CONTRAVERGAS EM SISTEMAS DE ALVENARIA ESTRUTURAL DE BLOCO CERÂMICO

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Data da Defesa: 28 de julho de 2026

Assinaturas:

gov.br Documento assinado digitalmente
NIANDER AGUIAR CERQUEIRA
Data: 27/09/2026 16:33:09-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof.: Niander Aguiar Cerqueira (D.Sc.) – LECIV/CCT/UENF
(Orientador)

gov.br Documento assinado digitalmente
SERGIO LUIS GONZALEZ GARCIA
Data: 28/09/2026 10:36:54-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof.: Sergio Luis González Garcia (D.Sc.) – LECIV/CCT/UENF

gov.br Documento assinado digitalmente
JONAS ALEXANDRE
Data: 28/09/2026 16:07:35-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof.: Jonas Alexandre (D.Sc.) – LECIV/CCT/UENF

gov.br Documento assinado digitalmente
SERGIO RAFAEL CORTES DE OLIVEIRA
Data: 27/09/2026 17:30:51-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof.: Sergio Rafael Cortes de Oliveira (D.Sc.) – IFFluminense / Campus Campos-Centro

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, agradeço a Deus por Sua presença em minha vida e por todo o cuidado ao longo desta caminhada. Sei que, sem Sua mão sobre mim, eu não teria chegado até aqui. Agradeço por Seu amor incondicional, por cada livramento, por cada força renovada nos momentos difíceis e por cada pessoa que colocou em meu caminho.

Agradeço à minha família pelo apoio, pelo cuidado, pelas palavras de encorajamento e também pelas cobranças necessárias nos momentos em que precisei seguir em frente. O suporte de vocês esteve presente em toda a minha caminhada na Construção Civil, desde a formação técnica, passando pela graduação, até este momento no mestrado. Cada etapa desta trajetória também carrega um pouco de vocês.

Agradeço ao meu orientador, Niander Aguiar Cerqueira, pelo apoio, pela paciência e pelas orientações ao longo desta pesquisa. Mais do que um professor, encontrei uma referência profissional e um amigo, cuja contribuição foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho e para minha formação como engenheiro e pesquisador.

Agradeço aos professores que estiveram comigo ao longo dos anos e que contribuíram para minha formação acadêmica, profissional e pessoal. Cada ensinamento recebido, dentro e fora da sala de aula, ajudou a construir a forma como hoje compreendo e vivencio a engenharia.

Agradeço aos amigos que me acompanharam nesta jornada, estando ao meu lado nos momentos de estudo e de lazer, de dor e júbilo, de derrota e vitória. Cada pessoa que caminhou comigo contribuiu, de alguma forma, para que este trabalho fosse desenvolvido, deixando marcas que levarei comigo para sempre.

Agradeço também a uma pessoa especial, que, mesmo à distância, esteve presente em uma das fases mais difíceis desta caminhada. Seu carinho, apoio, paciência e palavras de incentivo foram importantes para que eu encontrasse forças para continuar e concluir este ciclo. Obrigado por estar comigo, mesmo nos dias em que o peso parecia maior do que eu conseguiria carregar.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Cada gesto de apoio, cada palavra de incentivo e cada demonstração de cuidado fizeram parte desta conquista.

“Não to mandei eu? Esforça-te e tem bom ânimo; não pasmes, nem te espantes, porque o Senhor, teu Deus, é contigo, por onde quer que andares.”
(Josué 1:9)

RESUMO

A presença de aberturas em paredes de alvenaria estrutural altera o fluxo natural das tensões e exige a utilização de elementos de redistribuição, como vergas e contravergas. Entretanto, ainda existem lacunas quanto à definição do comprimento de transpasse desses elementos em sistemas de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos. Nesse contexto, esta pesquisa teve como objetivo avaliar numericamente a influência do comprimento de transpasse de vergas e contravergas sobre o comportamento mecânico de painéis de alvenaria estrutural submetidos a carregamentos verticais. Foram desenvolvidos modelos tridimensionais no *software* ANSYS, utilizando o Método dos Elementos Finitos, com representação dos blocos cerâmicos, argamassa de assentamento, vergas, contravergas e armaduras longitudinais. Foram analisadas cinco tipologias de transpasse, além de um modelo sem abertura utilizado como referência, considerando cinco cenários de carregamento correspondentes à cobertura e à contribuição acumulada de um a quatro pavimentos. Os resultados foram avaliados a partir dos campos de tensões principais de tração e compressão, das tensões desenvolvidas nas armaduras, dos deslocamentos dos painéis e da flecha das vergas. As simulações mostraram que o aumento do transpasse não produziu melhoria progressiva em todas as grandezas analisadas. A ampliação dos comprimentos até aproximadamente duas unidades de alvenaria reduziu determinadas concentrações de tensão e deformações, enquanto aumentos posteriores resultaram em ganhos adicionais limitados em diversas respostas e maior participação das regiões embutidas no mecanismo resistente. Os resultados também indicaram que vergas e contravergas apresentam comportamento compatível com restrição parcial à rotação desenvolvida ao longo dos transpasses, evidenciada pela inversão do campo de tensões e pela resposta das armaduras. Para as condições analisadas, a configuração correspondente a duas unidades de alvenaria apresentou uma condição favorável dentro do conjunto estudado, constituindo uma referência para o pré-dimensionamento, sem representar a definição de um comprimento universal de transpasse.

Palavras-chave: Alvenaria estrutural; Simulação numérica; Vergas e contravergas; Blocos cerâmicos.

ABSTRACT

The presence of openings in structural masonry walls alters the natural flow of stress and requires the use of redistribution elements, such as lintels and sill beams. However, gaps remain regarding the definition of the overlap length of these elements in structural masonry systems with ceramic blocks. In this context, this research aimed to numerically evaluate the influence of the overlap length of lintels and sill beams on the mechanical behavior of structural masonry panels subjected to vertical loads. Three-dimensional models were developed in ANSYS software using the Finite Element Method, including ceramic blocks, bedding mortar, lintels, sill beams, and longitudinal reinforcement. Five overlap typologies were analyzed, in addition to a wall model without an opening used as a reference, considering five loading scenarios corresponding to the roof load and the accumulated contribution of one to four upper floors. The results were evaluated based on the fields of principal tensile and compressive stresses, stresses developed in the reinforcement, panel displacements, and lintel deflection. The simulations showed that increasing the overlap length did not produce progressive improvement in all the analyzed responses. Increasing the overlap up to approximately two masonry units reduced certain stress concentrations and deformations, whereas further increases resulted in limited additional gains in several responses and greater participation of the embedded regions in the resisting mechanism. It was also found that the lintels and sill beams exhibited behavior compatible with partial rotational restraint developed along the overlap regions, as evidenced by the reversal of the stress field and the response of the reinforcement. Under the analyzed conditions, the configuration corresponding to an overlap of two masonry units presented a favorable condition within the set of typologies evaluated, constituting a reference for preliminary design without representing the definition of a universal overlap length.

Keywords: Structural masonry; Numerical simulation; Lintels and sill beams; Ceramic blocks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Construções históricas em alvenaria estrutural 1
Figura 2 – Janela com fissuração em extremidade 2
Figura 3 – Representação de verga e contraverga em vão de janela 12
Figura 4 – Dispersão de ações verticais: NBR 16868-1 13
Figura 5 – Determinação da região de carregamento da verga: NBR 16868-1 14
Figura 6 – Distribuição das tensões de tração em painel de alvenaria estrutural com abertura, verga e contraverga 15
Figura 7 – Representação de transpasse em abertura 16
Figura 8 – Representação esquemática das regiões B e D em uma parede de alvenaria estrutural com abertura 18
Figura 9 – Métodos de modelagem da alvenaria: (a) Exemplo de alvenaria; (b) Micromodelagem detalhada; (c) Micromodelagem simplificada; (d) Macromodelagem 21
Figura 10 – Hipótese de homogeneização 22
Figura 11 – Distribuições de tensão em cada modelo de alvenaria estrutural: sem aberturas, com abertura central e com duas aberturas 25
Figura 12 – Modelos de paredes ensaiados e resultados 26
Figura 13 – Gráfico tensão-deformação das modelagens computacionais em comparação aos dados experimentais 27
Figura 14 – Modelagem de alvenaria estrutural: (a) representação experimental, ... 28
Figura 15 – Tensões σx, σy e τxy para vergas e contravergas com diferentes medidas de transpasse: a) 1/2 da largura da abertura; b) 1/10 da largura da abertura 29
Figura 16 – Tensões em torno de aberturas sem e com vergas/contravergas 30
Figura 17 – Configurações dos cortes (unidades em mm): (a) corte horizontal central, (b) corte horizontal superior, (c) corte vertical, (d) corte inclinado 34
Figura 18 – Representação de prédio e elementos finitos utilizados no ANSYS 35
Figura 19 – Representação de prédio e elementos finitos utilizados no Robot 35
Figura 20 – Macromodelagem da construção Rocca Strozzi 36
Figura 21 – Representação da alvenaria parcialmente armada 37
Figura 22 – Detalhamento do Elemento SOLID186 43
Figura 23 – Detalhamento do Elemento REINF264 44

Figura 24 – Detalhamento do Elemento CONTA174 45
Figura 25 – Detalhamento do Elemento TARGE170 45
Figura 26 – Componentes e elementos finitos utilizados na modelagem numérica 46
Figura 27 – Malhas avaliadas no estudo de sensibilidade: (a) 40 mm; (b) 30 mm; (c) 20 mm; (d) 10 mm; (e) 5 mm; (f) 2,5 mm; (g) 1 mm 47
Figura 28 – Refinamento local da malha nos cantos da abertura: (a) regiões de influência; (b) detalhe da discretização local 50
Figura 29 – Representação tridimensional de: (a) bloco inteiro e (b) meio bloco, utilizados na modelagem numérica 51
Figura 30 – Geometria em planta do bloco cerâmico inteiro com identificação das cotas internas 52
Figura 31 – Dimensões globais do painel e da abertura considerada nos modelos numéricos 53
Figura 32 – Modelo SA: painel sem abertura 55
Figura 33 – Configuração Tipo A: critério associado à alvenaria de vedação 56
Figura 34 – Configuração Tipo B: transpasse de 1 bloco 56
Figura 35 – Configuração Tipo C: transpasse de 2 blocos 56
Figura 36 – Configuração Tipo D: transpasse de 3 blocos 57
Figura 37 – Configuração Tipo E: transpasse de 4 blocos 57
Figura 38 – Representação das condições de contorno e da aplicação do carregamento vertical 58
Figura 39 – Representação esquemática dos cenários de carregamento vertical acumulado considerados nas análises 61
Figura 40 – Distribuição dos deslocamentos verticais (Uy) sob o carregamento correspondente à cobertura: (a) Modelo SA; (b) Tipo A 66
Figura 41 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) nos blocos cerâmicos sob o carregamento correspondente à cobertura: (a) modelo SA; (b) Tipo A 67
Figura 42 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) nos blocos cerâmicos sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos: (a) Tipo A; (b) Tipo B; (c) Tipo C; (d) Tipo D; (e) Tipo E 69

Figura 43 – Detalhe da região de concentração das tensões principais de compressão (σ_3) nos blocos cerâmicos adjacentes ao apoio da verga sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos: (a) Tipo A; (b) Tipo C; (c) Tipo E 71
Figura 44 – Tensões principais máximas de compressão (σ_3) nos blocos cerâmicos em função da tipologia e do cenário de carregamento.....72
Figura 45 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) nos blocos cerâmicos sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos: (a) Tipo A; (b) Tipo B; (c) Tipo C; (d) Tipo D; (e) Tipo E.....73
Figura 46 – Detalhe da região de ocorrência da tensão principal máxima de tração (σ_1) nos blocos cerâmicos do Tipo A sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos.....74
Figura 47 – Tensões principais máximas de tração (σ_1) nos blocos cerâmicos em função da tipologia e do cenário de carregamento.....75
Figura 48 – Detalhe e distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) na argamassa do Tipo E sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos, detalhando o valor máximo e as tensões nas juntas adjacentes à abertura 76
Figura 49 – Detalhe e distribuição das tensões principais de tração (σ_1) na argamassa do Tipo E sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos, detalhando o valor máximo e as tensões nas juntas adjacentes à abertura 77
Figura 50 – Tensões principais máximas de tração (σ_1) nas juntas verticais situadas entre verga e contraverga em função da tipologia e do cenário de carregamento....78
Figura 51 – Tensões principais máximas de compressão (σ_3) nas juntas verticais situadas entre verga e contraverga em função da tipologia e do cenário de carregamento 78
Figura 52 – Representação esquemática do comportamento de flexão das vergas e contravergas: (a) condição idealizada de elemento simplesmente apoiado; (b) comportamento compatível com a restrição parcial à rotação desenvolvida nos transpasses.....80
Figura 53 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) na verga do Tipo E, evidenciando a inversão do campo de tração entre o trecho central e a região de transpasse, sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos.....81
Figura 54 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) nas vergas e contravergas sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos, para

configurações representativas dos comprimentos de transpasse: (a) Tipo A; (b) Tipo C; (c) Tipo E 82
Figura 55 – Tensões principais máximas de tração (σ_1) nas regiões de transpasse da verga (face superior) em função do cenário de carregamento 83
Figura 56 – Tensões principais máximas de tração (σ_1) nas regiões de transpasse da contraverga (face inferior) em função do cenário de carregamento 84
Figura 57 – Distribuição das tensões principais na armadura longitudinal da verga do Tipo E sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos: (a) tensão de tração (σ_1); (b) tensão de compressão (σ_3) 85
Figura 58 – Tensões nas armaduras longitudinais das vergas no cenário correspondente à cobertura + 4 pavimentos, apresentando tração no trecho central e compressão nos transpasses 86
Figura 59 – Tensões nas armaduras longitudinais das contravergas no cenário correspondente à cobertura + 4 pavimentos, apresentando tração no trecho central e compressão nos transpasses 87
Figura 60 – Distribuição dos deslocamentos verticais (Uy) nos painéis sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos: (a) Tipo A; (b) Tipo C; (c) Tipo E 89
Figura 61 – Deslocamento vertical máximo (Uy) dos painéis em função da tipologia e do cenário de carregamento 90
Figura 62 – Flecha máxima da verga em função da tipologia e do cenário de carregamento 91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – *Strings* de pesquisa para revisão sistemática 9
Tabela 2 – Propriedades dos blocos cerâmicos estruturais segundo a NBR 16868-1 11
Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos materiais aplicadas no modelo numérico .42
Tabela 4 – Resultados do teste de compressão 48
Tabela 5 – Resultados do teste de tração 48
Tabela 6 – Dimensões das cotas gerais e internas dos blocos (em milímetros).....52
Tabela 7 – Definição geométrica dos comprimentos de transpasse avaliados nos modelos numéricos 54
Tabela 8 – Carregamentos verticais aplicados nos cenários de análise.....62
Tabela 9 – Variação percentual dos principais indicadores mecânicos em relação ao Tipo C no cenário correspondente à cobertura + 4 pavimentos.....93

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Síntese interpretativa das tipologias analisadas 94

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. Justificativa 5
1.2. Objetivos 6
1.3. Organização do texto 8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 9
2.1. Alvenaria estrutural 10
2.2. Vergas e contravergas 12
2.2.1. Redistribuição das tensões nas aberturas 13
2.2.2. Dimensionamento de vergas e contravergas 15
2.3. Regiões de descontinuidade e Princípio de Saint-Venant 17
2.4. Modelagem computacional 20
2.5. Estudos sobre modelagem computacional de alvenarias e aberturas 24
3. MATERIAIS E MÉTODOS 39
3.1. Propriedades dos materiais 40
3.2. Modelagem computacional 43
3.2.1. Discretização da malha e elementos finitos 43
3.2.2. Estudo de sensibilidade 46
3.2.3. Definição da malha adotada e refinamento local 49
3.3. Geometria dos modelos e transpasses 50
3.4. Condições de contorno e carregamentos 58
3.5. Grandezas analisadas e critérios de interpretação 62
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 64
4.1. Comportamento global e efeito da introdução da abertura 65
4.2. Redistribuição das tensões na alvenaria e regiões adjacentes ao vão 68
4.3. Comportamento das vergas, contravergas e armaduras 79
4.4. Deslocamentos e resposta deformacional dos painéis 88
4.5. Síntese comparativa das tipologias 92
5. CONCLUSÃO 95
5.1. Sugestões para trabalhos futuros 98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 101
ANEXO A – PARÂMETROS DO MODELO DE DRUCKER-PRAGER APLICADO AO CONCRETO 106
APÊNDICE A – RESULTADOS DO TESTE DE SENSIBILIDADE DE MALHA 108
APÊNDICE B – TABELAS DE RESULTADOS DOS MODELOS NUMÉRICOS 111
APÊNDICE C – MAPAS DE TENSÕES E DESLOCAMENTOS DOS MODELOS NUMÉRICOS 114

1. INTRODUÇÃO

A construção civil acompanha o desenvolvimento das sociedades desde as primeiras civilizações e exerce papel essencial na organização dos espaços destinados à habitação, ao trabalho e às demais atividades humanas. Ao longo desse processo, diferentes sistemas construtivos foram desenvolvidos e aperfeiçoados com o objetivo de conciliar segurança, eficiência estrutural, racionalização dos recursos e viabilidade econômica. Entre eles, a alvenaria estrutural destaca-se por sua utilização em diferentes períodos históricos, estando presente tanto em construções históricas como as Pirâmides de Gizé, a Grande Muralha da China ou a Catedral de Notre-Dame de Paris (Figura 1) quanto em empreendimentos contemporâneos de diferentes portes.

Figura 1 – Construções históricas em alvenaria estrutural



Fonte: Compilação do autor (2026), com imagens de Pixabay, 2017

No Brasil, a alvenaria estrutural ganhou maior relevância nas últimas décadas, impulsionada, entre outros fatores, pela expansão dos programas habitacionais e pela busca por sistemas construtivos racionalizados e economicamente competitivos

(SANTOS; SANTOS, 2022). Nesse sistema, as paredes integram a estrutura resistente da edificação, transmitindo as cargas dos pavimentos superiores até as fundações. Por essa razão, alterações em sua geometria podem modificar significativamente o caminho percorrido pelos esforços internos.

Entre essas alterações, destacam-se as aberturas destinadas a portas e janelas, que interrompem a continuidade da parede e introduzem descontinuidades no campo de tensões. Como consequência, verificam-se concentrações de esforços em torno dos vãos, principalmente em seus cantos, tornando essas regiões suscetíveis ao desenvolvimento de fissuras. Sampaio (2010) identificou elevados níveis de tensões principais nessas áreas, evidenciando a necessidade de elementos que favoreçam a transferência dos esforços para trechos menos solicitados da parede. A Figura 2 apresenta um exemplo de fissuração junto à extremidade de uma abertura executada sem contraverga.

Figura 2 – Janela com fissuração em extremidade



Fonte: Arquivo do autor, 2026

Sob o ponto de vista da Mecânica das Estruturas, as proximidades das aberturas podem ser classificadas como regiões de descontinuidade, ou regiões D, nas quais as hipóteses simplificadoras aplicáveis a trechos submetidos predominantemente à compressão não representam adequadamente o comportamento estrutural. Embora o Princípio de Saint-Venant indique que os efeitos

localizados tendem a diminuir com o afastamento da descontinuidade, a transmissão dos esforços junto ao vão depende da existência de elementos capazes de conduzi-los à alvenaria adjacente.

Para essa finalidade, são empregadas vergas e contravergas, posicionadas, respectivamente, acima e abaixo das aberturas. Apesar de sua utilização amplamente difundida, ainda existem incertezas quanto à definição de algumas de suas dimensões. A NBR 16868-1 (ABNT, 2020) apresenta procedimentos para o dimensionamento desses elementos, mas não estabelece um critério específico para o comprimento de transpasse, correspondente ao trecho que se prolonga além dos limites da abertura e promove a transferência dos esforços para a parede.

Na prática profissional, essa dimensão costuma ser definida com base na experiência do projetista ou em recomendações empíricas. Entretanto, tais recomendações nem sempre são fundamentadas em análises que considerem sua influência sobre o comportamento conjunto da parede, especialmente em sistemas de alvenaria estrutural constituídos por blocos cerâmicos. Grande parte dos estudos disponíveis concentra-se em alvenarias de vedação ou em painéis executados com blocos de concreto, indicando a necessidade de investigações direcionadas a essa tipologia construtiva.

Diante dessa lacuna, estabelece-se como questão de pesquisa: de que maneira o comprimento de transpasse de vergas e contravergas influencia a distribuição das tensões e os deslocamentos em paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos com aberturas, e qual extensão de transpasse é capaz de reduzir de forma satisfatória as concentrações de tensão geradas nas proximidades do vão?

Como hipótese inicial, considerou-se que o aumento do comprimento de transpasse ampliaria a região de transferência dos esforços das vergas e contravergas para a alvenaria adjacente, promovendo uma redução progressiva das concentrações de tensão nas proximidades da abertura. Partiu-se, portanto, da expectativa de que o aumento do transpasse resultaria em melhoria do comportamento mecânico do painel e permitiria identificar, entre as configurações analisadas, uma extensão capaz de proporcionar uma distribuição mais favorável das tensões.

Para investigar essa hipótese, empregou-se a modelagem numérica pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), que possibilita analisar os campos de tensões,

os deslocamentos e a interação entre os diferentes componentes da estrutura sob condições controladas de carregamento. Foram simuladas diferentes configurações de comprimento de transpasse e níveis de carregamento representativos de edificações com múltiplos pavimentos, buscando identificar a influência dessa variável sobre o comportamento mecânico da parede e fornecer subsídios para o pré-dimensionamento desses elementos.

1.1. Justificativa

Embora as vergas e contravergas sejam amplamente empregadas em paredes de alvenaria estrutural, a definição de seu comprimento de transpasse ainda carece de critérios específicos. A NBR 16868-1 (ABNT, 2020) estabelece procedimentos para o dimensionamento de vergas como elementos submetidos predominantemente à flexão, mas não determina quanto esses componentes devem avançar além das extremidades das aberturas.

Consequentemente, essa dimensão costuma ser estabelecida a partir da experiência profissional ou de recomendações empíricas, algumas delas desenvolvidas para alvenarias de vedação ou para sistemas com características distintas das paredes estruturais de blocos cerâmicos. Essa prática dificulta a avaliação da adequação dos comprimentos empregados e de sua influência sobre o funcionamento conjunto da verga, da contraverga e da parede.

A relevância da investigação também decorre do efeito das aberturas sobre a capacidade resistente dos painéis. Tripathy e Singhal (2024) evidenciam que a presença de vãos modifica a transmissão das cargas e pode reduzir o desempenho estrutural da alvenaria. Nesse contexto, o comprimento de transpasse constitui uma variável capaz de interferir na transferência dos esforços entre os elementos de reforço e os trechos adjacentes da parede.

Apesar de sua importância prática, ainda são limitados os estudos que analisam sistematicamente essa variável em paredes estruturais executadas com blocos cerâmicos. A modelagem numérica pelo Método dos Elementos Finitos permite comparar diferentes configurações sob condições equivalentes de geometria, materiais e carregamento, contribuindo para identificar alterações nos níveis de tensão e nos deslocamentos dos componentes avaliados.

Assim, esta pesquisa justifica-se pela necessidade de ampliar a compreensão sobre a influência do comprimento de transpasse no comportamento mecânico de vergas e contravergas. Os resultados pretendem fornecer uma base técnica para a avaliação das recomendações atualmente utilizadas e apoiar o desenvolvimento de critérios de pré-dimensionamento mais adequados à alvenaria estrutural de blocos cerâmicos.

1.2. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é analisar, por meio da modelagem numérica pelo Método dos Elementos Finitos, a influência do comprimento de transpasse de vergas e contravergas sobre o comportamento mecânico de paredes de alvenaria estrutural constituídas por blocos cerâmicos, buscando fornecer subsídios técnicos para o pré-dimensionamento desses elementos.

Para alcançar esse objetivo, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

a) realizar levantamento bibliográfico sobre o comportamento de paredes de alvenaria estrutural com aberturas, a atuação de vergas e contravergas e a aplicação do Método dos Elementos Finitos, reunindo também dados experimentais disponíveis na literatura para a caracterização dos materiais utilizados na modelagem;
b) definir os parâmetros mecânicos necessários à representação dos materiais constituintes da alvenaria estrutural, com base em dados experimentais, normas técnicas e literatura especializada;
c) desenvolver, no software ANSYS, um modelo computacional em elementos finitos capaz de representar o comportamento mecânico de paredes de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos, vergas e contravergas, utilizando parâmetros obtidos na literatura;
d) aplicar o modelo computacional à simulação de paredes de alvenaria estrutural com abertura, submetidas a diferentes níveis de carregamento representativos de edificações com múltiplos pavimentos;
e) realizar uma análise paramétrica de diferentes comprimentos de transpasse de vergas e contravergas, verificando a influência dessa variação geométrica sobre o comportamento mecânico da parede;
f) avaliar as configurações simuladas por meio da análise das tensões e dos deslocamentos desenvolvidos na alvenaria, nas vergas, nas contravergas, nas armaduras e nas regiões adjacentes à abertura, sob diferentes condições de carregamento;
g) identificar, entre as configurações analisadas, aquela que apresenta o melhor desempenho mecânico e, com base nos resultados obtidos, fornecer

subsídios para o pré-dimensionamento de vergas e contravergas em paredes de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos.

1.3. Organização do texto

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos.

O primeiro capítulo apresenta a introdução do trabalho, contextualizando o tema da pesquisa e o problema investigado. São apresentadas a questão de pesquisa, a hipótese inicial adotada, a justificativa, os objetivos geral e específicos e a estrutura da dissertação.

O segundo capítulo apresenta a fundamentação teórica da pesquisa, reunindo o levantamento bibliográfico relacionado à alvenaria estrutural com blocos cerâmicos, ao comportamento de paredes com aberturas, à função estrutural de vergas e contravergas, aos mecanismos de redistribuição de tensões e à aplicação do Método dos Elementos Finitos na análise numérica desses sistemas.

O terceiro capítulo descreve os materiais e métodos empregados na pesquisa. São apresentados os dados geométricos dos blocos e dos painéis analisados, as propriedades mecânicas dos materiais, os elementos finitos utilizados, as condições de contato, a estratégia de discretização da malha, as condições de contorno, os carregamentos adotados e as tipologias de transpasse avaliadas.

O quarto capítulo apresenta os resultados das simulações numéricas e a discussão do comportamento mecânico dos modelos. Nesse capítulo são analisados os campos de tensões nos blocos cerâmicos, vergas, contravergas e argamassa, bem como os deslocamentos dos painéis e a influência do comprimento de transpasse sobre a redistribuição dos esforços nas regiões próximas à abertura. Ao final, é apresentada uma síntese comparativa das tipologias estudadas.

O quinto capítulo apresenta as conclusões da pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros. São discutidas as principais contribuições do estudo, as limitações da modelagem adotada e possíveis linhas de investigação relacionadas ao aprimoramento da análise numérica, à validação experimental e ao estudo de alternativas de reforço localizado em regiões adjacentes às aberturas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica utilizada no desenvolvimento da pesquisa. Inicialmente, são abordados os principais conceitos relacionados à alvenaria estrutural, às vergas e contravergas e ao comportamento das paredes nas regiões próximas às aberturas. Em seguida, são discutidos os fundamentos da modelagem computacional pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), além de estudos experimentais e numéricos relacionados ao comportamento mecânico da alvenaria estrutural.

A construção do referencial bibliográfico teve início com uma etapa de busca sistematizada realizada em 2024 nas bases Google Acadêmico e *ScienceDirect*. Foram utilizadas combinações de termos relacionadas à alvenaria estrutural, vergas e modelagem por elementos finitos, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – *Strings* de pesquisa para revisão sistemática

Base de Dados	***String* de Pesquisa**	**Trabalhos Obtidos**
Google Acadêmico	“alvenaria estrutural” “verga” “elementos finitos	62
	“structural masonry” “lintel” “finite elements”	50
ScienceDirect	“structural masonry” “lintel” “finite elements”	8
	“structural masonry” “finite elements”	50
	“lintel” “finite elements”	107

Fonte: Dados da pesquisa, 2026

Os registros obtidos foram organizados com auxílio do software StArt. Após a remoção das duplicidades, foram reunidas 249 referências, que passaram por uma etapa de triagem considerando sua relação com o tema e com os objetivos da pesquisa. Foram descartados os trabalhos que não apresentavam relação direta com o escopo investigado.

A busca inicial teve principalmente a função de fornecer um ponto de partida para a construção do referencial teórico. Ao longo do desenvolvimento da pesquisa, esse levantamento foi complementado por buscas direcionadas e pela consulta a livros, normas técnicas, dissertações, teses e outros trabalhos considerados relevantes para aspectos específicos da modelagem e da discussão dos resultados.

Essas fontes complementares passaram a compor parcela importante da fundamentação bibliográfica utilizada na versão final do trabalho.

2.1. Alvenaria estrutural

A alvenaria estrutural pode ser definida como um sistema construtivo no qual as paredes desempenham simultaneamente as funções de vedação e de resistência estrutural, sendo responsáveis por receber as ações atuantes na edificação e transmiti-las às fundações. Tradicionalmente, esse sistema é constituído por blocos ou tijolos unidos por juntas de argamassa. Entretanto, o desenvolvimento de novos sistemas construtivos possibilitou o surgimento de soluções baseadas em blocos de encaixe, que dispensam ou reduzem o uso de argamassa de assentamento. Independentemente da tecnologia empregada, o princípio estrutural permanece o mesmo: os elementos de alvenaria constituem o principal caminho resistente da edificação (Tauil e Nese, 2010).

A utilização da alvenaria estrutural remonta às primeiras civilizações, estando presente em construções históricas de grande porte distribuídas em diferentes regiões do mundo. Ao longo dos séculos, esse sistema construtivo passou por sucessivos processos de aperfeiçoamento, incorporando avanços nos materiais, nos métodos executivos e nos critérios normativos, o que possibilitou sua ampla aplicação em edificações contemporâneas.

O sistema de alvenaria estrutural é composto, essencialmente, por blocos estruturais, argamassa de assentamento, graute e armaduras. Os blocos constituem o elemento resistente básico do sistema, enquanto a argamassa promove a ligação entre as unidades e contribui para a uniformização da transmissão das tensões. O graute e as armaduras são empregados de forma localizada, conforme definido em projeto, com a finalidade de aumentar a capacidade resistente e assegurar o desempenho estrutural em regiões submetidas a maiores solicitações, como vergas, contravergas, pilaretes e cintas de amarração.

O desempenho desse sistema depende diretamente das propriedades mecânicas de seus componentes, especialmente dos blocos estruturais, cujas características influenciam a resistência, a rigidez e o comportamento global da alvenaria. No Brasil, esses requisitos são estabelecidos pela NBR 16868-1 (ABNT,

2020), que apresenta os critérios mínimos para caracterização dos blocos destinados à alvenaria estrutural. A Tabela 2 reúne as principais propriedades normativas referentes aos blocos cerâmicos estruturais, por constituírem os elementos utilizados nas modelagens desenvolvidas nesta pesquisa.

Tabela 2 – Propriedades dos blocos cerâmicos estruturais segundo a NBR 16868-1

Componente	Propriedade	Valor
Bloco cerâmico	Módulo de deformação longitudinal	600 f_{pk}
	Coeficiente de Poisson	0,15

Nota: f_{pk} = resistência característica à compressão simples do prisma de alvenaria.

Fonte: Adaptada de ABNT, 2020

Além dos critérios estabelecidos em norma, outros pesquisadores brasileiros têm investigado as propriedades mecânicas dos blocos cerâmicos estruturais produzidos no país, evidenciando a influência do processo de fabricação sobre o desempenho da alvenaria. Entre esses estudos, destaca-se o trabalho de Miller (2008), que realizou uma caracterização experimental detalhada de blocos cerâmicos produzidos na região Norte Fluminense, avaliando a influência da qualidade da queima nas propriedades mecânicas do material. Os resultados obtidos também subsidiaram o desenvolvimento de modelos numéricos representativos do comportamento da alvenaria, constituindo uma das principais bases para a calibração do modelo computacional adotado nesta pesquisa.

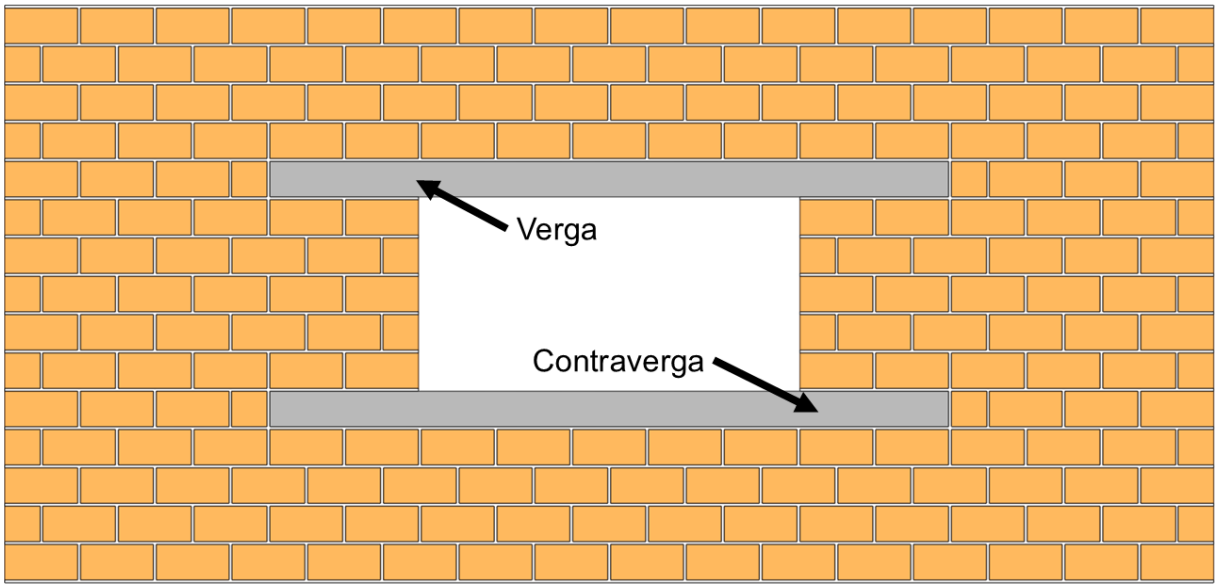
Considerando que as paredes representam os principais elementos resistentes da alvenaria estrutural, alterações em sua geometria modificam o caminho de transmissão das cargas e o comportamento do sistema. Entre essas alterações, destacam-se as aberturas para portas e janelas, que introduzem descontinuidades responsáveis pela concentração e redistribuição das tensões. Nesse contexto, tornam-se necessários elementos capazes de conduzir esses esforços para regiões menos solicitadas da parede, como as vergas e contravergas, discutidas no item seguinte.

2.2. Vergas e contravergas

A introdução de aberturas para portas e janelas representa uma das principais descontinuidades presentes em paredes de alvenaria estrutural. Essas aberturas interrompem a continuidade do painel resistente e alteram o caminho natural de transmissão das cargas verticais, promovendo concentrações localizadas de tensões, principalmente nos cantos dos vãos. Quando esses esforços não são adequadamente redistribuídos, podem ocorrer fissuras, deslocamentos localizados e comprometimento do desempenho estrutural da parede.

Com o objetivo de minimizar esses efeitos, empregam-se vergas e contravergas, elementos estruturais responsáveis por redistribuir os esforços ao redor das aberturas. De acordo com a NBR 16868-1 (ABNT, 2020), a verga é definida como uma "*viga alojada sobre abertura de porta ou janela, com a função exclusiva de transmissão de cargas verticais para os apoios adjacentes à abertura*", enquanto a contraverga corresponde ao "*elemento estrutural armado colocado sob o vão de abertura, com a função de prevenir a fissuração nos seus cantos*". A Figura 3 apresenta a disposição desses elementos em uma abertura de janela.

Figura 3 – Representação de verga e contraverga em vão de janela



Fonte: Elaborada pelo autor, 2026

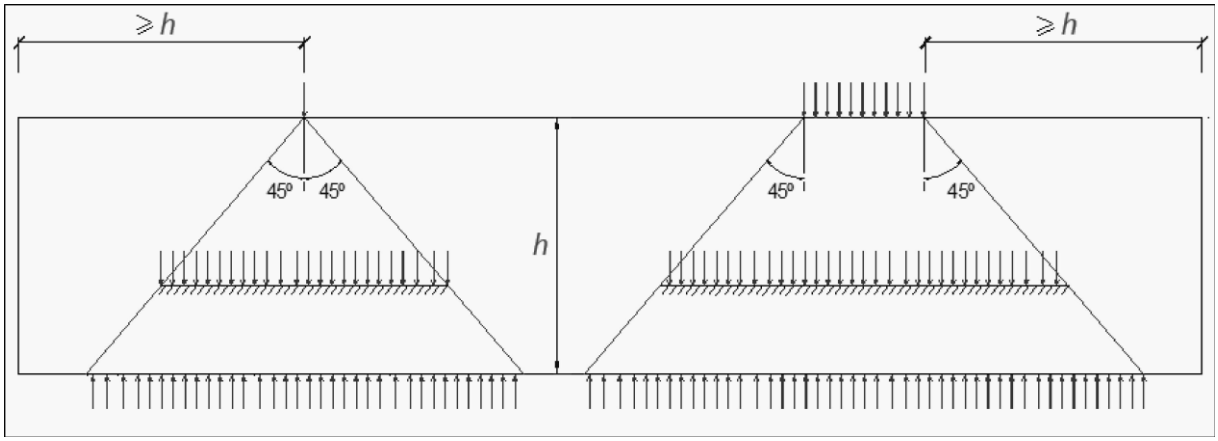
Embora atuem de forma complementar, esses elementos exercem funções distintas. A verga possui função estrutural predominante, recebendo as cargas provenientes da alvenaria localizada acima da abertura e redistribuindo-as para as regiões laterais da parede. A contraverga, por sua vez, atua principalmente na redução das tensões de tração desenvolvidas abaixo dos vãos, contribuindo para minimizar o aparecimento de fissuras nos cantos inferiores das aberturas e aumentar a rigidez local do painel.

2.2.1. Redistribuição das tensões nas aberturas

Para compreender a função estrutural das vergas, é necessário analisar inicialmente a forma como as cargas são transmitidas através da alvenaria. Em paredes contínuas, as ações verticais propagam-se em direção à fundação por meio da própria alvenaria, distribuindo-se gradualmente ao longo do painel. Entretanto, a presença de uma abertura interrompe esse caminho resistente, obrigando as tensões a contornarem o vão e produzindo concentrações de esforços nas regiões adjacentes.

A NBR 16868-1 (ABNT, 2020) representa esse comportamento por meio de um modelo simplificado de dispersão das tensões verticais, apresentado na Figura 4. Nesse modelo, admite-se que as cargas se propagam segundo uma inclinação de aproximadamente 45°, delimitando uma região triangular responsável pela parcela da alvenaria que descarrega diretamente sobre a verga.

Figura 4 – Dispersão de ações verticais: NBR 16868-1

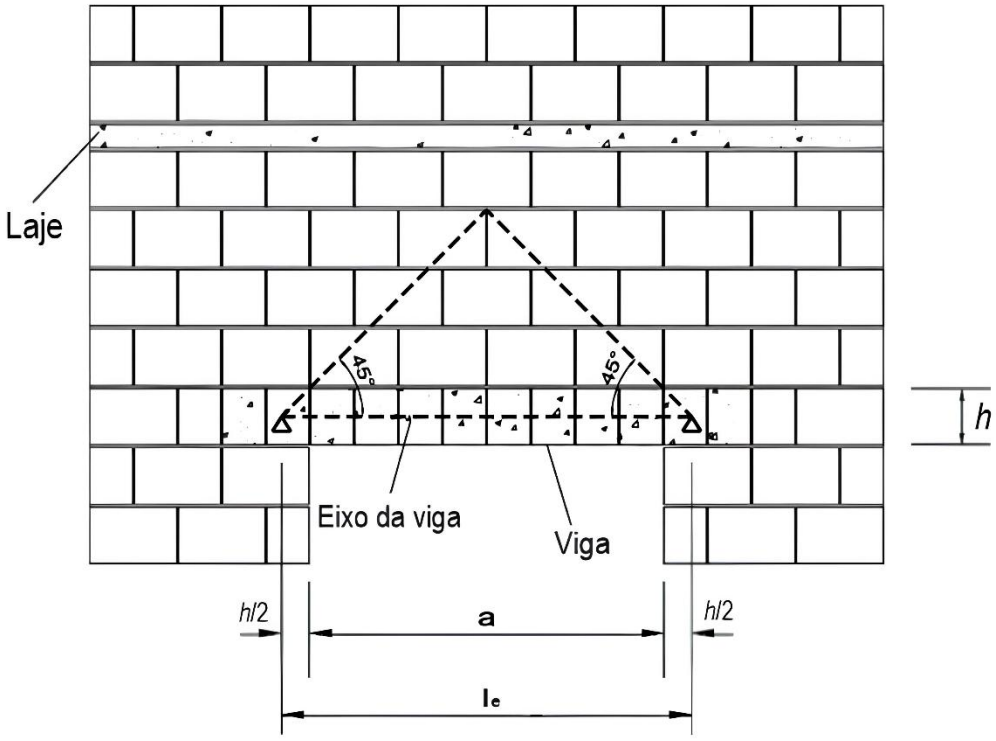


Nota: h = altura do trecho do elemento considerada na dispersão das ações verticais.

Fonte: ABNT, 2020

A partir desse conceito, a norma estabelece a região considerada para determinação das cargas atuantes sobre vigas localizadas acima dos vãos, conforme ilustrado na Figura 5. Observa-se que essa região não se limita apenas à largura da abertura, abrangendo também parte do comprimento de transpasse da verga. Além disso, caso existam carregamentos acima da região triangular de dispersão, essas ações também passam a contribuir para o carregamento considerado no dimensionamento do elemento.

Figura 5 – Determinação da região de carregamento da verga: NBR 16868-1



Nota: h = altura da verga (viga sobre a abertura); a = vão livre da abertura; l_e = vão efetivo da verga.

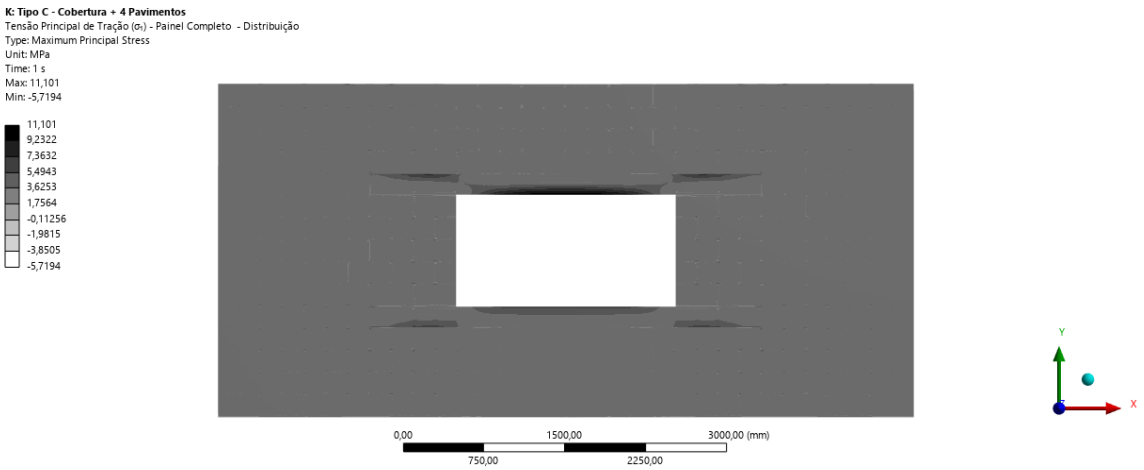
Fonte: ABNT, 2020

O modelo apresentado pela norma constitui uma representação simplificada destinada à determinação das ações verticais incidentes sobre a verga. Entretanto, sua finalidade restringe-se à definição do carregamento atuante sobre o elemento estrutural, não contemplando explicitamente a influência da interação mecânica entre o comprimento de transpasse e a alvenaria adjacente durante a redistribuição desses esforços. Dessa forma, embora o modelo estabeleça quais cargas devem ser

consideradas no dimensionamento, ele não descreve o comportamento estrutural desenvolvido na região de apoio da verga.

A influência das aberturas sobre a distribuição das tensões pode ser observada na Figura 6, que apresenta o campo de tensões principais de tração (σ_1) em um painel de alvenaria estrutural com abertura, verga e contraverga. Observa-se que as maiores tensões trativas se concentram nas regiões imediatamente superior e inferior ao vão, especialmente nas proximidades das extremidades dos elementos de transição. Esse comportamento indica que a abertura modifica o fluxo resistente da parede e gera campos localizados de tração, associados às regiões de descontinuidade do painel.

Figura 6 – Distribuição das tensões de tração em painel de alvenaria estrutural com abertura, verga e contraverga



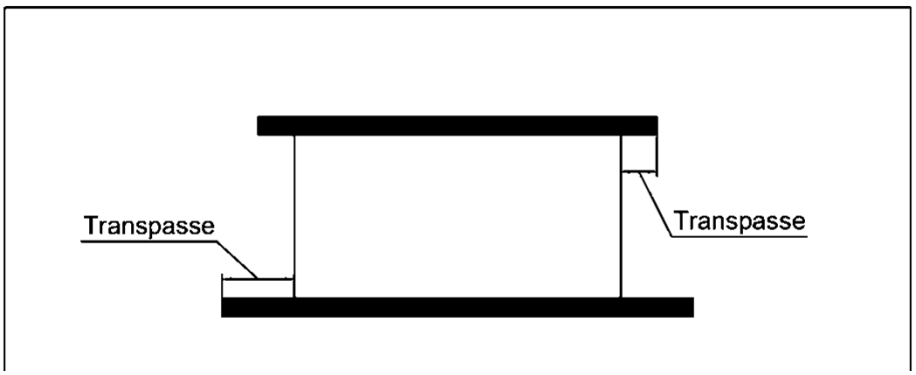
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

2.2.2. Dimensionamento de vergas e contravergas

O dimensionamento estrutural das vergas é realizado de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 16868-1 (ABNT, 2020), que trata esses elementos como vigas submetidas predominantemente à flexão. A determinação das ações atuantes baseia-se na região de dispersão de tensões apresentada anteriormente, permitindo estimar a parcela da alvenaria responsável pelo carregamento da verga. Entretanto, embora a norma estabeleça critérios para o

cálculo estrutural desses elementos, ela não apresenta recomendações específicas para definição do comprimento de transpasse, ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Representação de transpasse em abertura



Fonte: Elaborada pelo autor, 2026

O comprimento de transpasse corresponde ao trecho da verga que se prolonga além dos limites da abertura, permitindo que os esforços sejam gradualmente transferidos para a alvenaria adjacente. Como observado no modelo de dispersão de cargas da própria norma, parte desse trecho também participa da região de transmissão dos carregamentos provenientes da parede, ao mesmo tempo em que permanece inserido na continuidade do painel estrutural. Dessa forma, o transpasse não representa apenas um comprimento adicional de apoio, mas uma região de interação entre a verga e a alvenaria, cuja influência sobre o comportamento mecânico do sistema mostrou-se ainda pouco discutida na literatura.

Na ausência de critérios específicos na norma vigente para definição do comprimento de transpasse de vergas e contravergas, recomendações de caráter prático são frequentemente utilizadas no pré-dimensionamento desses elementos. Sánchez (2013), ao discutir a normalização brasileira para alvenaria estrutural, indica que o dimensionamento de vergas e contravergas poderia seguir o modelo anteriormente preconizado pela NBR 10837 (ABNT, 1989), norma posteriormente substituída pela NBR 15961 (ABNT, 2011) e, mais recentemente, pela NBR 16868-1 (ABNT, 2020). Para fins de pré-dimensionamento, o autor sugere que o comprimento total da peça seja adotado como a largura do vão acrescida de quatro módulos dimensionais, considerando-se o transpasse necessário nos cantos das aberturas e o apoio da peça nas paredes.

Na modulação usual da alvenaria estrutural, essa recomendação equivale, aproximadamente, à adoção de duas unidades de alvenaria como transpasse em cada extremidade da abertura. Embora constitua uma referência técnica relevante para o pré-dimensionamento, essa abordagem não trata de forma específica da influência do comprimento de transpasse sobre a redistribuição das tensões ou sobre a interação mecânica entre a verga e a alvenaria adjacente.

Além da recomendação apresentada por Sánchez (2013), diferentes critérios são encontrados para sistemas de alvenaria de vedação. Segundo Montes *et al*. (2020), a NBR 8545 (ABNT, 1984) estabelece um transpasse mínimo de 20 cm para vergas e contravergas. Outros critérios adotam comprimentos fixos de 20 cm para vergas e 30 cm para contravergas, enquanto algumas recomendações utilizam valores proporcionais à largura do vão, como largura/10 ou 10 cm para vergas e largura/5 ou 30 cm para contravergas, prevalecendo sempre o maior valor obtido. Embora esses critérios pertençam ao contexto da alvenaria de vedação, sua apresentação torna-se relevante por apontar a variedade de recomendações práticas existentes para a definição do transpasse desses elementos.

Observa-se, portanto, que as recomendações disponíveis para o pré-dimensionamento de vergas e contravergas concentram-se, em geral, na definição de comprimentos mínimos de apoio ou em critérios geométricos simplificados. Entretanto, permanece pouco explorada a influência do comprimento de transpasse sobre o comportamento mecânico desses elementos em paredes de alvenaria estrutural, especialmente no que se refere à redistribuição das tensões, ao desenvolvimento dos esforços internos e à interação mecânica entre o transpasse e a alvenaria adjacente. A compreensão desses mecanismos constitui uma das principais motivações desta pesquisa e fundamenta as análises numéricas apresentadas nos capítulos seguintes.

2.3. Regiões de descontinuidade e Princípio de Saint-Venant

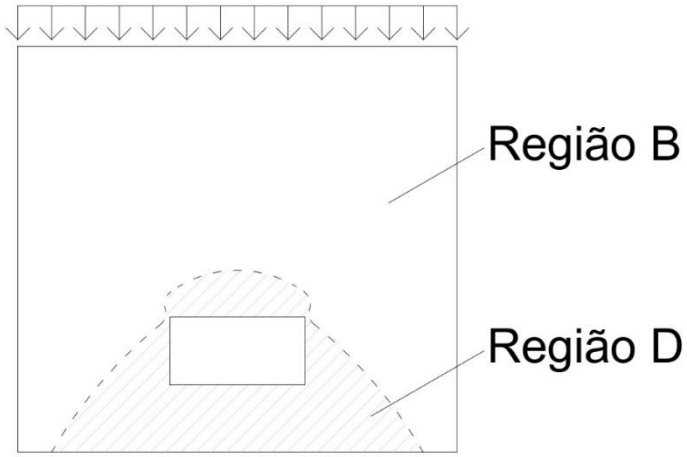
Conforme discutido nos itens anteriores, a presença de aberturas para portas e janelas altera o caminho natural de transmissão das cargas em paredes de alvenaria estrutural. Em um painel contínuo, submetido predominantemente à compressão, as tensões tendem a se distribuir de maneira mais regular ao longo da parede.

Entretanto, quando uma abertura é introduzida, essa continuidade é interrompida, obrigando os esforços a contornarem o vão e gerando concentrações localizadas de tensões nas regiões adjacentes à abertura.

Schlaich et al. (1987), no contexto do concreto estrutural, distinguem as estruturas em regiões B e D. Nas regiões B, associadas à hipótese de Bernoulli, considera-se válida a hipótese de que as seções permanecem planas após a deformação, permitindo a utilização das formulações usuais da teoria de vigas. As regiões D, por outro lado, correspondem às zonas em que essa hipótese deixa de representar adequadamente o comportamento estrutural em razão da presença de descontinuidades geométricas ou estáticas, como mudanças bruscas de geometria, apoios e cargas concentradas.

Essa interpretação pode ser aplicada, do ponto de vista mecânico, às paredes de alvenaria estrutural com aberturas. O vão constitui uma descontinuidade geométrica que altera a trajetória das tensões no painel, fazendo com que as regiões próximas aos seus cantos apresentem campos de tensão mais complexos e concentrações localizadas de esforços. Dessa forma, essas regiões podem ser interpretadas como regiões D, enquanto as regiões suficientemente afastadas da abertura tendem a apresentar comportamento mais regular, associado às regiões B, conforme representado esquematicamente na Figura 8.

Figura 8 – Representação esquemática das regiões B e D em uma parede de alvenaria estrutural com abertura



Nota: Os limites indicados para a região D são apenas ilustrativos e não representam uma delimitação quantitativa de sua extensão.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2026

O comportamento das tensões nas proximidades dessas perturbações também pode ser compreendido à luz do Princípio de Saint-Venant. Segundo Hibbeler (2010), os efeitos localizados provocados pela forma de aplicação do carregamento ou pelas condições de apoio tendem a diminuir à medida que se aumenta a distância em relação à região de aplicação. Em pontos suficientemente afastados, distribuições de carregamento estaticamente equivalentes tendem a produzir estados de tensão semelhantes.

No caso das paredes analisadas neste trabalho, esse princípio auxilia na interpretação do caráter localizado das perturbações provocadas pela abertura. Nas proximidades do vão, a trajetória das tensões é fortemente modificada, enquanto, à medida que se aumenta a distância da região de descontinuidade, espera-se uma tendência de recuperação de um campo de tensões mais regular. Essa característica reforça a importância da análise detalhada das regiões próximas aos cantos da abertura e aos apoios das vergas e contravergas.

A interpretação dessas regiões como zonas de descontinuidade permite compreender por que o comportamento de uma verga não depende apenas da carga vertical que atua sobre ela. Embora os modelos simplificados de dimensionamento sejam importantes para estimar as ações transmitidas à verga, eles não descrevem integralmente a interação entre o elemento estrutural, o comprimento de transpasse e a alvenaria adjacente. Essa interação influencia a forma como os esforços são redistribuídos e pode alterar os campos de tensão desenvolvidos nas regiões próximas à abertura.

Nesse sentido, o comprimento de transpasse assume papel relevante no comportamento mecânico do conjunto. O trecho da verga embutido na alvenaria não atua apenas como apoio geométrico, mas também como região de transferência de esforços entre o elemento de concreto e a parede. Como essa região permanece parcialmente contida pelos blocos adjacentes, sua deformação e sua rotação podem ser restringidas em diferentes níveis, dependendo da extensão do transpasse e da rigidez relativa entre os componentes. Esse comportamento se aproxima de uma condição de apoio com restrição parcial, distinta da hipótese idealizada de apoio simplesmente articulado.

Dessa forma, a análise da redistribuição de tensões em torno de aberturas de alvenaria estrutural envolve um problema localizado, associado à presença de regiões

D e à interação entre diferentes componentes do sistema. Essa característica justifica o uso de modelos numéricos mais detalhados, capazes de representar a geometria dos blocos, as interfaces entre os materiais, os elementos de transição e os gradientes de tensão desenvolvidos nas proximidades do vão.

O Método dos Elementos Finitos torna-se, nesse contexto, uma ferramenta adequada para investigar esse tipo de comportamento, pois permite analisar a resposta estrutural do painel considerando a geometria real dos componentes e as condições de contato entre eles. Por meio dessa abordagem, é possível avaliar como diferentes comprimentos de transpasse influenciam a redistribuição das tensões, os deslocamentos e os mecanismos resistentes desenvolvidos nas regiões de abertura, fornecendo subsídios para uma interpretação mais completa do comportamento das vergas e contravergas em alvenaria estrutural.

2.4. Modelagem computacional

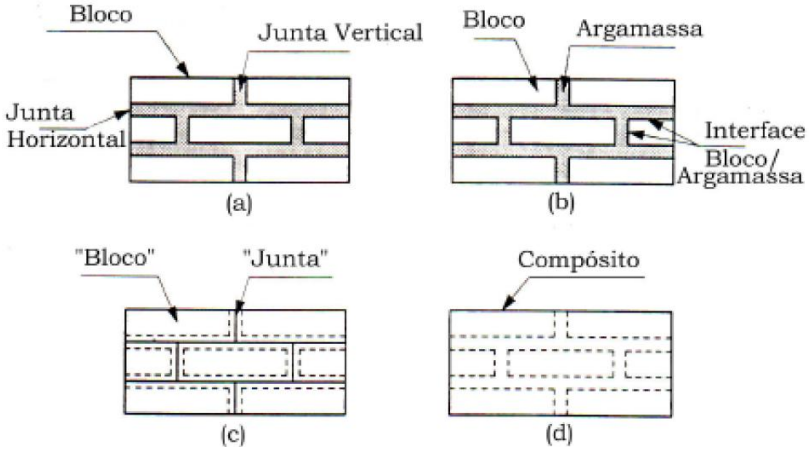
O Método dos Elementos Finitos (MEF) constitui uma ferramenta amplamente empregada na análise de estruturas, permitindo representar numericamente diferentes condições geométricas, materiais, carregamentos e vínculos. Segundo Alves Filho (2013), esse método possibilita avaliar o comportamento estrutural de forma controlada, aproximando o modelo numérico das condições reais por meio da discretização do domínio em elementos finitos. De modo geral, quanto maior o nível de detalhamento da malha e da geometria representada, maior tende a ser a capacidade do modelo em reproduzir variações locais de tensões e deformações. Entretanto, esse refinamento também aumenta o custo computacional, exigindo equilíbrio entre precisão e viabilidade de processamento.

No caso da alvenaria estrutural, a modelagem numérica apresenta desafios específicos em razão da natureza heterogênea do material. Peleteiro (2002) define a alvenaria como um material composto, formado pela associação entre blocos ou tijolos e juntas de argamassa. Essa composição resulta em um comportamento mecânico complexo, marcado pela diferença de rigidez entre os componentes, pela presença de interfaces e pela elevada resistência à compressão em comparação à baixa resistência à tração. Assim, a forma como esses componentes são representados no modelo influencia diretamente a resposta obtida na análise.

A modelagem de alvenarias pode ser realizada por diferentes estratégias, geralmente classificadas em micromodelagem detalhada, micromodelagem simplificada e macromodelagem, conforme representado na Figura 9. De acordo com Peleteiro (2002), essas abordagens podem ser definidas da seguinte forma:

a) micromodelagem detalhada: os blocos e as juntas de argamassa são representados separadamente por elementos contínuos, enquanto as interfaces entre os componentes podem ser modeladas por elementos descontínuos;
b) micromodelagem simplificada: os blocos são representados por elementos contínuos expandidos, enquanto as juntas de argamassa e as interfaces são incorporadas de forma simplificada ao modelo;
c) macromodelagem: a alvenaria é representada como um meio contínuo equivalente, no qual blocos, argamassa e interfaces são homogeneizados em um único material com propriedades médias.

Figura 9 – Métodos de modelagem da alvenaria: (a) Exemplo de alvenaria; (b) Micromodelagem detalhada; (c) Micromodelagem simplificada; (d) Macromodelagem



Fonte: Peleteiro, 2002

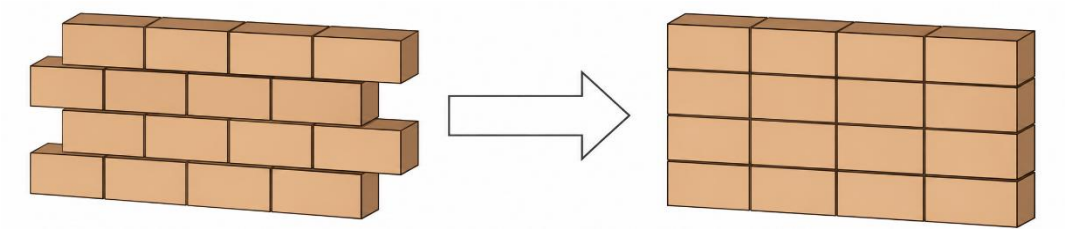
A escolha entre essas estratégias depende do objetivo da análise e do nível de detalhamento necessário. A micromodelagem é indicada quando se pretende investigar fenômenos localizados, como a concentração de tensões, o comportamento das interfaces e a resposta mecânica em regiões próximas a aberturas. Esse tipo de abordagem permite representar com maior precisão os gradientes de tensão

desenvolvidos em zonas de descontinuidade, sendo adequado para estudos que avaliam a influência de elementos como vergas, contravergas e juntas de argamassa.

Por outro lado, a macromodelagem costuma ser empregada quando o interesse principal está no comportamento global da estrutura, especialmente em modelos de grandes dimensões ou em análises nas quais o custo computacional da representação detalhada dos componentes se torna elevado. Nesse caso, a alvenaria é substituída por um material equivalente, cujas propriedades devem representar adequadamente o comportamento médio do conjunto. Para isso, é necessário adotar hipóteses de homogeneização compatíveis com o sistema analisado.

Barreto (2002) descreve algumas condições necessárias para que essa homogeneização represente adequadamente o comportamento da alvenaria, entre elas a aderência entre blocos e argamassa e a regularidade no arranjo das juntas. A Figura 10 apresenta uma representação esquemática desse processo. Embora a homogeneização reduza o custo computacional, ela tende a limitar a avaliação de efeitos locais, especialmente em regiões onde o fluxo de tensões é alterado por descontinuidades geométricas.

Figura 10 – Hipótese de homogeneização



Fonte: Adaptada de Barreto, 2002

Além da estratégia de representação geométrica, a modelagem computacional de alvenarias também depende da escolha do modelo constitutivo adotado para os materiais. Em análises voltadas à ruptura, fissuração ou comportamento pós-pico, torna-se necessário utilizar modelos não lineares capazes de representar a degradação de rigidez, a abertura de fissuras, o esmagamento localizado e a dissipação de energia durante o processo de dano. Nesses casos, parâmetros como energia de fratura, resistência à tração, resistência à compressão e critérios de ruptura passam a ter papel central na descrição do comportamento mecânico.

Entre os critérios utilizados na avaliação do comportamento de materiais frágeis, destaca-se o critério de Rankine, também denominado critério da máxima tensão de tração. Segundo Chen e Han (1988), esse critério considera que a falha por tração ocorre quando a máxima tensão principal em um ponto do material atinge sua resistência à tração, independentemente das demais tensões normais ou cisalhantes atuantes nos outros planos. Essa abordagem é particularmente associada a materiais que apresentam resistência à compressão significativamente superior à resistência à tração e comportamento frágil quando submetidos a esforços trativos.

No presente trabalho, o critério de Rankine é utilizado como base para a interpretação das tensões principais máximas (σ_1) desenvolvidas nos blocos cerâmicos e nas juntas de argamassa. Dessa forma, a comparação entre os valores de σ_1 e as resistências à tração adotadas para os materiais permite identificar regiões potencialmente críticas sob solicitação trativa. Essa avaliação possui caráter indicativo, uma vez que esses materiais foram representados em regime elástico linear e, portanto, não foi simulada explicitamente a propagação de fissuras ou a ruptura após o limite resistente.

Para materiais cuja resistência é influenciada pelo estado de pressão, Chen e Han (1988) apresentam o critério de Drucker-Prager como uma modificação do critério de von Mises que incorpora a influência da componente hidrostática do estado de tensões. Diferentemente de critérios independentes da pressão, o Drucker-Prager permite que a condição de escoamento varie de acordo com o nível de confinamento ao qual o material está submetido. No espaço das tensões principais, sua superfície de escoamento assume forma cônica e pode ser utilizada como uma aproximação contínua da superfície definida pelo critério de Mohr-Coulomb.

Nesta pesquisa, o modelo de Drucker-Prager foi utilizado na representação não linear do concreto empregado nas vergas e contravergas. Sua aplicação, portanto, difere do uso do critério de Rankine: enquanto este último serve como referência para a interpretação das tensões principais de tração nos componentes frágeis da alvenaria, o Drucker-Prager integra o modelo constitutivo adotado para o concreto. Os parâmetros utilizados nessa representação são apresentados no capítulo referente aos materiais e métodos.

No presente trabalho, a modelagem numérica foi direcionada à avaliação comparativa da redistribuição inicial das tensões em paredes de alvenaria estrutural

com diferentes comprimentos de transpasse de vergas e contravergas. Dessa forma, adotou-se uma abordagem tridimensional detalhada, capaz de representar separadamente os principais componentes do sistema e os gradientes de tensão nas regiões próximas à abertura. Embora modelos não lineares sejam mais adequados para estudos de ruptura e propagação de fissuras, a análise elástica linear permite avaliar, de forma controlada, a distribuição inicial das tensões e identificar as regiões mais solicitadas do painel, fornecendo subsídios para a comparação entre as tipologias analisadas.

Essa escolha mostrou-se coerente com o objetivo da pesquisa, uma vez que o foco não seria reproduzir o colapso da parede, mas compreender como diferentes comprimentos de transpasse influenciam a redistribuição das tensões, os deslocamentos e os mecanismos resistentes desenvolvidos em torno da abertura. Assim, a modelagem computacional atua como ferramenta de investigação do comportamento estrutural localizado, complementando os modelos simplificados de dimensionamento apresentados anteriormente.

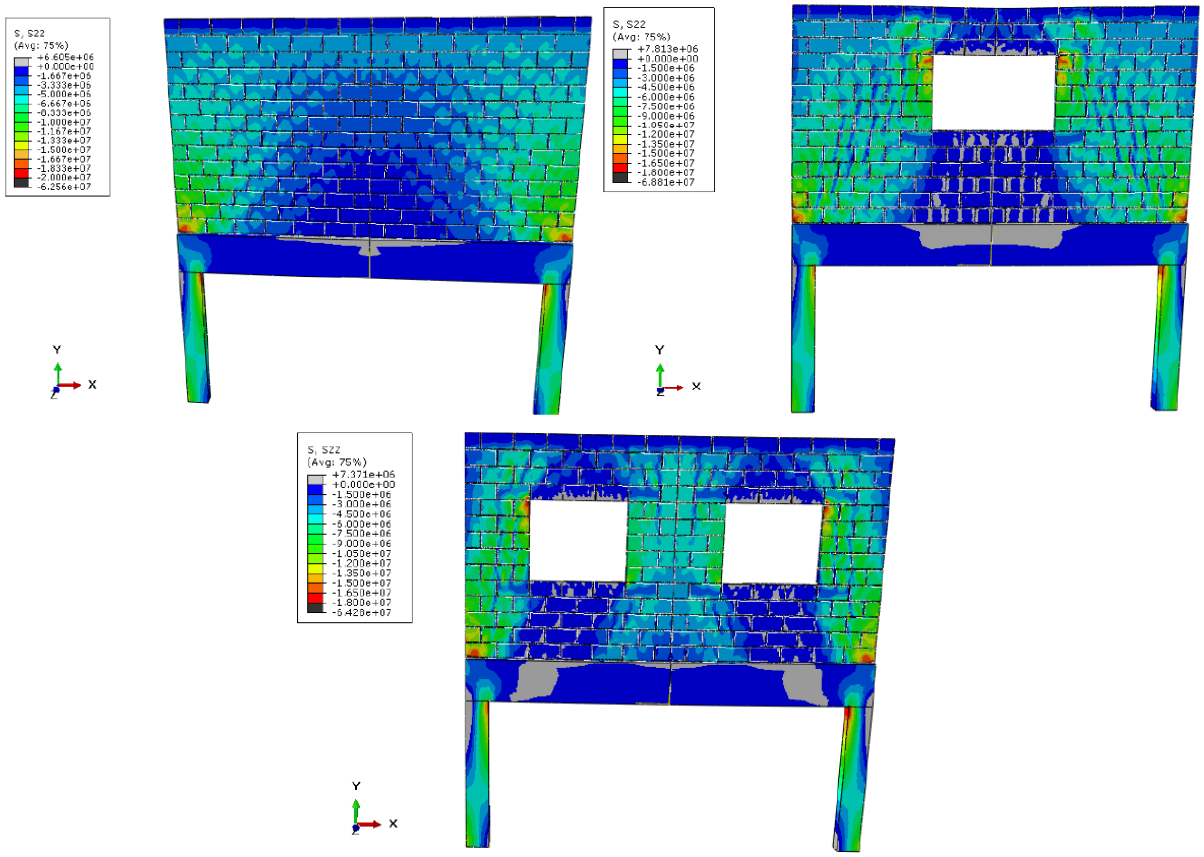
2.5. Estudos sobre modelagem computacional de alvenarias e aberturas

A modelagem computacional tem sido amplamente utilizada em estudos sobre alvenaria estrutural, tanto para avaliação do comportamento global de paredes quanto para análise de regiões localizadas de concentração de tensões. No caso de painéis com aberturas, essa abordagem permite investigar a influência dos vãos na redistribuição dos esforços, na redução da capacidade resistente e na formação de regiões críticas sujeitas à fissuração.

Entre os estudos voltados à influência das aberturas no comportamento de paredes de alvenaria estrutural, Dias et al. (2024) analisaram numericamente painéis apoiados sobre um pórtico, considerando modelos sem abertura, com uma abertura central e com duas aberturas. Os autores observaram que a presença e a disposição dos vãos alteram significativamente o caminho de transmissão das cargas para o sistema de apoio. No modelo com uma abertura central, o efeito de arco direcionou maior parcela dos esforços para as regiões próximas aos pilares, reduzindo em aproximadamente 40% a tensão máxima na viga de apoio em relação ao painel sem abertura. Já o modelo com duas aberturas apresentou comportamento mais

desfavorável, com tensões máximas cerca de 60% superiores. Esses resultados mostram que a influência das aberturas não se resume ao aumento das tensões, mas à alteração do fluxo resistente, cujos efeitos dependem da geometria do painel, da posição dos vãos e das condições de apoio.

Figura 11 – Distribuições de tensão em cada modelo de alvenaria estrutural: sem aberturas, com abertura central e com duas aberturas

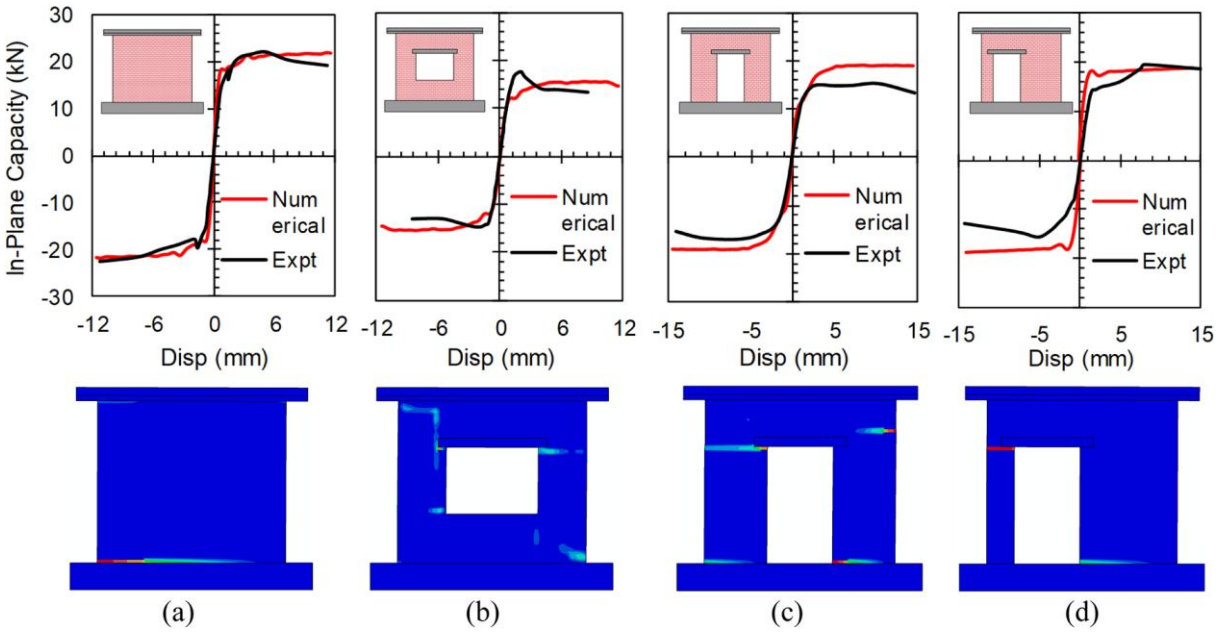


Fonte: Dias *et al.*, 2024

De forma complementar, Tripathy e Singhal (2024) investigaram experimental e numericamente a influência de aberturas na capacidade resistente no plano de paredes de alvenaria não armada. Os autores ensaiaram paredes sem abertura, com janela central, com porta central e com porta excêntrica, submetidas a carregamento cíclico quase-estático, como apresentado na Figura 12. Os resultados indicaram que a presença de aberturas reduziu a capacidade lateral dos painéis em aproximadamente 22% a 28%, além de diminuir a capacidade de dissipação de energia entre 10% e 42%. Os danos concentraram-se principalmente nas regiões

adjacentes aos vãos, com fissuras diagonais em escada nos cantos das aberturas e destacamento dos painéis laterais em modelos com porta. Em estudo paramétrico numérico, os autores observaram reduções de capacidade entre 6% e 82%, dependendo da dimensão, posição da abertura e propriedades da alvenaria. Embora o estudo esteja voltado ao comportamento no plano sob ações laterais, seus resultados reforçam a importância das aberturas como regiões de descontinuidade estrutural, nas quais a geometria do vão e a interação com os elementos adjacentes condicionam a resposta mecânica do painel.

Figura 12 – Modelos de paredes ensaiados e resultados



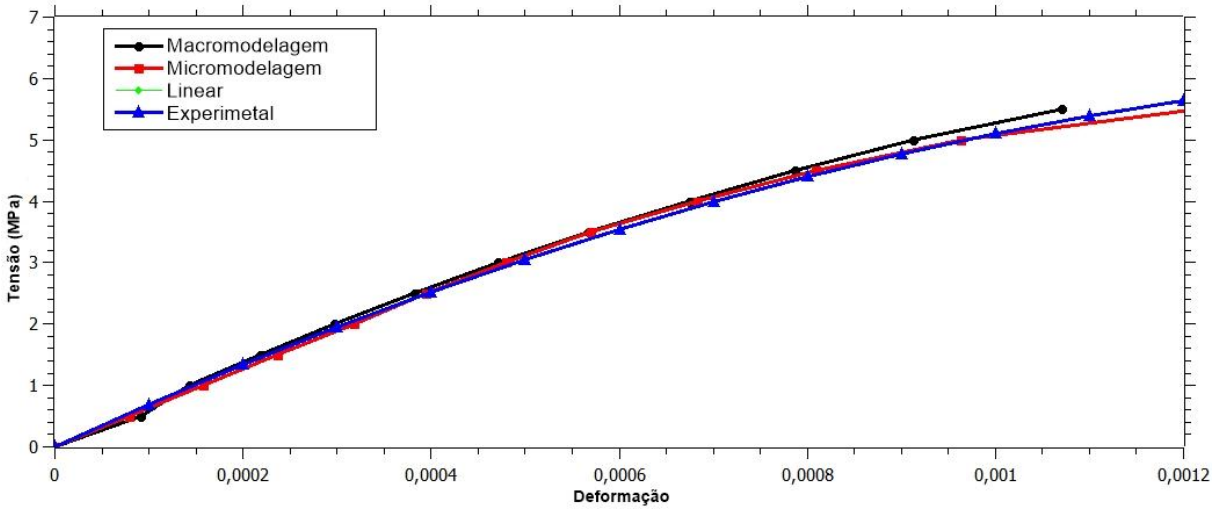
Fonte: Tripathy e Singhal, 2024

Também em estudo recente, Krtinić *et al.* (2025) analisaram, por meio do Método dos Elementos Finitos, o comportamento sísmico de paredes de alvenaria confinada com aberturas, executadas com blocos cerâmicos vazados e adesivo de poliuretano. Os autores desenvolveram um micromodelo tridimensional no *software Abaqus*, validado a partir de ensaios cíclicos em paredes em escala real, e posteriormente realizaram um estudo paramétrico considerando o tamanho e a posição das aberturas, a relação geométrica dos painéis e a presença de elementos de confinamento. Os resultados indicaram que a dimensão e o posicionamento dos vãos influenciaram negativamente a resposta estrutural das paredes, enquanto a presença de elementos de confinamento junto às aberturas contribuiu para reduzir

esses efeitos. Embora o estudo esteja voltado ao comportamento sísmico de alvenarias confinadas, seus resultados reforçam a importância da análise numérica detalhada para compreender como as aberturas modificam a distribuição dos esforços em paredes de alvenaria. Essa contribuição mostrou-se relevante para o presente trabalho por evidenciar que a influência das aberturas não depende apenas da presença do vão, mas também de sua geometria, posição e interação com os elementos estruturais adjacentes.

Santos e Santos (2022) avaliaram o uso de micro e macromodelagens na análise de paredes de alvenaria estrutural, comparando os resultados numéricos com dados experimentais. Entre os modelos estudados, foi considerada uma parede com vão de janela sem a presença de verga e contraverga, submetida a carregamento vertical. Os resultados indicaram boa aproximação entre os modelos numéricos e os dados experimentais, especialmente quanto ao comportamento global da parede. Além disso, os autores observaram concentração de esforços na região superior da abertura, comportamento compatível com os mecanismos de redistribuição de tensões discutidos anteriormente e que reforça a necessidade de elementos de transição, como as vergas. O gráfico presente na Figura 13 apresenta os resultados das modelagens elaboradas em comparação com os dados experimentais.

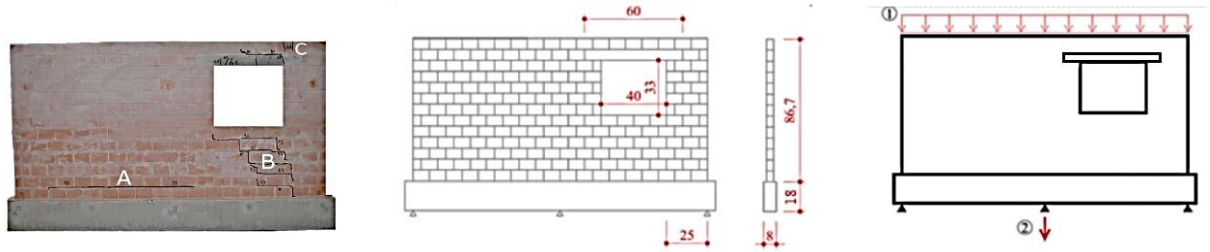
Figura 13 – Gráfico tensão-deformação das modelagens computacionais em comparação aos dados experimentais



Fonte: Adaptada de Santos e Santos, 2022

Oliveira e Andrade (2022) também compararam resultados experimentais e numéricos em painéis de alvenaria estrutural de tijolos cerâmicos, utilizando o software ANSYS. Os autores avaliaram modelos em micro e macromodelagem, apresentados na Figura 14, observando que ambas as abordagens apresentaram resultados semelhantes quanto às tensões normais. Entretanto, a macromodelagem apresentou limitações na representação dos efeitos de cisalhamento, devido à ausência de juntas individualizadas e à impossibilidade de representar adequadamente o deslizamento entre blocos. Esse resultado reforça a importância da escolha da estratégia de modelagem em função do fenômeno analisado, especialmente quando o objetivo envolve regiões de concentração de tensões e interação entre componentes.

Figura 14 – Modelagem de alvenaria estrutural: (a) representação experimental, (b) micromodelagem e (c) macromodelagem

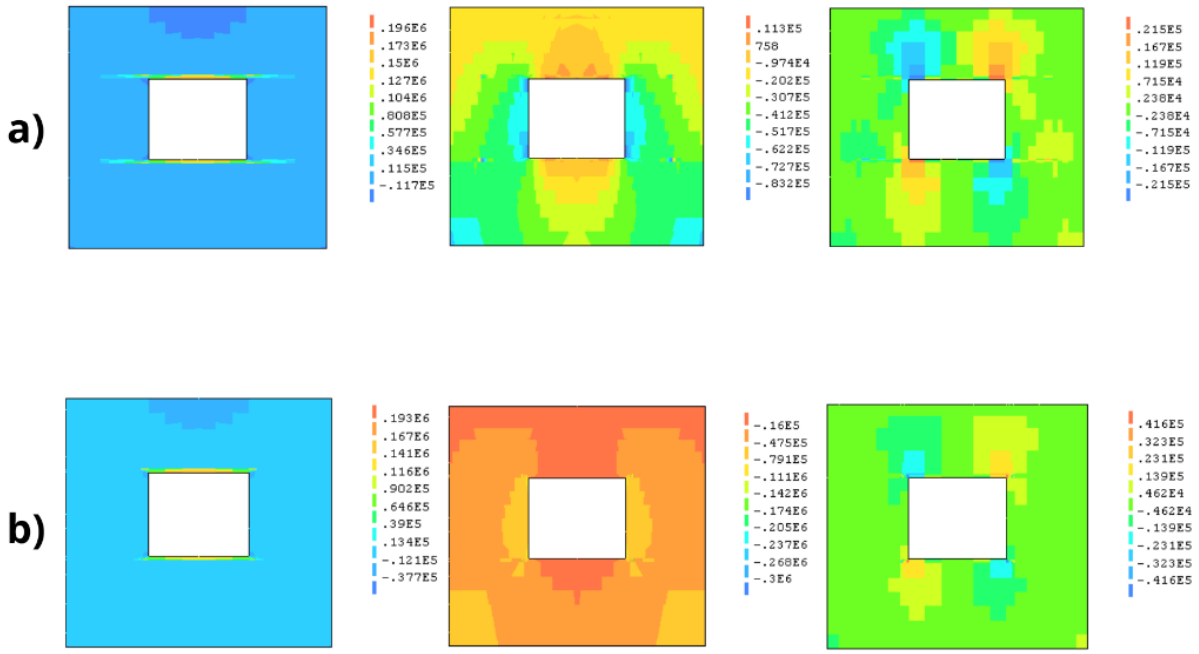


(a) (b) (c)

Fonte: Adaptado de Oliveira e Andrade, 2022

No que se refere especificamente à avaliação de vergas, contravergas e comprimentos de transpasse, Montes *et al*. (2020) estudaram as distribuições de tensão em paredes de alvenaria de vedação não estrutural compostas por blocos cerâmicos e elementos de concreto armado, como ilustrado na Figura 15. Os autores analisaram diferentes comprimentos de transpasse e observaram que o aumento do comprimento das vergas e contravergas reduziu a média das tensões distribuídas no painel. Com base nos resultados obtidos e considerando aspectos econômicos, os autores recomendaram a adoção de transpasse equivalente a 1/10 da largura do vão para vergas e contravergas. Embora o estudo tenha sido desenvolvido para alvenarias de fechamento, seus resultados contribuem para ilustrar que o comprimento desses elementos influencia a redistribuição das tensões ao redor das aberturas.

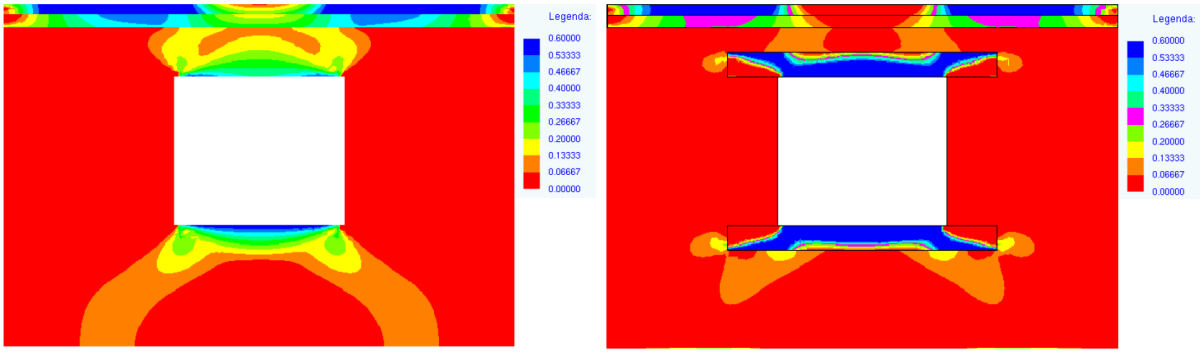
Figura 15 – Tensões σx, σy e τxy para vergas e contravergas com diferentes medidas de transpasse: a) 1/2 da largura da abertura; b) 1/10 da largura da abertura



Fonte: Adaptada de Montes *et al.*, 2020

Sampaio (2010) avaliou a ocorrência de fissuras em obras de alvenaria estrutural e identificou os contornos de aberturas como regiões de elevada incidência dessas manifestações. A partir dessa observação, foram elaborados modelos numéricos de paredes com aberturas de portas e janelas, considerando diferentes soluções de reforço, como vergas, contravergas, reforços laterais e cintas. Os resultados indicaram que as vergas e contravergas foram eficazes na redução das concentrações de tensões ao redor dos vãos, como observado na Figura 16. Para portas, a utilização de vergas mostrou-se suficiente para controlar a concentração de tensões; para janelas, as soluções com verga e contraverga simples apresentaram comportamento adequado, sem necessidade de substituição por cintas. Entretanto, o estudo não apresentou recomendações específicas para o comprimento de transpasse desses elementos, concentrando-se principalmente na avaliação da altura e da configuração dos reforços.

Figura 16 – Tensões em torno de aberturas sem e com vergas/contravergas



Fonte: Sampaio, 2010

Mughal *et al*. (2022) também avaliaram numericamente a influência das aberturas no comportamento de paredes de alvenaria, comparando painéis confinados e não confinados submetidos a ações laterais no plano. Os autores desenvolveram modelos tridimensionais no *software* ANSYS, por meio de micromodelagem simplificada, considerando paredes com aberturas centradas correspondentes a 0%, 1,85%, 3,66%, 10,91% e 16,5% da área do painel. Os resultados indicaram que o aumento da área de abertura reduziu significativamente a resistência e a rigidez das paredes, especialmente nos modelos não confinados. Para a maior abertura analisada, a redução da resistência lateral foi de 80,10% nas paredes não confinadas, enquanto nos modelos confinados essa redução foi limitada a 37,43%. Embora o estudo esteja voltado ao desempenho sísmico e à resistência no plano, seus resultados reforçam que a presença de aberturas altera de forma expressiva a resposta mecânica das paredes de alvenaria e que elementos estruturais adjacentes ao vão podem contribuir para reduzir os efeitos negativos dessas descontinuidades.

Mlybari *et al*. (2025) investigaram o reforço de paredes de alvenaria não armada com aberturas por meio de sistemas compostos por argamassa SHCC, malha de fibra de vidro e barras de aço externas. Os autores ensaiaram nove painéis com abertura central submetidos à compressão diagonal, conforme a ASTM E519 de 2010, avaliando diferentes configurações de reforço ao redor do vão. Os resultados indicaram que o uso de SHCC melhorou a ductilidade, o controle de fissuras e a capacidade resistente dos painéis, enquanto a orientação dos elementos de reforço influenciou significativamente o desempenho. O sistema híbrido, composto por malha de fibra de vidro em toda a superfície e barras diagonais, apresentou os melhores

resultados, com maior resistência, rigidez ao cisalhamento e aumento expressivo da energia absorvida. Embora o estudo esteja voltado ao reforço externo de paredes de alvenaria não armada sob ações no plano, seus resultados reforçam a importância das regiões adjacentes às aberturas como zonas críticas e demonstram que a disposição dos elementos de reforço ao redor do vão altera diretamente a redistribuição dos esforços.

De forma complementar, Ghalla *et al*. (2026) avaliaram o uso de telas de aço soldadas em paredes de alvenaria com aberturas, também submetidas à compressão diagonal, observando que o reforço contribuiu para redistribuir tensões, retardar a fissuração e aumentar a carga última, a rigidez e a energia absorvida. Esses estudos indicam que, embora as soluções de reforço variem quanto ao material e à técnica empregada, há convergência quanto à necessidade de tratar as aberturas como regiões de descontinuidade estrutural. A orientação, a extensão e a posição dos elementos de reforço ao redor do vão influenciam diretamente a redistribuição dos esforços e o controle das fissuras. Essa constatação se aproxima da abordagem desta dissertação, na qual se avalia não um reforço externo, mas o comprimento de transpasse das vergas e contravergas como variável associada à interação mecânica entre os elementos de redistribuição e a alvenaria adjacente.

Allen *et al*. (2017) investigaram numericamente paredes de alvenaria não armada com aberturas submetidas a esforços de cisalhamento no plano, comparando resultados experimentais em escala real com modelos não lineares desenvolvidos no *software* TNO DIANA. Os autores avaliaram estratégias de micromodelagem e macromodelagem, observando que ambas foram capazes de representar de forma razoável os modos de ruptura e as cargas máximas, embora tenham apresentado limitações na previsão da rigidez inicial e da ductilidade. A micromodelagem apresentou melhor correspondência com os resultados experimentais, em função da representação explícita das unidades de alvenaria e das juntas de argamassa. Embora o estudo esteja voltado à resposta sísmica de paredes não armadas, seus resultados reforçam a importância da escolha adequada da estratégia de modelagem para análises envolvendo aberturas e regiões de concentração de danos.

Em conjunto, os estudos analisados indicam que a presença de aberturas em paredes de alvenaria modifica a distribuição dos esforços e pode alterar a rigidez, a capacidade resistente e a formação de regiões críticas de concentração de tensões

próximas aos cantos dos vãos. Dias *et al*. (2024) evidenciam, sob carregamento vertical, que a quantidade e a posição das aberturas alteram o processo de transmissão de cargas e a formação dos campos de tensões, enquanto Tripathy e Singhal (2024), Mughal *et al*. (2022) e Krtinić *et al*. (2025) demonstram, em análises voltadas principalmente ao comportamento no plano e à resposta sísmica, que a geometria, a dimensão e a posição dos vãos influenciam significativamente a resistência, a rigidez e os mecanismos de dano das paredes de alvenaria. De forma complementar, Santos e Santos (2022), Oliveira e Andrade (2022) e Allen *et al*. (2017) reforçam a importância da escolha adequada da estratégia de modelagem numérica, indicando que abordagens mais detalhadas, especialmente aquelas capazes de representar unidades, juntas, interfaces e mecanismos locais de fissuração ou deslizamento, tendem a captar melhor as concentrações de tensões e os modos de ruptura em regiões de descontinuidade.

No que se refere especificamente aos elementos posicionados no entorno das aberturas, Sampaio (2010) demonstra que vergas e contravergas contribuem para reduzir concentrações de tensões em painéis de alvenaria estrutural, embora não avance na definição do comprimento de transpasse desses elementos. Montes *et al*. (2020), por sua vez, avaliam diferentes comprimentos de transpasse em alvenarias de vedação e indicam que o aumento do comprimento das vergas e contravergas pode reduzir a média das tensões distribuídas no painel, recomendando, para o caso analisado, transpasse equivalente a 1/10 da largura do vão. Entretanto, por se tratar de alvenaria de fechamento, seus resultados não podem ser transferidos diretamente para sistemas de alvenaria estrutural, nos quais a parede integra o sistema resistente e participa da transmissão das cargas verticais.

Os estudos mais recentes sobre reforço de aberturas também apontam para a importância das regiões adjacentes aos vãos. Mlybari *et al*. (2025) e Ghalla *et al*. (2026) demonstram que soluções localizadas, como SHCC, malhas de fibra de vidro, barras de aço e telas de aço soldadas, podem melhorar a redistribuição de esforços, retardar a fissuração e aumentar a resistência, a rigidez e a energia absorvida em paredes de alvenaria com aberturas. Embora essas pesquisas estejam voltadas a técnicas de reforço externo e ao comportamento no plano, elas convergem com os demais estudos ao demonstrar que o entorno das aberturas não deve ser tratado

como uma região secundária, mas como uma zona ativa de interação mecânica entre o painel e os elementos de redistribuição ou reforço.

Dessa forma, observa-se que a literatura converge quanto à relevância das aberturas como regiões de descontinuidade estrutural e quanto à necessidade de elementos capazes de redistribuir os esforços nessas zonas críticas. Entretanto, a maior parte dos estudos concentra-se na presença, tamanho e posição dos vãos, na comparação entre estratégias de modelagem ou em soluções externas de reforço. Ainda são limitadas as investigações voltadas especificamente ao comprimento de transpasse de vergas e contravergas em paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos submetidas a carregamentos verticais. Essa lacuna justifica a abordagem da presente pesquisa, que avalia o transpasse não apenas como uma extensão geométrica da verga ou da contraverga, mas como uma região ativa de interação entre os elementos de concreto armado e a alvenaria adjacente.

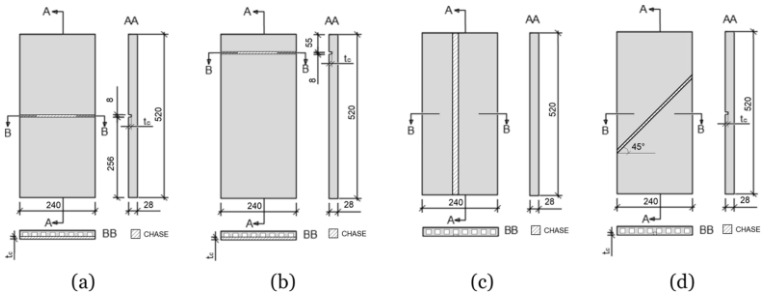
Outros estudos também contribuem para a compreensão da interação entre vergas e painéis de alvenaria, ainda que em contextos distintos da alvenaria estrutural cerâmica convencional. Mazur *et al*. (2017) avaliaram a interação entre vergas pré-moldadas de concreto celular autoclavado e alvenarias de fechamento executadas com blocos do mesmo material. Foram analisados modelos com diferentes números de fiadas sobre as vergas, submetidos a carregamento vertical. Os resultados experimentais e numéricos indicaram concentração de tensões na região de apoio entre os blocos e a verga, reforçando a importância da representação adequada dessa interface. Entretanto, os autores observaram divergências relevantes entre os modelos computacionais e os ensaios experimentais, indicando a necessidade de cuidado na calibração dos modelos numéricos.

Stavroulaki e Liarakos (2012), por sua vez, investigaram os efeitos de contato entre vergas de concreto armado e alvenaria sob ações dinâmicas, considerando fenômenos como separação, deslizamento e atrito. Foram avaliados modelos com vergas convencionais e com cintas contínuas, submetidos a diferentes intensidades de carregamento sísmico. Os resultados indicaram que a interação por contato e fricção entre os elementos pode contribuir para a redução das deformações plásticas sob excitações de baixa intensidade. Entretanto, em níveis mais elevados de solicitação, os mecanismos de dissipação de energia associados à interface entre verga e alvenaria apresentaram efeitos menos favoráveis. Esse estudo reforça a

importância da interação entre os elementos de transição e a alvenaria adjacente no comportamento estrutural do painel.

Além dos estudos diretamente relacionados a aberturas, diversos trabalhos empregam a modelagem computacional para analisar o comportamento de alvenarias estruturais em outras condições de solicitação. Medeiros *et al*. (2022), por exemplo, avaliaram os efeitos de cortes em paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos considerando também a influência da esbeltez. O estudo, desenvolvido como continuidade do trabalho de Milani *et al*. (2021), utilizou modelagens numéricas para analisar diferentes configurações de cortes na alvenaria, como os apresentados na Figura 17. Com base nos resultados, os autores propuseram fatores de redução da resistência a serem considerados em futuras revisões da NBR 16868 (ABNT, 2020). Embora o foco do trabalho não seja a presença de aberturas convencionais de portas e janelas, os resultados apontam a relevância da modelagem numérica na avaliação de descontinuidades geométricas em paredes estruturais.

Figura 17 – Configurações dos cortes (unidades em mm): (a) corte horizontal central, (b) corte horizontal superior, (c) corte vertical, (d) corte inclinado

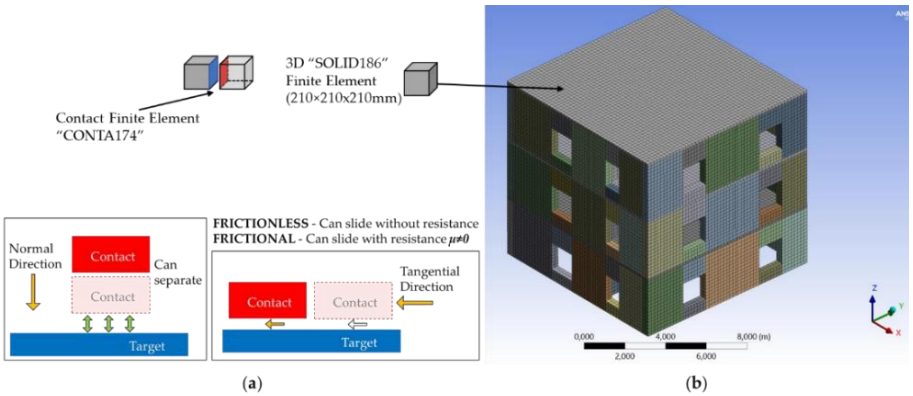


Fonte: Medeiros *et al*., 2022

Venghiac *et al*. (2023) utilizaram modelos em elementos finitos para avaliar normas romenas aplicadas à construção e restauração de edifícios de alvenaria estrutural submetidos a ações sísmicas. Os autores compararam modelos tridimensionais em elementos sólidos no ANSYS com modelos bidimensionais de casca no Robot, considerando diferentes registros sísmicos, com as configurações aplicadas apresentadas nas Figuras 18 e 19. Os resultados numéricos indicaram níveis de dano inferiores aos obtidos por meio dos procedimentos manuais normativos, sugerindo que os critérios simplificados adotados pelas normas romenas podem ser excessivamente conservadores em determinadas situações. Esse estudo

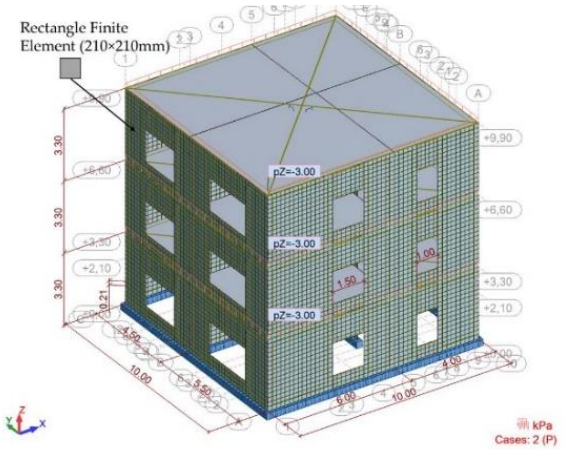
evidencia como a modelagem computacional pode auxiliar na avaliação crítica de procedimentos normativos simplificados.

Figura 18 – Representação de prédio e elementos finitos utilizados no ANSYS



Fonte: Venghiac *et al.*, 2023

Figura 19 – Representação de prédio e elementos finitos utilizados no Robot



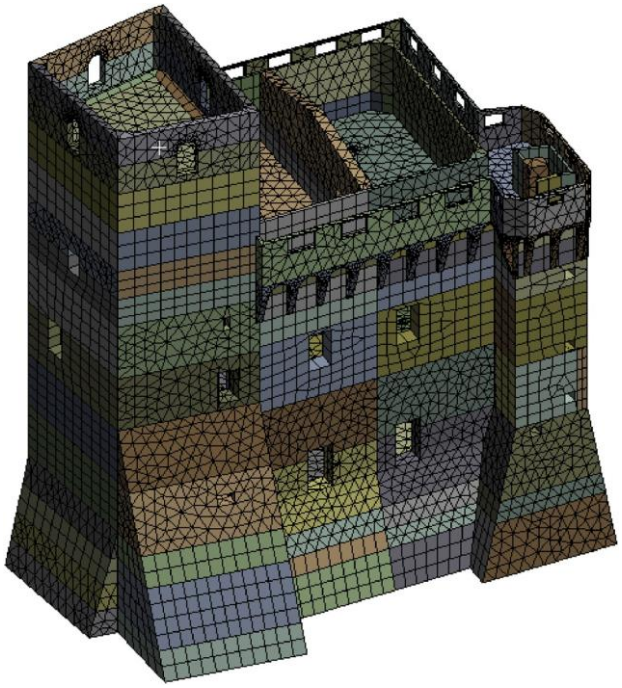
Fonte: Venghiac *et al.*, 2023

Asad *et al*. (2024) estudaram o comportamento de alvenarias estruturais armadas submetidas à compressão excêntrica, combinando ensaios experimentais e modelagem numérica. Os resultados indicaram que a esbeltez exerce influência significativa sobre a resistência dos painéis, com reduções de resistência associadas ao aumento desse parâmetro. Além disso, a alteração das condições de contorno de apoios simples para engastamentos resultou em acréscimos expressivos na capacidade resistente axial. Embora aplicado a outro tipo de solicitação, esse

resultado reforça a importância das condições de contorno e das restrições de deslocamento e rotação na resposta estrutural de paredes de alvenaria.

Orlando *et al*. (2020) aplicaram a macromodelagem em elementos finitos à análise da construção histórica Rocca Strozzi, localizada em Campi Bisenzio, na Itália. O estudo avaliou o comportamento estrutural da edificação e possíveis medidas de retrofit sísmico, utilizando o *software* ANSYS. Os resultados permitiram identificar vulnerabilidades estáticas e sísmicas da estrutura, além de orientar a escolha de técnicas de reforço compatíveis com a preservação do caráter histórico da construção. Esse trabalho ilustra a aplicabilidade da modelagem numérica em estruturas de alvenaria de grande escala, especialmente quando o interesse está voltado ao comportamento global. A malha utilizada para a simulação se encontra na Figura 20.

Figura 20 – Macromodelagem da construção Rocca Strozzi

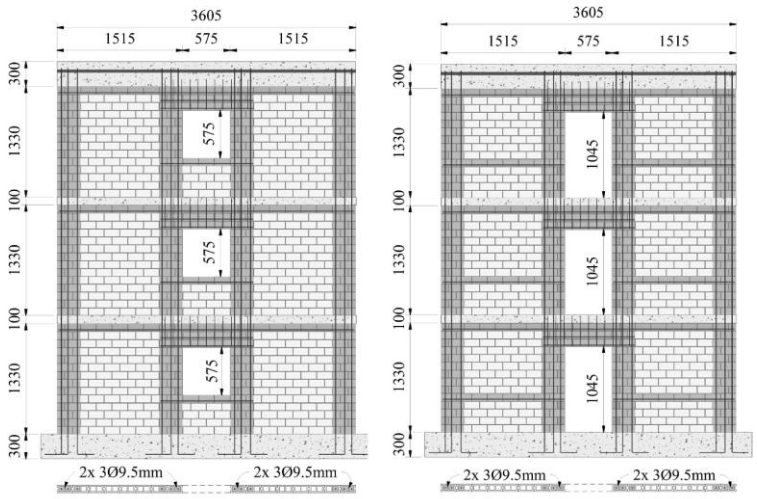


Fonte: Orlando *et al.*, 2020

Palhares *et al*. (2023) compararam modelos de macro e micromodelagem aplicados a alvenarias estruturais parcialmente armadas, considerando um caso em que as aberturas apresentavam reforços grauteados e armados em seus contornos, como apresentado na Figura 21. Os autores verificaram resultados satisfatórios para o modelo proposto, apontando a viabilidade da macromodelagem em determinadas condições. Entretanto, a presença de reforços em torno das aberturas limita a

generalização dos resultados para casos de alvenaria estrutural não armada ou com soluções convencionais de verga e contraverga.

Figura 21 – Representação da alvenaria parcialmente armada



Fonte: Palhares *et al.*, 2023

Veronese *et al*. (2022) avaliaram o uso de um compósito cimentício sustentável como revestimento de reforço em paredes de alvenaria estrutural de blocos de concreto. O estudo combinou etapa experimental e modelagem numérica, permitindo calibrar o modelo e propor uma equação para estimativa da capacidade resistente das paredes reforçadas. Já Huamani *et al*. (2022) investigaram alvenarias estruturais de tijolos de solo-cimento submetidas a carregamentos cíclicos, representativos de ações sísmicas. A partir de ensaios e de micromodelagem computacional calibrada, os autores observaram concentração de danos nas extremidades e na região central da parede, com formação de fissuração diagonal. Esses estudos reforçam o uso da modelagem numérica como ferramenta para análise de diferentes materiais, configurações e mecanismos resistentes em alvenarias estruturais.

A partir dos trabalhos analisados, observa-se que a modelagem computacional tem sido empregada com diferentes finalidades no estudo de alvenarias, incluindo a validação de modelos numéricos, a avaliação de descontinuidades geométricas, a análise de ações sísmicas, o estudo de reforços estruturais e a investigação de mecanismos de ruptura. No caso específico das aberturas, os estudos disponíveis indicam que a presença de vãos altera significativamente a redistribuição das tensões

e pode reduzir a capacidade resistente dos painéis. Entretanto, ainda são escassas as pesquisas voltadas especificamente à influência do comprimento de transpasse de vergas e contravergas em paredes de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos. Essa lacuna justifica a realização de análises paramétricas capazes de avaliar não apenas os níveis máximos de tensão, mas também os mecanismos de redistribuição dos esforços e a interação mecânica entre o transpasse e a alvenaria adjacente.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos adotados para a análise numérica do comportamento estrutural de paredes de alvenaria estrutural com abertura, verga e contraverga. As simulações foram desenvolvidas por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando o *software* ANSYS, com o objetivo de avaliar a influência do comprimento de transpasse sobre a redistribuição das tensões nas regiões adjacentes ao vão.

A estratégia de modelagem adotada buscou representar, de forma tridimensional, os principais componentes do sistema: blocos cerâmicos, juntas de argamassa, vergas, contravergas e armaduras longitudinais. A escolha por uma modelagem tridimensional deu-se pela necessidade de avaliar gradientes de tensão localizados nas regiões próximas à abertura, especialmente nos pontos de interação entre a alvenaria, a argamassa e os elementos de concreto armado. Esse nível de detalhamento é importante em problemas associados a regiões de descontinuidade, nas quais o comportamento estrutural não pode ser descrito adequadamente apenas por modelos globais simplificados.

Durante as etapas preliminares da pesquisa, avaliou-se a possibilidade de representar o comportamento dos blocos cerâmicos por meio de uma abordagem não linear, fundamentada em critérios de plasticidade e parâmetros de energia de fratura. Entretanto, as simulações iniciais apresentaram elevada sensibilidade à discretização da malha e instabilidades de convergência, dificultando a reprodução sistemática dos diferentes cenários paramétricos propostos. Como o objetivo do trabalho é comparar a influência do comprimento de transpasse sobre a distribuição das tensões entre as diferentes configurações analisadas, optou-se por uma formulação elástica linear para os componentes da alvenaria. Essa escolha permite realizar as comparações sob uma mesma condição de comportamento dos materiais, concentrando a análise nas alterações provocadas pela mudança do comprimento de transpasse, sem considerar os efeitos posteriores associados à fissuração e à perda progressiva de rigidez.

Dessa forma, os resultados obtidos são avaliados principalmente a partir das tensões e dos deslocamentos desenvolvidos nos modelos, permitindo identificar as regiões mais solicitadas e os mecanismos de redistribuição dos esforços. Os valores de tensão também podem ser comparados com as resistências de referência dos

materiais para indicar regiões potencialmente críticas, sem que isso represente a simulação direta da propagação de fissuras ou da ruptura da parede.

As interfaces entre os materiais foram representadas por contatos com aderência completa, assumindo compatibilidade de deslocamentos entre os componentes. Essa simplificação mostrou-se coerente com a abordagem adotada para os componentes da alvenaria e permite avaliar a transferência de esforços entre blocos, argamassa, vergas e contravergas. Dessa forma, fenômenos como a separação ou o deslizamento entre os materiais não são representados diretamente pelo modelo.

Os resultados obtidos são, portanto, interpretados de forma comparativa entre as tipologias analisadas, considerando as hipóteses simplificadoras adotadas na modelagem numérica.

3.1. Propriedades dos materiais

A caracterização dos materiais empregados no modelo numérico foi realizada a partir de dados experimentais disponíveis na literatura, parâmetros normativos e configurações previamente utilizadas em estudos desenvolvidos no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UENF. Foram definidos materiais distintos para os blocos cerâmicos, a argamassa de assentamento, o concreto das vergas e contravergas e o aço das armaduras longitudinais.

A seleção dos estudos de Miller (2008) e Lannes (2018) como referências para a caracterização dos materiais buscou manter continuidade com pesquisas anteriormente desenvolvidas no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UENF e utilizar conjuntos de dados experimentais já empregados em estudos numéricos no âmbito do programa. A escolha não teve como objetivo considerar esses materiais como representativos de todas as alvenarias cerâmicas ou concretos disponíveis na literatura, mas estabelecer uma base de propriedades conhecida para o desenvolvimento da análise paramétrica proposta. A manutenção de um único conjunto de propriedades para cada material também permitiu que o comprimento de transpasse permanecesse como a principal variável entre as configurações analisadas, evitando a introdução simultânea da variabilidade das propriedades dos materiais.

A modelagem seguiu uma abordagem de micromodelagem tridimensional, na qual os principais componentes do sistema foram representados de forma individualizada. Assim, os blocos cerâmicos, as juntas de argamassa e os elementos de concreto armado foram discretizados separadamente, permitindo avaliar a distribuição das tensões em cada material e as concentrações de esforços nas regiões de interface. Os blocos cerâmicos e a argamassa foram representados com comportamento elástico linear, conforme as hipóteses apresentadas na introdução deste capítulo, enquanto para o concreto foi adotado um modelo constitutivo não linear.

Para o componente cerâmico, as propriedades físicas e os limites resistentes foram obtidos a partir dos ensaios experimentais realizados por Miller (2008), com ênfase nos corpos de prova representativos dos materiais cerâmicos produzidos na região Norte Fluminense. A resistência à compressão adotada foi de 6,72 MPa. Na ausência de dados experimentais específicos para a resistência à tração no estudo de referência, adotou-se valor equivalente a 10% da resistência à compressão, resultando em 0,672 MPa. A densidade do material foi definida como 1,45 g/cm³.

O comportamento elástico do componente cerâmico foi definido a partir do módulo de elasticidade longitudinal e do coeficiente de Poisson. Para este último, adotou-se o valor de 0,15, conforme indicado pela NBR 16868-1 (ABNT, 2020) para blocos cerâmicos estruturais. Embora houvesse uma estimativa experimental disponível para o módulo de elasticidade, sua adoção direta não apresentou resposta satisfatória no modelo numérico. Dessa forma, a relação normativa apresentada a seguir foi utilizada como aproximação para a definição do módulo de elasticidade atribuído aos blocos cerâmicos, constituindo uma hipótese simplificadora da micromodelagem, e não uma determinação normativa direta dessa propriedade para a unidade cerâmica. O valor adotado foi obtido a partir da resistência característica à compressão do prisma, conforme apresentado na Equação (1):

$$E = 600 f_{pk} = 600 \cdot 2{,}035 = 1220{,}97\ MPa \quad (1)$$

Em que:

E = Módulo de elasticidade do material (MPa);

f_{pk} = Resistência característica de prisma (MPa).

Para a argamassa de assentamento, foram adotados parâmetros mecânicos provenientes da literatura utilizada como referência, mantendo-se o comportamento elástico linear. As juntas horizontais e verticais foram modeladas com espessura de 1,5 cm, permitindo representar sua participação na transferência de esforços entre as unidades cerâmicas e nas regiões próximas às vergas e contravergas.

As propriedades do concreto empregado nas vergas e contravergas tiveram como referência os dados apresentados por Lannes (2018). Além desses dados experimentais, foi recuperada uma configuração numérica desenvolvida posteriormente no ANSYS em pesquisas vinculadas ao PPGEC/UENF, utilizada como ponto de partida e adaptada às condições desta pesquisa. Diferentemente dos blocos e da argamassa, o concreto foi representado por um modelo constitutivo não linear, com emprego do critério de Drucker-Prager e de parâmetros associados à energia de fratura. As configurações e os parâmetros adotados são apresentados no Anexo A.

Para as armaduras longitudinais das vergas e contravergas, adotou-se o aço estrutural disponível na biblioteca de materiais do ANSYS. A geometria das armaduras teve como referência modelos de concreto armado desenvolvidos no PPGEC/UENF, com adaptações à configuração desta pesquisa. Cada elemento recebeu duas barras longitudinais de 8 mm de diâmetro, posicionadas conforme o detalhamento apresentado nas seções seguintes. Não foram consideradas armaduras transversais nem barras adicionais para resistência a momentos negativos.

A Tabela 3 apresenta as propriedades mecânicas dos materiais considerados na simulação computacional:

Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos materiais aplicadas no modelo numérico

Material	Módulo de Elasticidade (MPa)	Coeficiente de Poisson (v)	Densidade (g/cm³)	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Tração (MPa)	Energia de Fratura (J/m²)
Cerâmica	1220,97	0,150	1,45	6,720	0,672	-
Argamassa	7563,30	0,374	2,00	8,167	0,817	-
Concreto	30000,00	0,180	2,30	50,000	4,000	100,00
Aço	200000,00	0,300	7,85	460,000	460,000	-

Fonte: Elaborada pelo autor com base em Miller (2008), Lannes (2018), ABNT (2020) e dados da biblioteca de materiais do ANSYS.

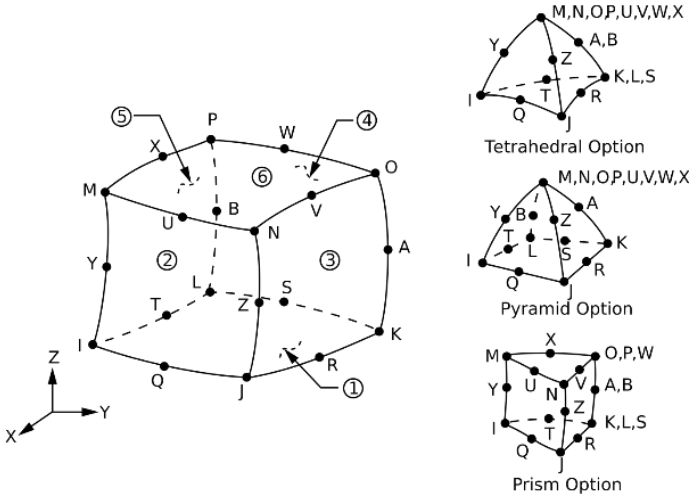
3.2. Modelagem computacional

A discretização dos modelos foi realizada no módulo ANSYS *Mechanical*, utilizando uma malha tridimensional compatível com a geometria dos blocos cerâmicos, das juntas de argamassa e dos elementos de concreto armado. A estratégia de discretização foi definida de forma a representar os gradientes de tensão nas regiões próximas às aberturas, especialmente nos apoios das vergas e contravergas.

3.2.1. Discretização da malha e elementos finitos

Os blocos cerâmicos, a argamassa de assentamento, as vergas e as contravergas foram discretizados com o elemento SOLID186. Trata-se de um elemento sólido tridimensional de ordem quadrática, adequado à representação de geometrias irregulares e de campos de tensão com variações locais. A geração da malha dos componentes sólidos foi realizada por meio do método MultiZone, com prioridade para a formação de elementos predominantemente hexaédricos, buscando compatibilizar a discretização com a geometria vazada dos blocos e preservar adequadamente suas abas, septos e vazios internos. A representação esquemática do elemento SOLID186 utilizado na discretização dos componentes sólidos é apresentada na Figura 22.

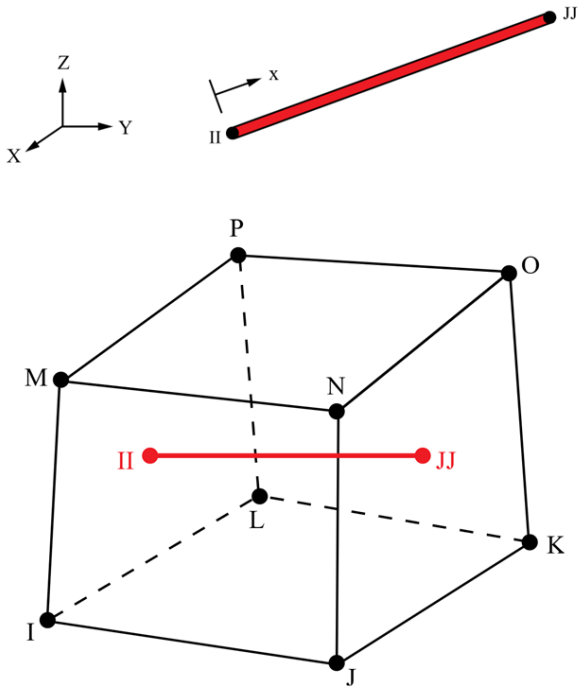
Figura 22 – Detalhamento do Elemento SOLID186



Fonte: ANSYS, 2024

As armaduras longitudinais das vergas e contravergas foram modeladas por meio de elementos de reforço REINF264 associados aos elementos de concreto. Essa forma de representação permite que a armadura trabalhe de maneira integrada ao volume de concreto no qual está inserida, dispensando a criação de pares de contato independentes entre o aço e o concreto. Dessa maneira, foi possível representar a contribuição das armaduras para o comportamento das vergas e contravergas e obter diretamente as tensões desenvolvidas no aço durante as análises. A Figura 23 apresenta o elemento REINF264 adotado para a representação das armaduras longitudinais.

Figura 23 – Detalhamento do Elemento REINF264

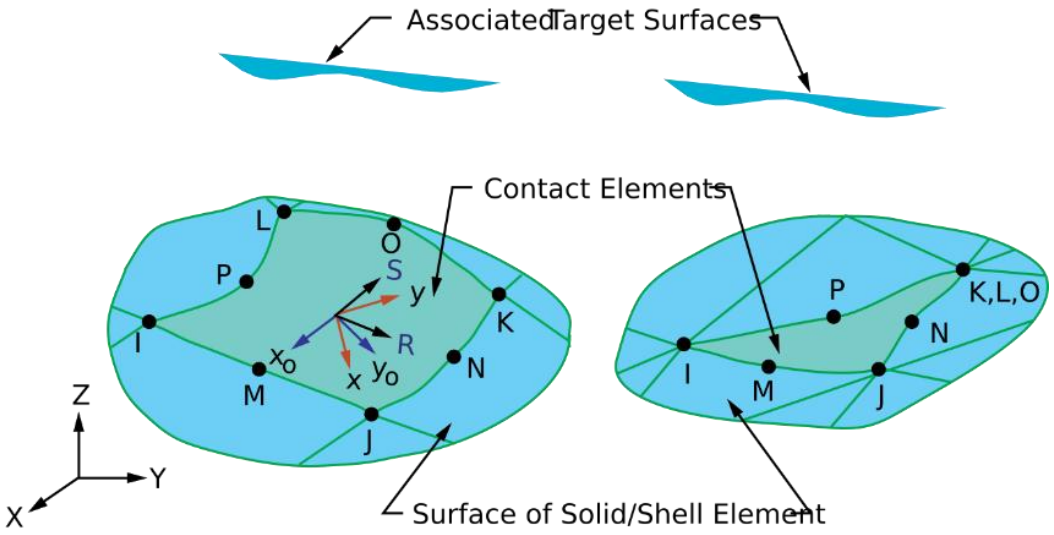


Fonte: ANSYS, 2024

As interfaces entre os diferentes componentes sólidos, correspondentes às ligações bloco-argamassa e argamassa-concreto, foram configuradas com contato do tipo *Bonded*. Essa condição considera a aderência entre as superfícies conectadas, não permitindo separação ou escorregamento relativo entre os componentes.

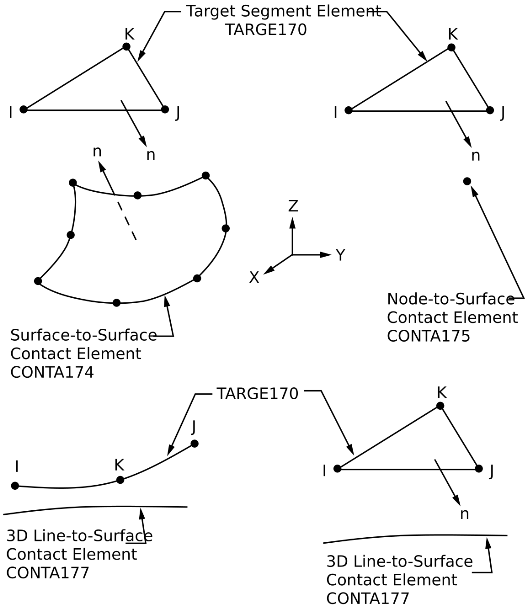
A modelagem dos contatos foi realizada por meio dos elementos de superfície CONTA174 e TARGE170, apresentados nas Figuras 24 e 25, utilizados na interação entre as faces dos corpos tridimensionais.

Figura 24 – Detalhamento do Elemento CONTA174



Fonte: ANSYS, 2024

Figura 25 – Detalhamento do Elemento TARGE170



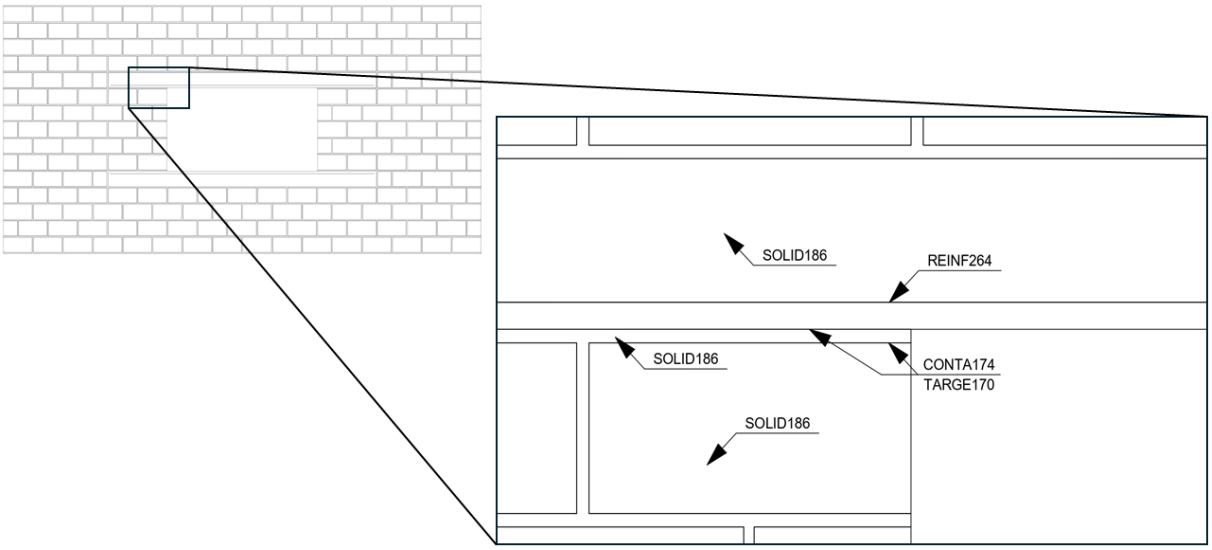
Fonte: ANSYS, 2024

A adoção do contato *Bonded* está associada às hipóteses simplificadoras apresentadas anteriormente e, consequentemente, não permite representar diretamente a abertura das juntas, o escorregamento entre os componentes ou a perda progressiva de aderência.

A Figura 26 apresenta a associação entre os componentes do modelo e os elementos finitos empregados na discretização. Os blocos cerâmicos, a argamassa e

os elementos de concreto foram representados por SOLID186; as armaduras longitudinais, por REINF264; e as superfícies de contato entre os materiais, pela combinação CONTA174 e TARGE170.

Figura 26 – Componentes e elementos finitos utilizados na modelagem numérica



Fonte: Elaborada pelo autor, 2026

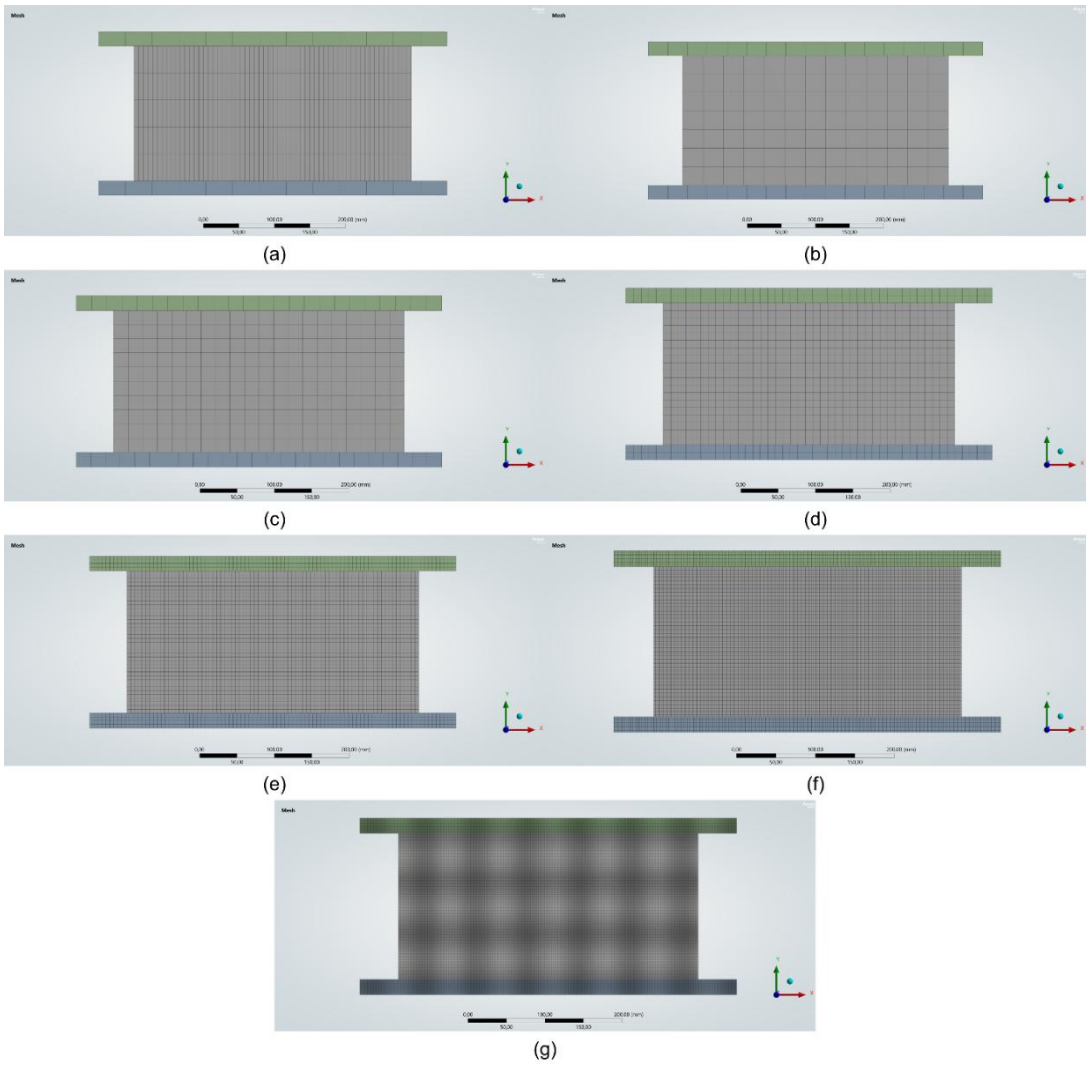
A discretização dos painéis foi realizada por meio de uma malha global complementada por refinamento local nas proximidades dos cantos das aberturas. Os tamanhos empregados foram definidos com base no estudo de sensibilidade apresentado no item seguinte.

3.2.2. Estudo de sensibilidade

Antes das simulações dos painéis completos, foi realizado um estudo de sensibilidade de malha para avaliar a influência do refinamento da discretização sobre os resultados e auxiliar na definição do tamanho dos elementos. Essa verificação foi considerada necessária em razão da geometria vazada dos blocos cerâmicos, formada por abas e septos de pequena espessura, nos quais podem ocorrer concentrações locais de tensão.

Foram avaliados tamanhos globais de elemento de 40 mm, 30 mm, 20 mm, 10 mm, 5 mm, 2,5 mm e 1 mm, conforme apresentado na Figura 27.

Figura 27 – Malhas avaliadas no estudo de sensibilidade: (a) 40 mm; (b) 30 mm; (c) 20 mm; (d) 10 mm; (e) 5 mm; (f) 2,5 mm; (g) 1 mm



Fonte: Elaborada pelo autor, 2026

O estudo foi realizado a partir de dois modelos simplificados. No teste de compressão, o bloco cerâmico foi posicionado entre duas chapas metálicas e submetido a deslocamento vertical controlado. No teste de tração, foi analisado diretamente o bloco cerâmico, sem a utilização das chapas. Para a compressão, adotou-se como principal parâmetro de comparação a tensão principal mínima média (σ_3), enquanto, para a tração, foi utilizada a tensão principal máxima média (σ_1). Em ambos os casos, os valores médios obtidos no volume total do bloco foram utilizados como principal referência para a comparação entre as discretizações.

Como avaliação complementar, foi considerada uma região localizada na parte central do bloco. Foram criadas *Named Selections* buscando representar

aproximadamente a mesma região em cada discretização. Entretanto, como a disposição dos elementos varia de uma malha para outra, não foi possível manter exatamente o mesmo volume selecionado. Por esse motivo, os resultados dessa região foram utilizados apenas como complemento à análise realizada no volume total do bloco.

Os valores extremos das tensões também foram acompanhados ao longo do estudo. Entretanto, por estarem associados a regiões localizadas de concentração de tensão e apresentarem maior influência do refinamento da malha, não foram utilizados isoladamente como critério para a definição da discretização.

As Tabelas 4 e 5 apresentam os principais resultados empregados no estudo de sensibilidade. Os valores máximos, mínimos e médios obtidos nas diferentes discretizações são apresentados de forma completa no Apêndice A.

Tabela 4 – Resultados do teste de compressão

Tamanho global da malha	σ_3 média no bloco (MPa)	σ_3 média na aba central (MPa)	Tempo de processamento
40 mm	-6,5117	-6,4426	33 s
30 mm	-6,5130	-6,4525	25 s
20 mm	-6,5068	-6,4593	23 s
10 mm	-6,5114	-6,4678	30 s
5 mm	-6,5161	-6,4737	49 s
2,5 mm	-6,5127	-6,4696	2 min 13 s
1 mm	-6,5099	-6,4688	38 min 21 s

Fonte: Dados da pesquisa, 2026

Tabela 5 – Resultados do teste de tração

Tamanho global da malha	σ_1 média no bloco (MPa)	σ_1 média na aba central (MPa)	Tempo de processamento
40 mm	6,4760	6,4357	23 s
30 mm	6,4767	6,4415	20 s
20 mm	6,4734	6,4450	22 s
10 mm	6,4761	6,4491	21 s
5 mm	6,4787	6,4498	27 s
2,5 mm	6,4770	6,4493	1 min 9 s
1 mm	6,4755	6,4499	13 min 19 s

Fonte: Dados da pesquisa, 2026

As tensões médias apresentaram pouca variação ao longo do refinamento. No ensaio de compressão, a tensão principal mínima média ($\sigma_{3média}$) do bloco permaneceu próxima de -6,51 MPa em todas as discretizações, enquanto, no ensaio de tração, a tensão principal máxima média ($\sigma_{1média}$) permaneceu próxima de 6,48 MPa. Tendência semelhante foi observada na região central selecionada.

Em contrapartida, os valores extremos apresentaram aumento em módulo com o refinamento da malha. No ensaio de compressão, o valor mínimo de σ_3 no bloco passou de -9,9768 MPa, para a malha de 40 mm, para -21,281 MPa, na malha de 1 mm. No ensaio de tração, o valor máximo de σ_1 passou de 10,334 MPa para 21,808 MPa no mesmo intervalo de refinamento. Esse comportamento evidencia a maior sensibilidade das tensões pontuais às concentrações locais e reforça a utilização das grandezas médias como principal parâmetro de comparação.

Também foi observado aumento significativo do tempo de processamento nas discretizações mais refinadas. A redução do tamanho do elemento de 20 mm para 1 mm elevou o tempo do ensaio de compressão de aproximadamente 23 segundos para 38 minutos e 21 segundos, enquanto, no ensaio de tração, o tempo passou de aproximadamente 22 segundos para 13 minutos e 19 segundos, sem alteração relevante das tensões médias.

Os resultados mostraram, portanto, que as tensões médias apresentaram pouca variação com o refinamento, enquanto o custo computacional aumentou de forma significativa para as discretizações mais finas. Esse comportamento indicou que refinamentos adicionais proporcionavam pouca alteração nas grandezas médias analisadas, apesar do aumento expressivo do tempo de processamento.

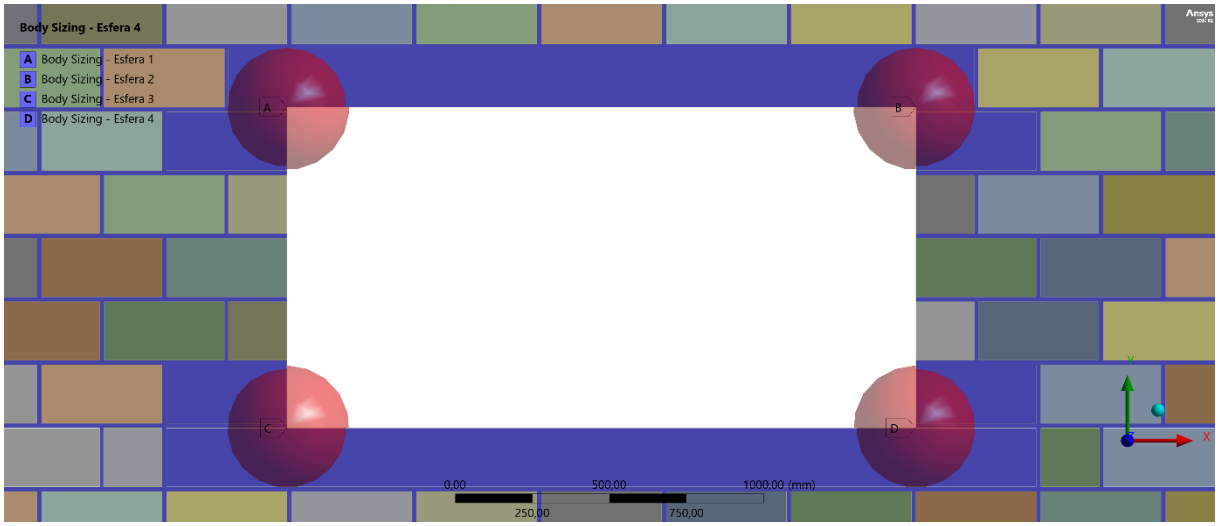
3.2.3. Definição da malha adotada e refinamento local

Com base nos resultados do estudo de sensibilidade, foi adotado tamanho global de elemento de 20 mm nos modelos completos dos painéis. Nas proximidades dos cantos das aberturas, foi empregado refinamento local para 10 mm, buscando melhorar a representação dos gradientes de tensão nas regiões diretamente relacionadas ao comportamento das vergas e contravergas.

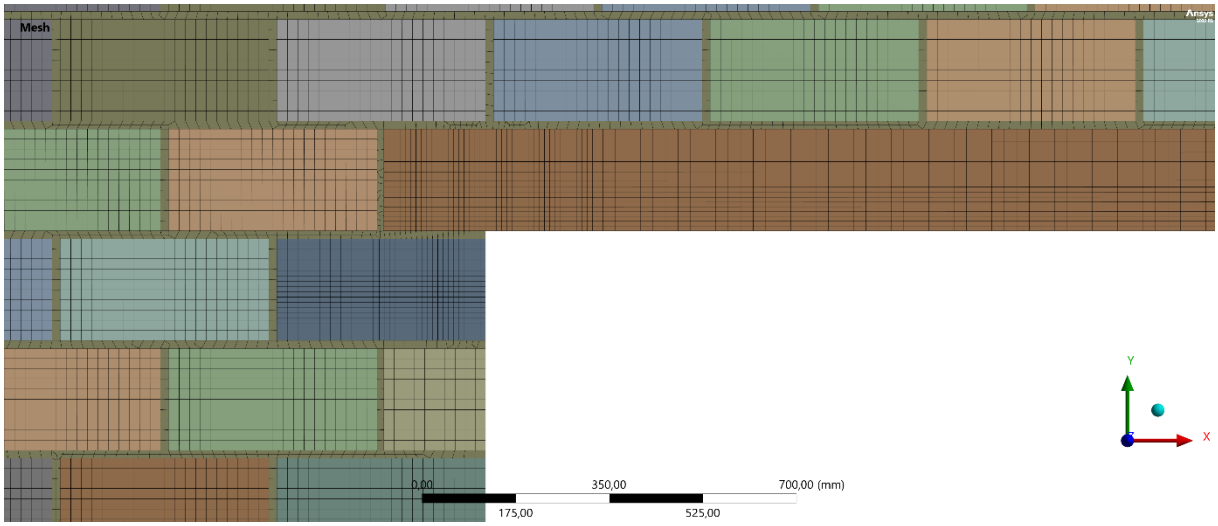
O refinamento local foi aplicado por meio de esferas de influência posicionadas nos cantos da abertura, com raio de 20,5 cm, correspondente à altura de uma unidade

de alvenaria acrescida de uma camada de argamassa, conforme ilustrado na Figura 28. Essa configuração permitiu concentrar elementos menores nas regiões de maior interesse da análise sem aplicar o mesmo nível de refinamento a todo o painel.

Figura 28 – Refinamento local da malha nos cantos da abertura:
(a) regiões de influência; (b) detalhe da discretização local



(a)



(b)

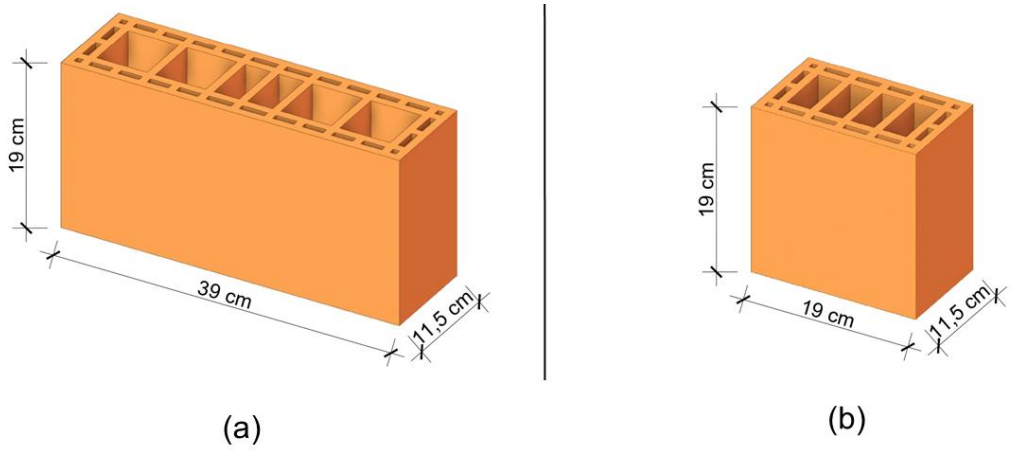
Fonte: Elaborada pelo autor, 2026

3.3. Geometria dos modelos e transpasses

A geometria dos modelos numéricos foi definida a partir de blocos cerâmicos estruturais com dimensões compatíveis com a modulação usual da alvenaria. Foram

utilizados dois tipos de unidades: bloco inteiro e meio bloco, permitindo a composição das fiadas e o ajuste da modulação do painel em torno da abertura. A Figura 29 apresenta a representação tridimensional das unidades cerâmicas adotadas no modelo.

Figura 29 – Representação tridimensional de: (a) bloco inteiro e (b) meio bloco, utilizados na modelagem numérica

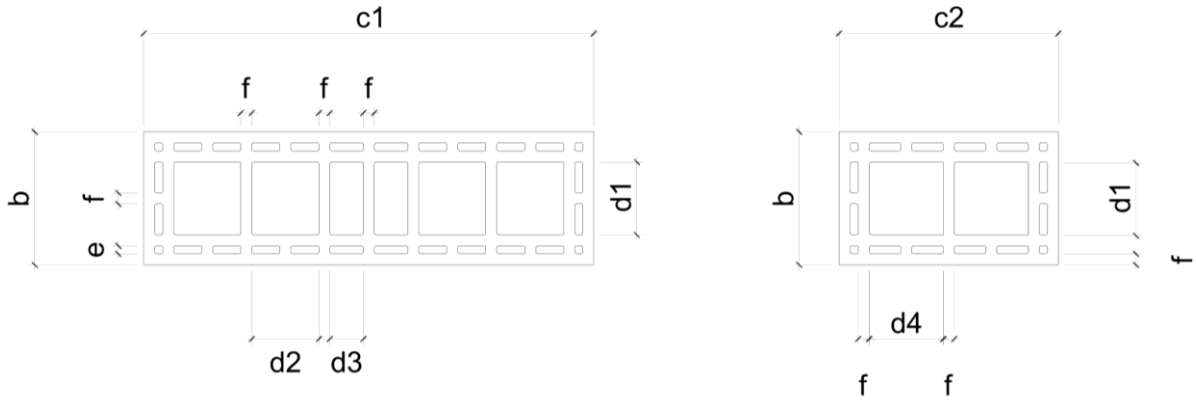


Fonte: Elaborada pelo autor, 2026

O bloco inteiro possui dimensões nominais de 11,5 cm × 19,0 cm × 39,0 cm, enquanto o meio bloco possui dimensões nominais de 11,5 cm × 19,0 cm × 19,0 cm. Essas unidades foram representadas considerando sua geometria vazada, de modo a preservar as abas externas, os septos internos e os vazios característicos dos blocos cerâmicos estruturais. A adoção dessa representação detalhada permitiu avaliar a distribuição das tensões no componente cerâmico de forma mais realista do que seria possível em uma abordagem homogeneizada.

A Figura 30 apresenta a geometria em planta do bloco cerâmico inteiro, com a identificação das cotas internas utilizadas para a construção do modelo numérico. A identificação por letras foi adotada para facilitar a leitura, uma vez que a inserção direta de todas as dimensões poderia comprometer sua clareza gráfica.

Figura 30 – Geometria em planta do bloco cerâmico inteiro com identificação das cotas internas



Fonte: Elaborada pelo autor, 2026

As dimensões correspondentes às cotas indicadas na Figura 30 são apresentadas na Tabela 6. Essas medidas foram utilizadas na construção geométrica dos blocos no ambiente de modelagem, permitindo representar as espessuras das abas externas, dos septos internos e dos vazios do componente cerâmico.

Tabela 6 – Dimensões das cotas gerais e internas dos blocos (em milímetros)

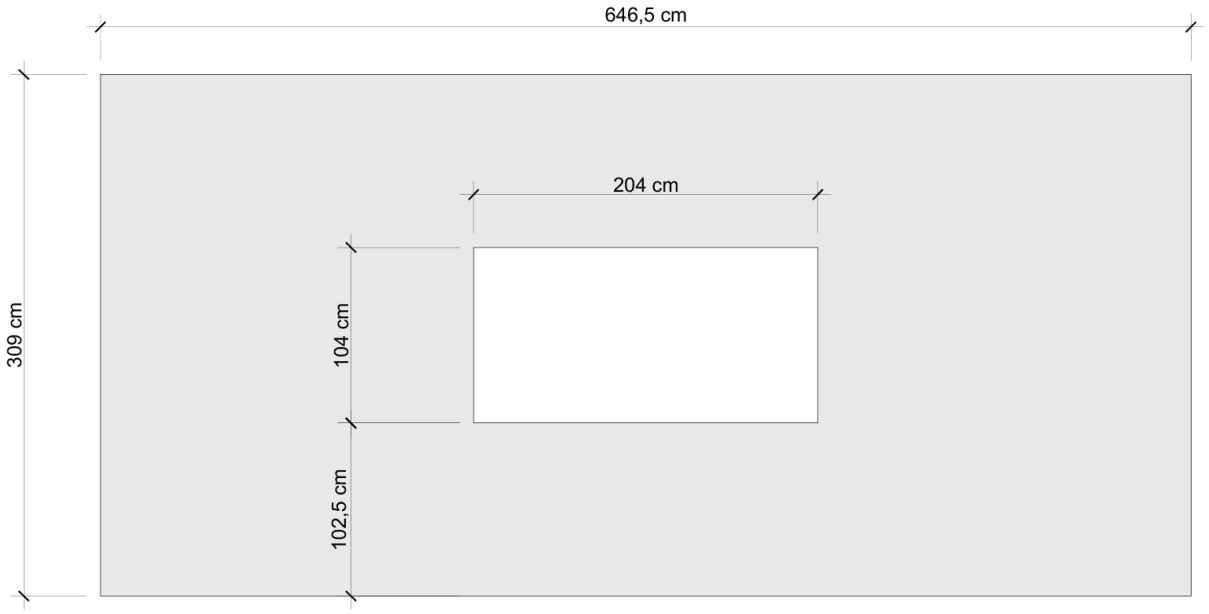
	b	**c1**	**c2**	**d1**	**d2**	**d3**	**d4**	**e**	**f**
Medida	115	390	190	63	58,1	29,05	64,25	7	9,5

Fonte: Dados da pesquisa, 2026

A representação detalhada da geometria interna dos blocos foi mantida nos modelos completos dos painéis, preservando a influência dos vazios e septos na distribuição local das tensões. Essa escolha foi considerada especialmente relevante para a presente pesquisa, uma vez que os gradientes de tensão nas regiões próximas à abertura e aos apoios das vergas e contravergas podem ser influenciados pela configuração geométrica do bloco cerâmico.

Em seguida, os blocos inteiros e meios blocos foram utilizados para compor os painéis de alvenaria estrutural. Os modelos foram definidos com dimensões globais de 646,5 cm de comprimento, 309,0 cm de altura e 11,5 cm de espessura. A Figura 31 apresenta as dimensões globais do painel e a geometria da abertura centralizada adotada nos modelos correspondentes.

Figura 31 – Dimensões globais do painel e da abertura considerada nos modelos numéricos



Fonte: Elaborada pelo autor, 2026

As vergas e contravergas foram modeladas como elementos de concreto armado com seção transversal compatível com a modulação da alvenaria. A altura adotada para esses elementos foi de 19,0 cm, correspondente à altura nominal de uma fiada, e a espessura foi definida como 11,5 cm, igual à espessura da parede. Dessa forma, os elementos foram integrados à modulação do painel, mantendo continuidade geométrica com as fiadas de blocos cerâmicos.

Para avaliar a influência do comprimento de transpasse sobre o comportamento mecânico da parede, foram definidas cinco tipologias com abertura, mantendo-se constante a geometria do vão e alterando-se apenas o prolongamento lateral das vergas e contravergas. Adicionalmente, foi considerado um painel sem abertura como referência para a avaliação dos efeitos decorrentes da introdução do vão. A Tabela 7 apresenta as configurações geométricas adotadas.

Tabela 7 – Definição geométrica dos comprimentos de transpasse avaliados nos modelos numéricos

Modelo	Descrição	Transpasse da verga (cm)	Transpasse da contraverga (cm)	Comprimento total das peças (cm)
SA	Parede sem abertura	–	–	–
Tipo A	Critério associado à alvenaria de vedação – 1/10 e 1/5 do vão	19,0	39,0	242,0 (verga) 282,0 (contraverga)
Tipo B	Transpasse de 1 bloco	39,0	39,0	282,0
Tipo C	Recomendação de Sánchez (2013) – 2 blocos	79,5	79,5	363,0
Tipo D	Extensão paramétrica – 3 blocos	120,0	120,0	444,0
Tipo E	Extensão paramétrica – 4 blocos	160,5	160,5	525,0

Fonte: Dados da pesquisa, 2026

O modelo SA corresponde ao painel sem abertura e foi incluído como referência para a análise do comportamento da parede antes da introdução da descontinuidade geométrica provocada pelo vão. Por não possuir abertura, esse modelo não apresenta verga, contraverga ou comprimento de transpasse.

A configuração Tipo A foi definida como referência comparativa associada a critérios usualmente empregados em alvenarias de vedação. Nessa tipologia, foram adotados transpasses distintos para verga e contraverga, correspondentes, respectivamente, a 1/10 e 1/5 da largura do vão. Assim, a verga recebeu transpasse de 19,0 cm em cada extremidade, correspondente a meio bloco, enquanto a contraverga recebeu transpasse de 39,0 cm, correspondente a um bloco. Essas medidas encontram-se levemente abaixo dos valores exatos obtidos pelas frações, sendo, respectivamente, 6,9% e 4,4% menores. O uso dessa tipologia permitiu representar uma condição de transpasse reduzido para comparação com as demais soluções avaliadas.

A configuração Tipo B foi definida com transpasse correspondente a um bloco em cada extremidade da abertura, tanto para a verga quanto para a contraverga.

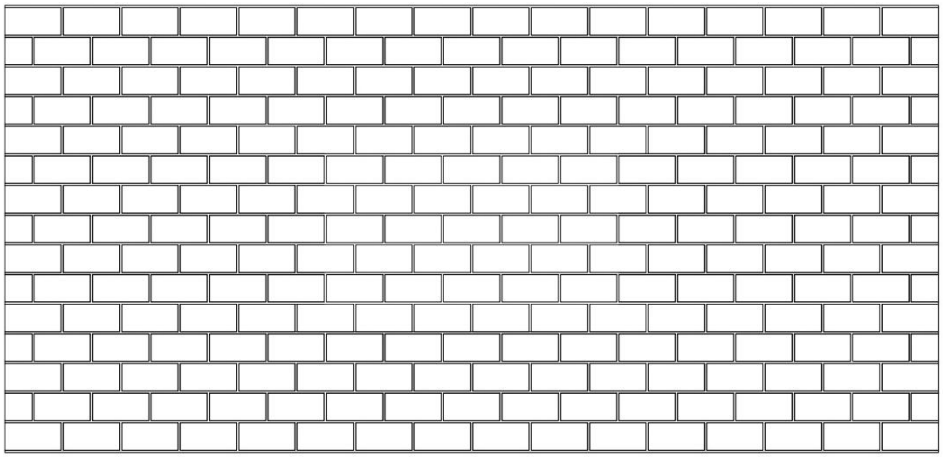
Dessa forma, foi adotado comprimento de transpasse de 39,0 cm em cada lado, constituindo a menor configuração com prolongamento lateral simétrico entre os dois elementos. A comparação entre os Tipos A e B permite, ainda, avaliar o efeito do aumento inicial do transpasse da verga, mantendo-se inalterado o comprimento de transpasse da contraverga.

A configuração Tipo C foi definida com base na recomendação técnica apresentada por Sánchez (2013), que sugere a adoção de comprimento total da peça equivalente à largura do vão acrescida de quatro módulos dimensionais. Considerando a modulação adotada no presente trabalho, essa recomendação corresponde aproximadamente a dois blocos de transpasse em cada extremidade da abertura, resultando em 79,5 cm de embutimento lateral para verga e contraverga.

As configurações Tipo D e Tipo E foram definidas como extensões paramétricas da recomendação anterior, com o objetivo de avaliar os efeitos do aumento do comprimento de transpasse sobre a redistribuição das tensões. No Tipo D, adotou-se transpasse equivalente a três blocos em cada extremidade, totalizando 120,0 cm. No Tipo E, adotou-se transpasse equivalente a quatro blocos em cada extremidade, totalizando 160,5 cm.

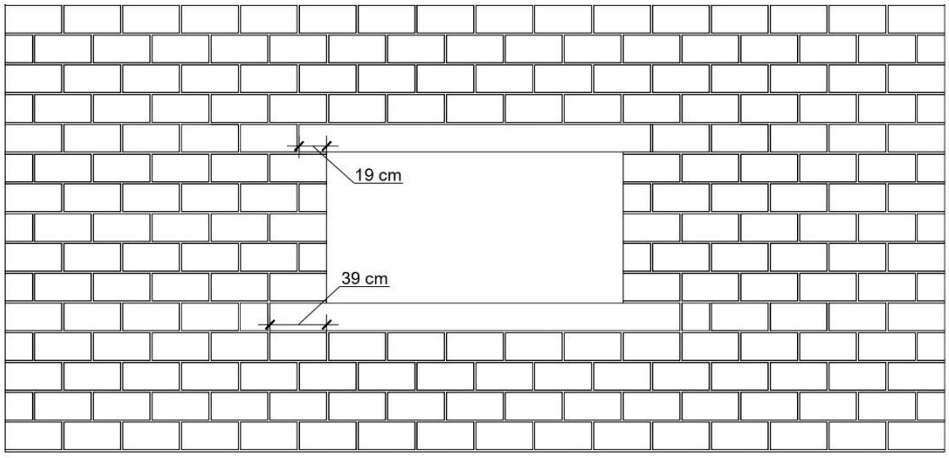
As Figuras 32 a 37 apresentam o modelo sem abertura e as cinco tipologias geométricas analisadas, evidenciando a variação do comprimento de transpasse das vergas e contravergas nos modelos com abertura.

Figura 32 – Modelo SA: painel sem abertura



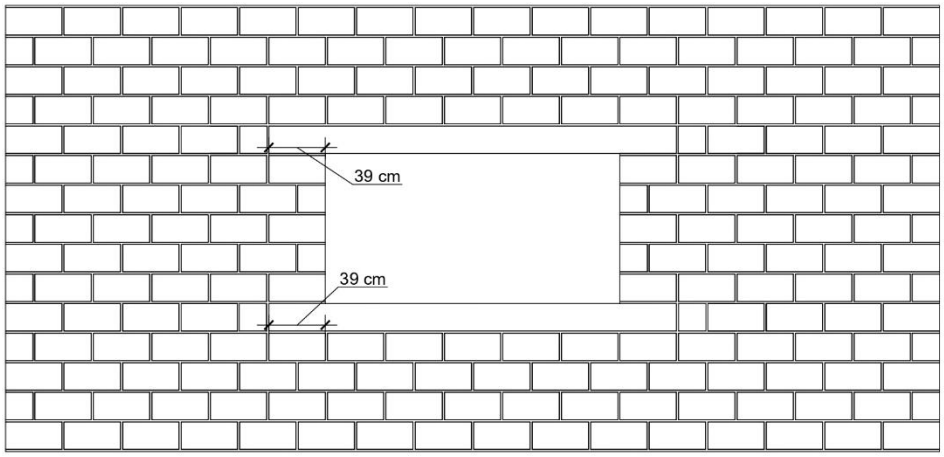
Fonte: Elaborada pelo autor, 2026

Figura 33 – Configuração Tipo A: critério associado à alvenaria de vedação



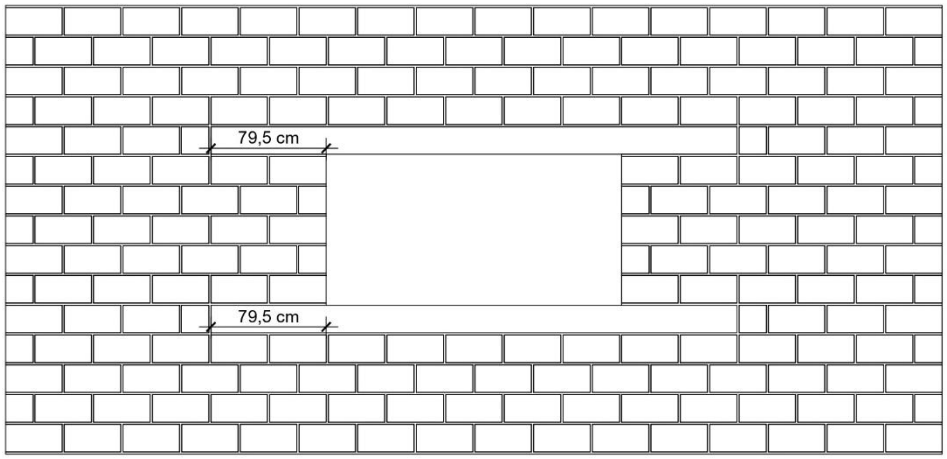
Fonte: Elaborada pelo autor, 2026

Figura 34 – Configuração Tipo B: transpasse de 1 bloco



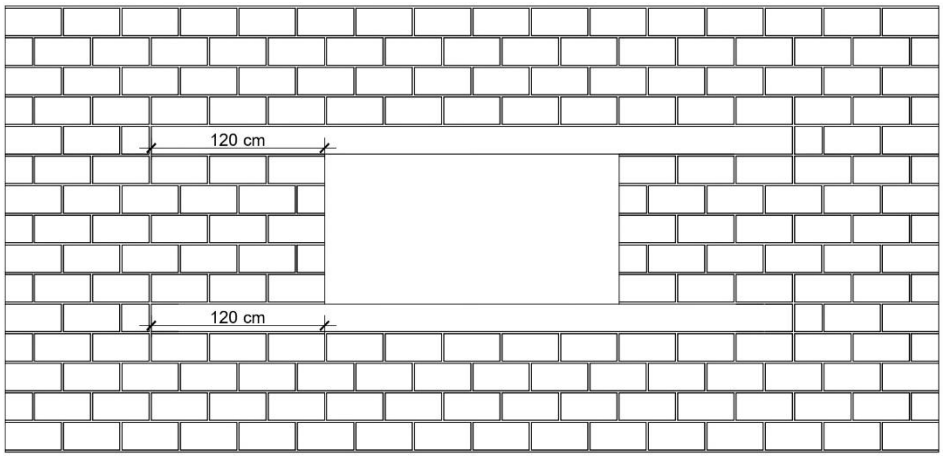
Fonte: Elaborada pelo autor, 2026

Figura 35 – Configuração Tipo C: transpasse de 2 blocos



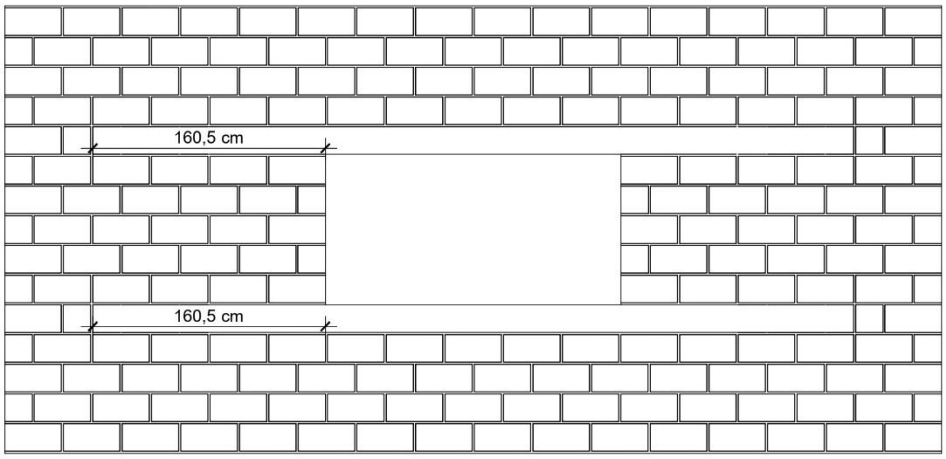
Fonte: Elaborada pelo autor, 2026

Figura 36 – Configuração Tipo D: transpasse de 3 blocos



Fonte: Elaborada pelo autor, 2026

Figura 37 – Configuração Tipo E: transpasse de 4 blocos



Fonte: Elaborada pelo autor, 2026

A comparação entre os modelos permitiu avaliar, inicialmente, as alterações associadas à introdução da abertura em relação ao painel de referência e, entre as tipologias com vão, os efeitos da redução ou do aumento do comprimento de transpasse sobre a distribuição das tensões. Dessa forma, a análise paramétrica foi direcionada à compreensão da interação entre as vergas, as contravergas e a alvenaria adjacente sob diferentes extensões de transpasse. A formulação original já tinha esse foco na influência do comprimento das peças sobre a interação com a alvenaria, mas agora ele passa a incluir também o painel sem abertura como referência.

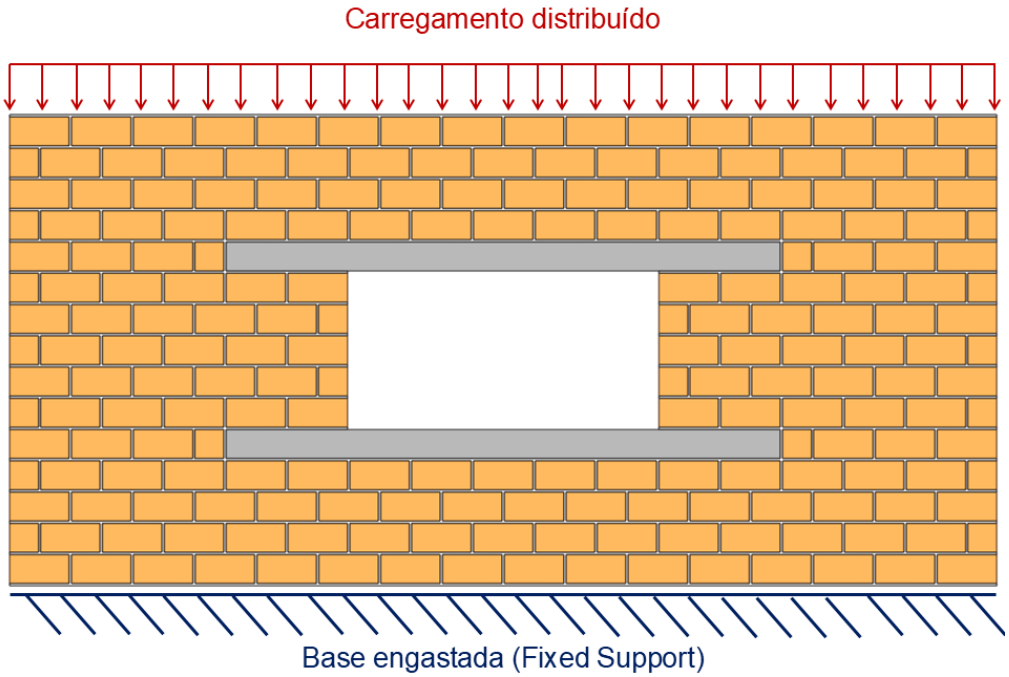
3.4. Condições de contorno e carregamentos

As condições de contorno e os carregamentos foram definidos com o objetivo de representar, de forma simplificada, o comportamento de uma parede de alvenaria estrutural submetida à ação de carregamentos verticais provenientes dos pavimentos superiores. A face inferior da primeira fiada de blocos foi considerada totalmente restringida, impedindo os deslocamentos nas três direções e representando, de forma idealizada, o apoio da parede sobre uma base rígida.

As análises foram limitadas aos efeitos decorrentes das ações verticais. Dessa forma, não foram consideradas ações horizontais, como as provenientes do vento, nem deslocamentos impostos associados a possíveis distorções da fundação. Essa delimitação foi adotada de modo a concentrar a análise na influência do comprimento de transpasse das vergas e contravergas sobre a distribuição das tensões provocadas pelos carregamentos verticais.

A Figura 38 apresenta esquematicamente as condições de contorno adotadas e a aplicação do carregamento vertical sobre a face superior do painel.

Figura 38 – Representação das condições de contorno e da aplicação do carregamento vertical



Fonte: Elaborada pelo autor, 2026

A determinação dos carregamentos verticais considerou uma laje maciça de concreto armado representativa de um cômodo com dimensões de 6,50 m × 6,50 m, resultando em área de 42,25 m². Como hipótese simplificada de distribuição, considerou-se que a carga total correspondente a essa área seria transmitida igualmente às quatro paredes de contorno, de modo que o painel analisado recebesse 25% da carga total. Essa hipótese foi mantida em todos os cenários e tipologias, garantindo a aplicação das mesmas condições de carregamento externo aos diferentes comprimentos de transpasse.

Para o peso próprio da laje, considerou-se espessura de 12,0 cm e peso específico do concreto armado de 25,0 kN/m³, resultando em uma carga permanente de 3,0 kN/m², conforme indicado na Equação (2).

$$g_{laje} = \gamma \cdot h = 25{,}0 \cdot 0{,}12 = 3{,}0\ kN/m^2 \tag{2}$$

Em que:

g_{laje} = carga correspondente ao peso próprio da laje (kN/m²);

γ = peso específico do concreto armado (kN/m³);

h = espessura da laje (m).

Para o cenário correspondente somente à cobertura, foi considerada, além do peso próprio da laje, uma carga de cobertura de 1,5 kN/m². Dessa forma, a parcela transmitida à parede foi calculada a partir da Equação (3):

$$P_{cob} = (g_{laje} + q_{cob}) \cdot A \cdot 0{,}25$$
$$P_{cob} = (3{,}0 + 1{,}5) \cdot 42{,}25 \cdot 0{,}25 = 47{,}53125\ kN \tag{3}$$

Em que:

P_{cob} = carregamento da cobertura direcionado à parede (kN);

q_{cob} = carregamento de utilização da cobertura (kN/m²);

A = área considerada no cálculo (m²).

Para cada pavimento de utilização acrescentado acima do painel analisado, foi considerada uma carga de utilização de 4,0 kN/m², somada ao peso próprio da laje. Além dessas ações, foi incluído o peso correspondente a uma parede estrutural sem abertura com as mesmas dimensões globais dos painéis analisados. A massa dessa

parede foi obtida no modelo numérico como 1.971,6 kg e foi adotada como valor de referência para todos os pavimentos, independentemente da tipologia de transpasse analisada. Considerando a aceleração da gravidade igual a 9,81 m/s², obteve-se a partir da Equação (4):

$$P_{parede} = m \cdot g$$
$$P_{parede} = 1971{,}6 \cdot 9{,}81 = 19341{,}396\ N = 19{,}341396\ kN \quad (4)$$

Em que:

P_{parede} = peso próprio do painel (N);

m = massa do painel (kg);

g = aceleração da gravidade (m/s²).

A contribuição correspondente a cada pavimento de utilização foi, portanto, determinada pela soma entre as ações da laje e o peso da parede de referência, como apresentado na Equação (5):

$$P_{pav} = \left(g_{laje} + q_{uso}\right) \cdot A \cdot 0{,}25 + P_{parede}$$
$$P_{pav} = (3{,}0 + 4{,}0) \cdot 42{,}25 \cdot 0{,}25 + 19{,}341396 \quad (5)$$
$$P_{pav} = 93{,}278896\ kN = 93278{,}896\ N$$

Em que:

P_{pav} = carregamento do pavimento direcionado à parede (kN);

g_{laje} = carga correspondente ao peso próprio da laje (kN/m²);

q_{uso} = carregamento de utilização do pavimento (kN/m²).

A partir desses valores, foram definidos cinco cenários de carregamento acumulado: cobertura; cobertura acrescida de um pavimento; cobertura acrescida de dois pavimentos; cobertura acrescida de três pavimentos; e cobertura acrescida de quatro pavimentos. Para um número n de pavimentos de utilização, a força total aplicada foi determinada pela Equação (6):

$$P_n = P_{cob} + \mathrm{n}P_{pav} \quad (6)$$

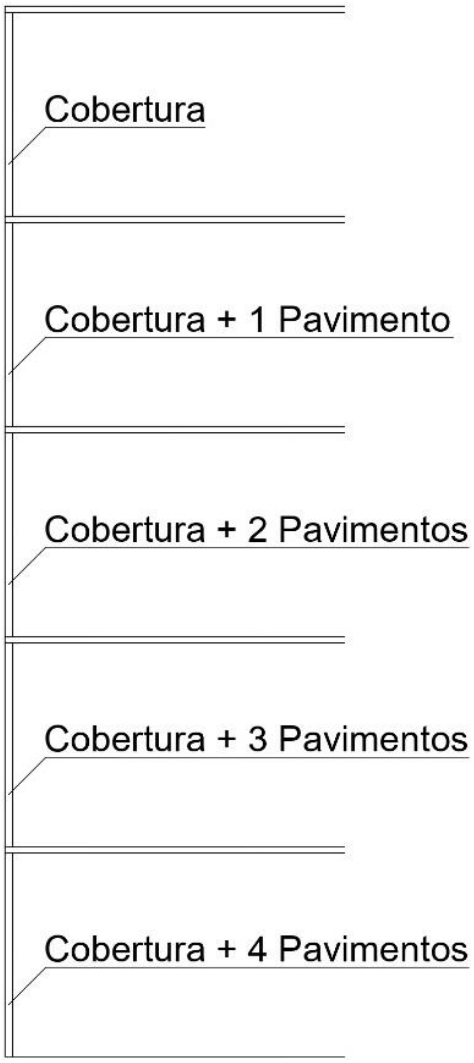
Em que:

P_n = carregamento referente a n pavimentos direcionados à parede (kN);

n = número de pavimentos.

A partir desses valores, foram definidos cinco cenários de carregamento acumulado: cobertura; cobertura acrescida de um pavimento; cobertura acrescida de dois pavimentos; cobertura acrescida de três pavimentos; e cobertura acrescida de quatro pavimentos. A correspondência entre esses cenários e as diferentes posições do painel ao longo da edificação é apresentada esquematicamente na Figura 39.

Figura 39 – Representação esquemática dos cenários de carregamento vertical acumulado considerados nas análises



Nota: A figura representa esquematicamente os níveis de carregamento considerados; os pavimentos completos da edificação não foram modelados nas análises numéricas.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2026

Os carregamentos resultantes são apresentados na Tabela 8:

Tabela 8 – Carregamentos verticais aplicados nos cenários de análise

Cenário de carregamento	Força vertical aplicada (N)
Cobertura	47.531,250
Cobertura + 1 pavimento	140.810,146
Cobertura + 2 pavimentos	234.089,042
Cobertura + 3 pavimentos	327.367,938
Cobertura + 4 pavimentos	420.646,834

Fonte: Dados da pesquisa, 2026

Os mesmos valores de carregamento foram aplicados a todas as tipologias com abertura. A adoção da massa da parede sem abertura como referência eliminou a variação das cargas em função das diferenças de geometria e massa provocadas pelos comprimentos de transpasse, permitindo que as comparações entre os modelos fossem realizadas sob condições externas equivalentes. Dessa forma, as diferenças observadas nos campos de tensão e nos deslocamentos podem ser associadas principalmente às alterações geométricas das vergas e contravergas, dentro das hipóteses adotadas na modelagem.

3.5. Grandezas analisadas e critérios de interpretação

Para a avaliação do comportamento dos modelos, foram analisadas principalmente as tensões principais máxima e mínima e os deslocamentos desenvolvidos nos componentes X e Y do painel. A tensão principal máxima (σ_1) foi utilizada para a avaliação das solicitações de tração, enquanto a tensão principal mínima (σ_3) foi utilizada para a análise das solicitações de compressão. Essas grandezas foram obtidas diretamente no pós-processamento das análises realizadas no ANSYS.

Nos blocos cerâmicos e nas juntas de argamassa, representados com comportamento elástico linear, a interpretação das solicitações de tração foi realizada com base no critério da máxima tensão principal de Rankine, apresentado no Capítulo 2. Assim, os valores de σ_1 foram comparados às resistências à tração adotadas para os respectivos materiais, permitindo identificar regiões potencialmente críticas sob

solicitação trativa. Para a compressão, os valores de σ_3 foram comparados às resistências à compressão de referência.

Ressalta-se que, para os componentes representados em regime elástico linear, a ultrapassagem das resistências de referência não corresponde à simulação explícita da fissuração, do esmagamento ou da ruptura do material. Esses valores foram utilizados como indicadores das regiões mais solicitadas e como parâmetros para a comparação entre as diferentes configurações analisadas.

Para o concreto das vergas e contravergas, também foram utilizadas as tensões principais máxima (σ_1) e mínima (σ_3) como grandezas de pós-processamento. Nesse caso, entretanto, os valores resultam de uma análise na qual o comportamento do concreto foi representado por um modelo constitutivo não linear baseado no critério de Drucker-Prager e nos parâmetros de energia de fratura descritos anteriormente. Dessa forma, o critério de Drucker-Prager está associado à representação do comportamento do material durante a solução numérica, enquanto as tensões principais foram utilizadas para a apresentação e comparação dos resultados obtidos nos elementos de concreto.

Por fim, a interpretação dos resultados considerou o caráter determinístico das análises numéricas realizadas. Para cada combinação entre tipologia e cenário de carregamento, foi obtida uma única resposta a partir das propriedades dos materiais, condições de contorno e demais parâmetros definidos no modelo. Os diferentes níveis de carregamento representam, portanto, condições distintas de solicitação e não repetições amostrais de uma mesma condição. Dessa forma, a comparação entre as tipologias foi baseada nos valores obtidos, nas diferenças relativas e na manutenção das tendências entre os cenários analisados, não sendo empregados testes estatísticos inferenciais de significância.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nas simulações numéricas realizadas no *software* ANSYS para as cinco tipologias de comprimento de transpasse analisadas, além do modelo de parede sem abertura utilizado como referência. Os modelos foram submetidos a cinco cenários de carregamento vertical acumulado, correspondentes à cobertura e à cobertura acrescida de um, dois, três e quatro pavimentos de utilização, conforme descrito no Capítulo 3.

A análise dos resultados foi conduzida com o objetivo de avaliar a influência do comprimento de transpasse das vergas e contravergas sobre a distribuição das tensões e os deslocamentos nas regiões adjacentes à abertura. A interpretação considerou as hipóteses constitutivas e as simplificações adotadas na modelagem, sendo realizada principalmente a partir dos campos de tensões principais, dos deslocamentos e da localização das regiões mais solicitadas.

Para os blocos cerâmicos e as juntas de argamassa, representados em regime elástico linear, os valores de tensão foram utilizados de forma comparativa e como indicadores de regiões potencialmente críticas, não correspondendo à simulação explícita da propagação de fissuras ou da ruptura desses componentes. Para o concreto das vergas e contravergas, os resultados decorrem do modelo constitutivo não linear apresentado no Capítulo 3.

No pós-processamento realizado no ANSYS, foram utilizadas a tensão principal máxima (σ_1), associada às solicitações de tração, e a tensão principal mínima (σ_3), associada às solicitações de compressão. Os critérios adotados para a interpretação dessas grandezas, incluindo a utilização do critério de Rankine como referência para a avaliação das solicitações de tração nos componentes frágeis da alvenaria, são apresentados no item 3.5.

Para evitar a repetição descritiva dos resultados de cada modelo, a discussão foi organizada por fenômeno mecânico observado. Inicialmente, avalia-se o comportamento global do painel e a distribuição das tensões na alvenaria. Em seguida, são discutidos os efeitos do comprimento de transpasse sobre as vergas e contravergas, o comportamento das juntas de argamassa, os deslocamentos verticais e, por fim, a comparação geral entre as configurações analisadas. As tabelas complementares referentes aos diferentes cenários de carregamento são

apresentadas no Apêndice B. Já as imagens das tensões e deslocamentos tanto do Modelo SA como das tipologias A-E no cenário de carregamento de cobertura + 4 pavimentos são apresentadas no Apêndice C.

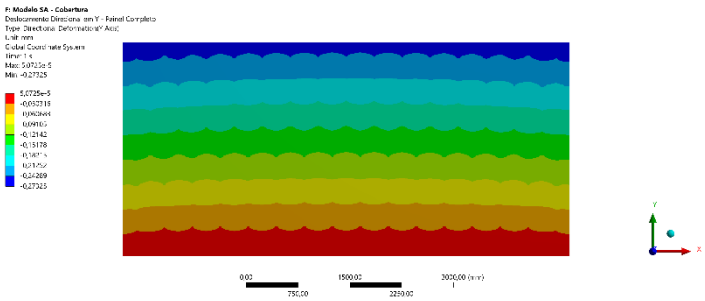
4.1. Comportamento global e efeito da introdução da abertura

A análise inicial dos resultados foi direcionada à avaliação do efeito provocado pela introdução da abertura no comportamento global do painel. Para isso, o modelo de parede sem abertura (SA) foi comparado às tipologias com vão sob o mesmo cenário de carregamento, correspondente somente à cobertura. Essa condição foi adotada porque o modelo SA foi analisado apenas nesse nível de solicitação, sendo utilizado como referência para caracterizar as alterações decorrentes da descontinuidade geométrica introduzida pela abertura. Nos itens seguintes, a análise passa a se concentrar exclusivamente nas cinco tipologias com abertura.

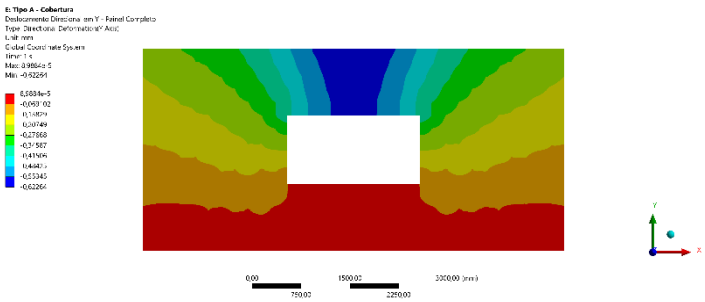
Na parede sem abertura, o carregamento vertical é transmitido de maneira relativamente uniforme ao longo da altura e da largura do painel. O campo de deslocamentos verticais apresenta faixas aproximadamente horizontais, com aumento progressivo do deslocamento em direção ao topo da parede, comportamento compatível com a deformação de um painel contínuo submetido predominantemente à compressão vertical. O deslocamento vertical máximo obtido nesse modelo foi de aproximadamente 0,273 mm.

A introdução da abertura modifica de forma evidente esse padrão. Como exemplo representativo, a Figura 40 compara os campos de deslocamento vertical do modelo SA e da configuração Tipo A, ambos submetidos somente ao carregamento da cobertura. No painel com abertura, as linhas de igual deslocamento deixam de apresentar o padrão predominantemente horizontal observado na parede íntegra e passam a se curvar nas proximidades do vão. A região situada acima da abertura apresenta maior deslocamento vertical, enquanto a deformação se distribui lateralmente em direção às regiões adjacentes ao vão.

Figura 40 – Distribuição dos deslocamentos verticais (Uy) sob o carregamento correspondente à cobertura: (a) Modelo SA; (b) Tipo A



(a)



(b)

Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

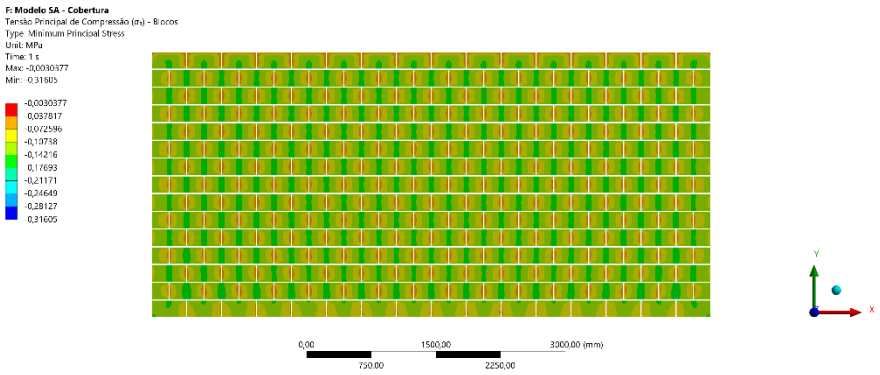
Esse efeito não se restringe à configuração Tipo A. Sob o mesmo carregamento, os deslocamentos verticais máximos das cinco tipologias com abertura variaram entre aproximadamente 0,576 mm e 0,623 mm, enquanto o modelo SA apresentou 0,273 mm. Assim, mesmo antes de considerar as diferenças decorrentes do comprimento de transpasse, a simples introdução do vão produz aumento expressivo da deformabilidade vertical do painel.

A alteração observada nos deslocamentos está associada à modificação do caminho de transmissão dos esforços. Na parede sem abertura, não existe uma descontinuidade geométrica central que impeça a transferência direta das ações verticais entre as fiadas. Consequentemente, as tensões principais de compressão apresentam uma distribuição global relativamente regular ao longo da parede, ainda que ocorram variações locais relacionadas à geometria vazada dos blocos cerâmicos. O valor máximo de compressão obtido no modelo SA foi de aproximadamente 0,316 MPa.

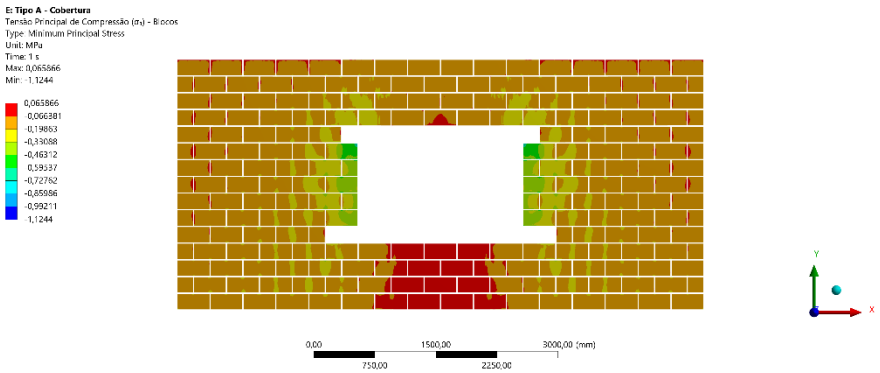
Com a presença do vão, essa trajetória direta é interrompida. Os esforços provenientes da região superior precisam contornar a abertura e ser transferidos para

as faixas laterais da parede por meio da interação entre os blocos, as juntas de argamassa e a verga. Como consequência, surgem regiões de maior concentração compressiva nas proximidades dos cantos superiores do vão e, principalmente, junto aos apoios da verga. A Figura 41 evidencia essa alteração ao comparar o campo de tensões principais de compressão nos blocos do modelo SA com aquele observado no Tipo A.

Figura 41 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) nos blocos cerâmicos sob o carregamento correspondente à cobertura:
(a) modelo SA; (b) Tipo A



(a)



(b)

Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

No Tipo A, o maior valor compressivo nos blocos foi de aproximadamente 1,124 MPa e ocorreu na região imediatamente adjacente ao encontro com a verga. Nas demais tipologias com abertura, os valores máximos sob o mesmo carregamento variaram entre aproximadamente 1,043 MPa e 1,072 MPa. Portanto, apesar das diferenças entre os comprimentos de transpasse, todas as configurações com

abertura apresentaram picos compressivos substancialmente superiores ao observado na parede íntegra, confirmando que a presença do vão é responsável pela formação de regiões localizadas de concentração de tensões.

Mais importante do que o aumento do valor máximo é a alteração da própria distribuição espacial dos esforços. Enquanto no modelo SA as tensões compressivas permanecem distribuídas de forma relativamente regular ao longo da largura do painel, nos modelos com abertura ocorre um desvio das trajetórias de compressão para as regiões laterais do vão. A verga atua como elemento de transição, transferindo parte dos esforços provenientes da região superior para a alvenaria adjacente, enquanto as faixas laterais passam a participar de forma mais intensa da condução das ações verticais. Esse comportamento caracteriza a abertura como uma região de descontinuidade no fluxo de tensões e explica a formação das concentrações observadas em seus cantos e apoios.

Os resultados mostram, portanto, que a introdução da abertura altera tanto a deformabilidade global quanto o caminho de transmissão dos esforços no painel. Entretanto, essa comparação inicial não permite, por si só, avaliar qual comprimento de transpasse apresenta comportamento mais favorável. O modelo SA tem como função estabelecer a resposta de referência da parede íntegra e, por ter sido analisado apenas sob o carregamento correspondente à cobertura, não é utilizado nas comparações realizadas nos itens seguintes. A partir do item 4.2, a análise concentra-se nas cinco tipologias com abertura, considerando principalmente o cenário de maior solicitação para a interpretação dos campos de tensão e os cinco níveis de carregamento para a avaliação quantitativa da influência do comprimento de transpasse.

4.2. Redistribuição das tensões na alvenaria e regiões adjacentes ao vão

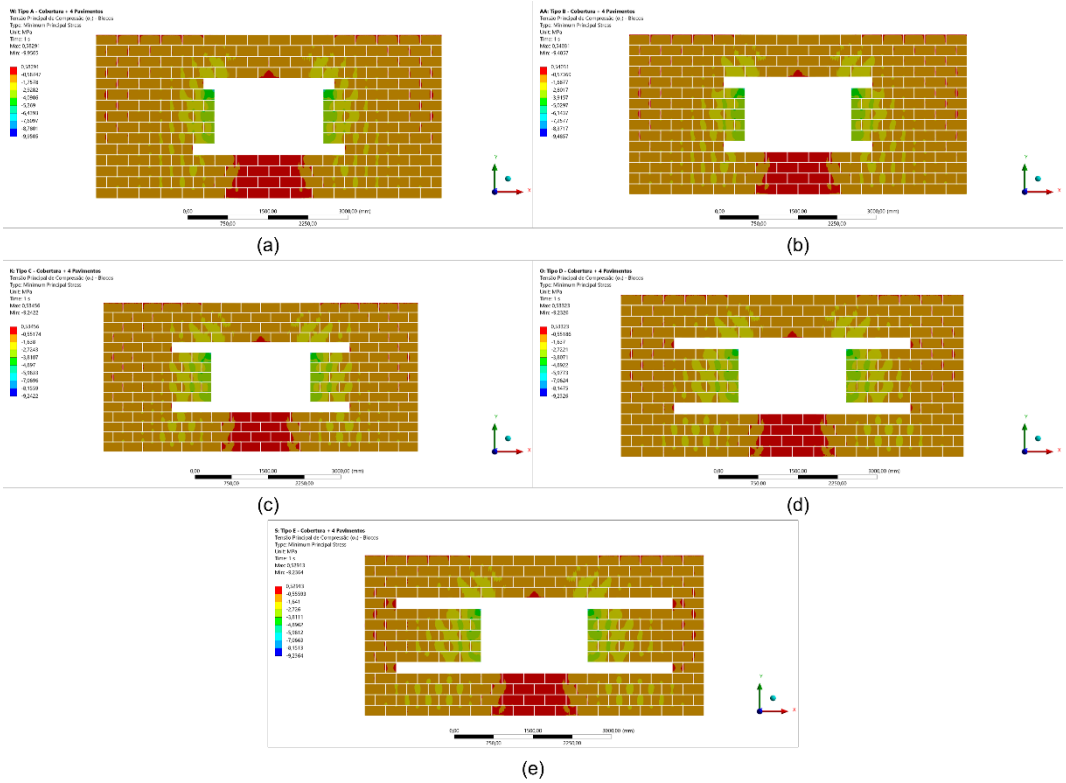
Uma vez caracterizado o efeito da introdução da abertura sobre o comportamento global do painel, a análise passa a se concentrar nas cinco tipologias com vão, buscando identificar de que forma o comprimento de transpasse das vergas e contravergas interfere na distribuição das tensões na alvenaria. Para a interpretação dos campos de tensão, são apresentados neste item os resultados referentes ao cenário de maior solicitação, correspondente à cobertura acrescida de quatro

pavimentos. Os demais níveis de carregamento são utilizados de forma complementar para verificar a permanência das tendências observadas.

Inicialmente, foram analisadas as tensões principais de compressão (σ_3) nos blocos cerâmicos. De maneira geral, as cinco tipologias apresentaram padrão semelhante de redistribuição dos esforços ao redor da abertura. A interrupção do caminho vertical das tensões provocada pelo vão direciona parte das solicitações para as regiões laterais da parede, produzindo maiores concentrações compressivas nos blocos próximos aos apoios da verga. Assim, embora o comprimento de transpasse interfira na intensidade das solicitações locais, a posição das principais regiões de concentração permanece associada à própria descontinuidade geométrica introduzida pela abertura.

A Figura 42 apresenta os campos de tensão principal de compressão nos blocos cerâmicos para as cinco tipologias sob o carregamento correspondente à cobertura acrescida de quatro pavimentos.

Figura 42 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) nos blocos cerâmicos sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos: (a) Tipo A; (b) Tipo B; (c) Tipo C; (d) Tipo D; (e) Tipo E



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

A comparação dos campos de tensão indica que o aumento do comprimento de transpasse não modifica de forma expressiva o mecanismo global de redistribuição das tensões compressivas ao redor da abertura. Os Tipos A e B apresentam configurações bastante semelhantes entre si, com trajetórias de compressão concentradas nas regiões laterais do vão. Na configuração Tipo C observa-se uma discreta ampliação da região envolvida por essas trajetórias, sugerindo maior dispersão dos esforços para a alvenaria adjacente. A partir desse comprimento, entretanto, os Tipos D e E mantêm padrão global muito próximo ao observado no Tipo C, embora permaneçam pequenas diferenças locais nos contornos de tensão. Esse comportamento sugere uma tendência de estabilização da forma de redistribuição das tensões a partir da configuração correspondente a dois blocos de transpasse.

Essa tendência visual também se manifesta nos valores máximos de compressão obtidos junto ao encontro entre a verga e a alvenaria. No cenário de maior carregamento, foram registrados 9,9505 MPa para o Tipo A, 9,4857 MPa para o Tipo B, 9,2422 MPa para o Tipo C, 9,2326 MPa para o Tipo D e 9,2364 MPa para o Tipo E. Observa-se, portanto, uma redução progressiva mais evidente entre os Tipos A e C, seguida por variações muito pequenas entre C, D e E.

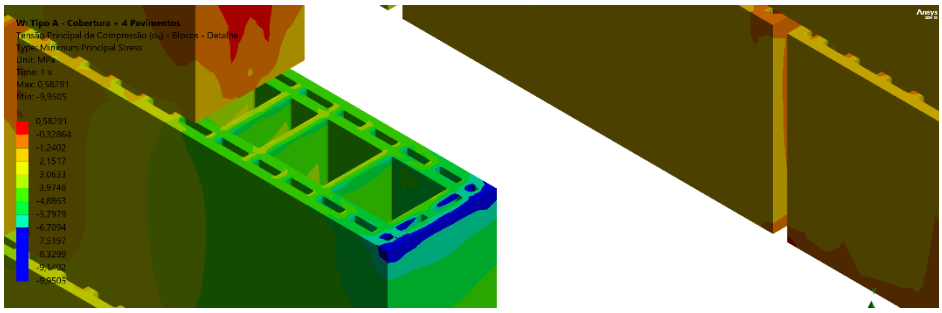
A redução entre as primeiras configurações indica que o aumento inicial do transpasse favorece a distribuição das solicitações compressivas para uma região mais extensa da alvenaria adjacente. Entretanto, os acréscimos realizados após o Tipo C produzem influência muito limitada tanto sobre os valores máximos quanto sobre a configuração global dos campos de tensão. Dessa forma, para essa grandeza, os resultados apontam para uma redução dos ganhos marginais a partir da configuração correspondente a dois blocos de transpasse, e não para uma diminuição contínua das tensões à medida que o comprimento das peças aumenta.

Os mapas também mostram que os valores máximos estão associados a regiões relativamente localizadas dos blocos, especialmente nas proximidades do contato entre a alvenaria, a argamassa e a extremidade da verga. Em razão da geometria vazada dos componentes cerâmicos, formada por abas e septos de pequena espessura, essas regiões apresentam gradientes de tensão mais elevados. Dessa forma, a avaliação dos valores máximos deve ser realizada em conjunto com sua distribuição espacial, evitando que um pico localizado seja interpretado isoladamente como representativo de toda a região adjacente ao vão. Essa

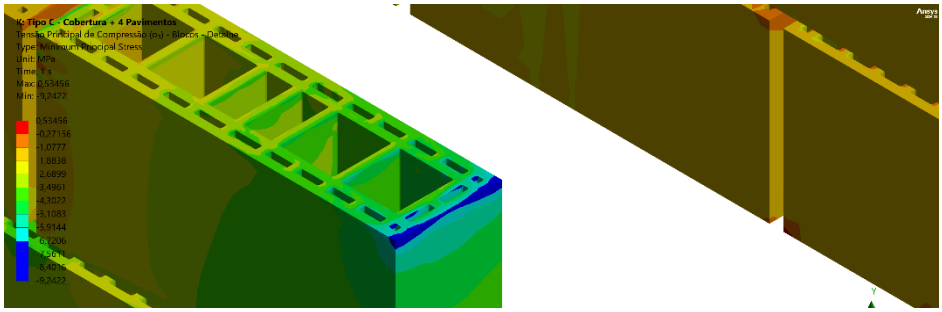
característica já havia sido observada na análise anterior dos modelos, na qual os máximos se concentravam principalmente nas proximidades dos septos e das regiões de contato.

A Figura 43 apresenta uma ampliação das regiões de maior concentração compressiva em três configurações representativas do intervalo de comprimentos analisado, permitindo comparar a condição de menor transpasse, a configuração correspondente a dois blocos e o maior comprimento estudado.

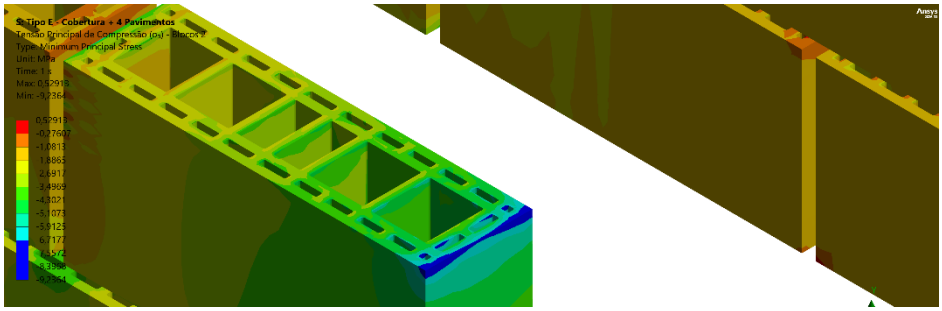
Figura 43 – Detalhe da região de concentração das tensões principais de compressão (σ_3) nos blocos cerâmicos adjacentes ao apoio da verga sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos:
(a) Tipo A; (b) Tipo C; (c) Tipo E



(a)



(b)



(c)

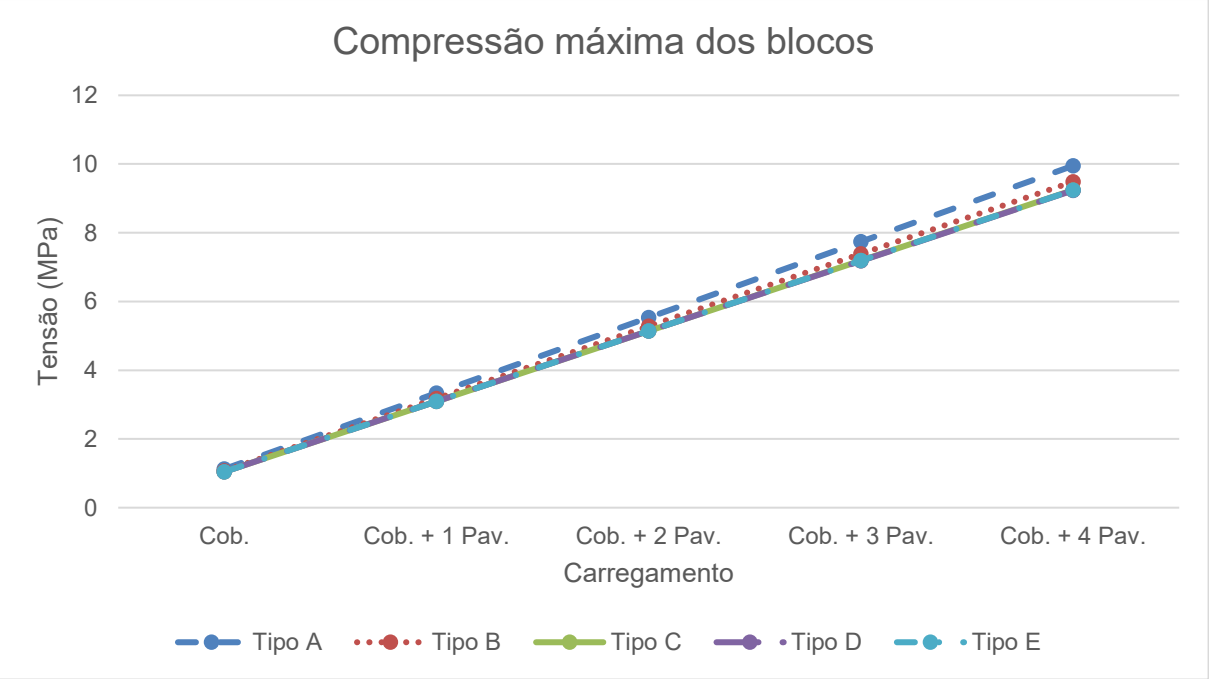
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Os valores máximos obtidos no cenário de maior carregamento superam a resistência à compressão de referência adotada para os blocos cerâmicos. Entretanto, como esses componentes foram representados por comportamento elástico linear, essa condição não corresponde à simulação explícita de esmagamento ou de ruptura progressiva do material. Conforme estabelecido nos critérios de interpretação apresentados no Capítulo 3, esses resultados são utilizados como indicadores das regiões potencialmente críticas e como parâmetros de comparação entre as diferentes configurações.

A mesma tendência observada no cenário de maior solicitação permanece nos demais níveis de carregamento. Em todos os casos, o Tipo A apresenta o maior valor de compressão na região analisada, seguido pelo Tipo B, enquanto os resultados dos Tipos C, D e E permanecem bastante próximos. O aumento do carregamento vertical eleva a magnitude das tensões, porém não altera de forma relevante a ordem relativa das tipologias nem o mecanismo identificado nos mapas.

A Figura Z apresenta a evolução dos valores máximos de compressão nos blocos cerâmicos para os cinco cenários de carregamento.

Figura 44 – Tensões principais máximas de compressão (σ_3) nos blocos cerâmicos em função da tipologia e do cenário de carregamento

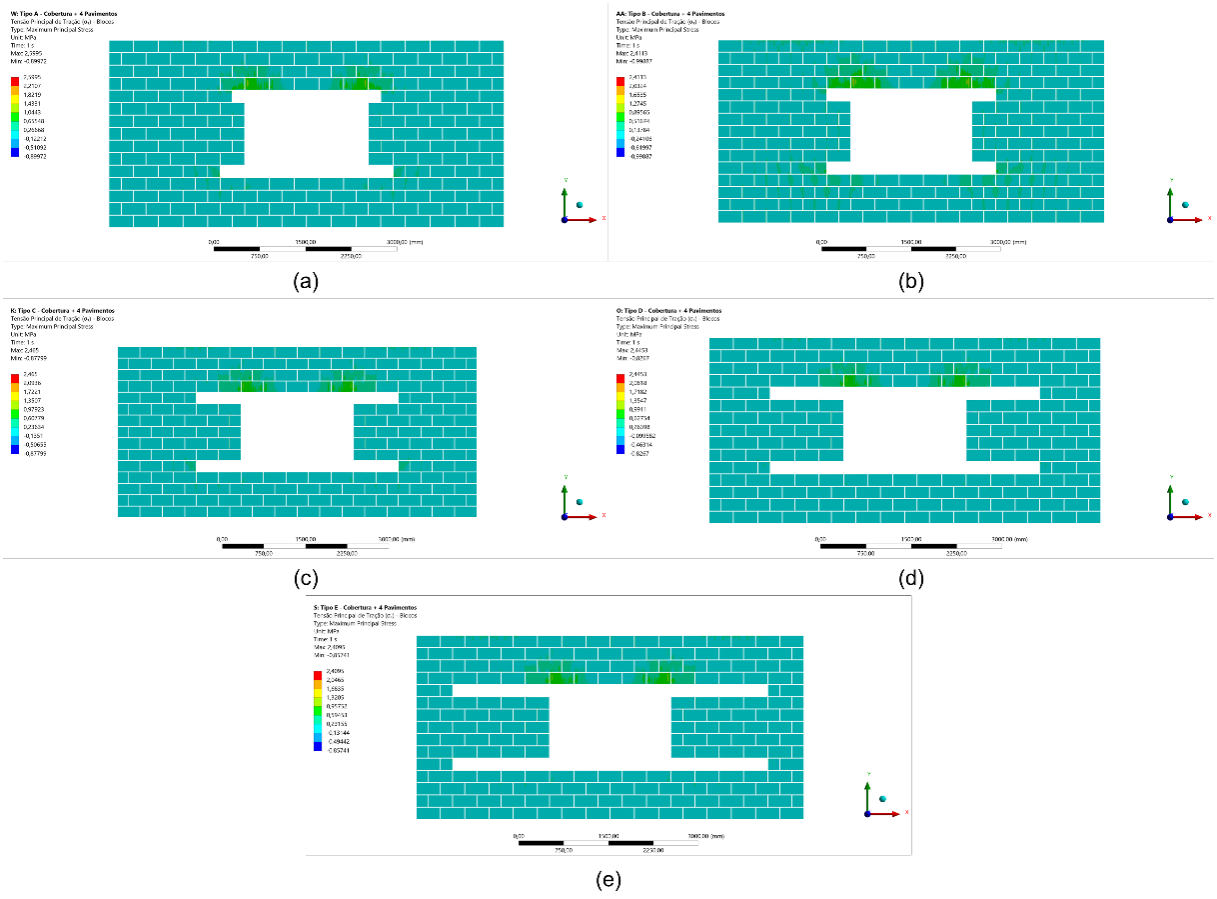


Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Além das solicitações compressivas, foram avaliadas as tensões principais de tração (σ_1) nos blocos cerâmicos. Diferentemente da compressão, os resultados de tração não apresentaram uma tendência monotônica clara com o aumento do comprimento de transpasse. As maiores solicitações permaneceram concentradas principalmente na região superior da abertura e nas proximidades de seus cantos, indicando que a formação desses campos trativos está mais diretamente associada à descontinuidade geométrica introduzida pelo vão.

A Figura 45 apresenta a distribuição das tensões principais de tração nos blocos cerâmicos para as cinco tipologias no cenário correspondente à cobertura acrescida de quatro pavimentos.

Figura 45 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) nos blocos cerâmicos sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos:
(a) Tipo A; (b) Tipo B; (c) Tipo C; (d) Tipo D; (e) Tipo E



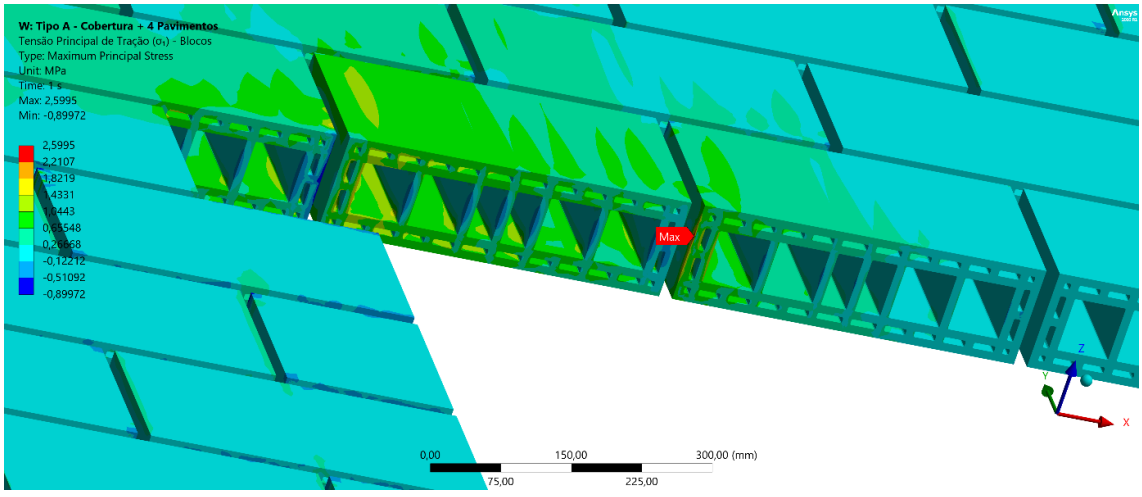
(a) (b) (c) (d) (e)

Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Os campos de tração apresentaram distribuição semelhante entre as tipologias, com as maiores solicitações concentradas na região imediatamente acima da abertura. Diferentemente das tensões compressivas, não se observou uma alteração progressiva do padrão espacial com o aumento do transpasse. No cenário de maior solicitação, os valores máximos de σ_1 variaram entre 2,4095 MPa e 2,5995 MPa, sendo o maior valor registrado no Tipo A. As pequenas oscilações entre os Tipos B, C, D e E indicam que o aumento do comprimento de transpasse exerceu influência limitada sobre as tensões máximas de tração.

A Figura 46 apresenta uma ampliação da região de ocorrência do valor máximo de σ_1 no Tipo A. Observa-se que o pico de 2,5995 MPa está concentrado em uma região reduzida das abas e septos do bloco imediatamente acima da abertura, com rápida redução das tensões nas regiões adjacentes. Dessa forma, o valor máximo caracteriza uma concentração localizada, e não um estado de tração uniforme na região superior do painel.

Figura 46 – Detalhe da região de ocorrência da tensão principal máxima de tração (σ_1) nos blocos cerâmicos do Tipo A sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

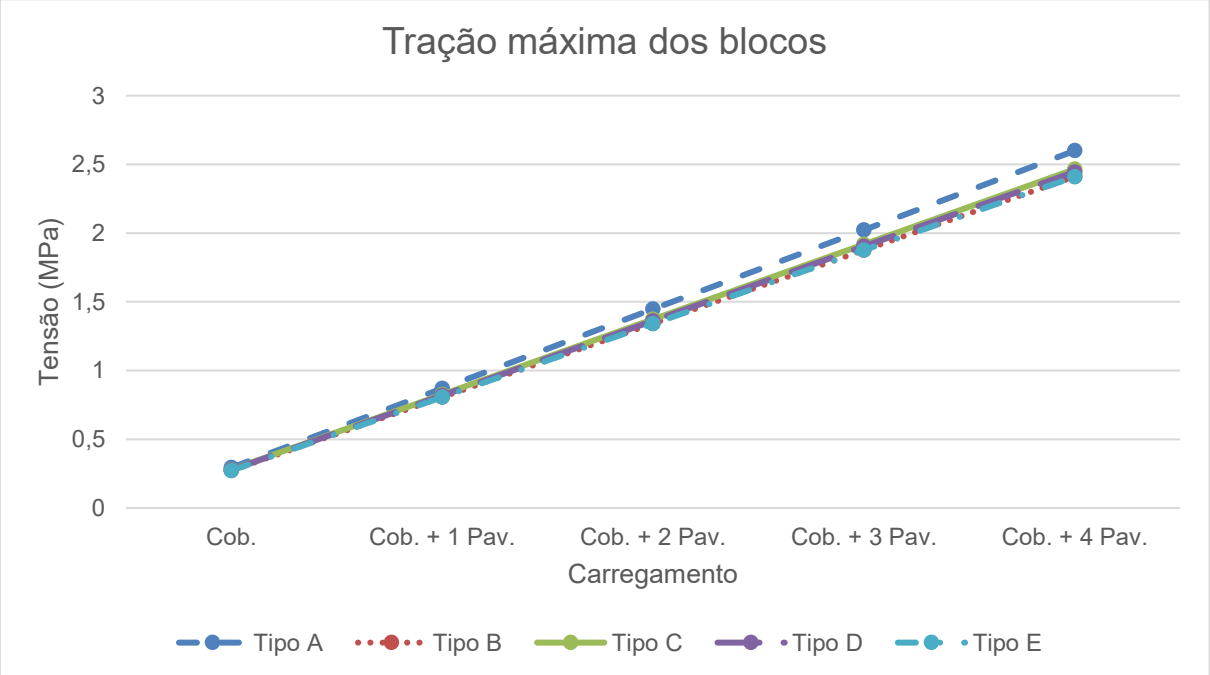
Esse caráter localizado é particularmente relevante na comparação com a resistência à tração adotada para o material cerâmico. No cenário correspondente somente à cobertura, os valores máximos permaneceram entre aproximadamente 0,27 MPa e 0,29 MPa, abaixo da resistência de referência de 0,672 MPa. A partir do

cenário correspondente à cobertura acrescida de um pavimento, entretanto, os valores máximos passam a superar essa referência, atingindo entre aproximadamente 0,81 MPa e 0,87 MPa já nesse nível de carregamento.

Como os blocos foram representados por comportamento elástico linear, essa ultrapassagem não corresponde à simulação explícita do início ou da propagação de fissuras. A comparação com a resistência à tração, fundamentada no critério de interpretação apresentado no Capítulo 3, permite apenas identificar regiões potencialmente críticas sob solicitação trativa. A Figura 46 reforça essa distinção, uma vez que evidencia que os maiores valores se concentram em regiões pontuais da geometria vazada do componente, não caracterizando uma solicitação generalizada de toda a alvenaria acima do vão.

A Figura 47 apresenta a evolução dos valores máximos de tração nos blocos cerâmicos para os cinco níveis de carregamento.

Figura 47 – Tensões principais máximas de tração (σ_1) nos blocos cerâmicos em função da tipologia e do cenário de carregamento



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

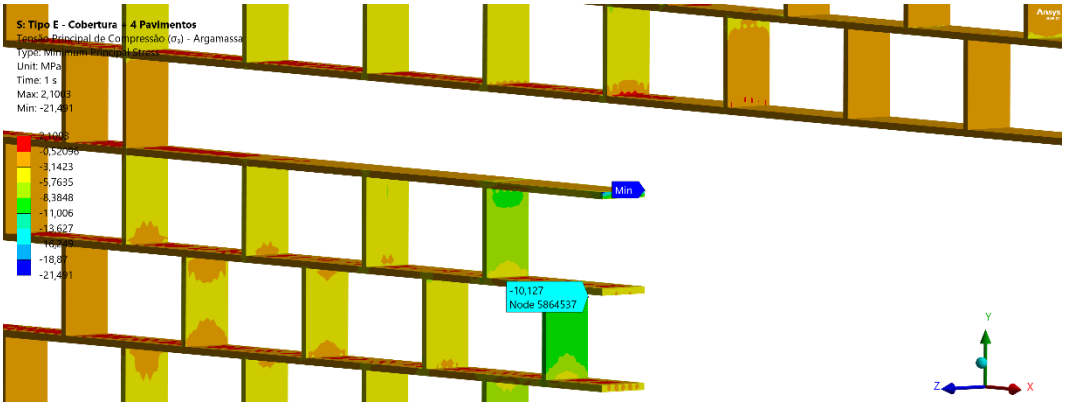
O aumento do carregamento provoca crescimento aproximadamente proporcional da magnitude das tensões, sem modificar substancialmente a relação

observada entre as tipologias. Em todos os níveis analisados, o Tipo A permanece com o maior valor, enquanto os demais modelos apresentam resultados próximos e pequenas alternâncias entre si. Dessa forma, não se observa para a tração a mesma tendência de estabilização claramente identificada nas tensões compressivas a partir do Tipo C; o que se verifica é uma influência globalmente reduzida do comprimento de transpasse sobre essa resposta.

Além dos blocos cerâmicos, também foram avaliadas as tensões desenvolvidas nas juntas de argamassa, com o objetivo de verificar de que forma a variação do comprimento de transpasse interfere na transferência dos esforços entre os diferentes componentes da alvenaria. Nessa etapa, foram considerados tanto os picos localizados próximos ao início dos transpasses quanto as tensões desenvolvidas nas juntas verticais situadas entre a verga e a contraverga.

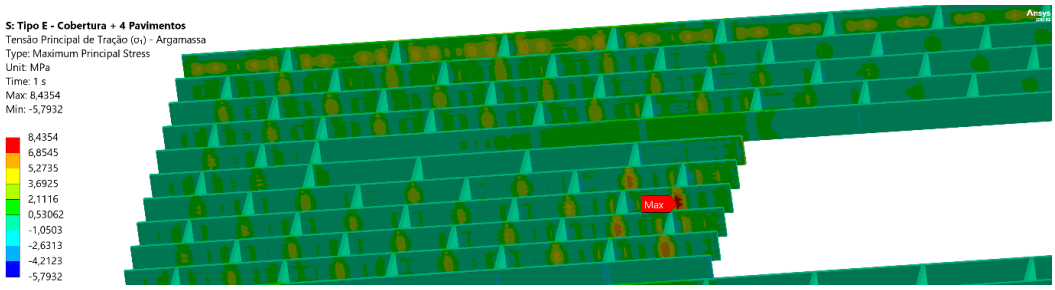
As Figuras 48 e 49 apresentam o detalhe dos locais apresentando os picos de tensão e a distribuição das tensões principais de compressão e de tração na argamassa para o Tipo E, sob o carregamento correspondente à cobertura acrescida de quatro pavimentos. Observa-se que as maiores solicitações se concentram nas regiões adjacentes ao vão, especialmente nas juntas verticais compreendidas entre a verga e a contraverga e nas proximidades do início dos transpasses, evidenciando o papel da argamassa na transferência local dos esforços entre os elementos da alvenaria.

Figura 48 – Detalhe e distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) na argamassa do Tipo E sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos, detalhando o valor máximo e as tensões nas juntas adjacentes à abertura



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura 49 – Detalhe e distribuição das tensões principais de tração (σ_1) na argamassa do Tipo E sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos, detalhando o valor máximo e as tensões nas juntas adjacentes à abertura



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

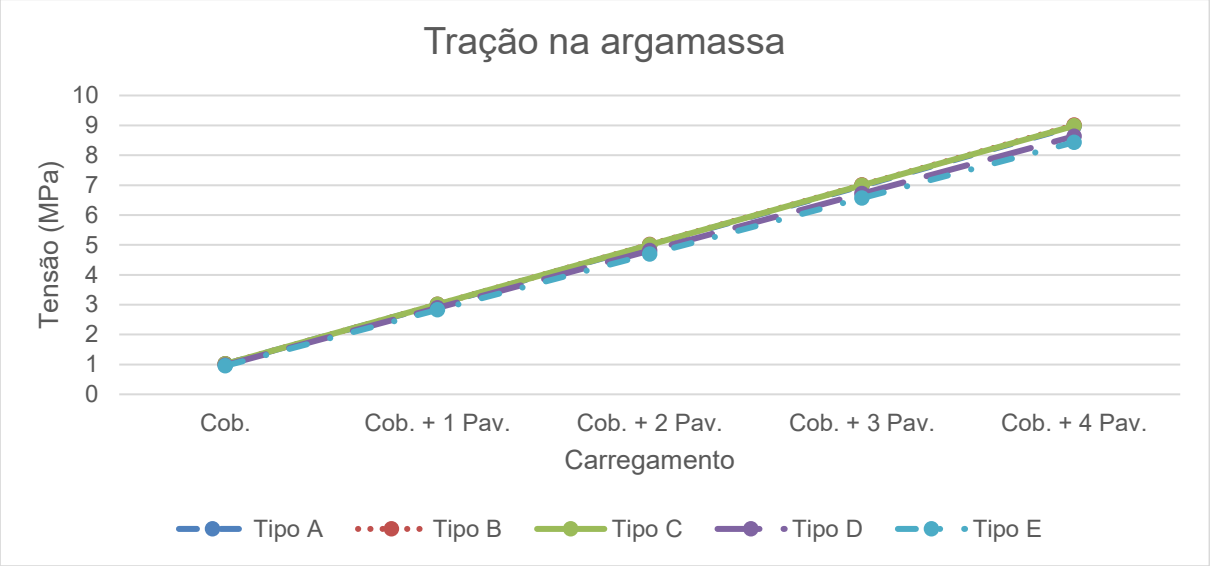
Os maiores valores pontuais de compressão ocorreram próximos ao início dos transpasses. No cenário correspondente à cobertura acrescida de quatro pavimentos, esses valores variaram entre 20,166 MPa e 21,491 MPa, sem apresentar uma relação monotônica com o aumento do comprimento das peças. Por se tratar de concentrações bastante localizadas e sem uma tendência consistente entre as tipologias, esses máximos foram utilizados principalmente para caracterizar as regiões de transferência local dos esforços, não sendo adotados como principal parâmetro de comparação entre os diferentes comprimentos de transpasse.

Nas juntas verticais localizadas entre a verga e a contraverga, entretanto, foi identificada uma tendência mais regular. No cenário de maior solicitação, a tensão máxima de compressão diminuiu de 11,005 MPa no Tipo A para 10,872 MPa no Tipo B, 10,485 MPa no Tipo C, 10,236 MPa no Tipo D e 10,127 MPa no Tipo E. Essa redução indica que o aumento do transpasse favoreceu uma diminuição gradual das concentrações compressivas nessas juntas.

As tensões de tração apresentaram comportamento semelhante, embora com menor regularidade nas primeiras configurações. No maior carregamento, foram obtidos 8,9652 MPa no Tipo A, 9,0047 MPa no Tipo B e 8,9832 MPa no Tipo C, enquanto os Tipos D e E apresentaram valores inferiores, de 8,6339 MPa e 8,4354 MPa, respectivamente. Dessa forma, os três menores comprimentos apresentaram resultados bastante próximos entre si, ao passo que as configurações com maiores transpasses promoveram redução mais perceptível das solicitações trativas nas juntas.

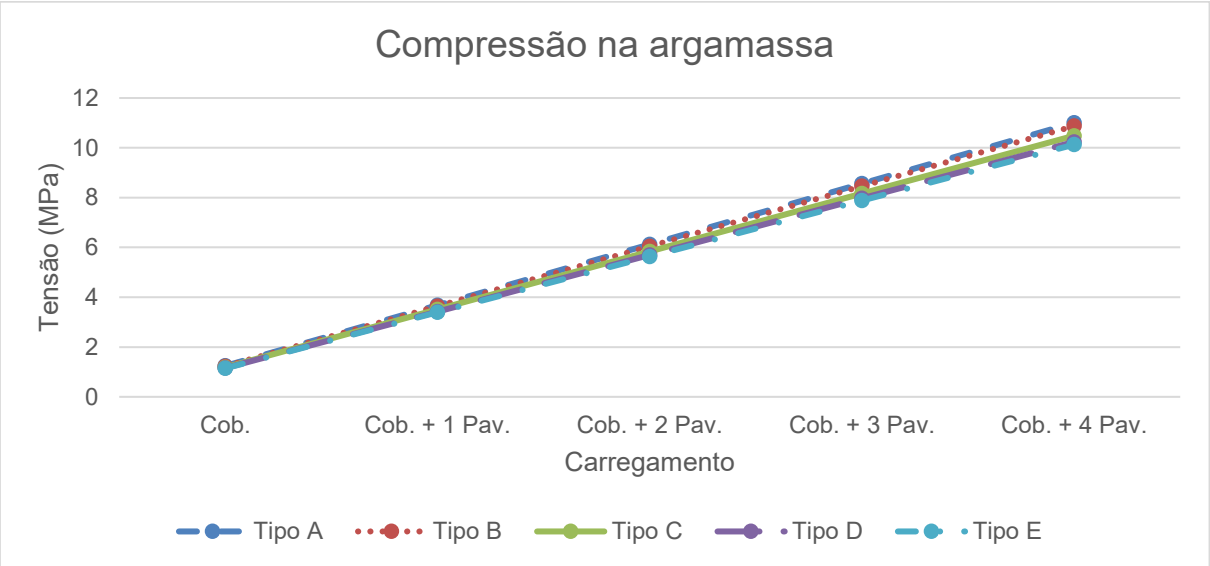
As Figuras 50 e 51 apresentam a evolução das tensões de compressão e de tração nas juntas verticais entre a verga e a contraverga para os cinco níveis de carregamento analisados.

Figura 50 – Tensões principais máximas de tração (σ_1) nas juntas verticais situadas entre verga e contraverga em função da tipologia e do cenário de carregamento



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura 51 – Tensões principais máximas de compressão (σ_3) nas juntas verticais situadas entre verga e contraverga em função da tipologia e do cenário de carregamento



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Em ambos os casos, o aumento do carregamento elevou a magnitude das tensões sem modificar de forma substancial as tendências entre as tipologias. Entretanto, a resposta das juntas diferiu daquela observada nos blocos cerâmicos: enquanto a compressão nos blocos apresentou redução mais evidente até o Tipo C e posterior estabilização, determinadas tensões nas juntas verticais continuaram diminuindo nas configurações D e E. Isso indica que o aumento do transpasse pode continuar influenciando a transferência local dos esforços pela argamassa mesmo quando algumas respostas dos blocos já apresentam ganhos adicionais reduzidos.

Como a argamassa foi representada em regime elástico linear, eventuais valores superiores às resistências de referência devem ser interpretados apenas como indicadores de regiões mais solicitadas, e não como simulação explícita de fissuração, esmagamento ou perda de aderência.

De forma geral, os resultados da alvenaria mostram que o aumento do transpasse não produz melhoria igualmente contínua em todas as respostas: algumas grandezas tendem à estabilização a partir do Tipo C, enquanto outras continuam sendo modificadas para comprimentos maiores. A identificação de uma configuração mais favorável deve, portanto, considerar conjuntamente o comportamento dos blocos, das juntas, das vergas, das contravergas, das armaduras e dos deslocamentos.

4.3. Comportamento das vergas, contravergas e armaduras

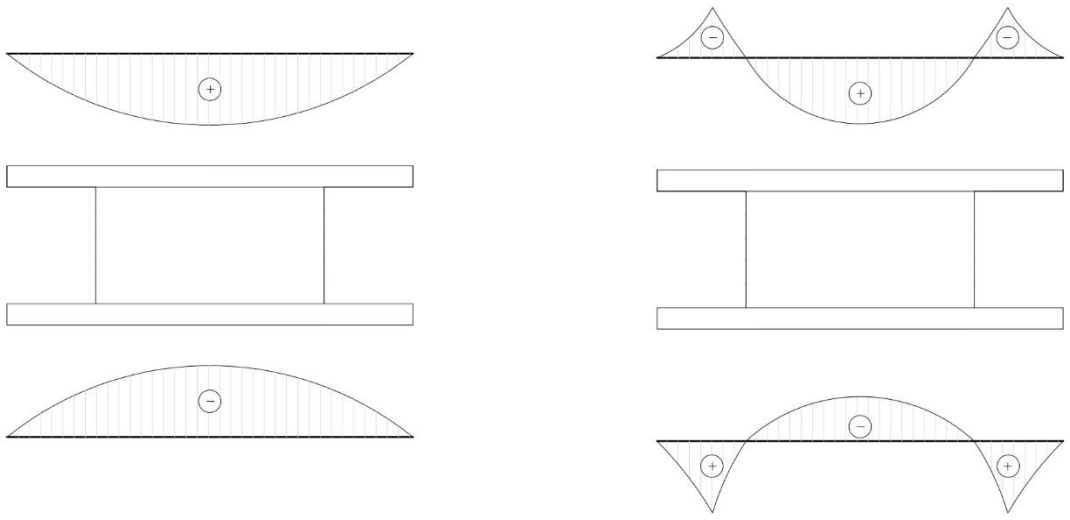
Após a análise das tensões desenvolvidas na alvenaria, foram avaliados o comportamento das vergas e contravergas e as solicitações desenvolvidas em suas armaduras longitudinais. A análise conjunta desses componentes permite compreender de forma mais direta como o comprimento de transpasse interfere na flexão das peças e na interação com a alvenaria adjacente.

Em uma representação simplificada, vergas e contravergas poderiam ser interpretadas como elementos submetidos predominantemente à flexão no trecho correspondente à abertura. Entretanto, os campos de tensão obtidos nas simulações indicam que a interação dos trechos de transpasse com a alvenaria promove uma restrição parcial à rotação, modificando o estado de flexão nas regiões embutidas. Dessa forma, o comportamento observado difere daquele de um elemento

simplesmente apoiado, sem que tenha sido imposta aos modelos qualquer condição de engaste nas extremidades. A restrição desenvolve-se de forma distribuída ao longo do transpasse, como consequência da interação entre o elemento de concreto armado e a alvenaria. Esse mecanismo já havia sido sugerido pelos campos de tensão observados na análise original, embora naquela etapa não tenham sido avaliadas as tensões desenvolvidas nas armaduras.

A Figura 52 apresenta esquematicamente essa interpretação, comparando a condição idealizada de um elemento simplesmente apoiado com o comportamento compatível com os resultados obtidos nas simulações.

Figura 52 – Representação esquemática do comportamento de flexão das vergas e contravergas: (a) condição idealizada de elemento simplesmente apoiado; (b) comportamento compatível com a restrição parcial à rotação desenvolvida nos transpasses



(a) (b)

Nota: O diagrama apresentado possui caráter esquemático e representa qualitativamente a inversão do estado de flexão observada nos campos de tensão. A forma e a posição dos máximos não correspondem a um diagrama de momentos obtido diretamente da análise numérica.

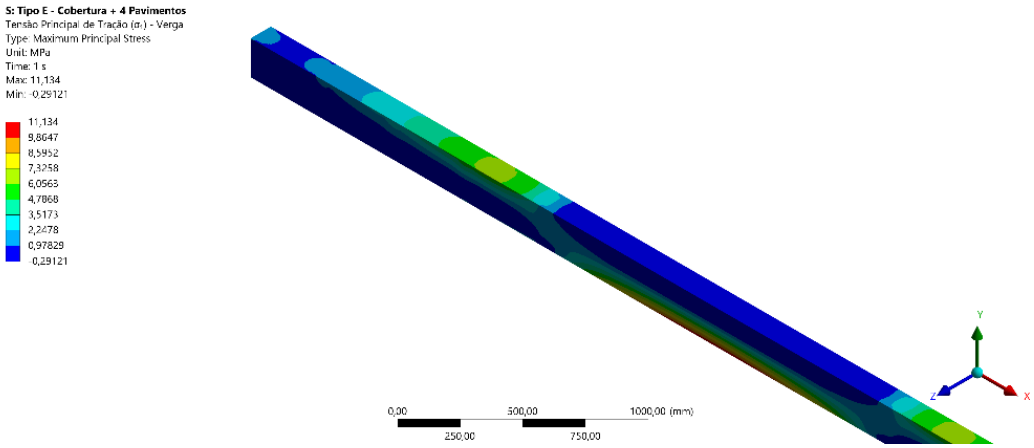
Fonte: Elaborada pelo autor, 2026

Na verga, o trecho central apresenta maior solicitação trativa na face inferior, compatível com a flexão de momento positivo. Nas regiões de transpasse, entretanto, ocorre a inversão desse padrão, com o desenvolvimento de tensões trativas na face superior. Na contraverga, observa-se comportamento complementar: as maiores

tensões de tração no trecho central ocorrem na região superior da peça, enquanto nos transpasses surgem solicitações trativas na face inferior. Esse comportamento demonstra que os trechos embutidos participam ativamente da resposta mecânica das peças e não atuam apenas como prolongamentos geométricos além do vão.

A Figura 53 apresenta em maior detalhe essa mudança no estado de flexão para a verga do Tipo E, submetida ao cenário correspondente à cobertura acrescida de quatro pavimentos.

Figura 53 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) na verga do Tipo E, evidenciando a inversão do campo de tração entre o trecho central e a região de transpasse, sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos

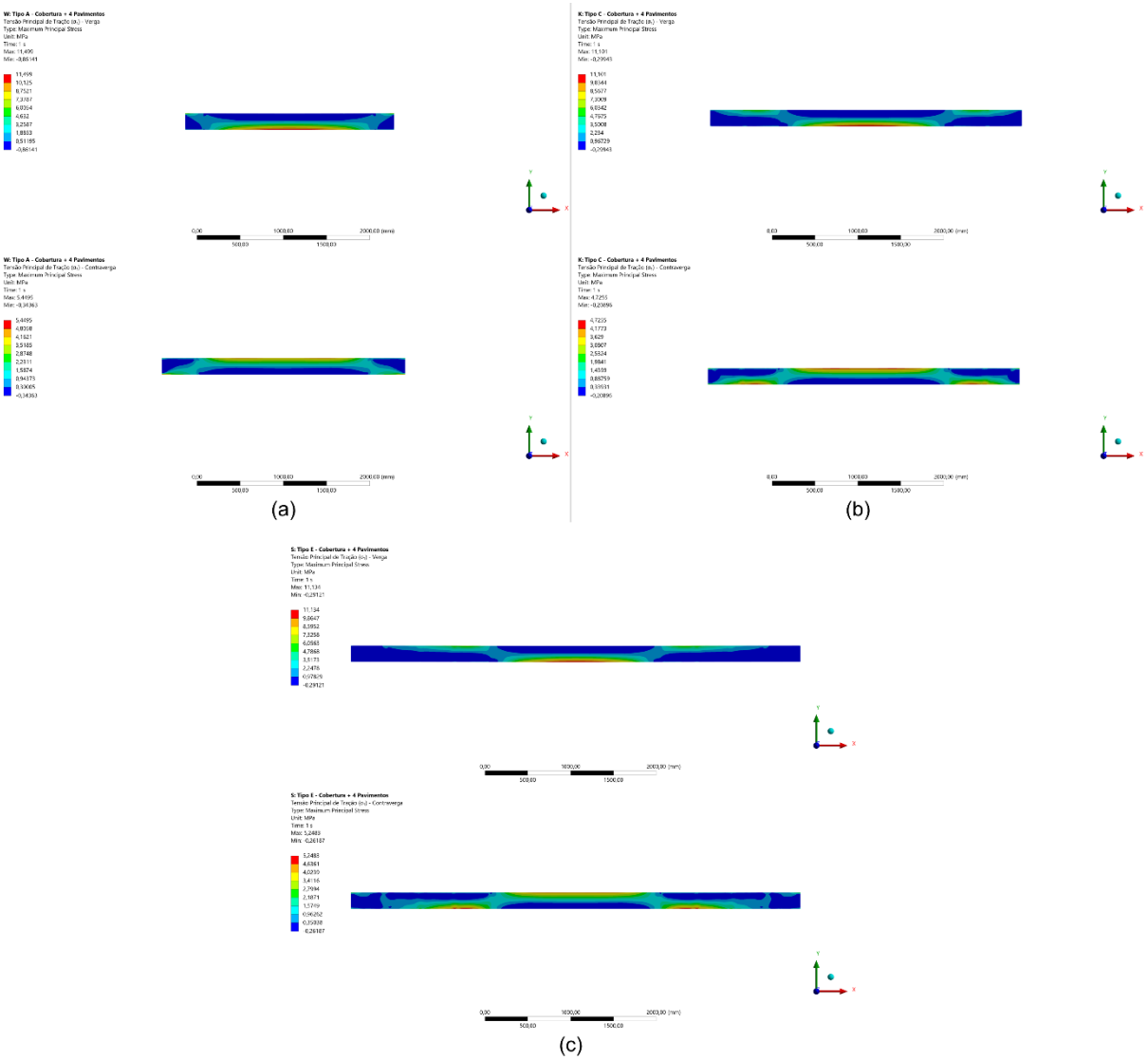


Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Observa-se que, no trecho central, as tensões trativas de maior intensidade estão localizadas na face inferior da verga. Ao longo dos transpasses, a região tracionada desloca-se para a face superior da peça. Além disso, a maior intensidade dessas tensões não ocorre na extremidade da verga: a solicitação desenvolve-se no interior da região de transpasse e diminui progressivamente em direção à ponta. Esse resultado reforça a interpretação de que a restrição à rotação ocorre de forma distribuída ao longo do trecho embutido na alvenaria.

A Figura 54 compara os campos de tensão principal de tração nas vergas e contravergas dos Tipos A, C e E. A seleção dessas três configurações permite representar, respectivamente, o menor comprimento de transpasse, a configuração correspondente a dois blocos e o maior comprimento analisado.

Figura 54 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) nas vergas e contravergas sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos, para configurações representativas dos comprimentos de transpasse:
(a) Tipo A; (b) Tipo C; (c) Tipo E



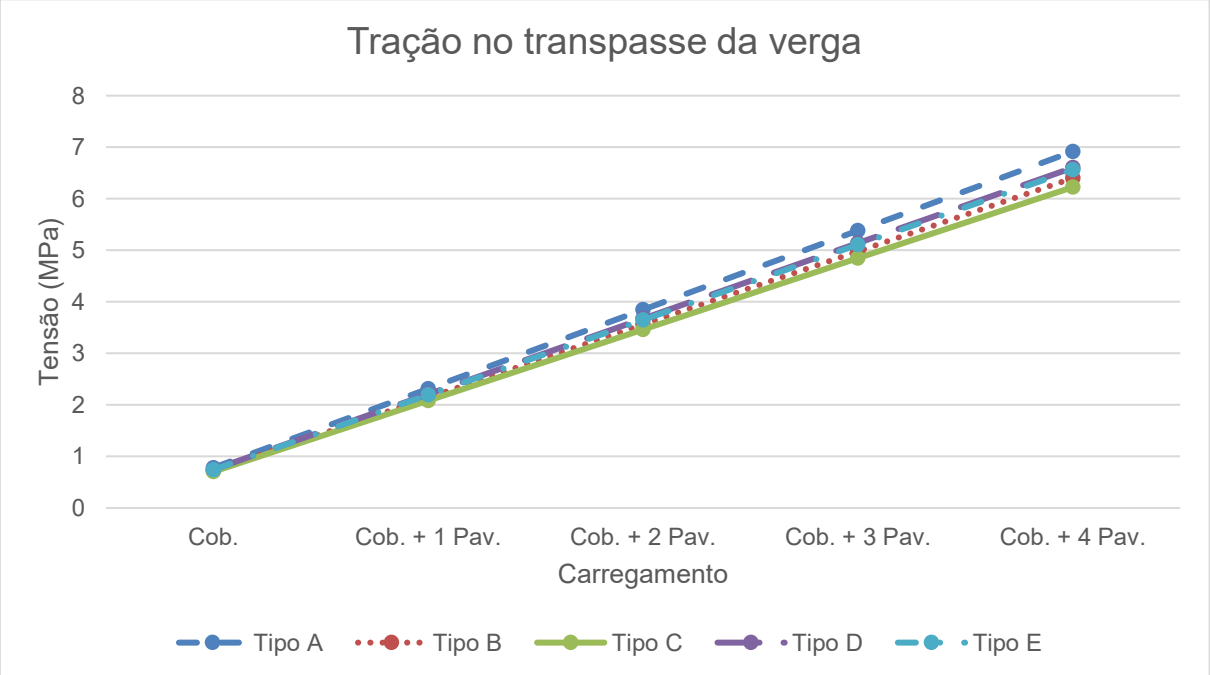
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

No trecho central das vergas, a influência do comprimento de transpasse foi relativamente pequena. No cenário de maior solicitação, a tensão principal máxima de tração na base da peça passou de 11,499 MPa no Tipo A para 11,101 MPa no Tipo C, permanecendo próxima desse valor nos Tipos D e E. Nas contravergas, o comportamento foi ainda menos sensível à variação geométrica: a tensão máxima de tração no topo da peça variou apenas entre 4,2805 MPa e 4,3973 MPa entre as cinco configurações.

As diferenças tornam-se mais evidentes nas regiões de transpasse. Na verga, a tensão principal de tração na face superior dessas regiões foi de 6,9163 MPa no Tipo A, diminuiu para 6,2247 MPa no Tipo C e voltou a crescer para 6,6017 MPa e 6,5599 MPa nos Tipos D e E, respectivamente. Na contraverga, a tração na base dos transpasses apresentou comportamento semelhante, com valor mínimo de 4,7255 MPa no Tipo C e valores maiores tanto nas configurações mais curtas quanto nas mais longas. Dessa forma, os resultados do concreto não indicam redução contínua dessas solicitações com o aumento do comprimento de transpasse.

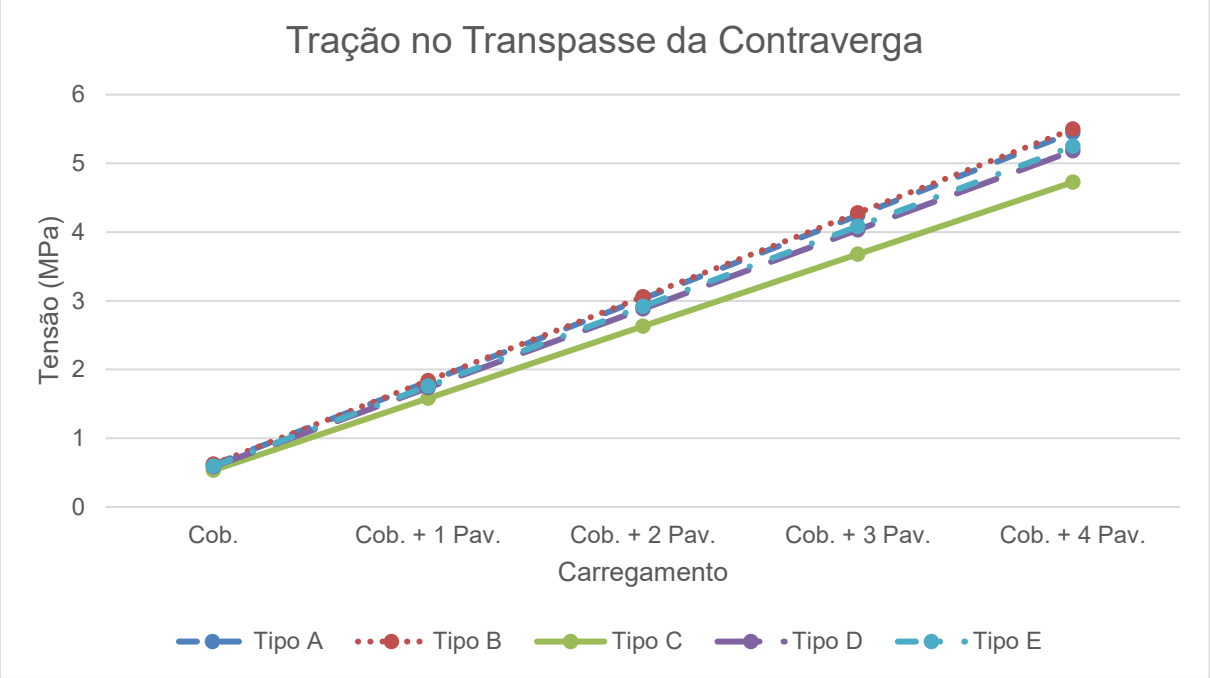
As Figuras 55 e 56 apresentam a evolução dessas tensões nas regiões de transpasse para os cinco cenários de carregamento analisados. Em ambas as peças, o aumento das ações verticais promoveu crescimento aproximadamente proporcional das solicitações, sem modificar de forma substancial a relação observada entre as tipologias.

Figura 55 – Tensões principais máximas de tração (σ_1) nas regiões de transpasse da verga (face superior) em função do cenário de carregamento



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura 56 – Tensões principais máximas de tração (σ_1) nas regiões de transpasse da contraverga (face inferior) em função do cenário de carregamento



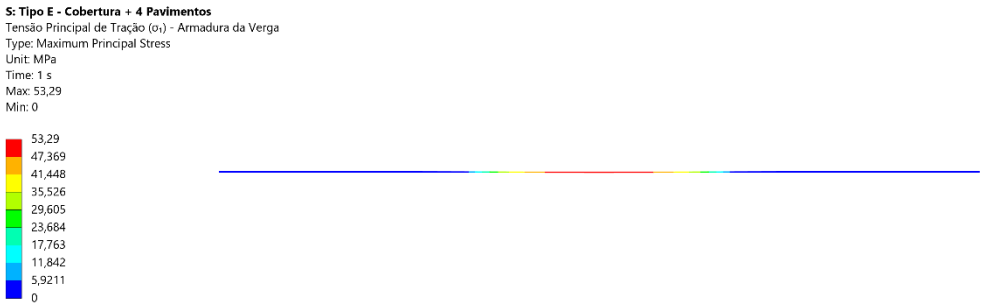
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

A comparação entre os modelos evidencia, entretanto, que a resposta em função do comprimento de transpasse não é monotônica: tanto na verga quanto na contraverga, os menores valores ocorreram próximos ao Tipo C, enquanto as configurações D e E voltaram a apresentar aumento das tensões trativas nas regiões embutidas.

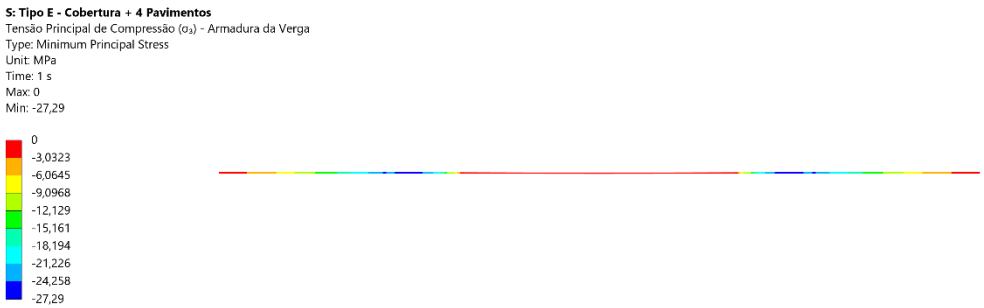
Esse comportamento indica que a ampliação inicial do transpasse favorece a redução das solicitações trativas associadas à inversão do estado de flexão, mas que esse efeito não se mantém de forma progressiva para os maiores comprimentos analisados. A proximidade das tendências nos diferentes níveis de carregamento também mostra que esse comportamento está relacionado principalmente à configuração geométrica dos transpasses, e não a uma alteração do mecanismo provocada pelo aumento da carga.

A análise das armaduras fornece uma evidência adicional para a interpretação desse mecanismo. A Figura 57 apresenta, para a verga do Tipo E, a distribuição das tensões de tração e de compressão na armadura longitudinal sob o cenário de maior carregamento.

Figura 57 – Distribuição das tensões principais na armadura longitudinal da verga do Tipo E sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos: (a) tensão de tração (σ_1); (b) tensão de compressão (σ_3)



(a)



(b)

Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Na armadura, a diferenciação entre o trecho central e os transpasses torna-se particularmente evidente. A tração concentra-se predominantemente na região central da verga, atingindo 53,290 MPa no Tipo E, enquanto as regiões de transpasse apresentam compressão, com magnitude máxima de 27,290 MPa. A correspondência entre a tração na face inferior do concreto e a tração na armadura central, acompanhada pela inversão das solicitações nas regiões embutidas, reforça a existência da restrição parcial à rotação identificada anteriormente nos campos de tensão.

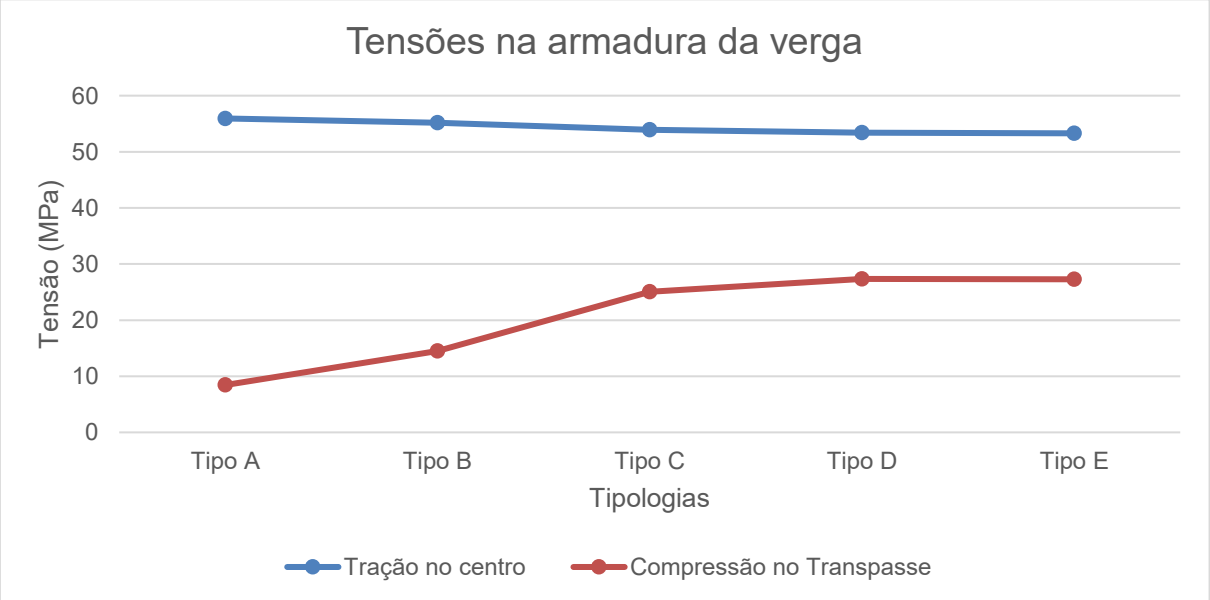
A comparação entre as cinco tipologias mostra ainda que o aumento do transpasse exerce influência muito maior sobre as solicitações desenvolvidas nas regiões embutidas do que sobre o trecho central. Na armadura da verga, a tensão de tração central variou de 55,935 MPa no Tipo A para 53,290 MPa no Tipo E, diferença relativamente pequena. Em contrapartida, a magnitude da compressão nos

transpasses aumentou de 8,4388 MPa no Tipo A para 14,512 MPa no Tipo B e 25,060 MPa no Tipo C, permanecendo próxima de 27 MPa nos Tipos D e E.

A contraverga apresentou o mesmo tipo de comportamento. As tensões de tração na armadura central permaneceram praticamente constantes entre as tipologias, variando de 21,716 MPa a 22,179 MPa no cenário de maior solicitação. Já a compressão desenvolvida nos transpasses passou de 3,1806 MPa no Tipo A e 3,3464 MPa no Tipo B para 11,780 MPa no Tipo C, atingindo 12,888 MPa no Tipo D e 12,396 MPa no Tipo E.

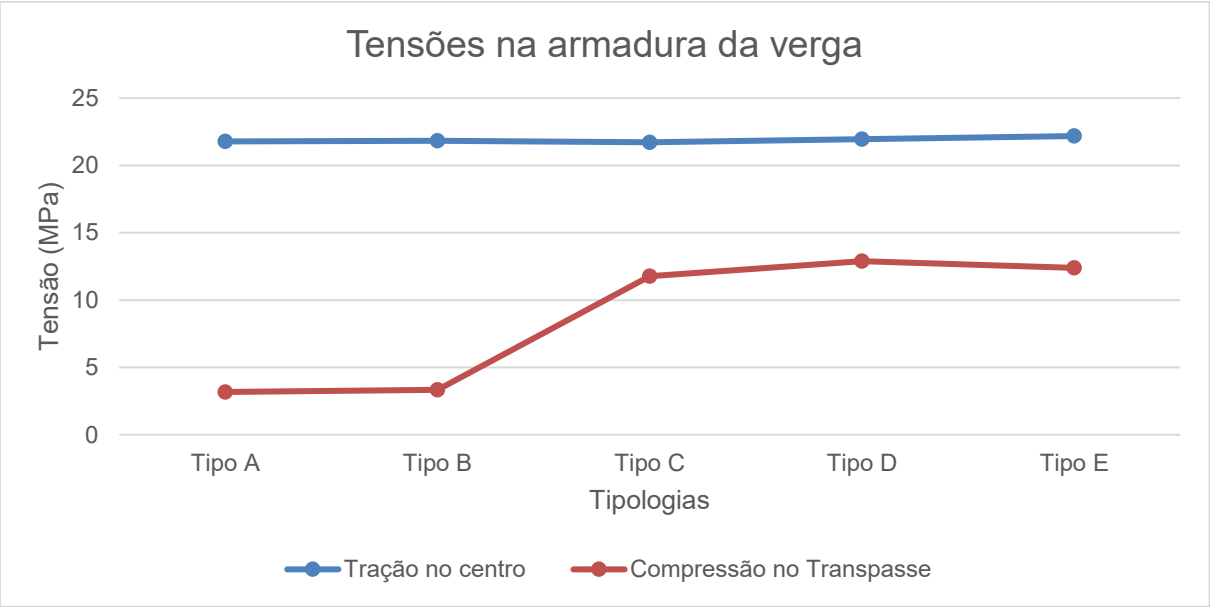
Para evidenciar essa diferença sem sobrecarregar a apresentação com as curvas referentes a todos os níveis de carregamento, as Figuras 58 e 59 comparam apenas os resultados correspondentes ao cenário de maior solicitação. Os demais valores são apresentados nas tabelas complementares do Apêndice B.

Figura 58 – Tensões nas armaduras longitudinais das vergas no cenário correspondente à cobertura + 4 pavimentos, apresentando tração no trecho central e compressão nos transpasses



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura 59 – Tensões nas armaduras longitudinais das contravergas no cenário correspondente à cobertura + 4 pavimentos, apresentando tração no trecho central e compressão nos transpasses



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Nesses gráficos, o eixo horizontal corresponde às configurações A, B, C, D e E, sendo apresentadas somente duas séries em cada parte da figura: a tensão de tração no trecho central e a magnitude da tensão de compressão nos transpasses. Dessa forma, observa-se que a solicitação central permanece relativamente estável enquanto a compressão desenvolvida nas regiões embutidas cresce de maneira acentuada até aproximadamente o Tipo C, apresentando variações menores nas configurações seguintes.

As tensões de compressão no concreto da verga foram avaliadas de forma complementar. Na região central superior, os valores obtidos no cenário de maior solicitação variaram entre aproximadamente 7,86 MPa e 8,07 MPa, indicando baixa sensibilidade ao comprimento de transpasse. Na base da peça, próximo ao início do trecho embutido, ocorreram concentrações pontuais entre aproximadamente 7,80 MPa e 9,98 MPa, sem tendência monotônica com o aumento do comprimento. Por apresentarem caráter localizado e não modificarem a interpretação do mecanismo principal, essas solicitações foram consideradas apenas como complemento à análise. As tensões de compressão no concreto da contraverga, igualmente não

determinantes para a comparação entre as tipologias, não foram utilizadas como parâmetro principal de discussão.

De maneira geral, as relações identificadas no cenário de maior carregamento permanecem nos demais níveis de solicitação. O aumento das ações verticais eleva as magnitudes das tensões, mas mantém a distinção entre a resposta relativamente estável dos trechos centrais e a maior sensibilidade das regiões de transpasse. Os valores completos obtidos nos diferentes cenários são apresentados no Apêndice B.

A análise conjunta do concreto e do aço mostra, portanto, que o comprimento de transpasse exerce influência limitada sobre as solicitações desenvolvidas no trecho central das vergas e contravergas, mas interfere de forma mais pronunciada no comportamento das regiões embutidas. O aumento do comprimento amplia a região de interação com a alvenaria e, simultaneamente, intensifica a restrição parcial à rotação desenvolvida ao longo dos transpasses.

Os resultados também mostram que esse efeito não cresce indefinidamente com o comprimento das peças. Em diversas grandezas, mudanças importantes ocorrem até aproximadamente o Tipo C, enquanto os Tipos D e E apresentam variações adicionais reduzidas. Ao mesmo tempo, determinadas solicitações associadas à inversão do estado de flexão permanecem elevadas nas configurações mais longas. Dessa forma, o aumento sucessivo do transpasse não produz uma melhoria igualmente sucessiva em todos os parâmetros avaliados. A identificação de uma configuração mais favorável deve considerar esse mecanismo em conjunto com o comportamento da alvenaria, das juntas de argamassa e dos deslocamentos, antes da análise integrada apresentada ao final deste capítulo.

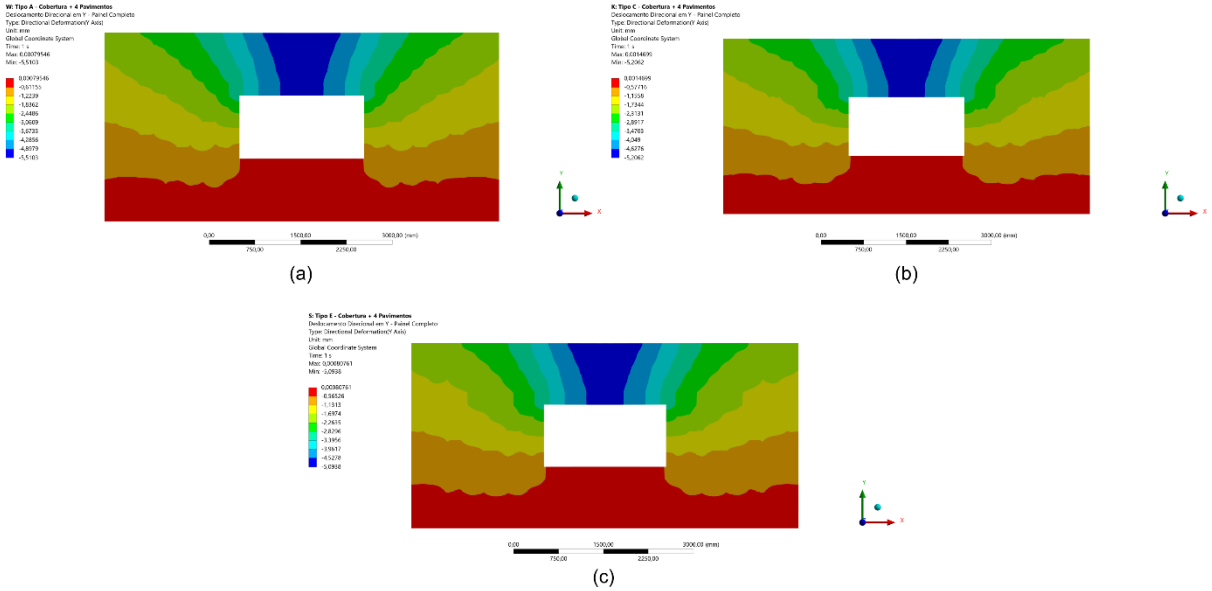
4.4. Deslocamentos e resposta deformacional dos painéis

Além das tensões desenvolvidas nos diferentes componentes, foram avaliados os deslocamentos verticais dos painéis e a flecha das vergas, com o objetivo de verificar se a variação do comprimento de transpasse também interfere na resposta deformacional do sistema. A análise concentrou-se no deslocamento vertical (Uy), por estar diretamente relacionado ao carregamento aplicado e representar a deformação global da parede, e na flecha da verga, utilizada para avaliar de forma mais específica a deformação do elemento situado sobre a abertura.

Os campos de deslocamento vertical apresentaram padrão semelhante entre as tipologias analisadas. Em todos os modelos, os maiores valores ocorreram na região superior do painel, diminuindo em direção à base restringida. Nas proximidades da abertura, observa-se a alteração local da deformada decorrente da descontinuidade geométrica do vão, comportamento já identificado na comparação com o painel sem abertura apresentada no item 4.1.

A Figura 60 apresenta os campos de deslocamento vertical dos Tipos A, C e E sob o cenário correspondente à cobertura acrescida de quatro pavimentos. A seleção dessas configurações permite comparar o menor comprimento analisado, a configuração correspondente a dois blocos de transpasse e o maior comprimento estudado.

Figura 60 – Distribuição dos deslocamentos verticais (Uy) nos painéis sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos:
(a) Tipo A; (b) Tipo C; (c) Tipo E



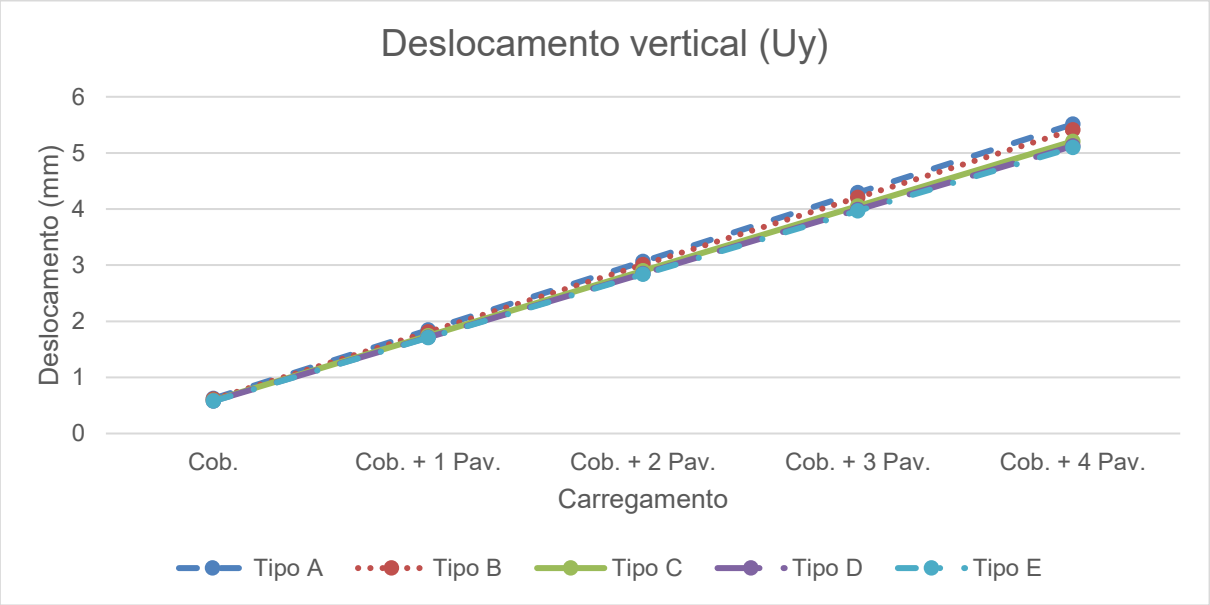
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

A comparação visual mostra que o aumento do transpasse não provoca alteração expressiva no padrão global dos deslocamentos, mas reduz sua magnitude. No cenário de maior solicitação, os valores máximos de Uy foram de 5,5103 mm no Tipo A, 5,4070 mm no Tipo B, 5,2062 mm no Tipo C, 5,1224 mm no Tipo D e 5,0938 mm no Tipo E. Entre os Tipos A e E, a redução foi de aproximadamente 7,6%.

Embora a diminuição dos deslocamentos prossiga até o Tipo E, observa-se que os ganhos se tornam progressivamente menores à medida que o comprimento de transpasse aumenta. A diferença entre A e C é de aproximadamente 0,30 mm, enquanto as reduções posteriores são consideravelmente menores. Esse comportamento sugere que o aumento do transpasse contribui para uma resposta global ligeiramente mais rígida, mas sem produzir redução proporcional dos deslocamentos para os maiores comprimentos analisados.

A Figura 61 apresenta a evolução do deslocamento vertical máximo nos cinco cenários de carregamento.

Figura 61 – Deslocamento vertical máximo (Uy) dos painéis em função da tipologia e do cenário de carregamento



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

O aumento das ações verticais resultou em crescimento aproximadamente proporcional dos deslocamentos em todas as configurações, mantendo a mesma relação geral entre as tipologias. Dessa forma, a tendência de redução de Uy com o aumento do transpasse não se restringe ao cenário de maior solicitação, mas permanece nos diferentes níveis de carregamento considerados.

Além do deslocamento global da parede, foi avaliada a flecha da verga. Para essa análise, foi considerada a deformação relativa desenvolvida no trecho correspondente à abertura, desconsiderando-se a movimentação vertical global do

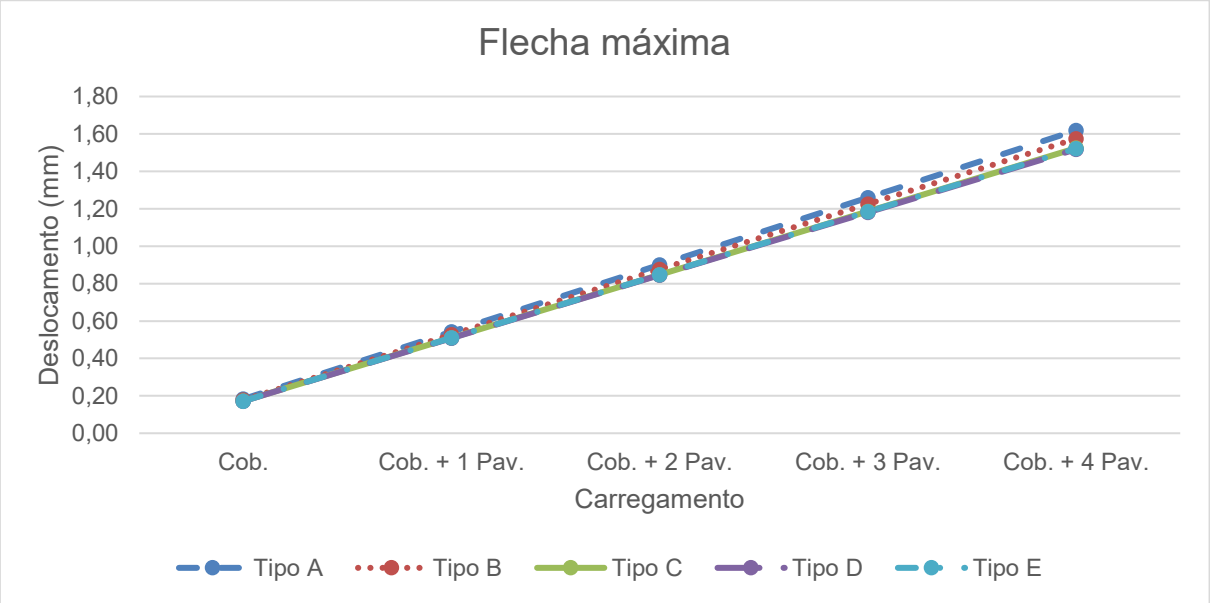
painel. Essa distinção é importante, pois permite avaliar de maneira mais direta a deformabilidade da própria verga, sem confundi-la com o deslocamento acumulado das fiadas inferiores da parede.

No cenário correspondente à cobertura acrescida de quatro pavimentos, a flecha máxima foi de 1,619 mm no Tipo A, 1,575 mm no Tipo B e 1,524 mm no Tipo C. Nos Tipos D e E foram obtidos, respectivamente, 1,518 mm e 1,522 mm. Nesse caso, a estabilização da resposta é mais evidente do que aquela observada para o deslocamento global do painel: praticamente toda a redução ocorre até a configuração Tipo C, enquanto os comprimentos adicionais produzem diferenças muito pequenas.

Complementarmente, foi avaliada a flecha da verga, considerando sua deformação relativa no trecho correspondente à abertura e desconsiderando o deslocamento global da parede. No cenário de maior carregamento, os valores diminuíram de 1,619 mm no Tipo A para 1,575 mm no Tipo B e 1,524 mm no Tipo C, permanecendo praticamente constantes nos Tipos D e E, com 1,518 mm e 1,522 mm, respectivamente.

A Figura 62 apresenta a evolução da flecha máxima da verga nos diferentes níveis de carregamento.

Figura 62 – Flecha máxima da verga em função da tipologia e do cenário de carregamento



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

A manutenção dessa tendência nos diferentes cenários reforça que a pequena diferença observada entre os Tipos C, D e E não está associada apenas ao maior nível de carregamento. Para essa grandeza, os resultados indicam que o aumento do transpasse até aproximadamente dois blocos contribui para a redução da deformação da verga, enquanto os acréscimos posteriores apresentam influência limitada.

De maneira geral, a análise dos deslocamentos acompanha as tendências identificadas nas avaliações de tensão. O aumento do comprimento de transpasse promove redução dos deslocamentos verticais do painel e da flecha da verga, porém os benefícios adicionais diminuem à medida que os comprimentos aumentam. A resposta deformacional, portanto, também não indica vantagem proporcional ao aumento contínuo do transpasse, contribuindo para a comparação integrada entre as configurações apresentada no item seguinte.

4.5. Síntese comparativa das tipologias

A comparação entre as cinco tipologias mostra que a influência do comprimento de transpasse não ocorre de forma linear nem se manifesta igualmente em todas as grandezas analisadas. O aumento do comprimento das vergas e contravergas reduz determinadas concentrações de tensão e deslocamentos, porém os ganhos adicionais tendem a diminuir nas configurações de maior transpasse. Ao mesmo tempo, a ampliação das regiões embutidas aumenta determinadas solicitações associadas à restrição parcial à rotação.

Conforme estabelecido no item 3.5, a análise possui caráter determinístico, sendo as tipologias comparadas a partir da magnitude das diferenças e da consistência das tendências entre os diferentes cenários de carregamento.

De maneira geral, o aumento do carregamento elevou as tensões e os deslocamentos sem alterar substancialmente a relação entre as tipologias. Por esse motivo, o cenário correspondente à cobertura acrescida de quatro pavimentos foi utilizado como referência para a comparação quantitativa apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 – Variação percentual dos principais indicadores mecânicos em relação ao Tipo C no cenário correspondente à cobertura + 4 pavimentos

Indicador	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D	Tipo E
Compressão nos blocos junto à verga	+7,66%	+2,63%	0,00%	−0,10%	−0,06%
Compressão da argamassa nas juntas verticais	+4,96%	+3,69%	0,00%	−2,37%	−3,41%
Tração no topo dos transpasses da verga	+11,11%	+2,81%	0,00%	+6,06%	+5,38%
Tração na base dos transpasses da contraverga	+15,32%	+16,34%	0,00%	+9,64%	+11,06%
Compressão da armadura da verga no transpasse	−66,33%	−42,09%	0,00%	+9,12%	+8,90%
Compressão da armadura da contraverga no transpasse	−73,00%	−71,59%	0,00%	+9,41%	+5,23%
Deslocamento vertical máximo (Uy)	+5,84%	+3,86%	0,00%	−1,61%	−2,16%
Flecha máxima da verga	+6,23%	+3,35%	0,00%	−0,39%	−0,13%

Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

O Tipo C foi adotado como referência comparativa por corresponder ao transpasse de duas unidades de alvenaria e por coincidir com a região em que diversas respostas passaram a apresentar tendência de estabilização. Em relação a essa configuração, os Tipos A e B apresentaram maiores concentrações compressivas nos blocos, maiores deslocamentos e maior flecha da verga. Já os Tipos D e E produziram alterações muito pequenas nessas grandezas, embora ainda tenham promovido reduções adicionais em determinadas tensões nas juntas de argamassa.

Nas vergas e contravergas, as tensões de tração nas regiões de transpasse apresentaram menores valores próximos ao Tipo C e voltaram a aumentar nas configurações D e E. As armaduras evidenciaram de forma mais clara a mudança do mecanismo, com crescimento das tensões de compressão nas regiões embutidas à medida que o transpasse foi ampliado. Esse comportamento reforça que comprimentos maiores aumentam a interação entre as peças e a alvenaria, mas também intensificam os efeitos da restrição parcial à rotação.

Complementarmente, o Quadro 1 apresenta uma síntese qualitativa das cinco configurações.

Quadro 1 – Síntese interpretativa das tipologias analisadas

Tipologia	Síntese do comportamento mecânico
Tipo A	Maiores concentrações nos blocos, deslocamentos e flecha, com menor participação das armaduras nas regiões de transpasse.
Tipo B	Comportamento intermediário entre A e C, com redução parcial das solicitações e deformações.
Tipo C	Redução expressiva de diversas respostas em relação aos menores transpasses e início de estabilização de vários indicadores.
Tipo D	Pequenos ganhos adicionais em algumas grandezas, acompanhados por maior efeito da restrição nas regiões embutidas.
Tipo E	Comportamento próximo ao Tipo D, com benefícios adicionais limitados e manutenção dos efeitos de restrição nos transpasses.

Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

A análise conjunta mostra que nenhuma configuração apresenta simultaneamente os menores valores para todas as grandezas. Entretanto, o Tipo C apresentou uma configuração favorável dentro do conjunto estudado, pois diversos indicadores já exibiam redução expressiva ou tendência de estabilização nesse comprimento, enquanto os aumentos posteriores do transpasse produziram benefícios adicionais limitados e, em algumas respostas, maior solicitação das regiões embutidas.

Dessa forma, o comprimento correspondente a dois blocos mostrou-se adequado como referência de pré-dimensionamento para as condições analisadas, sem representar a definição de um comprimento ótimo ou universal. Essa conclusão se restringe às características geométricas, propriedades dos materiais, condições de contorno e carregamentos adotados no modelo, não devendo ser extrapolada diretamente para situações distintas sem verificação específica.

5. CONCLUSÃO

Esta pesquisa teve como objetivo analisar, por meio da modelagem numérica em elementos finitos, a influência do comprimento de transpasse de vergas e contravergas sobre o comportamento mecânico de paredes de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos. Para isso, foram desenvolvidos modelos tridimensionais no *software* ANSYS, considerando cinco configurações de transpasse e cinco cenários de carregamento vertical, correspondentes à cobertura e à contribuição acumulada de um a quatro pavimentos. As tipologias com abertura foram submetidas às mesmas condições externas de carregamento em cada cenário, permitindo avaliar de forma comparativa a influência das alterações geométricas das vergas e contravergas.

Partiu-se da hipótese de que o aumento do comprimento de transpasse ampliaria a região de transferência dos esforços para a alvenaria adjacente, promovendo redução progressiva das concentrações de tensão nas proximidades da abertura e melhoria do comportamento mecânico do painel. Os resultados mostraram que essa hipótese não foi confirmada em sua formulação inicial. Embora o aumento do transpasse tenha reduzido determinadas solicitações e deslocamentos em relação às configurações de menor comprimento, essa melhoria não ocorreu de forma progressiva para todas as grandezas analisadas. Em diversas respostas, observou-se tendência de estabilização a partir da configuração correspondente a dois blocos, enquanto comprimentos maiores produziram ganhos adicionais limitados e, em alguns casos, aumentaram solicitações associadas à restrição desenvolvida nas regiões embutidas.

A investigação foi conduzida a partir das tensões principais de tração e compressão, dos deslocamentos e dos mecanismos de redistribuição dos esforços nas regiões próximas à abertura. Considerando as hipóteses adotadas na modelagem, especialmente o comportamento elástico linear dos blocos cerâmicos e da argamassa, os resultados foram analisados de forma comparativa entre as tipologias. Assim, eventuais ultrapassagens das resistências de referência nesses componentes indicam regiões potencialmente críticas dentro do modelo, não correspondendo à representação explícita da fissuração, do esmagamento ou da ruptura dos materiais.

Nos blocos cerâmicos, o aumento do transpasse promoveu redução das concentrações máximas de compressão principalmente entre as configurações de menor comprimento e o Tipo C. A partir dessa configuração, os Tipos C, D e E apresentaram valores muito próximos, indicando estabilização da resposta compressiva para os maiores comprimentos estudados. As tensões de tração, por sua vez, permaneceram concentradas em regiões localizadas próximas à abertura e apresentaram diferenças relativamente pequenas e não monotônicas entre as tipologias. Dessa forma, o aumento sucessivo do comprimento das peças não resultou em redução progressiva das solicitações desenvolvidas nos blocos.

A argamassa apresentou resposta mais sensível às condições locais de transferência dos esforços. Nas juntas verticais situadas entre a verga e a contraverga, as tensões compressivas diminuíram gradualmente com o aumento do transpasse, enquanto as tensões trativas permaneceram próximas entre os Tipos A, B e C e apresentaram redução mais perceptível nos Tipos D e E. Por outro lado, os máximos pontuais próximos ao início dos transpasses não apresentaram tendência regular entre as configurações. Esses resultados indicam que comprimentos maiores ainda podem modificar localmente a transferência dos esforços pelas juntas, mesmo quando determinadas respostas dos blocos já apresentam pouca variação.

A análise das vergas e contravergas mostrou que esses elementos não apresentam comportamento equivalente ao de vigas simplesmente apoiadas ideais. Os campos de tensão evidenciaram a participação dos trechos embutidos na alvenaria, desenvolvendo-se uma restrição parcial à rotação distribuída ao longo dos transpasses. Como consequência, foram observadas regiões de tração associadas à flexão no trecho central das peças e inversão do campo de tensões nas regiões laterais, compatível com a participação dos transpasses no mecanismo resistente.

Nas vergas, as tensões trativas no trecho central apresentaram pequenas variações entre as configurações, enquanto as solicitações desenvolvidas no topo dos transpasses foram mais sensíveis ao comprimento das peças. A redução observada até o Tipo C não prosseguiu para os Tipos D e E, que voltaram a apresentar aumento dessas tensões. Comportamento semelhante foi observado nas contravergas: as solicitações na região central permaneceram próximas, enquanto a tração na base dos transpasses apresentou seu menor valor no Tipo C e voltou a crescer nas configurações de maior comprimento. Esses resultados reforçam que a ampliação do

transpasse modifica a interação das peças com a alvenaria, mas não produz redução contínua das solicitações nas regiões embutidas.

A análise das armaduras forneceu uma evidência adicional desse mecanismo. As tensões trativas desenvolvidas na região central das barras permaneceram relativamente próximas entre as tipologias, tanto na verga quanto na contraverga. Em contrapartida, as tensões compressivas desenvolvidas nas regiões de transpasse aumentaram de forma acentuada com a ampliação inicial do comprimento embutido, especialmente na passagem das configurações A e B para C, permanecendo em níveis próximos nos Tipos C, D e E. Esse comportamento evidencia o aumento da participação das regiões laterais das peças e confirma que transpasses maiores promovem maior restrição à rotação, mesmo quando outras respostas do painel já apresentam tendência de estabilização.

Os deslocamentos apresentaram comportamento compatível com as tendências observadas nas tensões. O deslocamento vertical máximo diminuiu gradualmente com o aumento do transpasse, passando a apresentar reduções progressivamente menores nas configurações de maior comprimento. A flecha da verga apresentou estabilização ainda mais evidente: a redução ocorreu principalmente até o Tipo C, enquanto os Tipos C, D e E produziram valores praticamente coincidentes. Dessa forma, a ampliação do transpasse acima de aproximadamente dois blocos não resultou em aumento proporcional da rigidez global do painel ou em redução adicional relevante da deformação da verga.

De forma geral, os resultados indicam que o comprimento de transpasse atua como uma região ativa de interação mecânica entre verga, contraverga e alvenaria adjacente. Comprimentos reduzidos limitam a região disponível para a transferência dos esforços e estão associados a maiores concentrações em determinadas regiões dos blocos, além de maiores deslocamentos e flecha. O aumento inicial do transpasse amplia essa interação e reduz parte dessas solicitações. Entretanto, a continuidade desse aumento não produz benefícios proporcionais, uma vez que diversas grandezas tendem à estabilização e determinadas solicitações associadas à restrição parcial à rotação voltam a crescer para os maiores comprimentos.

Entre as tipologias analisadas, a configuração Tipo C, correspondente ao transpasse de duas unidades de alvenaria em cada extremidade da abertura, apresentou uma condição favorável dentro do conjunto estudado. Nessa

configuração, diversos indicadores já apresentavam redução expressiva em relação aos menores transpasses ou início de estabilização, enquanto os aumentos posteriores do comprimento produziram benefícios adicionais limitados. O Tipo C não apresentou o menor valor em todas as grandezas analisadas, uma vez que os Tipos D e E ainda proporcionaram reduções em determinadas solicitações nas juntas de argamassa e no deslocamento vertical. Entretanto, essas melhorias locais não foram acompanhadas por redução proporcional das demais respostas e ocorreram juntamente com maior participação das regiões embutidas no mecanismo resistente.

Dessa forma, o comprimento correspondente a dois blocos mostrou-se adequado como referência de pré-dimensionamento para as condições investigadas, sem representar a definição de um comprimento ótimo ou universal. Essa indicação se restringe às características geométricas, propriedades dos materiais, condições de contorno, carregamentos e hipóteses adotadas nos modelos desenvolvidos. Sua utilização constitui, portanto, um subsídio à avaliação inicial de vergas e contravergas em paredes de alvenaria estrutural cerâmica, não substituindo o dimensionamento e a verificação específicos de cada situação.

Por fim, esta pesquisa contribui para ampliar a compreensão dos mecanismos de redistribuição de tensões em torno de aberturas em paredes de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos. Os resultados mostram que a avaliação das vergas e contravergas não pode ser baseada apenas na ideia de que o aumento do transpasse necessariamente melhora o comportamento do painel. A interação entre as peças, suas armaduras e a alvenaria adjacente também modifica o estado de tensões desenvolvido nas regiões embutidas. A análise realizada fornece, assim, subsídios para o pré-dimensionamento e para futuras investigações voltadas ao detalhamento desses elementos e à definição de critérios aplicáveis a diferentes configurações estruturais.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Embora os resultados obtidos tenham permitido avaliar a influência do comprimento de transpasse sobre o comportamento dos painéis analisados, alguns aspectos não contemplados nesta pesquisa podem ser aprofundados em estudos

futuros, ampliando a compreensão dos mecanismos desenvolvidos nas regiões próximas às aberturas.

Inicialmente, recomenda-se a realização de ensaios experimentais, em escala real ou reduzida, para validação dos modelos numéricos e comparação com os mecanismos observados em laboratório. Associadamente, podem ser desenvolvidos modelos numéricos capazes de representar de forma mais detalhada a fissuração dos materiais e o comportamento das interfaces, incluindo abertura de juntas, deslizamento relativo e perda progressiva de aderência entre bloco, argamassa e concreto. Essas análises permitiriam aprofundar a avaliação das regiões identificadas como potencialmente críticas no presente trabalho.

Também se sugere ampliar as condições de carregamento consideradas. Além de outros níveis e distribuições de ações verticais, mantendo-se condições equivalentes entre as tipologias comparadas, podem ser avaliadas ações horizontais, especialmente aquelas decorrentes do vento, bem como combinações entre carregamentos verticais e horizontais. Essa ampliação permitiria verificar se as tendências observadas para o efeito do transpasse permanecem em condições de solicitação distintas das adotadas nesta pesquisa.

Outra linha de investigação envolve a variação das propriedades e do detalhamento dos elementos próximos à abertura. Podem ser avaliadas diferentes resistências do concreto das vergas e contravergas, armaduras longitudinais complementares nas regiões de transpasse, armaduras transversais e armaduras verticais adjacentes ao vão. O grauteamento localizado dos blocos laterais à abertura também pode ser investigado, isoladamente ou associado à introdução de armaduras verticais, verificando-se tanto seus possíveis benefícios para a transferência dos esforços quanto eventuais alterações locais de rigidez e concentração de tensões.

Recomenda-se ainda ampliar o estudo para diferentes geometrias e condições numéricas, considerando outras dimensões de blocos, espessuras de parede, dimensões de abertura e condições de contorno. Estudos adicionais de sensibilidade de malha diretamente nos painéis completos e nas regiões críticas, assim como avaliações da influência dos parâmetros adotados nas interfaces, também podem contribuir para verificar a robustez das respostas numéricas. A análise pode ser complementada pela consideração da extensão das regiões mais solicitadas, utilizando grandezas que não dependam exclusivamente dos máximos localizados.

Por fim, estudos paramétricos mais amplos podem incorporar a variabilidade das propriedades dos materiais, da geometria, das condições de apoio e dos carregamentos, permitindo futuramente análises de incerteza ou abordagens probabilísticas quando houver dados suficientes para justificar as distribuições adotadas. A combinação dessas análises com resultados experimentais poderá contribuir para verificar a generalidade da tendência de estabilização observada a partir do transpasse de dois blocos e para o desenvolvimento de critérios mais abrangentes de pré-dimensionamento de vergas e contravergas em alvenaria estrutural cerâmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8545:** Execução de alvenaria sem função estrutural de tijolos e blocos cerâmicos – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10837:** Cálculo de alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 1989 (Descontinuada).

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15961-1**: Alvenaria estrutural – Blocos de concreto – Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 2011 (Descontinuada).

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16868-1:** Alvenaria Estrutural – Parte 1: Projetos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ALLEN, C.; MASIA, M.; PAGE, A.; GRIFFITH, M.; INGHAM, J. Nonlinear Finite Element Modelling of Unreinforced Masonry Walls with Openings Subjected to In-Plane Shear. Halifax: **Canadian Masonry Symposium**, 2017.

ALVES FILHO, A. **Elementos Finitos:** A Base da Tecnologia CAE. 6. ed. São Paulo: Érica, 2013.

ANSYS, Inc. **Ansys Mechanical APDL Element Reference.** Release 2024 R2. Canonsburg: Ansys, 2024. Disponível em: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/ans_elem/Hlp_E_ABOUT.html. Acesso em: 25 jun. 2026.

ASAD, Mohammad; THAMBOO, Julian; ZAHRA, Tatheer. Reinforced concrete block masonry walls under eccentric compression: assessment using experimental and numerical data. **Journal of Building Engineering**, v. 86, art. 108761, 2024. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.108761.

BARRETO, A. S. P. **Análise numérica de painéis de alvenaria estrutural utilizando técnica de homogeneização.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2002.

CHEN, W. F.; HAN, D. J. **Plasticity for structural engineers.** New York: Springer-Verlag, 1988.

DIAS, C.; CUNHA, P.; LANA, J.; AMÉRICO JÚNIOR, P. The use of Micro-FE analysis to access a masonry structure reinforced with concrete beams. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**, Série III, n. 24, p. 31-40, mar. 2024. DOI: 10.34638/rpee-sIII-n24-003.

GHALLA, M.; BAZUHAIR, R. W.; MLYBARI, E. A.; MAHMOODZADEH, A.; ELSAMAK, G.; YEHIA, S. A. Shear performance of unreinforced masonry walls with door and window openings strengthened using welded steel mesh. **Scientific Reports**, v. 16, art. 8704, 2026. DOI: 10.1038/s41598-026-40618-z.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais.** 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

HUAMANI, K.; ENCISO, R.; GONZALES, M.; ZAVALETA, D.; AGUILAR, R. Experimental and numerical evaluation of a stackable compressed earth block masonry system: characterization at cyclic shear loads. **Journal of Building Engineering**, v. 60, art. 105139, 2022. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.105139.

KRTINIĆ, N.; MARINKOVIĆ, M.; GAMS, M. Finite Element Method Analysis of Seismic Response of Confined Masonry Walls with Openings Built Using Polyurethane Glue. **Buildings**, v. 15, art. 424, 2025. DOI: 10.3390/buildings15030424.

LANNES, C. V. **Comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto armado leve e leve autoadensável sem armadura transversal.** Tese (Doutorado). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Campos dos Goytacazes, 2018.

MAZUR, W.; DROBIEC, Ł.; JASIŃSKI, R. Research and numerical investigation of masonry – AAC precast lintels interaction. **Procedia Engineering**, v. 193, p. 385-392, 2017. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.228.

MEDEIROS, G. F.; MOHAMAD, G.; KOSTESKI, L. E.; RODRIGUEZ, R. Q.; MILANI, A. S. Strength capacity of hollow clay blocks structural masonry - Flange, Chases, and slenderness effects. **Engineering Structures**, v. 272, art. 114943, 2022. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114943.

MILANI, A. S.; LÜBECK, A.; MOHAMAD, G.; SANTOS NETO, A. B. S.; BUDNY, J. Experimental investigation of small-scale clay blocks masonry walls with chases under compression. **Construction and Building Materials**, v. 273, art. 121539, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121539.

MILLER, C. P. **Determinação de parâmetros mecânicos e modelagem numérica em alvenaria estrutural de blocos cerâmicos da indústria de Campos dos Goytacazes.** Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Campos dos Goytacazes, 2008.

MLYBARI, E. A.; GHALLA, M.; HU, J. W.; BAZUHAIR, R. W.; ALTOBGY, M. A.; ALKHAWALDEH, A. A. Value-oriented SHCC-based strengthening of masonry walls with openings: Integration of glass fiber mesh and steel bars for seismic risk mitigation in construction. **Case Studies in Construction Materials**, v. 23, art. e05511, 2025. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e05511.

MONTES, R. O. P.; SANTOS, A. R. P.; CAVALCANTE, K. M.; MELO, R. B. Modelagem numérica para cálculo do transpasse de vergas e contravergas. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 6, p. 38803-38820, jun. 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n6-428.

MUGHAL, U. A.; QAZI, A. U.; AHMED, A.; ABBASS, W.; ABBAS, S.; SALMI, A.; SAYED, M. M. Impact of Openings on the In-Plane Strength of Confined and Unconfined Masonry Walls: A Sustainable Numerical Study. **Sustainability**, v. 14, art. 7467, 2022. DOI: 10.3390/su14127467.

OLIVEIRA, M. F. F.; ANDRADE, T. J. Análise de painel de alvenaria estrutural pelas abordagens de macro e micromodelagem. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 11, p. 70462-70475, dez. 2022. DOI: 10.34117/bjdv8n11-002.

ORLANDO, M.; BETTI, M.; SPINELLI, P. Assessment of structural behaviour and seismic retrofitting for an Italian monumental masonry building. **Journal of Building Engineering**, v. 29, art. 101115, 2020. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.101115.

PALHARES, R. A.; MEDEIROS, K. A. S.; PARSEKIAN, G. A.; SHRIVE, N. G.; MARQUES, R.. A macro-modeling approach for non-linear analysis of multi-story perforated masonry walls with grout and reinforcement concentrated at their pier ends. **Journal of Building Engineering**, v. 73, art. 106785, 2023. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.106785.

PELETEIRO, S. C. **Contribuições à modelagem numérica de alvenaria estrutural.** Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

SAMPAIO, M. B. **Fissuras em Edifícios Residenciais em Alvenaria Estrutural.** Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

SÁNCHEZ, E. **Nova Normalização Brasileira Para a Alvenaria Estrutural**. Rio de Janeiro: Interciência, 2013.

SANTOS, E. R.; SANTOS, G. J. B. Numerical analysis of structural masonry panel using macromodeling and simplified micromodeling. Foz do Iguaçu: **XLIII Congresso**

Ibero-Latino Americano de Métodos Computacionais em Engenharia (CILAMCE), 2022.

SCHLAICH, J.; SCHÄFER, K.; JENNEWEIN, M. Toward a consistent design of structural concrete. **PCI Journal**, Chicago, v. 32, n. 3, p. 74-150, May/June 1987.

STAVROULAKI, M. E.; LIARAKOS, V. B. Dynamic analysis of a masonry wall with reinforced concrete lintels or tie-beams. **Engineering Structures**, v. 44, p. 23-33, 2012. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.05.041.

TAUIL, C. A.; NESE, F. J. M. **Alvenaria Estrutural.** São Paulo: Pini, 2010.

TRIPATHY, D.; SINGHAL, V. Experimental and analytical investigation of opening effects on the in-plane capacity of unreinforced masonry wall. **Engineering Structures**, v. 311, art. 118161, 2024. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118161.

VENGHIAC, V.-M.; NEAGU, C.-P.; TARANU, G.; ROTARU, A. Time History Analyses of a Masonry Structure for a Sustainable Technical Assessment According to Romanian Design Codes. **Sustainability**, v. 15, art. 2932, 2023. DOI: 10.3390/su15042932.

VERONESE, R. B. A.; MEDEIROS, W. A.; PARSEKIAN, G. A.; SHRIVE, N. G. Numerical analysis of eco-friendly ductile cementitious composite influence on structural masonry reinforcement. **Engineering Structures**, v. 252, art. 113686, 2022. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113686.

ANEXO A – PARÂMETROS DO MODELO DE DRUCKER-PRAGER APLICADO AO CONCRETO

Os parâmetros apresentados neste anexo foram fornecidos por Natália de Souza Pinto, discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UENF, e por Alessandro da Silva Rolin, colaborador em pesquisas desenvolvidas em conjunto com o programa, em 2026, a partir de calibrações numéricas previamente realizadas. Por se tratarem de dados não publicados até o momento, os valores utilizados nesta pesquisa são reproduzidos neste anexo com o objetivo de permitir sua identificação e rastreabilidade.

Tabela A.1 – Propriedades do concreto utilizado nas vergas e contravergas da simulação no ANSYS, com base no modelo de Drucker-Prager, em inglês

Property		Value	Unit
Material Field Variables	Temperature	22	°C
Density		2,3	g/cm³
Isotropic Elasticity	Young's Modulus	30000	MPa
	Poisson's Ratio	0,18	
Drucker-Prager Strength	Scale	1	
Piecewise	Offset	0	MPa
Tensile Pressure Failure	Maximum Tensile Pressure	-4	MPa
Crack Softening Failure	Flow Rule	No Bulking	
	Fracture Energy Gf	100	J/m²

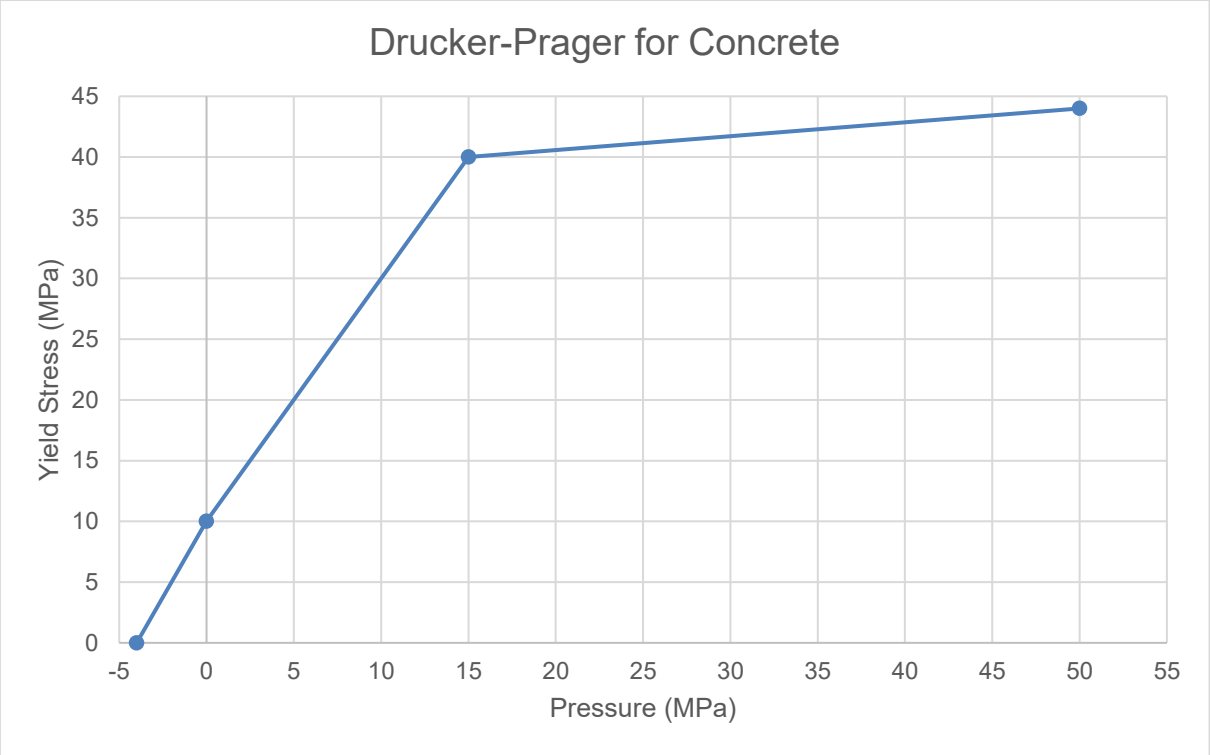
Fonte: Pinto e Rolin, 2026 (informação verbal)

Tabela A.2 – Tabela de pontos de configuração do modelo de Drucker-Prager associado ao concreto no ANSYS, em inglês

Pressure P (MPa)	Yield Stress Y (MPa)
-4	0
0	10
15	40
50	44

Fonte: Pinto e Rolin, 2026 (informação verbal)

Figura A.1 – Gráfico dos pontos do modelo de Drucker-Prager associado ao concreto no ANSYS, em inglês



Fonte: Pinto e Rolin, 2026 (informação verbal)

APÊNDICE A – RESULTADOS DO TESTE DE SENSIBILIDADE DE MALHA

Tabela A.1 – Resultados do teste de compressão para as diferentes discretizações de malha (MPa)

Grandeza analisada	Tamanho global da malha	Máximo	Mínimo	Média
Tensão principal mínima (σ_3) – bloco cerâmico	40 mm	-5,4344	-9,9768	-6,5117
	30 mm	-5,5080	-10,003	-6,5130
	20 mm	-5,4869	-10,716	-6,5068
	10 mm	-5,2769	-12,031	-6,5114
	5 mm	-5,4053	-13,813	-6,5161
	2,5 mm	-5,1276	-16,741	-6,5127
	1 mm	-5,0089	-21,281	-6,5099
Tensão principal mínima (σ_3) – aba central	40 mm	-6,1998	-6,5822	-6,4426
	30 mm	-6,1953	-6,5783	-6,4525
	20 mm	-6,1824	-6,5652	-6,4593
	10 mm	-6,0607	-6,5689	-6,4678
	5 mm	-5,6451	-6,9661	-6,4737
	2,5 mm	-5,7812	-7,4693	-6,4696
	1 mm	-5,9175	-8,5645	-6,4688
Tensão principal máxima (σ_1) – bloco cerâmico	40 mm	0,67316	-0,87294	-0,088587
	30 mm	0,63618	-0,97354	-0,10803
	20 mm	0,38948	-1,0199	-0,086552
	10 mm	0,45104	-1,1947	-0,063572
	5 mm	0,45822	-1,3982	-0,043437
	2,5 mm	0,54251	-1,6312	-0,032391
	1 mm	0,68869	-2,0638	-0,035566
Tensão principal máxima (σ_1) – aba central	40 mm	0,11796	-0,38005	-0,056061
	30 mm	0,085038	-0,52734	-0,062945
	20 mm	0,12328	-0,58445	-0,058165
	10 mm	0,25381	-0,70499	-0,047756
	5 mm	0,30415	-0,95084	-0,035078
	2,5 mm	0,41420	-1,0709	-0,023057
	1 mm	0,27945	-1,0658	-0,021058

Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Tabela A.2 – Resultados do teste de tração para as diferentes discretizações de malha (MPa)

Grandeza analisada	Tamanho global da malha	Máximo	Mínimo	Média
Tensão principal mínima (σ_3) – bloco cerâmico	40 mm	0,85555	-0,63901	0,043298
	30 mm	0,95742	-0,60405	0,050398
	20 mm	0,99162	-0,40299	0,039816
	10 mm	1,2290	-0,46632	0,029084
	5 mm	1,4369	-0,47012	0,019569
	2,5 mm	1,6770	-0,55732	0,014123
	1 mm	2,1158	-0,70568	0,015751
Tensão principal mínima (σ_3) – aba central	40 mm	0,39925	-0,071093	0,028939
	30 mm	0,51748	-0,083145	0,029736
	20 mm	0,56719	-0,11754	0,026616
	10 mm	0,688615	-0,24609	0,022222
	5 mm	0,92184	-0,24793	0,015100
	2,5 mm	1,0388	-0,25692	0,0097363
	1 mm	1,0507	-0,27241	0,0096707
Tensão principal máxima (σ_1) – bloco cerâmico	40 mm	10,334	5,5210	6,4760
	30 mm	10,300	5,4928	6,4767
	20 mm	11,049	5,5154	6,4734
	10 mm	12,407	5,2862	6,4761
	5 mm	14,232	5,3938	6,4787
	2,5 mm	17,201	5,1159	6,4770
	1 mm	21,808	5,0008	6,4755
Tensão principal máxima (σ_1) – aba central	40 mm	6,5588	6,0829	6,4357
	30 mm	6,5492	6,0744	6,4415
	20 mm	6,5510	6,0530	6,4450
	10 mm	6,5584	5,9418	6,4491
	5 mm	6,7865	5,5747	6,4498
	2,5 mm	7,2823	5,6944	6,4493
	1 mm	8,3167	5,8016	6,4499

Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Tabela A.3 – Tempos de processamento dos testes de sensibilidade de malha

Tamanho global da malha	Teste de compressão	Teste de tração
40 mm	33 s	23 s
30 mm	25 s	20 s
20 mm	23 s	22 s
10 mm	30 s	21 s
5 mm	49 s	27 s
2,5 mm	2 min 13 s	1 min 9 s
1 mm	38 min 21 s	13 min 19 s

Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

APÊNDICE B – TABELAS DE RESULTADOS DOS MODELOS NUMÉRICOS

Tabela B.1 – Tensões máximas de compressão e tração nos elementos (MPa)

Elemento analisado	Cenário	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D	Tipo E
Compressão no bloco cerâmico *(canto junto à verga)*	Cobertura	1,1244	1,0718	1,0443	1,0432	1,0437
	Cob. + 1 Pav.	3,3309	3,1753	3,0938	3,0906	3,0918
	Cob. + 2 Pav.	5,5374	5,2788	5,1433	5,1379	5,1400
	Cob. + 3 Pav.	7,7439	7,3823	7,1927	7,1853	7,1882
	Cob. + 4 Pav.	9,9505	9,4857	9,2422	9,2326	9,2364
Tração nos blocos *(acima da abertura)*	Cobertura	0,29373	0,27246	0,27854	0,27631	0,27226
	Cob. + 1 Pav.	0,87017	0,80716	0,82515	0,81857	0,80656
	Cob. + 2 Pav.	1,4466	1,3419	1,3718	1,3608	1,3409
	Cob. + 3 Pav.	2,0231	1,8766	1,9184	1,9031	1,8752
	Cob. + 4 Pav.	2,5995	2,4113	2,4650	2,4453	2,4095
Compressão no topo da verga *(região central)*	Cobertura	0,91052	0,90613	0,88789	0,89946	0,90563
	Cob. + 1 Pav.	2,7008	2,6844	2,6304	2,6646	2,6829
	Cob. + 2 Pav.	4,4900	4,4627	4,3728	4,4298	4,4602
	Cob. + 3 Pav.	6,2792	6,2409	6,1153	6,1950	6,2374
	Cob. + 4 Pav.	8,0683	8,0192	7,8577	7,9602	8,0147
Compressão na base da verga *(início do transpasse – pontual)*	Cobertura	1,1276	0,88159	0,96003	1,0226	1,2045
	Cob. + 1 Pav.	3,3404	2,6117	2,8441	3,0296	3,0349
	Cob. + 2 Pav.	5,5532	4,3418	4,7281	5,0365	5,0454
	Cob. + 3 Pav.	7,7660	6,0719	6,6121	7,0434	7,0559
	Cob. + 4 Pav.	9,9788	7,8020	8,4961	9,0503	9,0664
Tração na base da verga *(centro – zona armada)*	Cobertura	1,2993	1,2964	1,2544	1,2592	1,2581
	Cob. + 1 Pav.	3,8492	3,8405	3,7161	3,7304	3,7271
	Cob. + 2 Pav.	6,3991	6,3846	6,1778	6,2016	6,1962
	Cob. + 3 Pav.	8,9789	8,9287	8,6394	8,6727	8,6652
	Cob. + 4 Pav.	11,499	11,473	11,101	11,144	11,134
Tração no topo da verga *(região de transpasse – inversão de flexão)*	Cobertura	0,78151	0,72311	0,70337	0,74596	0,74124
	Cob. + 1 Pav.	2,3152	2,1422	2,0837	2,2099	2,1959
	Cob. + 2 Pav.	3,8489	3,5613	3,4641	3,6738	3,6505
	Cob. + 3 Pav.	5,3826	4,9804	4,8444	5,1378	5,1052
	Cob. + 4 Pav.	6,9163	6,3995	6,2247	6,6017	6,5599
Tração no topo da contraverga *(centro – zona armada)*	Cobertura	0,49498	0,49688	0,48367	0,48989	0,49228
	Cob. + 1 Pav.	1,4664	1,4720	1,4329	1,4513	1,4583
	Cob. + 2 Pav.	2,4378	2,4471	2,3821	2,4127	2,4244
	Cob. + 3 Pav.	3,4092	3,4222	3,3313	3,3741	3,3905
	Cob. + 4 Pav.	4,3806	4,3973	4,2805	4,3339	4,3566
Tração na base da contraverga *(região de transpasse – inversão de flexão)*	Cobertura	0,61577	0,62119	0,53397	0,58543	0,59304
	Cob. + 1 Pav.	1,8242	1,8403	1,5819	1,7343	1,7569
	Cob. + 2 Pav.	3,0326	3,0593	2,6298	2,8832	2,9207
	Cob. + 3 Pav.	4,2411	4,2784	3,6776	4,0321	4,0845
	Cob. + 4 Pav	5,4495	5,4975	4,7255	5,1810	5,2483

Compressão na armadura da verga *(região de transpasse)*	Cobertura	0,95355	1,6398	2,8317	3,0900	3,0837
	Cob. + 1 Pav.	2,8249	4,8578	8,3888	9,1541	9,1354
	Cob. + 2 Pav.	4,6962	8,0759	13,946	15,218	15,187
	Cob. + 3 Pav.	6,5675	11,294	19,503	21,282	21,239
	Cob. + 4 Pav	8,4388	14,512	25,060	27,346	27,290
Tração na armadura da verga *(região central)*	Cobertura	6,3204	6,2344	6,0906	6,0336	6,0215
	Cob. + 1 Pav.	18,724	18,469	18,043	17,875	17,839
	Cob. + 2 Pav.	31,128	30,704	29,996	29,715	29,656
	Cob. + 3 Pav.	43,532	42,939	41,949	41,556	41,473
	Cob. + 4 Pav	55,935	55,174	53,901	53,397	53,290
Compressão na armadura da contraverga *(região de transpasse)*	Cobertura	0,35940	0,37813	1,3311	1,4563	1,4007
	Cob. + 1 Pav.	1,0647	1,1202	3,9433	4,3141	4,1496
	Cob. + 2 Pav.	1,7700	1,8623	6,5556	7,1720	6,8985
	Cob. + 3 Pav.	2,4753	2,6043	9,1678	10,030	9,6474
	Cob. + 4 Pav	3,1806	3,3464	11,780	12,888	12,396
Tração na armadura da contraverga *(região central)*	Cobertura	2,4606	2,4660	2,4538	2,4808	2,5058
	Cob. + 1 Pav.	7,2895	7,3054	7,2693	7,3494	7,4235
	Cob. + 2 Pav.	12,118	12,145	12,085	12,218	12,341
	Cob. + 3 Pav.	16,947	16,984	16,900	17,087	17,259
	Cob. + 4 Pav	21,776	21,824	21,716	21,955	22,179
Compressão na argamassa *(início do transpasse – pontual)*	Cobertura	2,2787	2,3694	2,3987	2,3381	2,4284
	Cob. + 1 Pav.	6,7506	7,0193	7,1061	6,9265	7,1941
	Cob. + 2 Pav.	11,223	11,669	11,813	11,515	11,960
	Cob. + 3 Pav.	15,694	16,319	16,521	16,103	16,726
	Cob. + 4 Pav	20,166	20,969	21,228	20,692	21,491
Compressão na argamassa *(juntas verticais entre verga e contraverga)*	Cobertura	1,2435	1,2285	1,1848	1,1566	1,1443
	Cob. + 1 Pav.	3,6838	3,6394	3,5099	3,4264	3,3898
	Cob. + 2 Pav.	6,1241	6,0503	5,8350	5,6961	5,6354
	Cob. + 3 Pav.	8,5644	8,4612	8,1601	7,9659	7,8809
	Cob. + 4 Pav	11,005	10,872	10,485	10,236	10,127
Tração na argamassa *(juntas verticais entre verga e contraverga)*	Cobertura	1,0130	1,0175	1,0151	0,97559	0,95317
	Cob. + 1 Pav.	3,0011	3,0143	3,0071	2,8902	2,8237
	Cob. + 2 Pav.	4,9891	5,0111	4,9991	4,8047	4,6943
	Cob. + 3 Pav.	6,9772	7,0079	6,9911	6,7193	6,5649
	Cob. + 4 Pav	8,9652	9,0047	8,9832	8,6339	8,4354

Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Tabela B.2 – Deslocamentos máximos em X, Y e flecha da verga (mm)

Elemento analisado	Cenário	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D	Tipo E
Deslocamento vertical máximo (Uy) *(face superior central seguindo o sentido da força para baixo)*	Cobertura	0,62264	0,61097	0,58828	0,57881	0,57558
	Cob. + 1 Pav.	1,8445	1,8100	1,7428	1,7147	1,7051
	Cob. + 2 Pav.	3,0665	3,0090	2,8973	2,8506	2,8347
	Cob. + 3 Pav.	4,2884	4,2080	4,0518	3,9865	3,9643
	Cob. + 4 Pav	5,5103	5,4070	5,2062	5,1224	5,0938
Deslocamento horizontal máximo (Ux) *(face superior convergindo ao centro, seguindo o deslocamento vertical)*	Cobertura	0,085543	0,084350	0,081373	0,080571	0,081916
	Cob. + 1 Pav.	0,25342	0,24921	0,24027	0,23941	0,24267
	Cob. + 2 Pav.	0,42026	0,41429	0,40076	0,39681	0,40343
	Cob. + 3 Pav.	0,58917	0,58095	0,55859	0,55493	0,56419
	Cob. + 4 Pav	0,75705	0,74649	0,72014	0,71305	0,72495
Flecha máxima da verga *(deslocamento vertical no vão livre)*	Cobertura	0,183	0,178	0,172	0,172	0,172
	Cob. + 1 Pav.	0,542	0,527	0,510	0,508	0,510
	Cob. + 2 Pav.	0,901	0,876	0,848	0,845	0,847
	Cob. + 3 Pav.	1,260	1,226	1,186	1,181	1,185
	Cob. + 4 Pav	1,619	1,575	1,524	1,518	1,522

Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Tabela B.3 – Resultados do Modelo SA sob o carregamento correspondente à cobertura

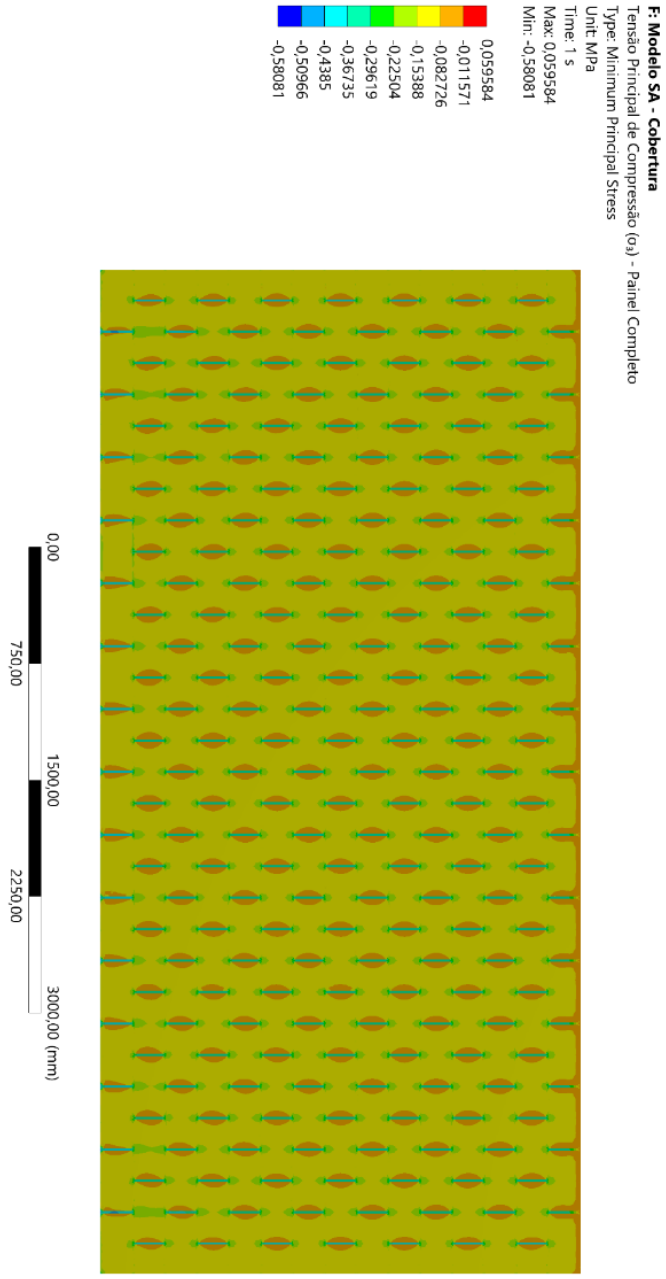
Componente	Grandeza analisada	Valor
Bloco cerâmico	Compressão máxima no topo da parede (MPa)	0,31605
Bloco cerâmico	Tração máxima no topo dos blocos da fiada inferior (MPa)	0,23447
Argamassa	Compressão máxima nas arestas externas da base das juntas verticais (MPa)	0,58081
Argamassa	Tração máxima no topo das juntas verticais da fiada superior (MPa)	0,58007
Painel	Deslocamento vertical máximo (Uy) (mm)	0,27325
Painel	Deslocamento horizontal máximo em X (Ux) (mm)	0,029731

Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

APÊNDICE C – MAPAS DE TENSÕES E DESLOCAMENTOS DOS MODELOS NUMÉRICOS

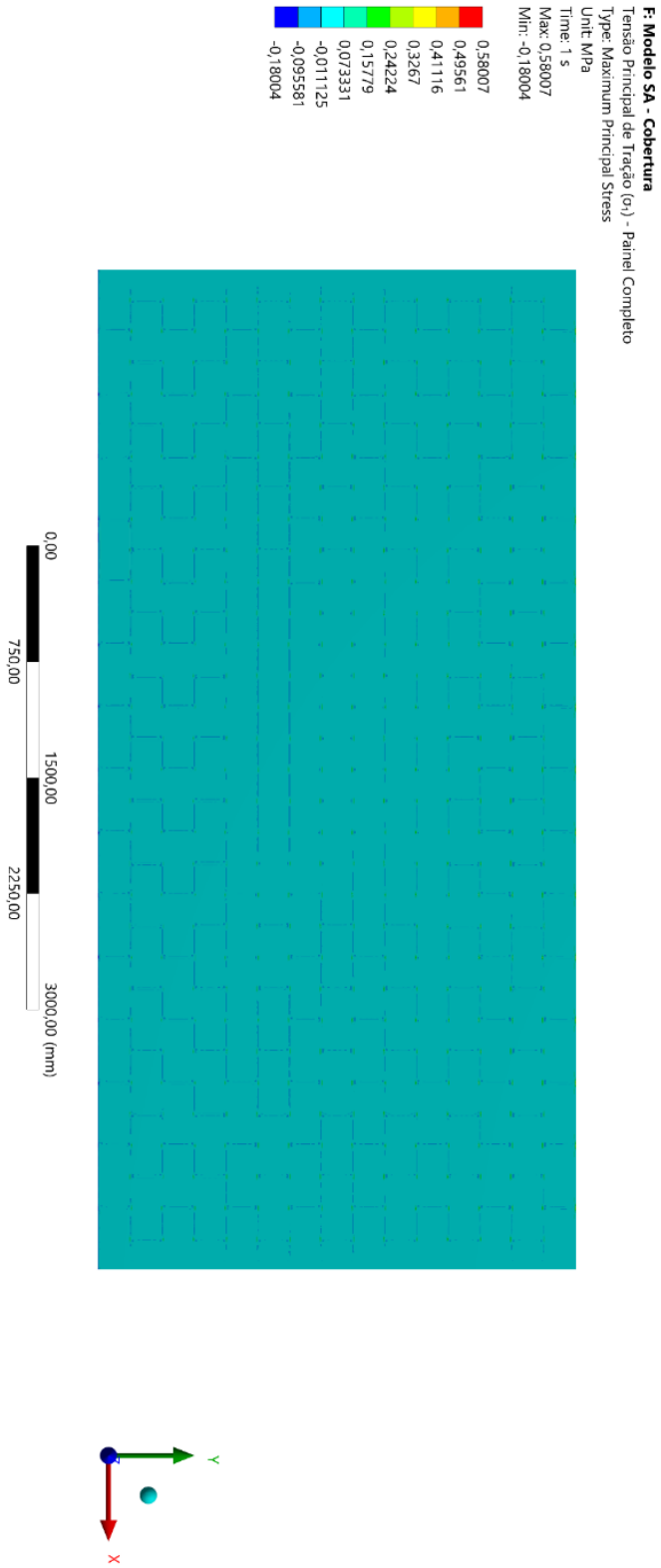
Modelo Sem Abertura (SA)

Figura C.1 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) no painel completo do modelo SA sob o carregamento correspondente à cobertura



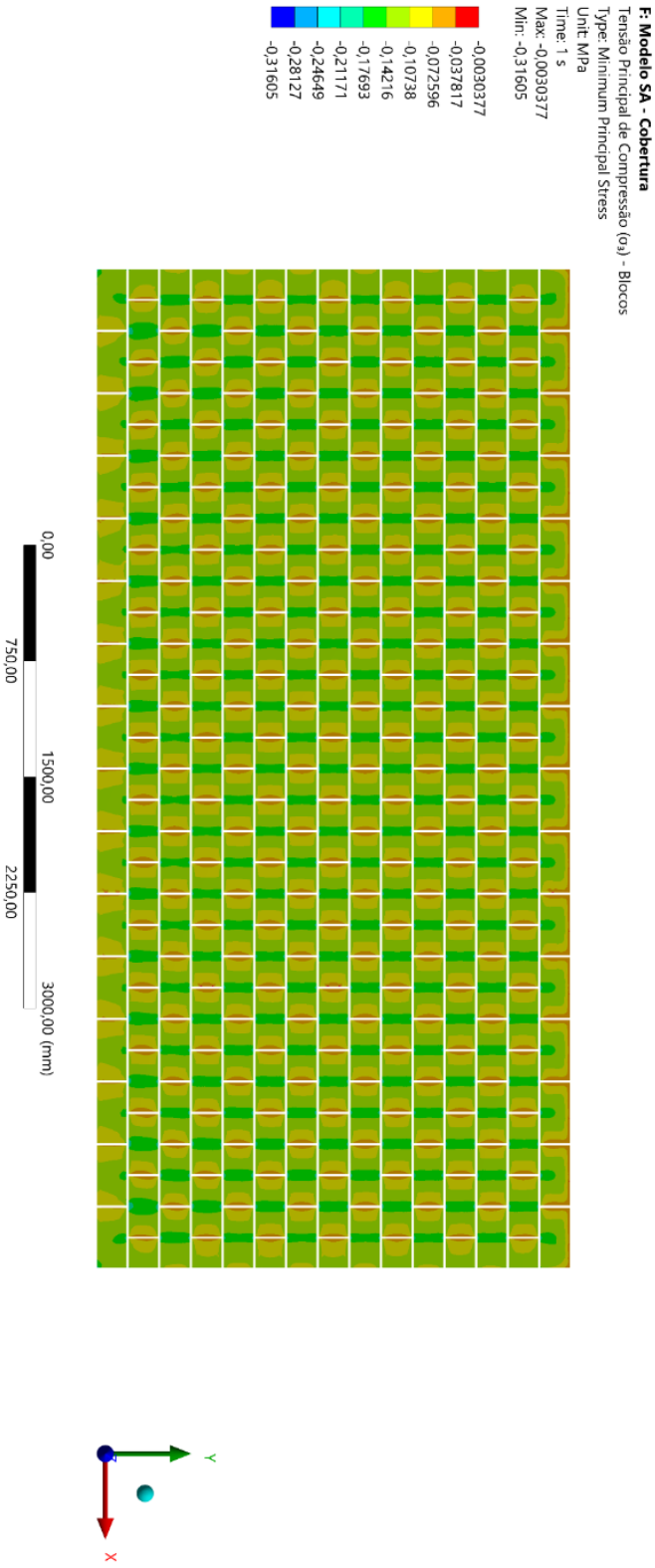
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.2 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) no painel completo do modelo SA sob o carregamento correspondente à cobertura



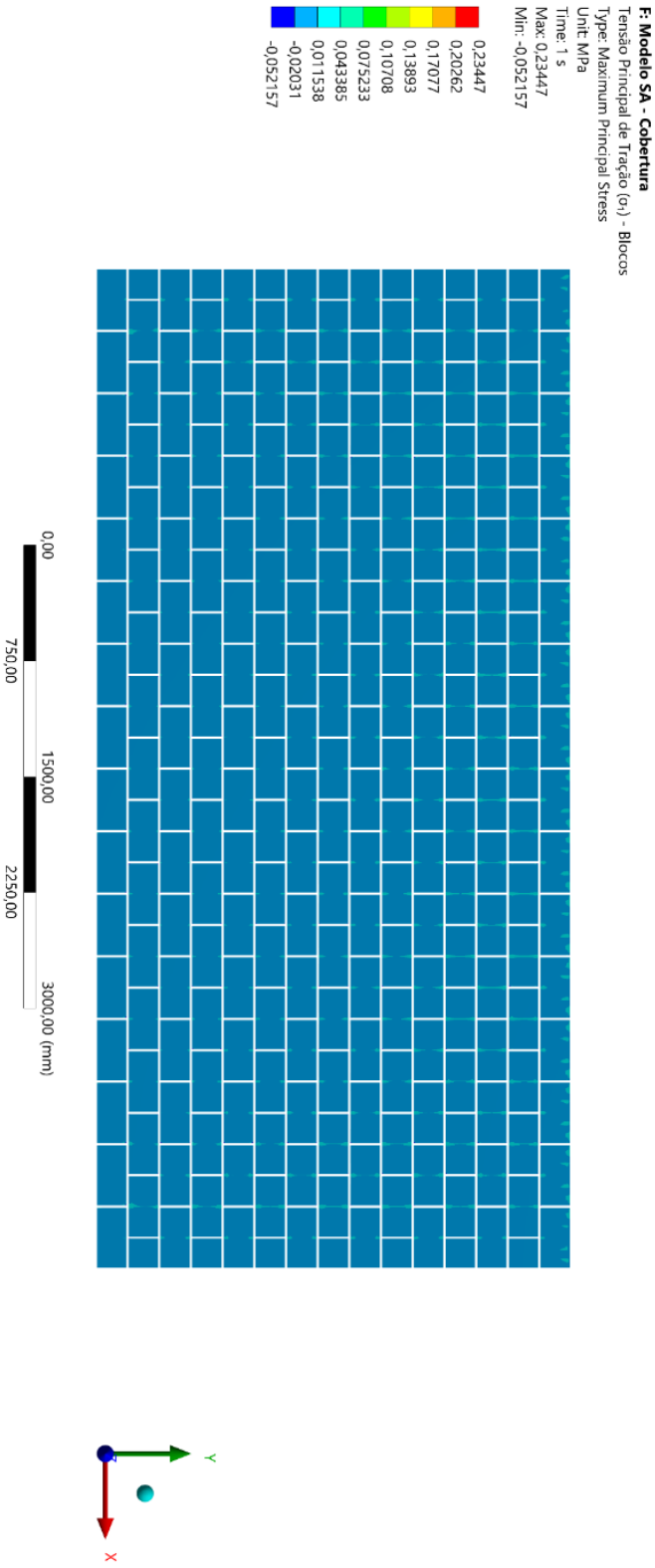
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.3 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) nos blocos cerâmicos do modelo SA sob o carregamento correspondente à cobertura



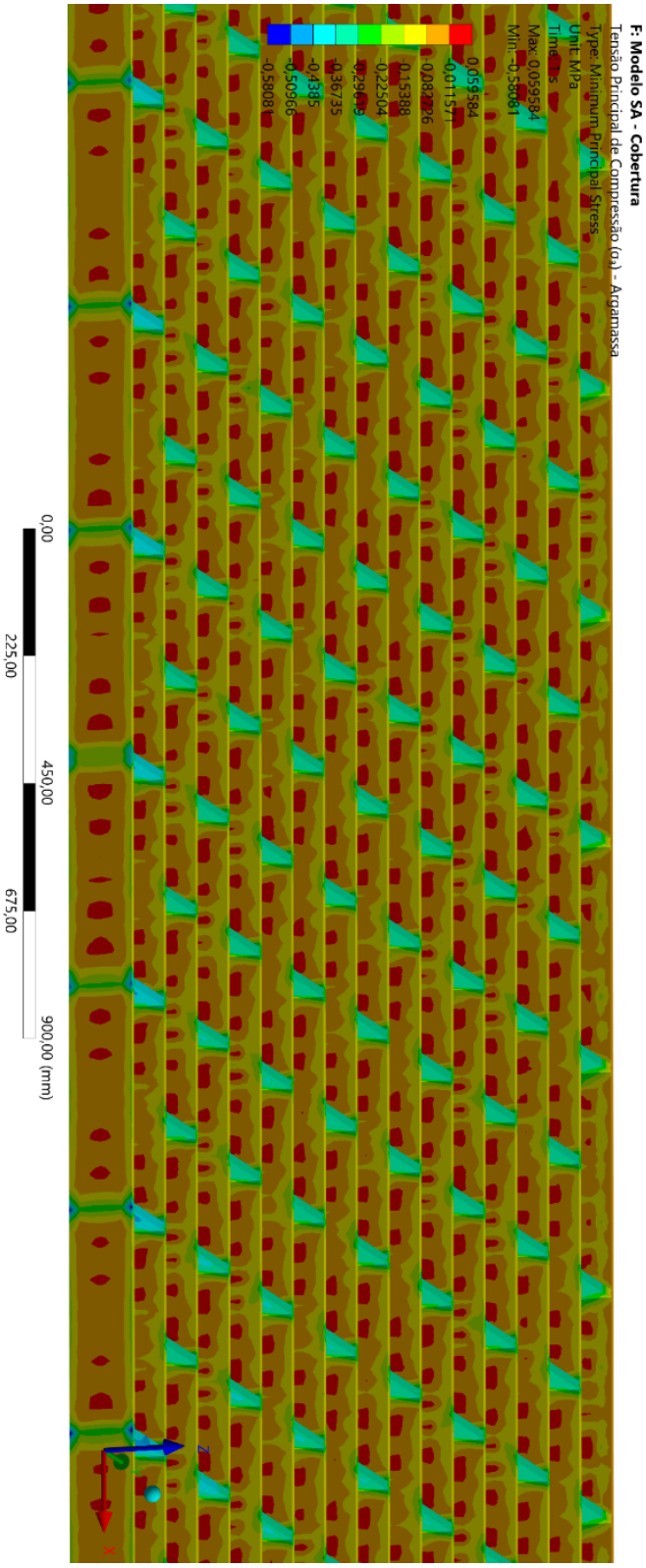
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.4 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) nos blocos cerâmicos do modelo SA sob o carregamento correspondente à cobertura



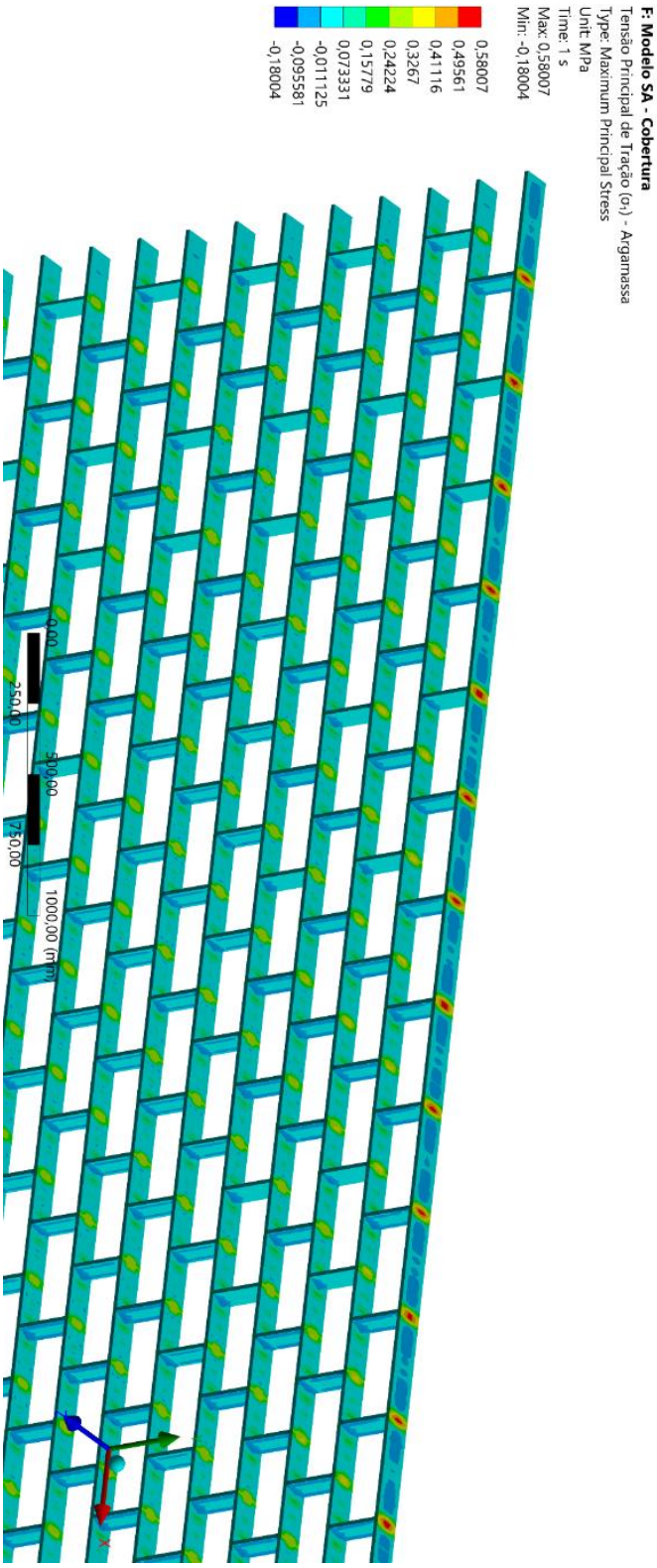
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.5 – Detalhe das tensões principais de compressão (σ_3) na argamassa do modelo SA sob o carregamento correspondente à cobertura



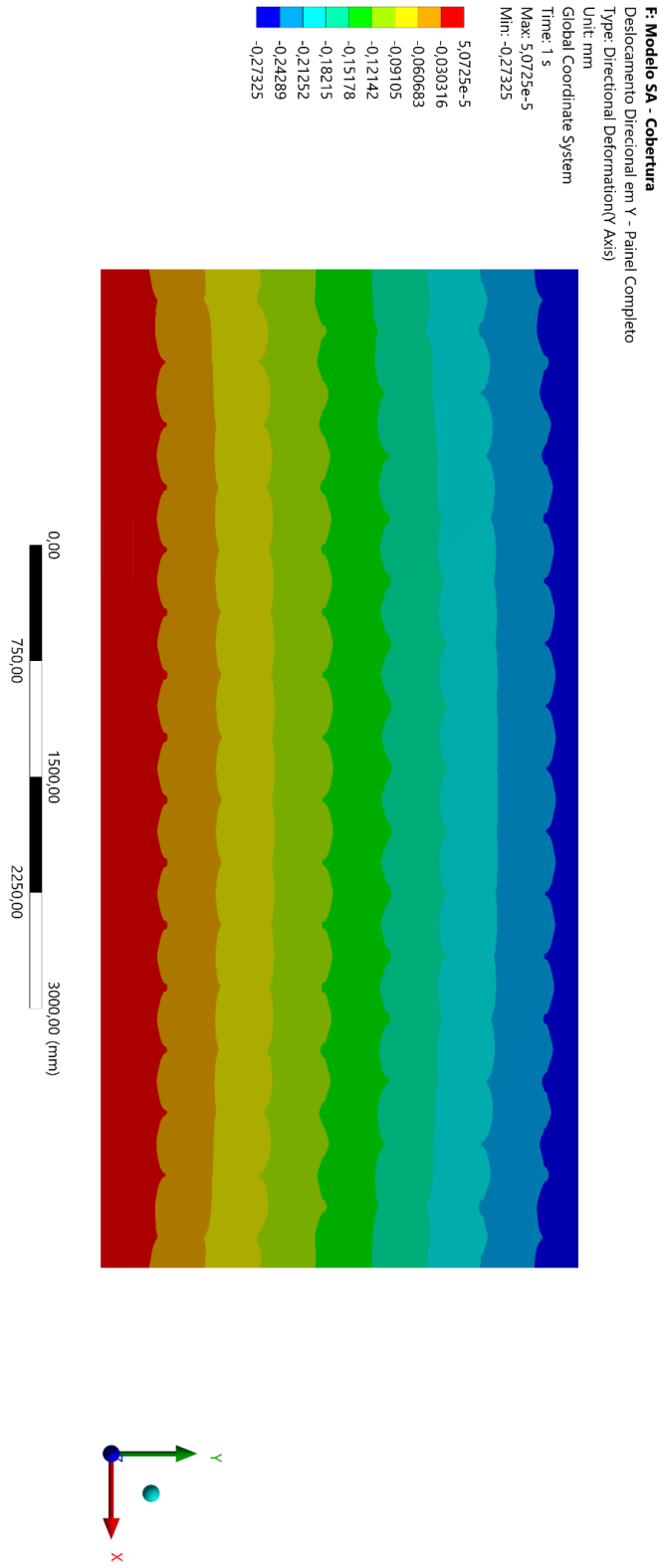
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.6 – Detalhe das tensões principais de tração (σ_1) na argamassa do modelo SA sob o carregamento correspondente à cobertura



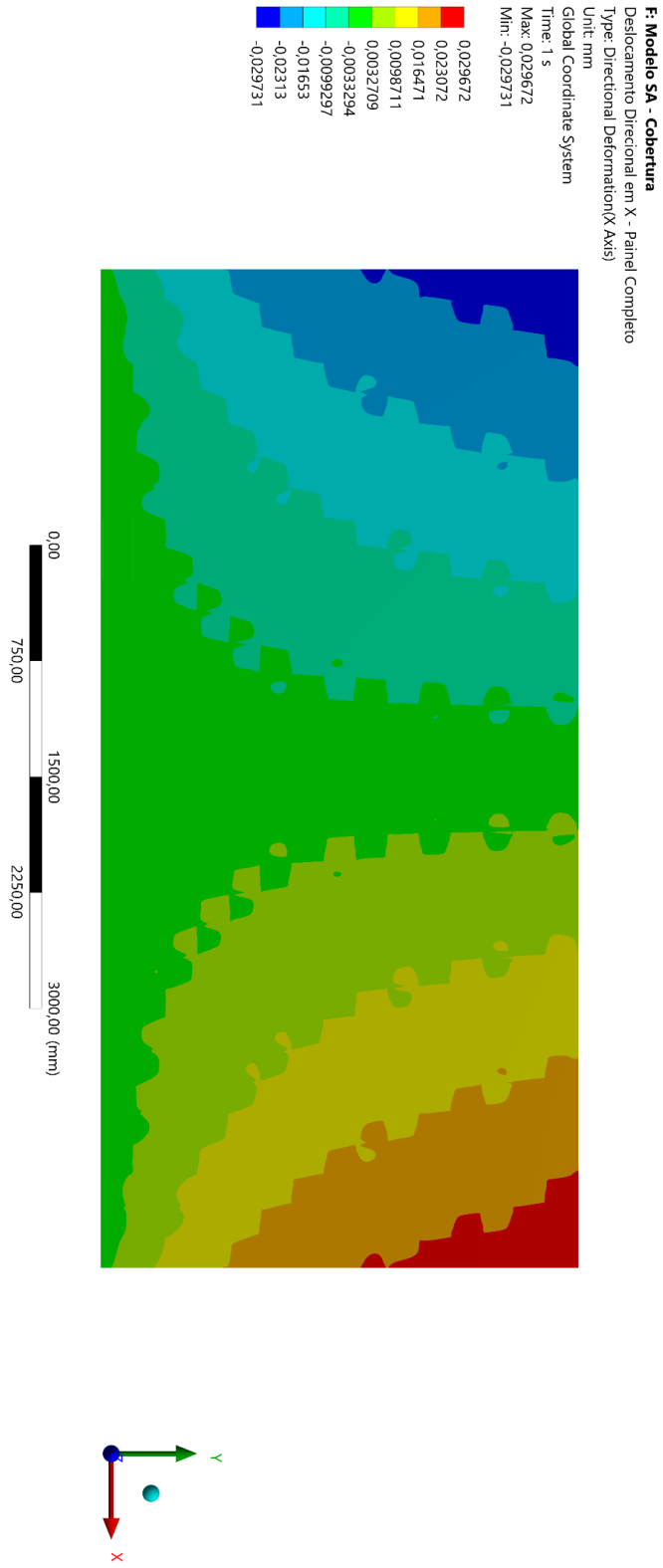
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.7 – Distribuição dos deslocamentos verticais (Uy) no painel do modelo SA sob o carregamento correspondente à cobertura



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

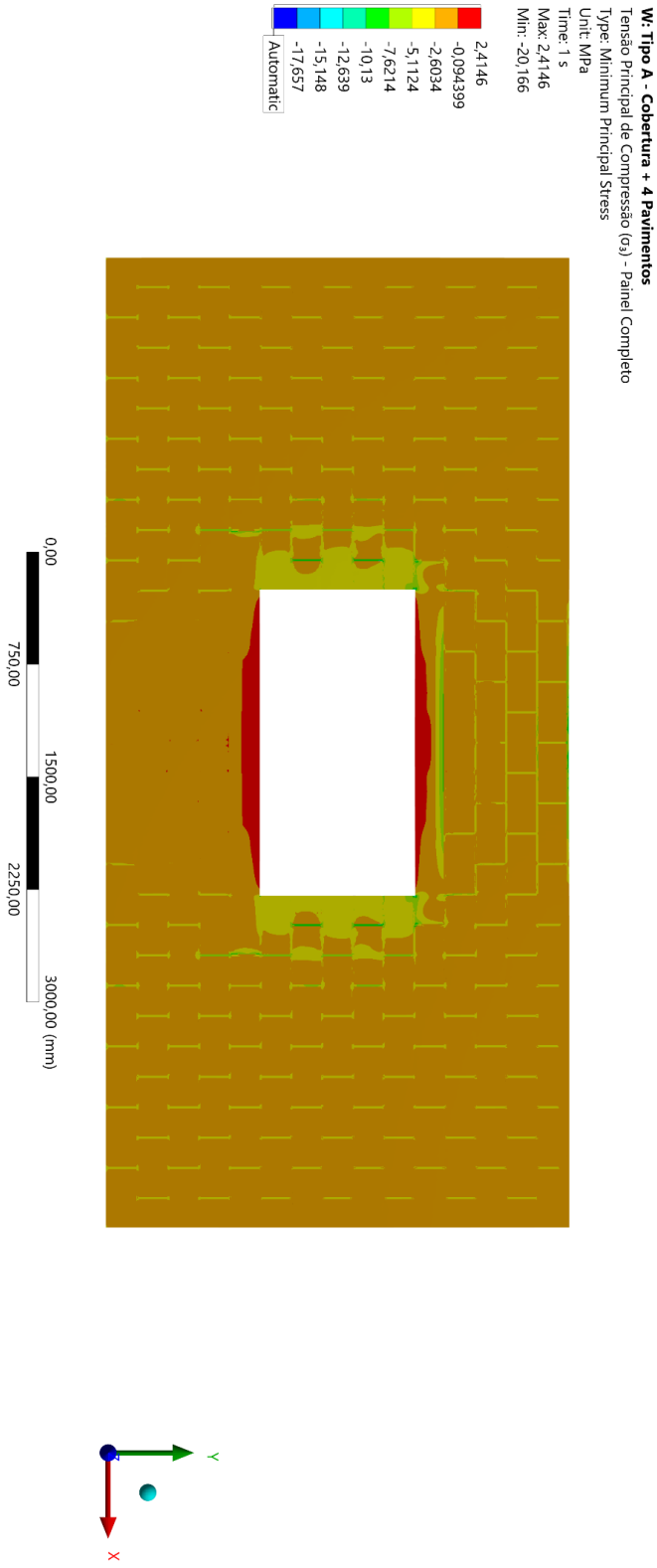
Figura C.8 – Distribuição dos deslocamentos horizontais (Ux) no painel do modelo SA sob o carregamento correspondente à cobertura



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

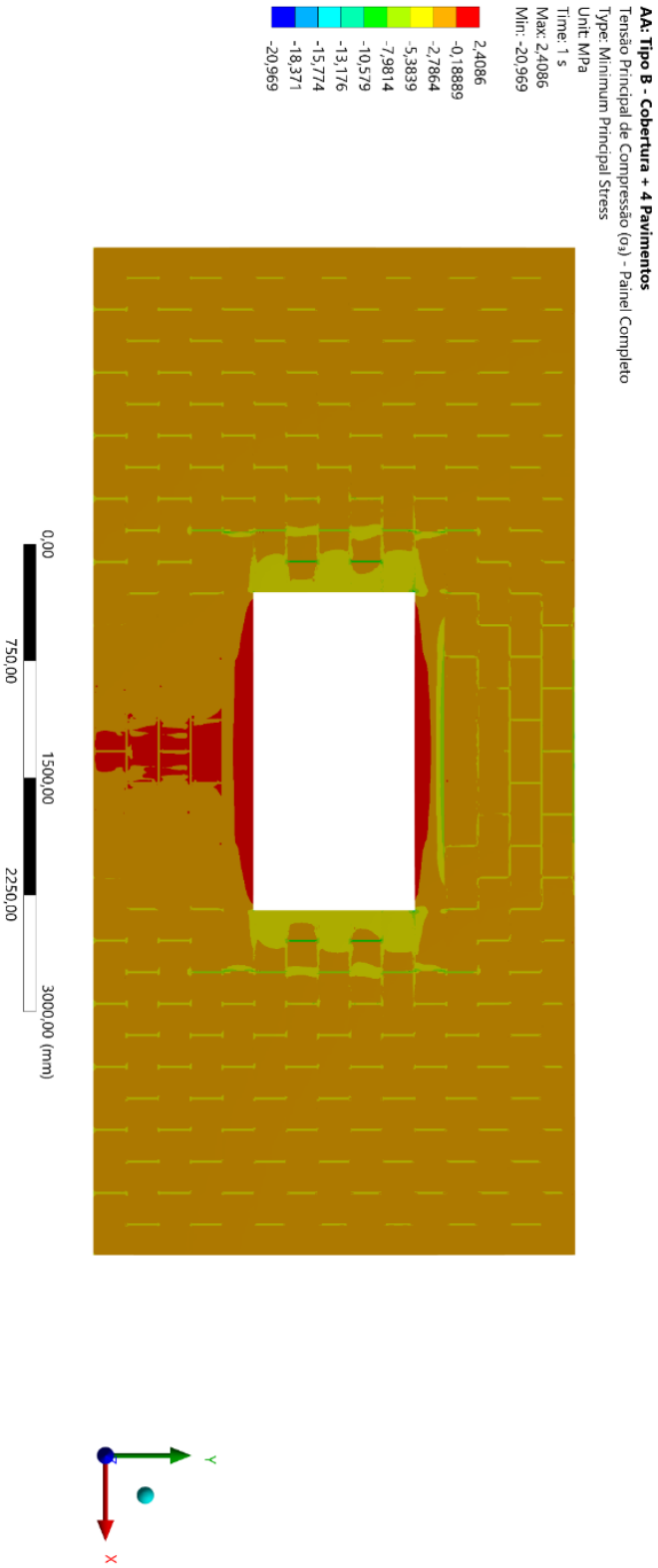
Distribuição global das tensões nos painéis com abertura

Figura C.9 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) no painel completo do Tipo A sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



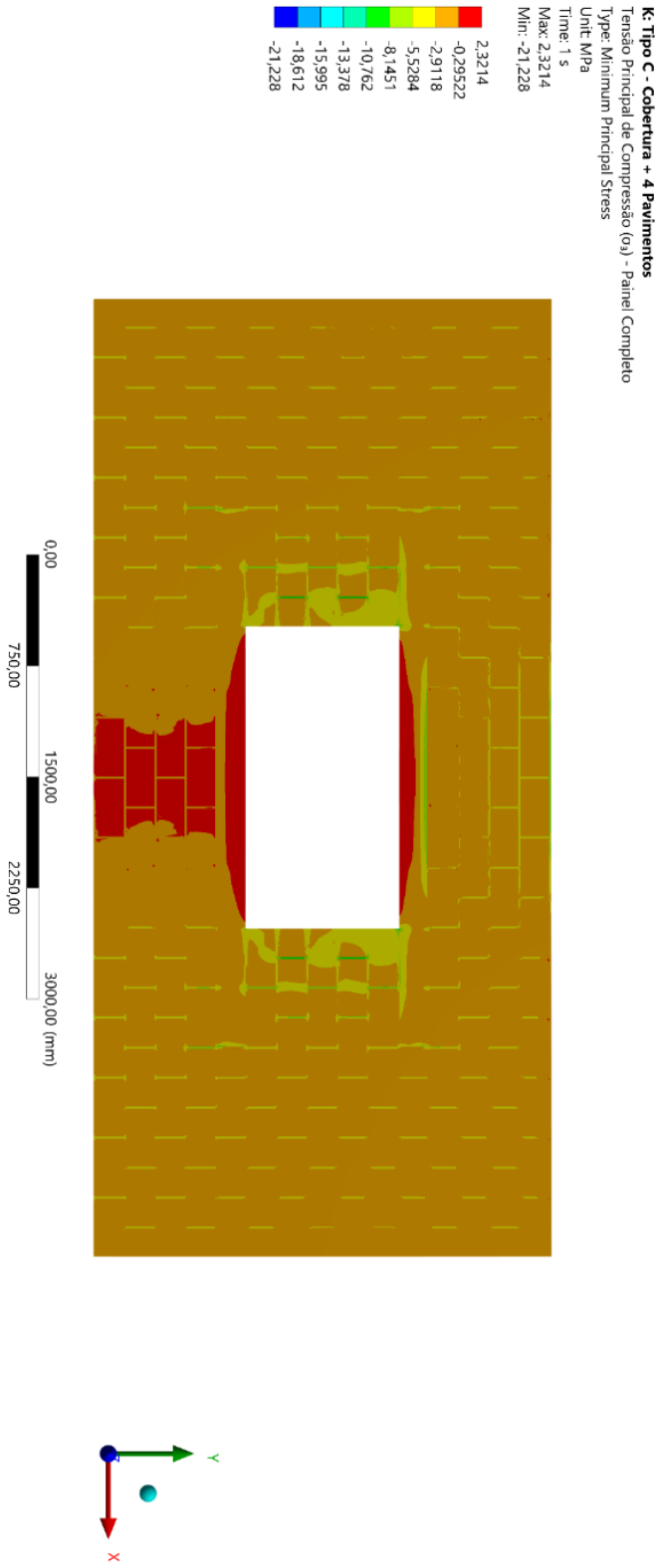
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.10 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) no painel completo do Tipo B sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



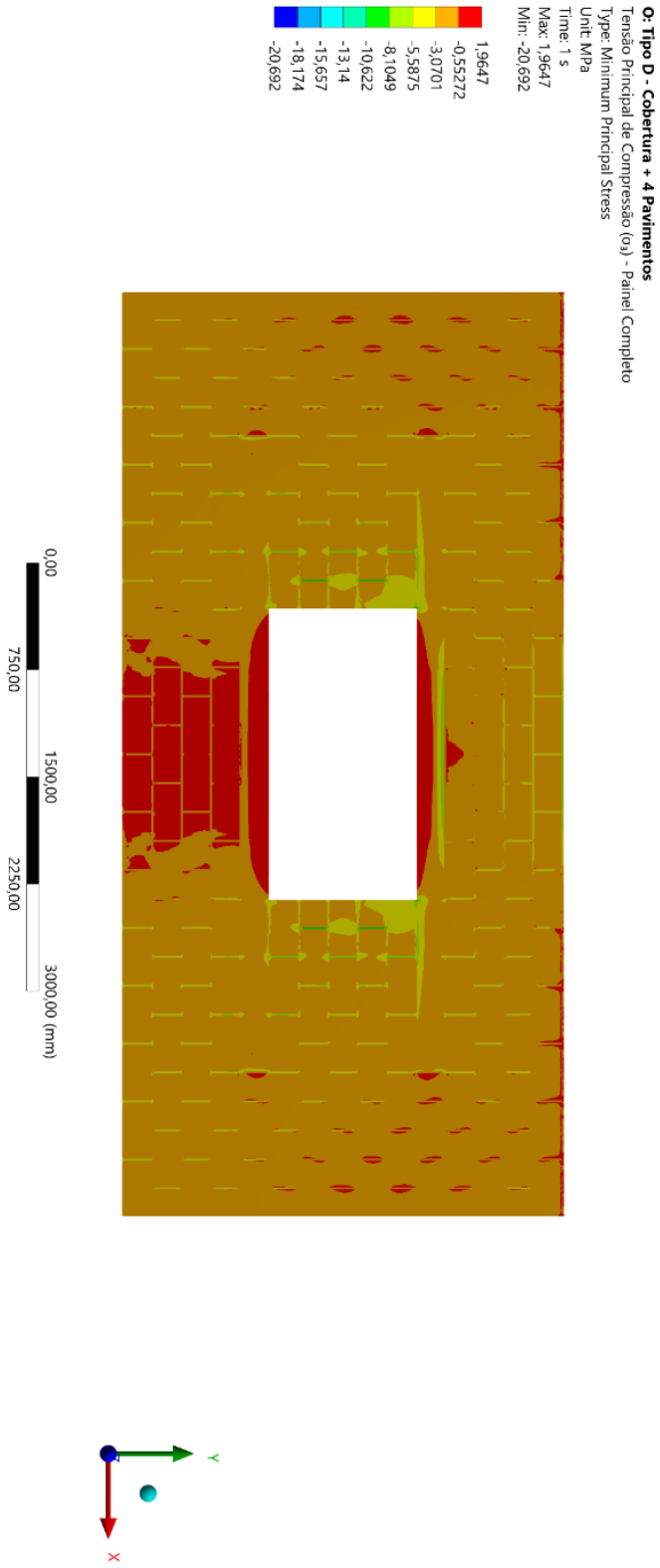
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.11 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) no painel completo do Tipo C sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



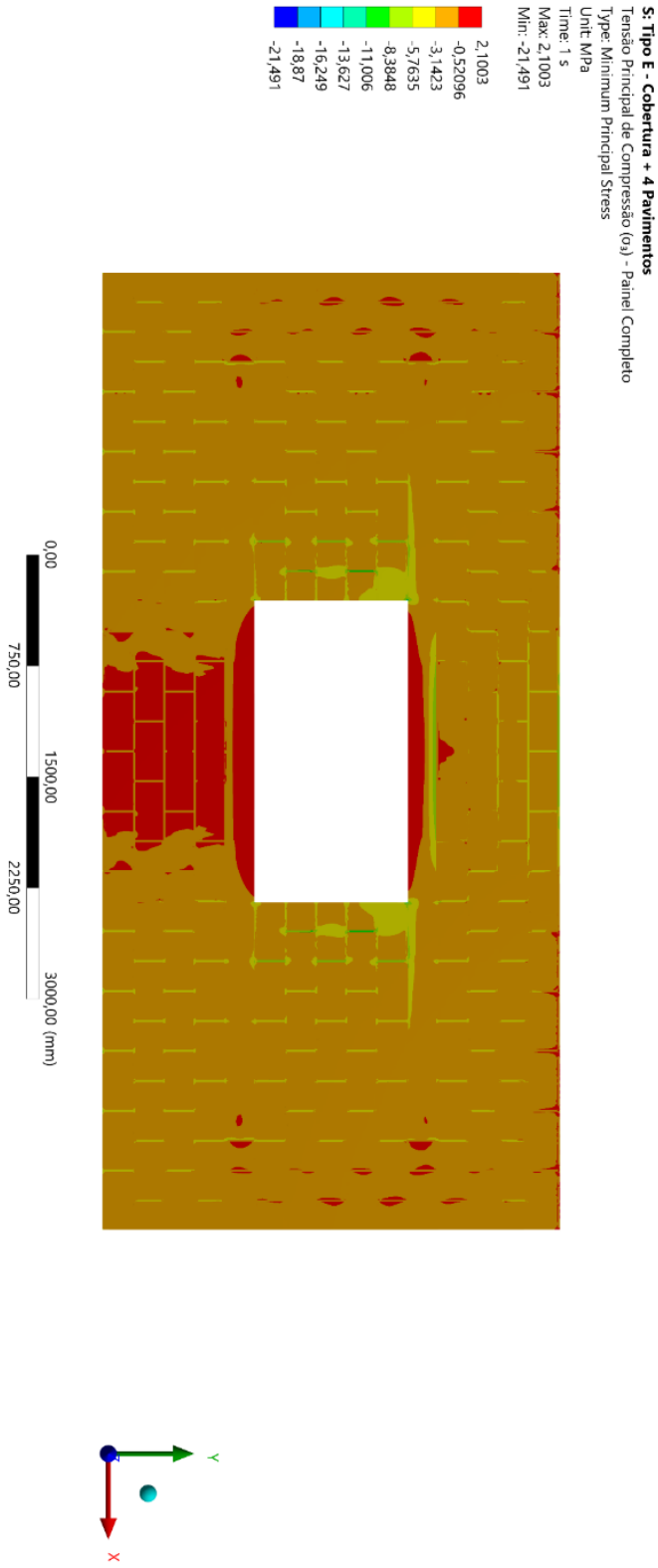
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.12 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) no painel completo do Tipo D sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



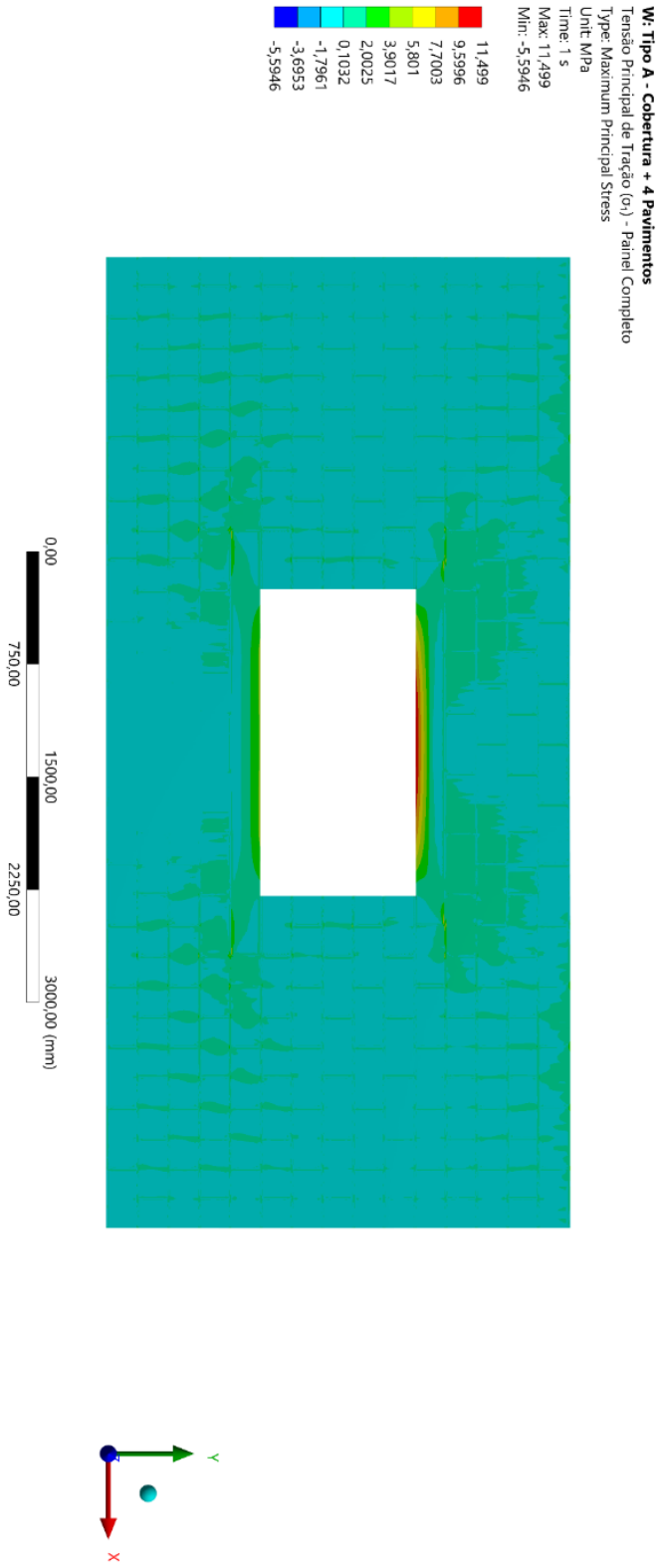
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.13 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) no painel completo do Tipo E sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



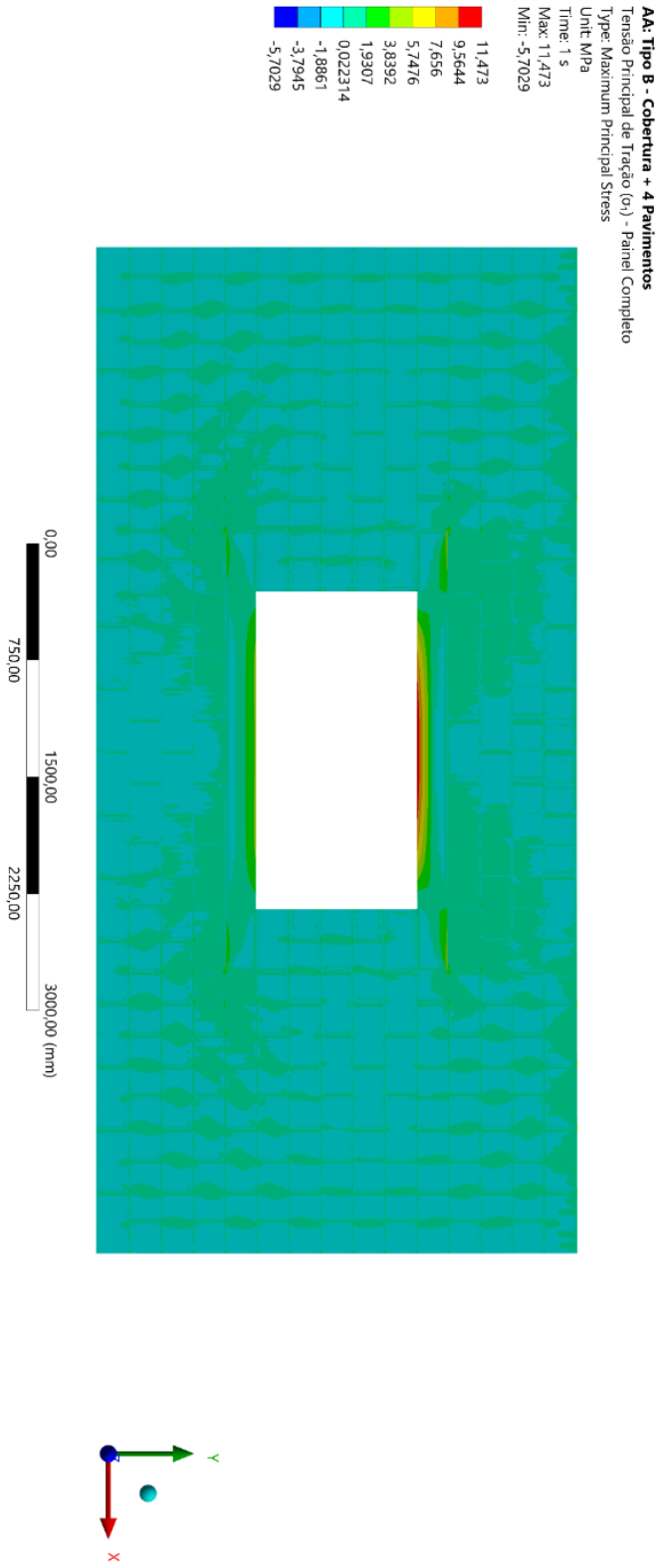
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.14 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) no painel completo do Tipo A sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



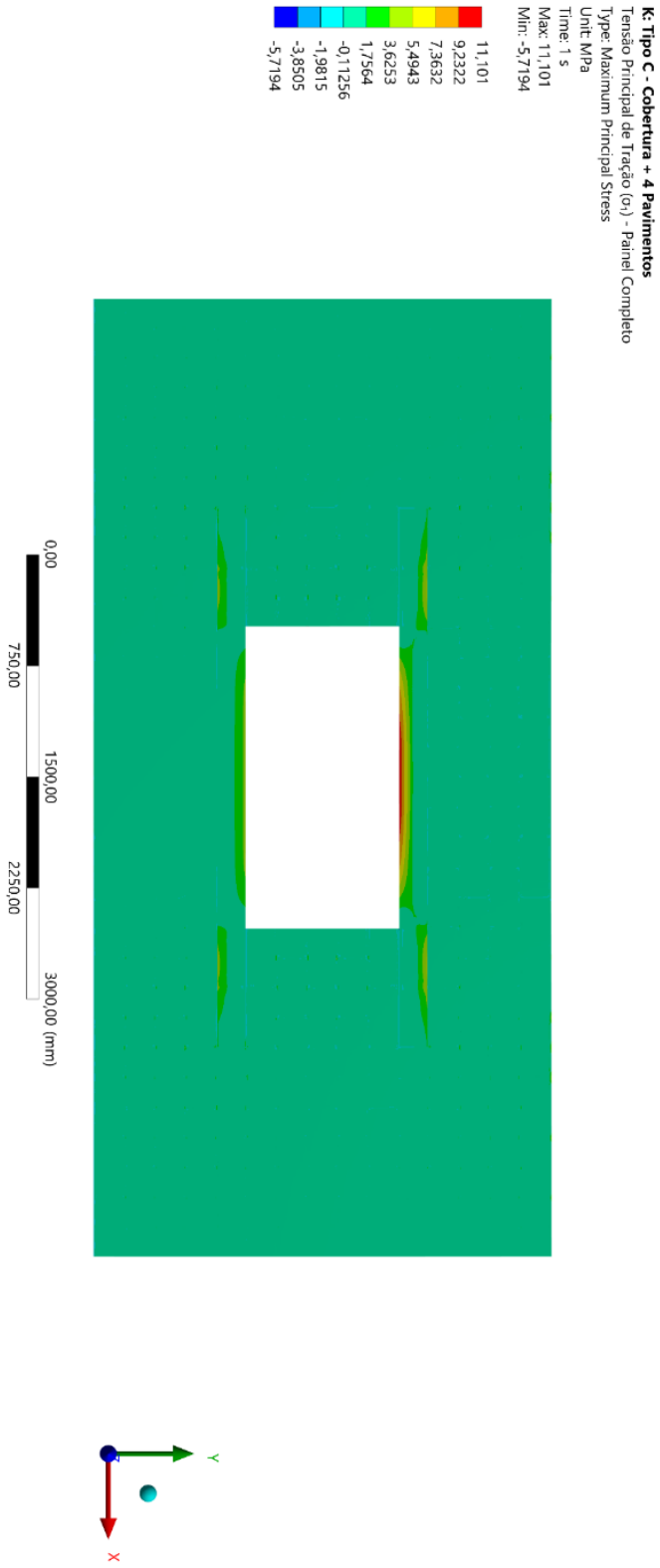
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.15 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) no painel completo do Tipo B sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



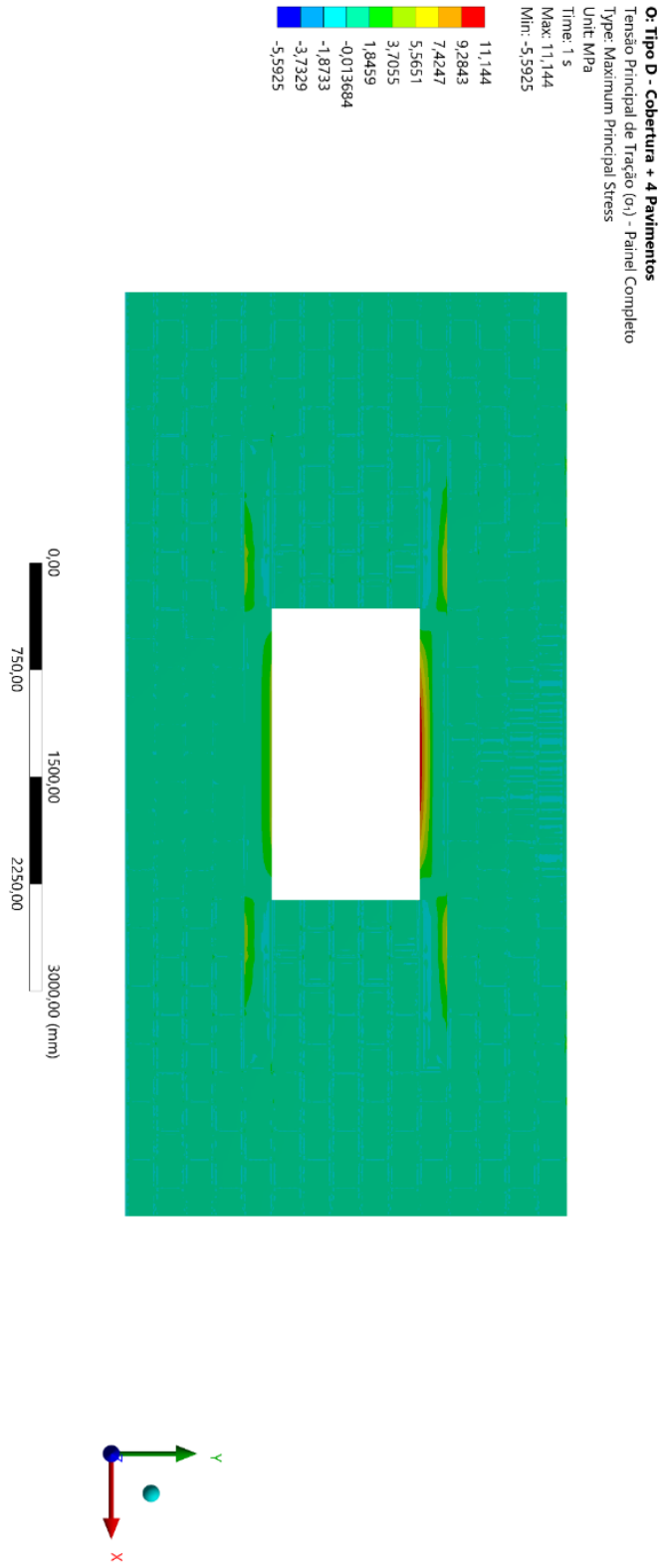
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.16 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) no painel completo do Tipo C sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



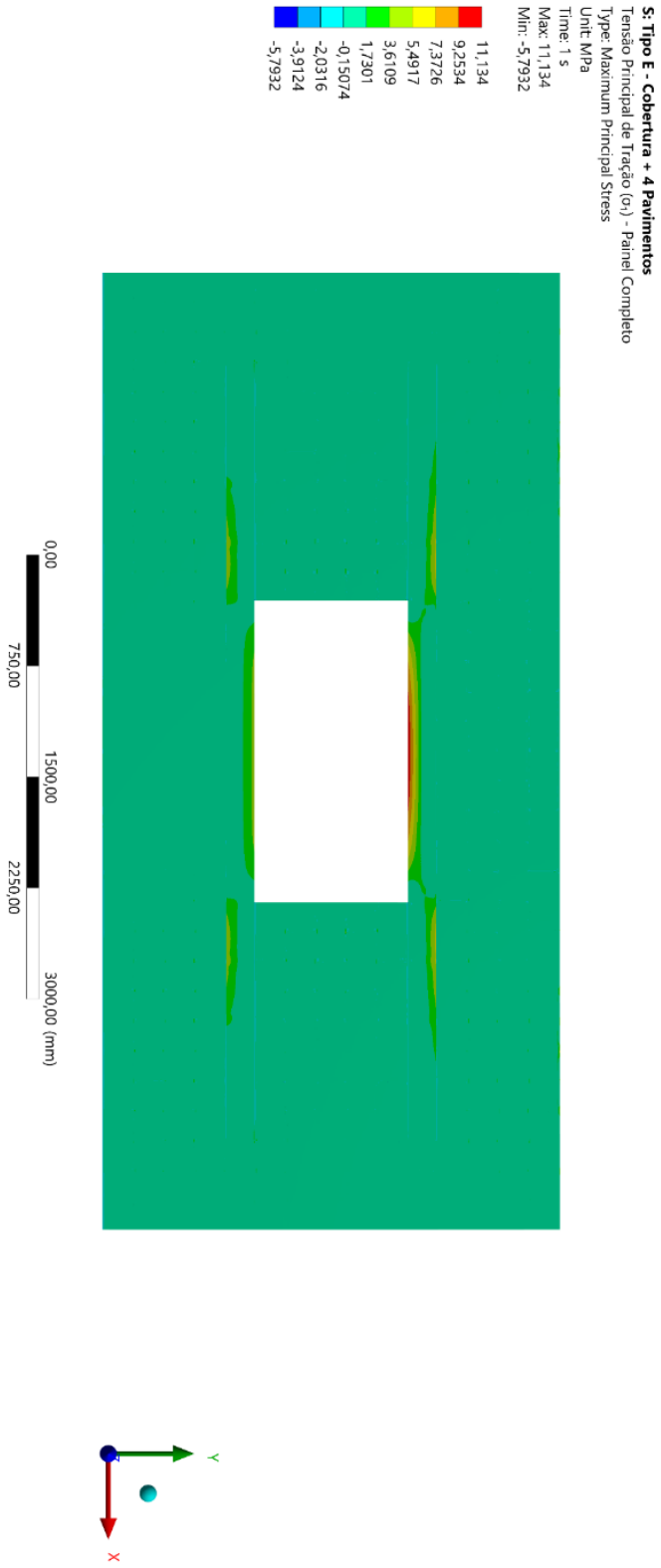
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.17 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) no painel completo do Tipo D sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

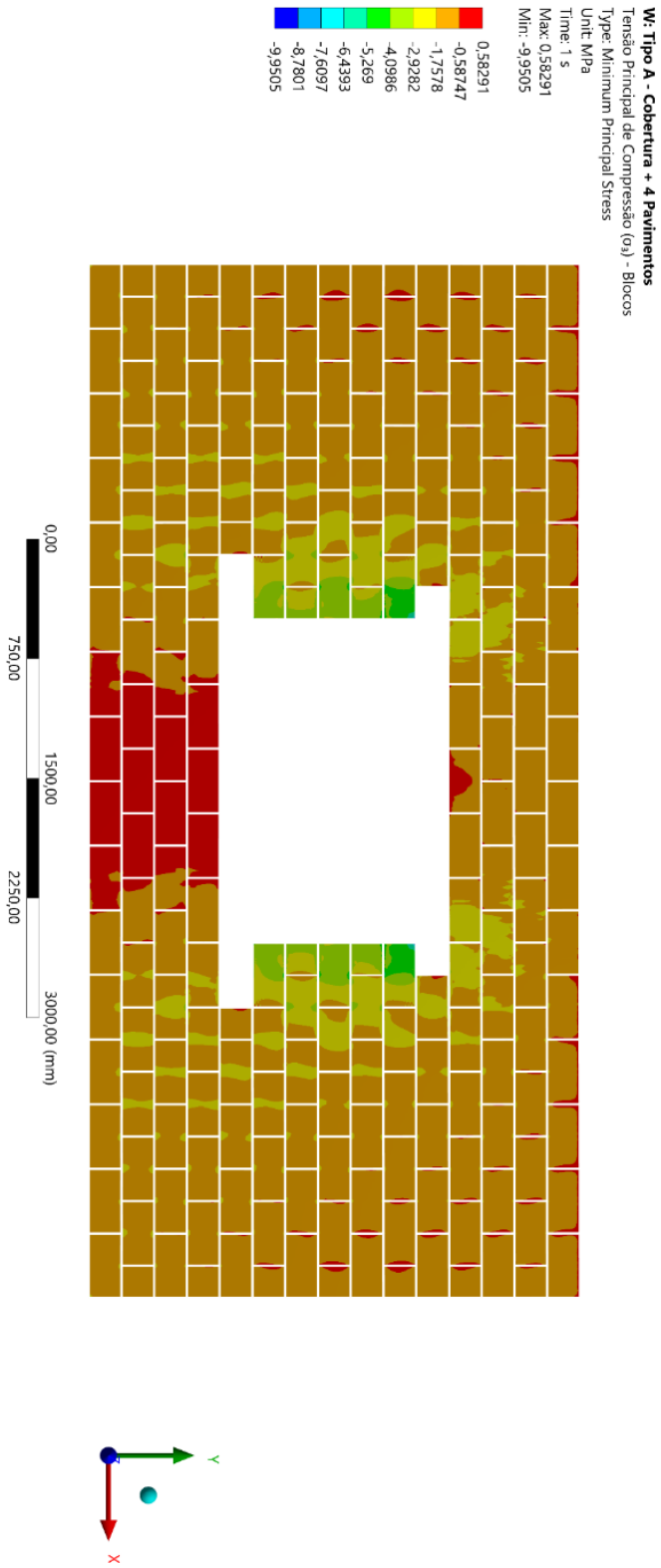
Figura C.18 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) no painel completo do Tipo E sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

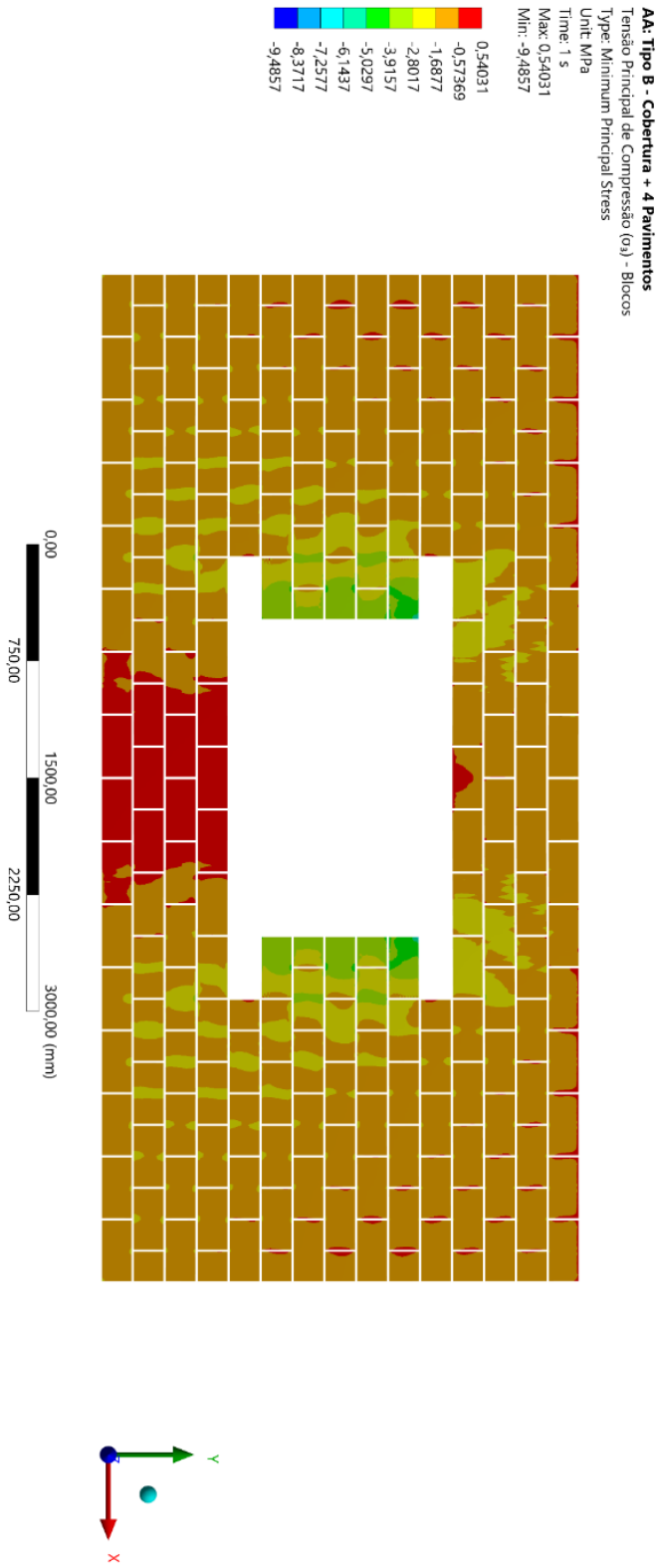
Tensões nos blocos cerâmicos dos painéis com abertura

Figura C.19 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) nos blocos cerâmicos do Tipo A sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



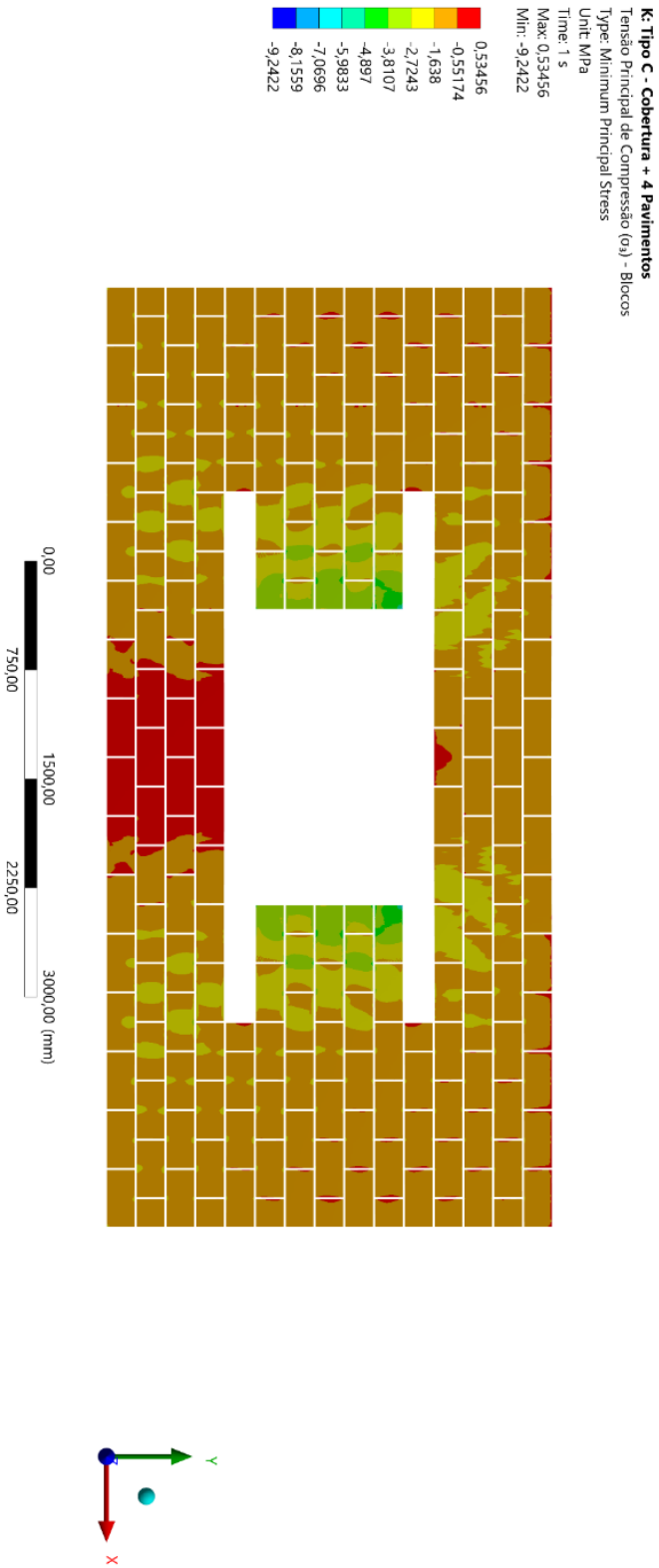
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.20 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) nos blocos cerâmicos do Tipo B sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



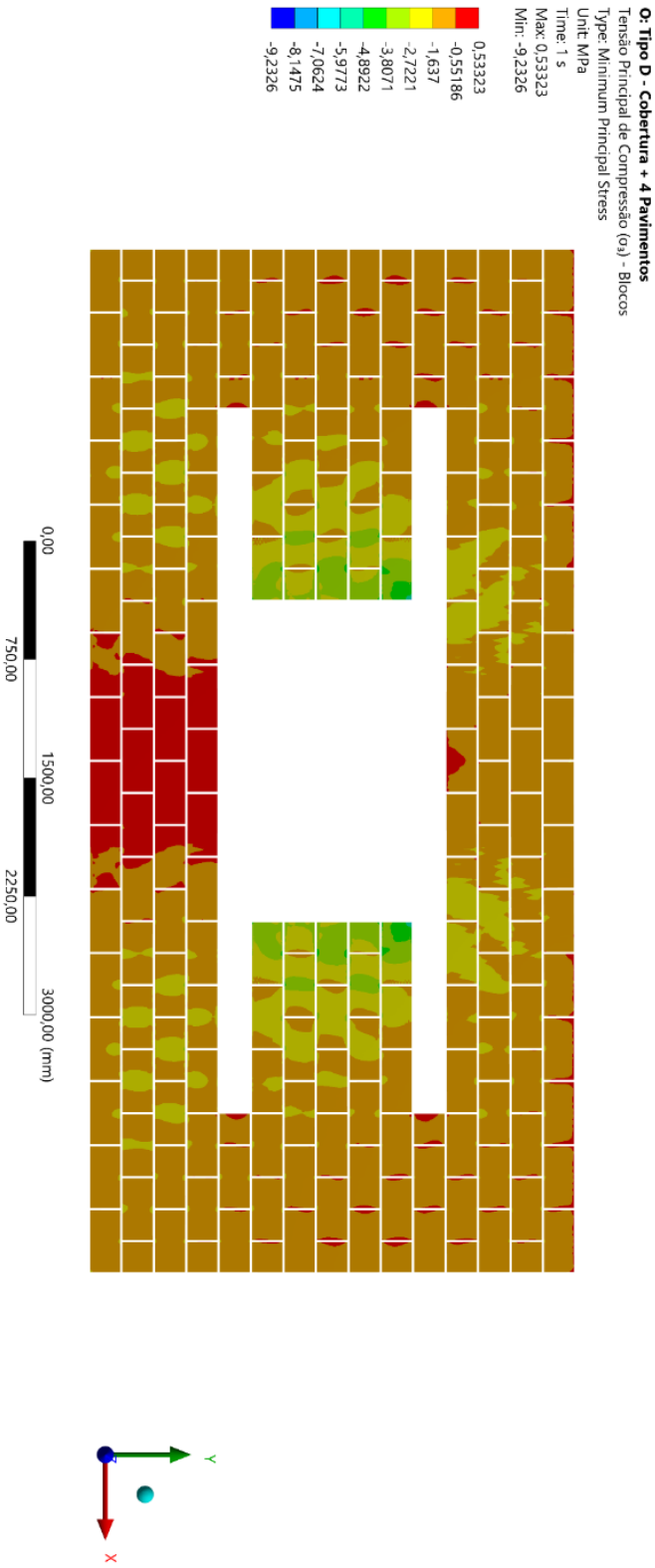
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.21 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) nos blocos cerâmicos do Tipo C sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



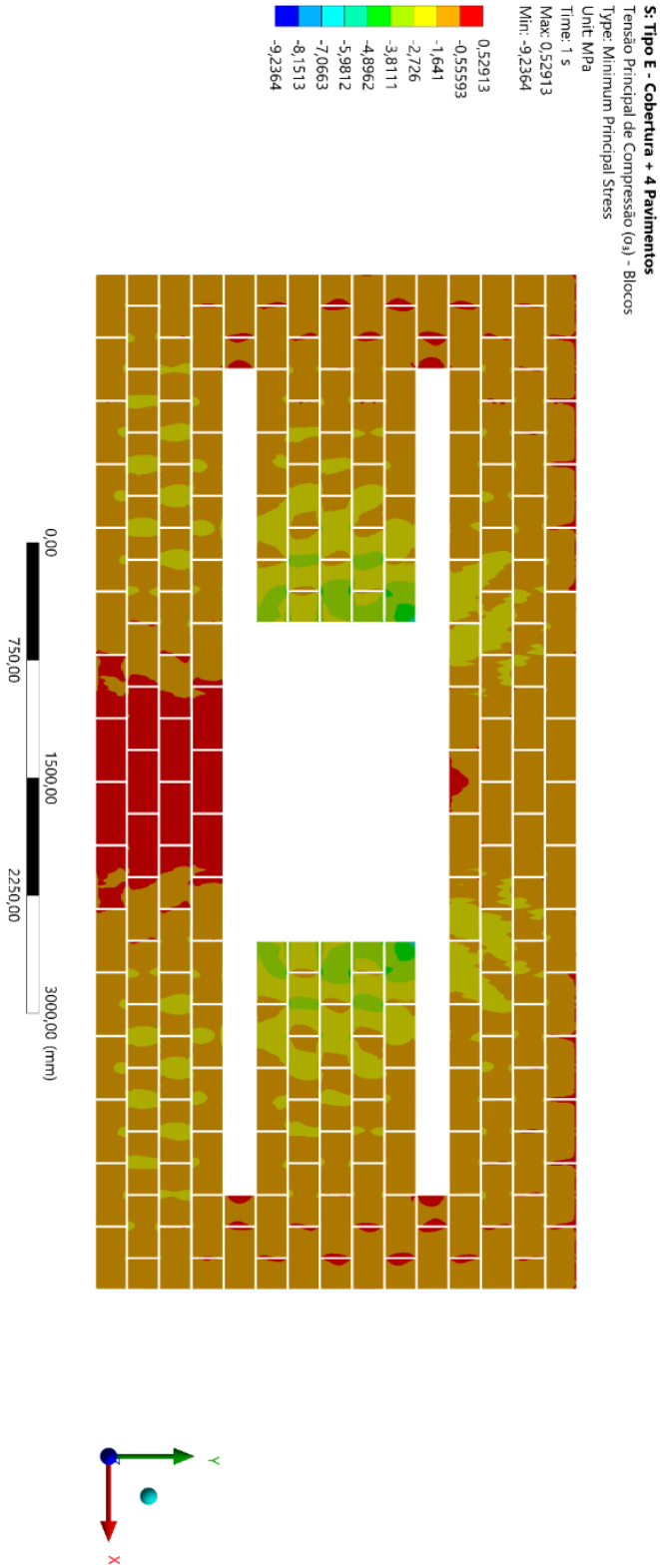
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.22 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) nos blocos cerâmicos do Tipo D sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



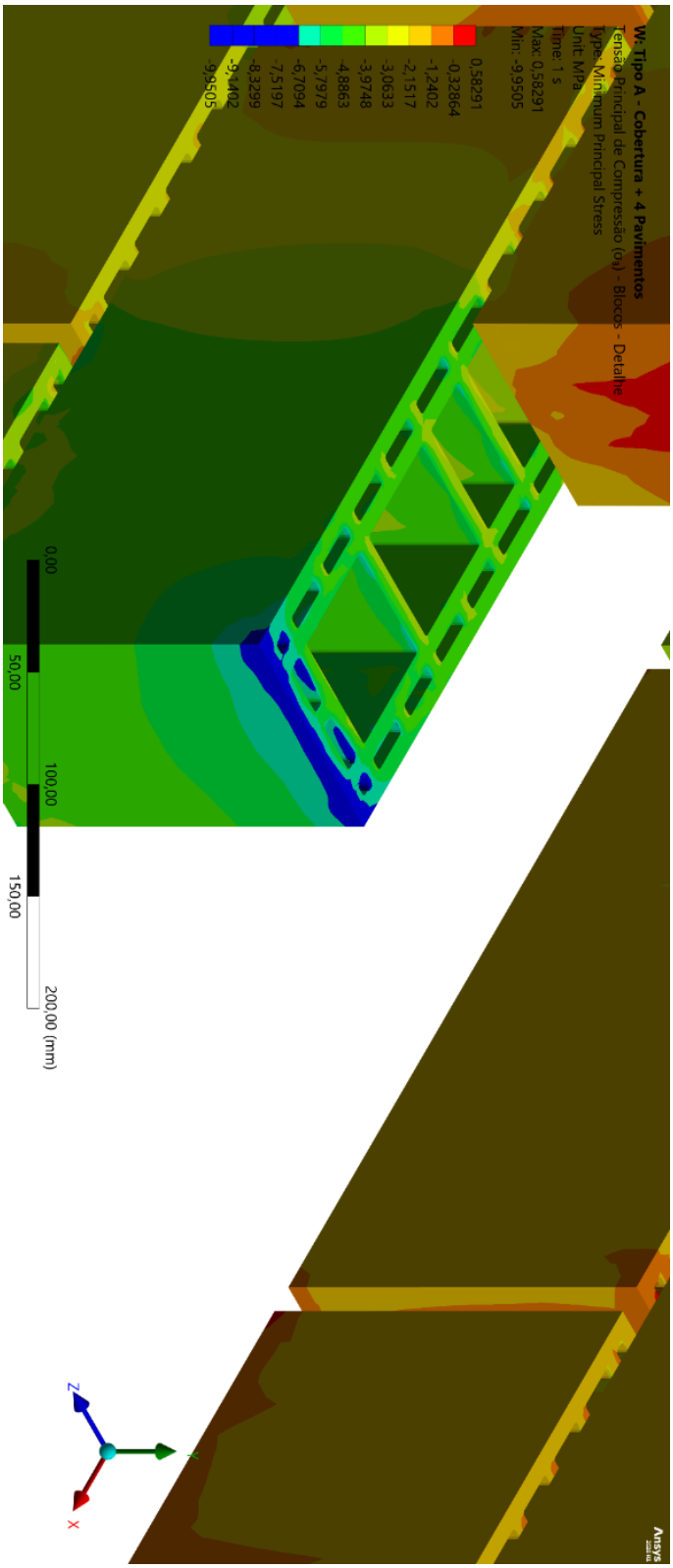
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.23 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) nos blocos cerâmicos do Tipo E sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



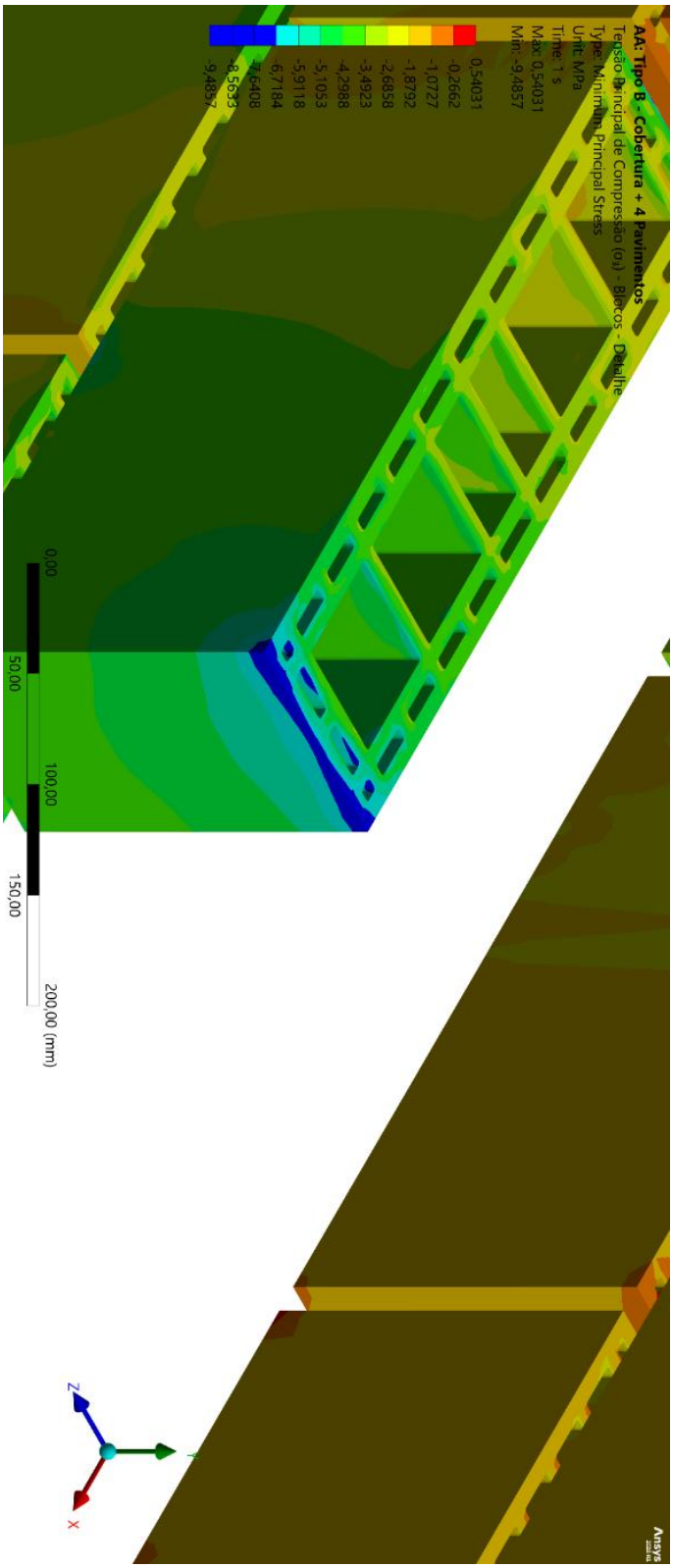
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.24 – Detalhe da região dos blocos cerâmicos com tensões de compressão superiores à resistência de referência no Tipo A sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



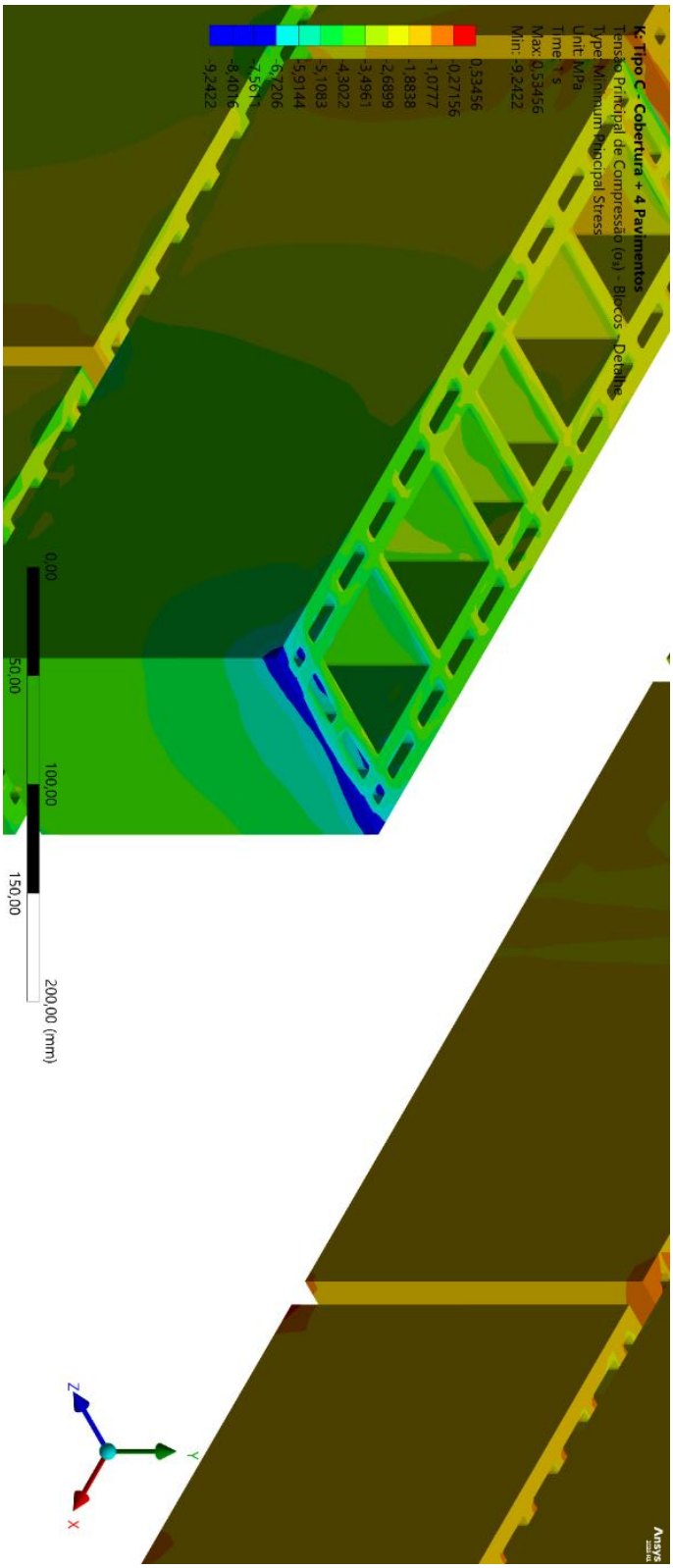
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.25 – Detalhe da região dos blocos cerâmicos com tensões de compressão superiores à resistência de referência no Tipo B sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



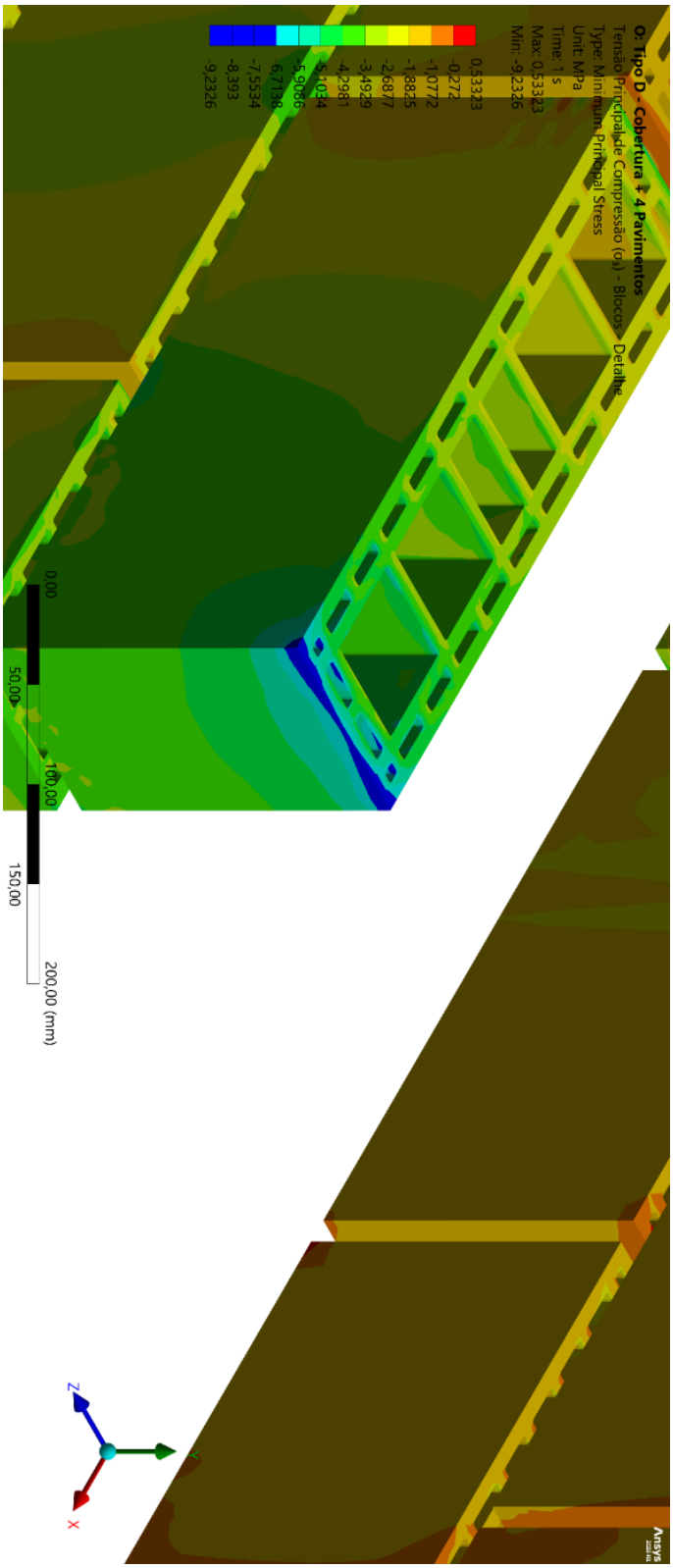
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.26 – Detalhe da região dos blocos cerâmicos com tensões de compressão superiores à resistência de referência no Tipo C sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



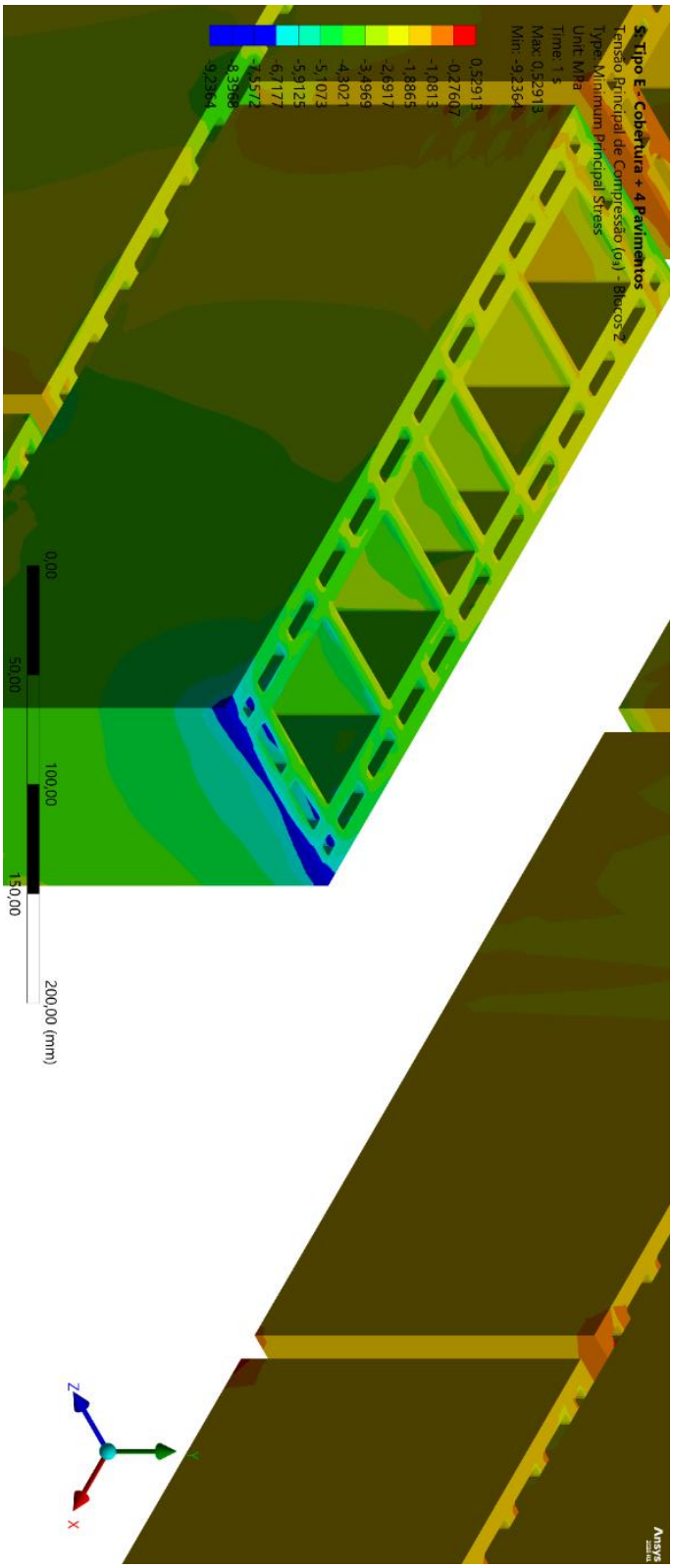
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.27 – Detalhe da região dos blocos cerâmicos com tensões de compressão superiores à resistência de referência no Tipo D sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



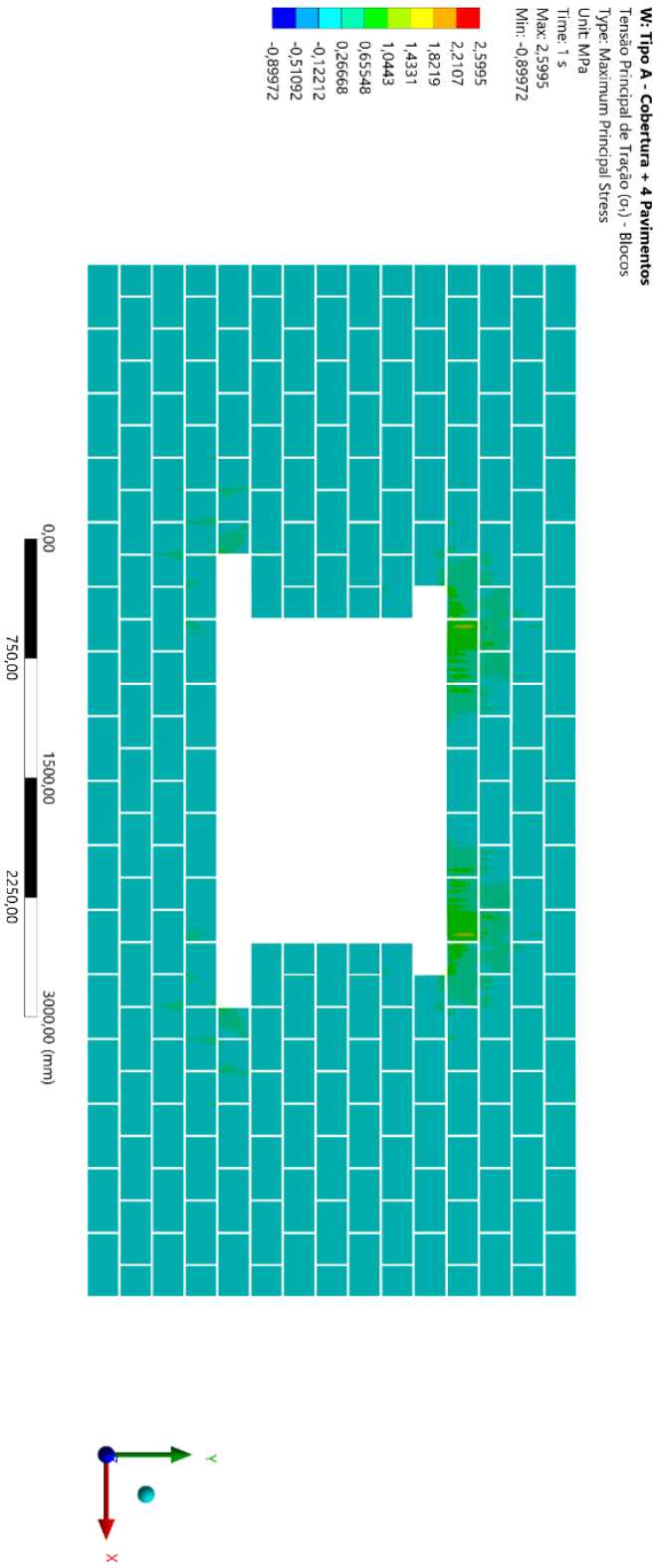
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.28 – Detalhe das regiões dos blocos cerâmicos com tensões de compressão superiores à resistência de referência no Tipo E sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



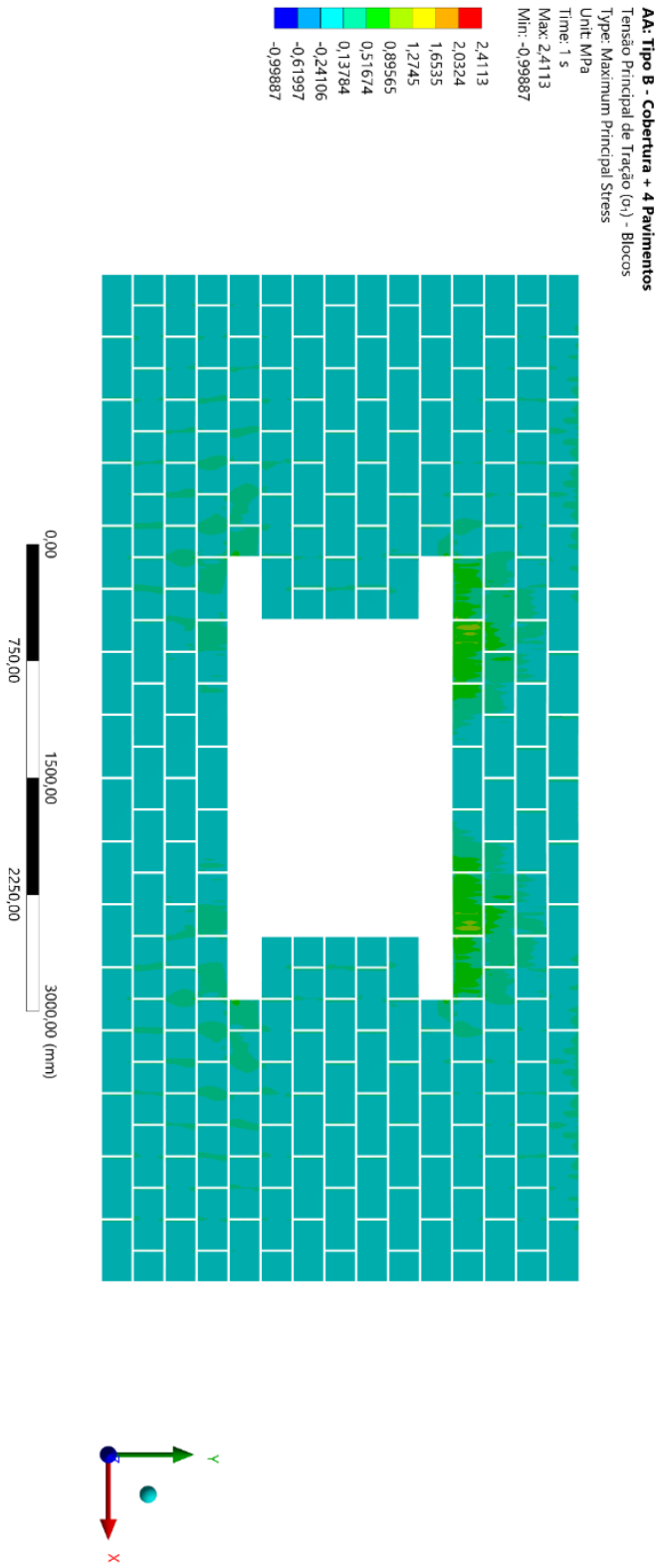
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.29 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) nos blocos cerâmicos do Tipo A sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



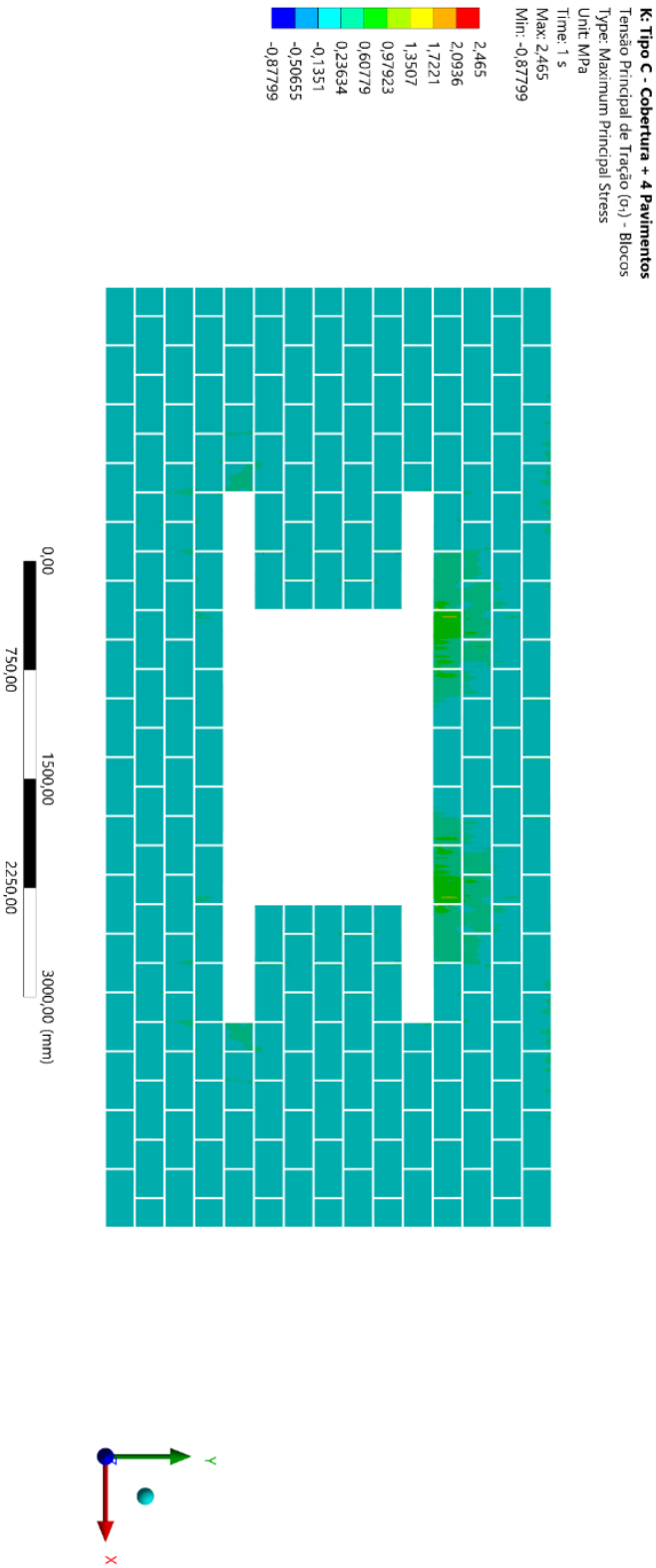
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.30 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) nos blocos cerâmicos do Tipo B sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



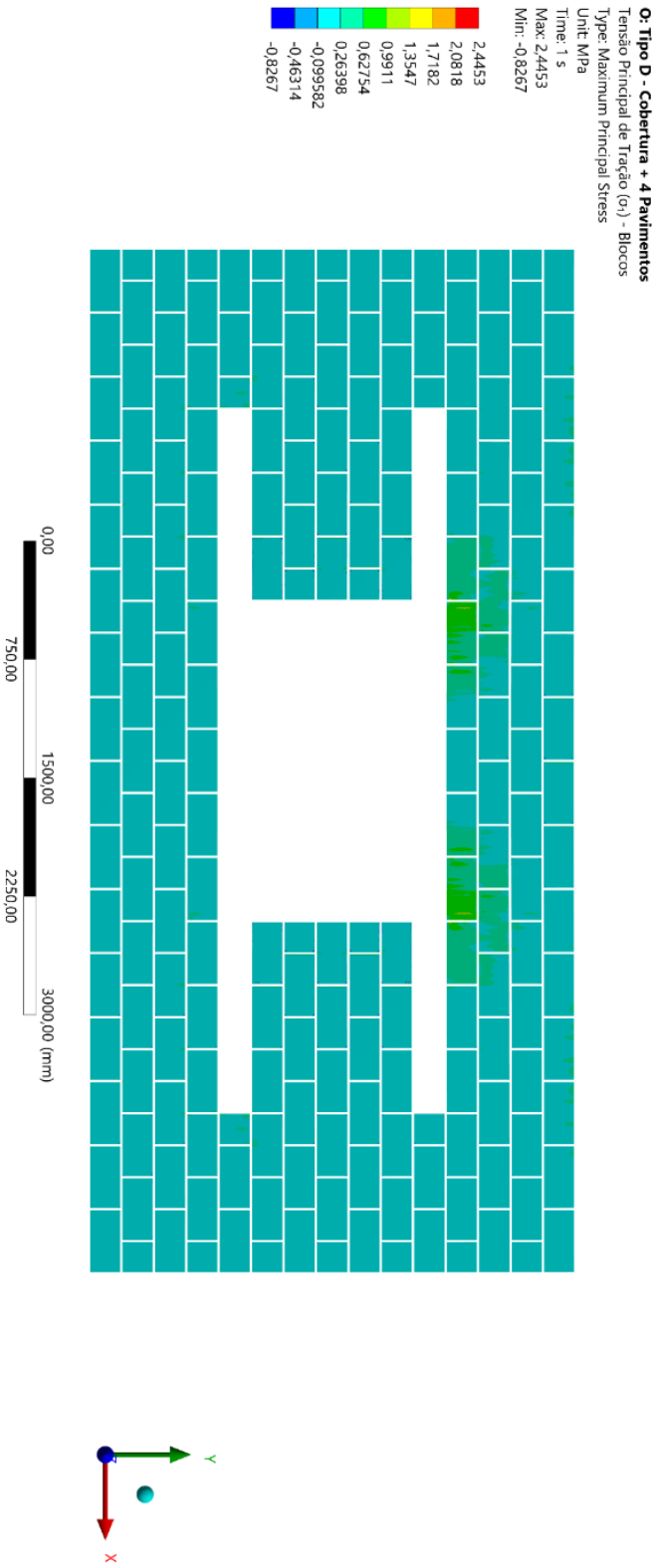
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.31 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) nos blocos cerâmicos do Tipo C sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



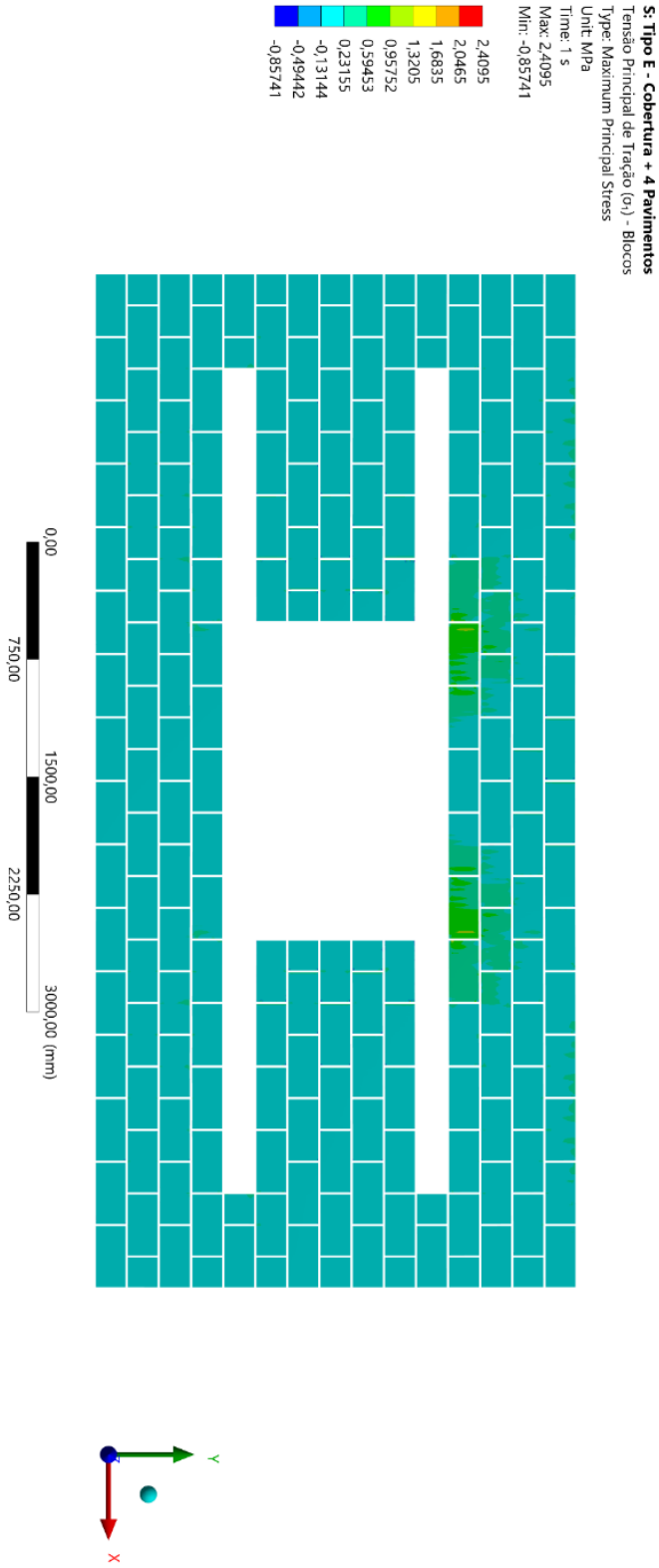
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.32 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) nos blocos cerâmicos do Tipo D sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.33 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) nos blocos cerâmicos do Tipo E sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

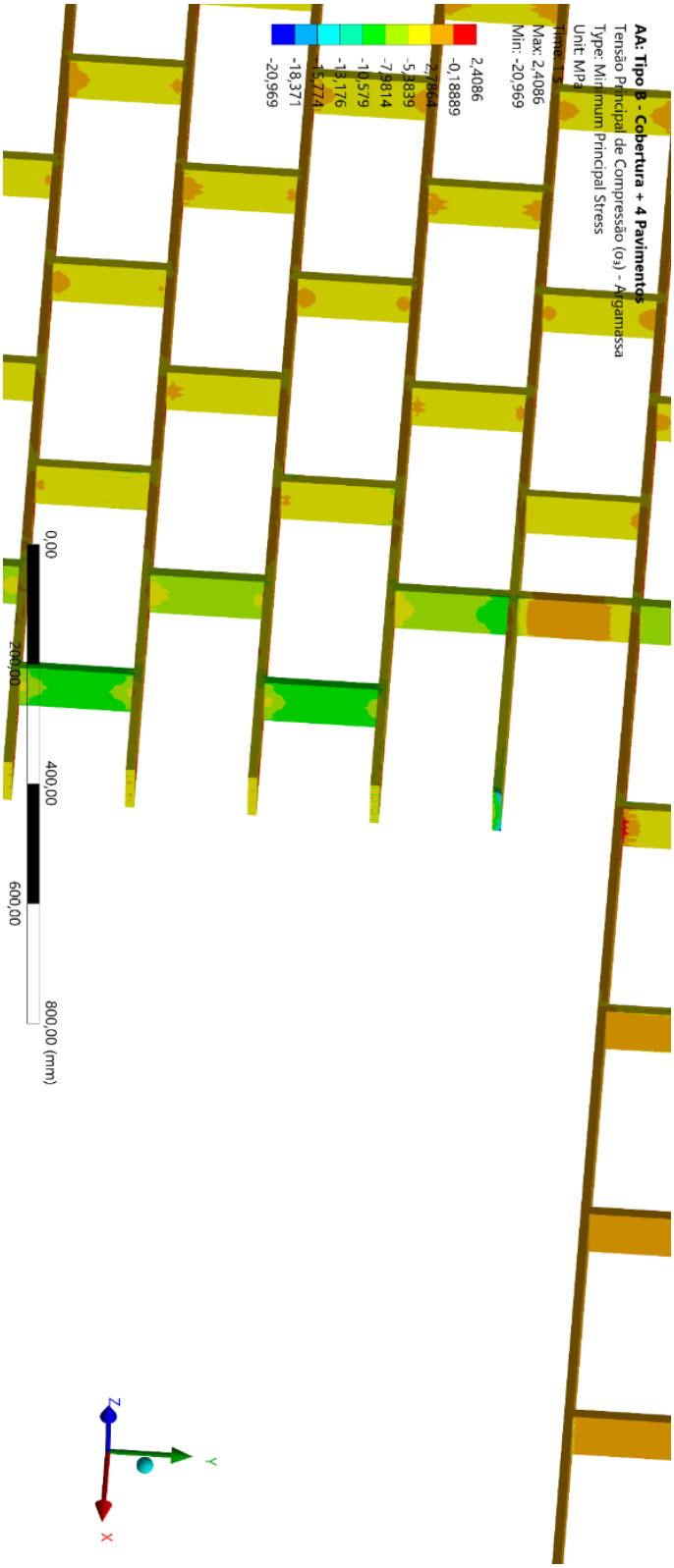
Tensões na argamassa dos painéis com abertura

Figura C.34 – Detalhe das tensões principais de compressão (σ_3) na argamassa do Tipo A sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



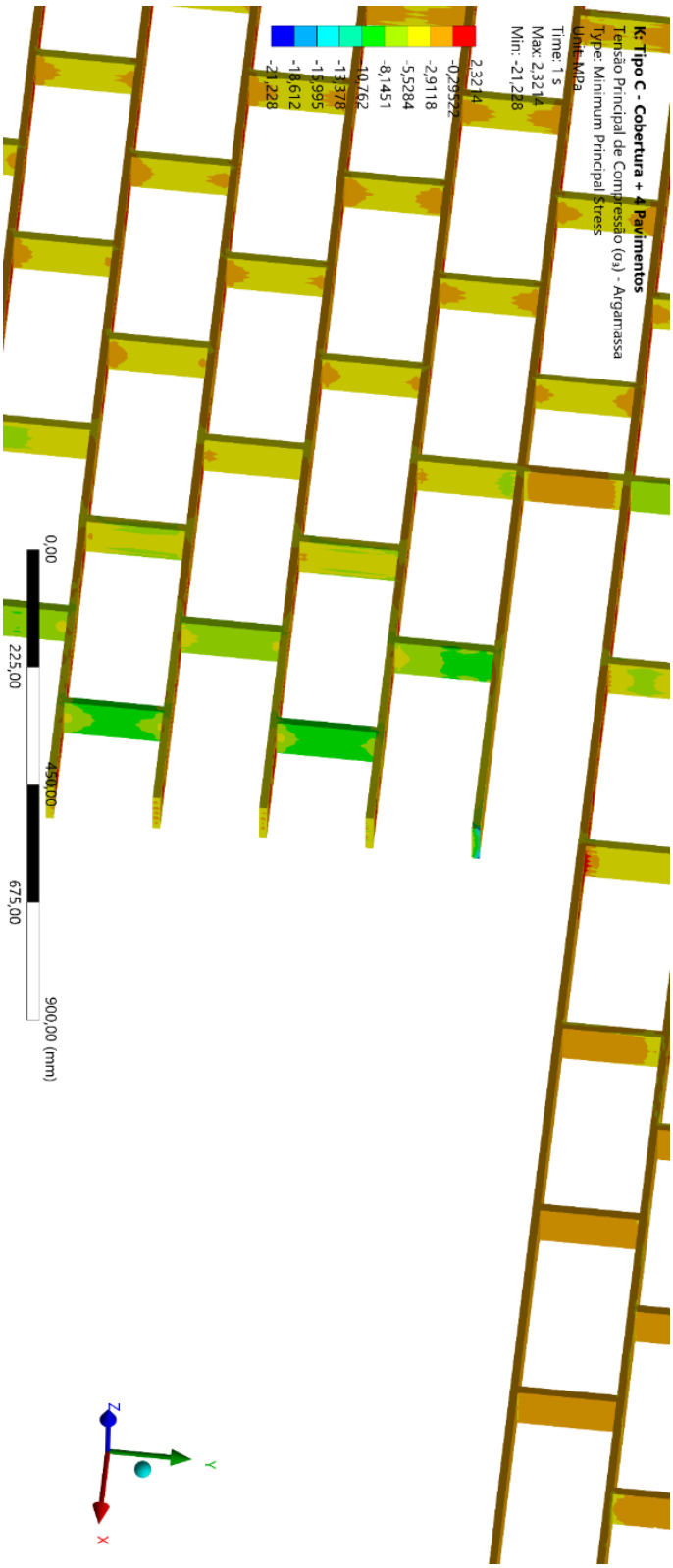
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.35 – Detalhe das tensões principais de compressão (σ_3) na argamassa do Tipo B sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



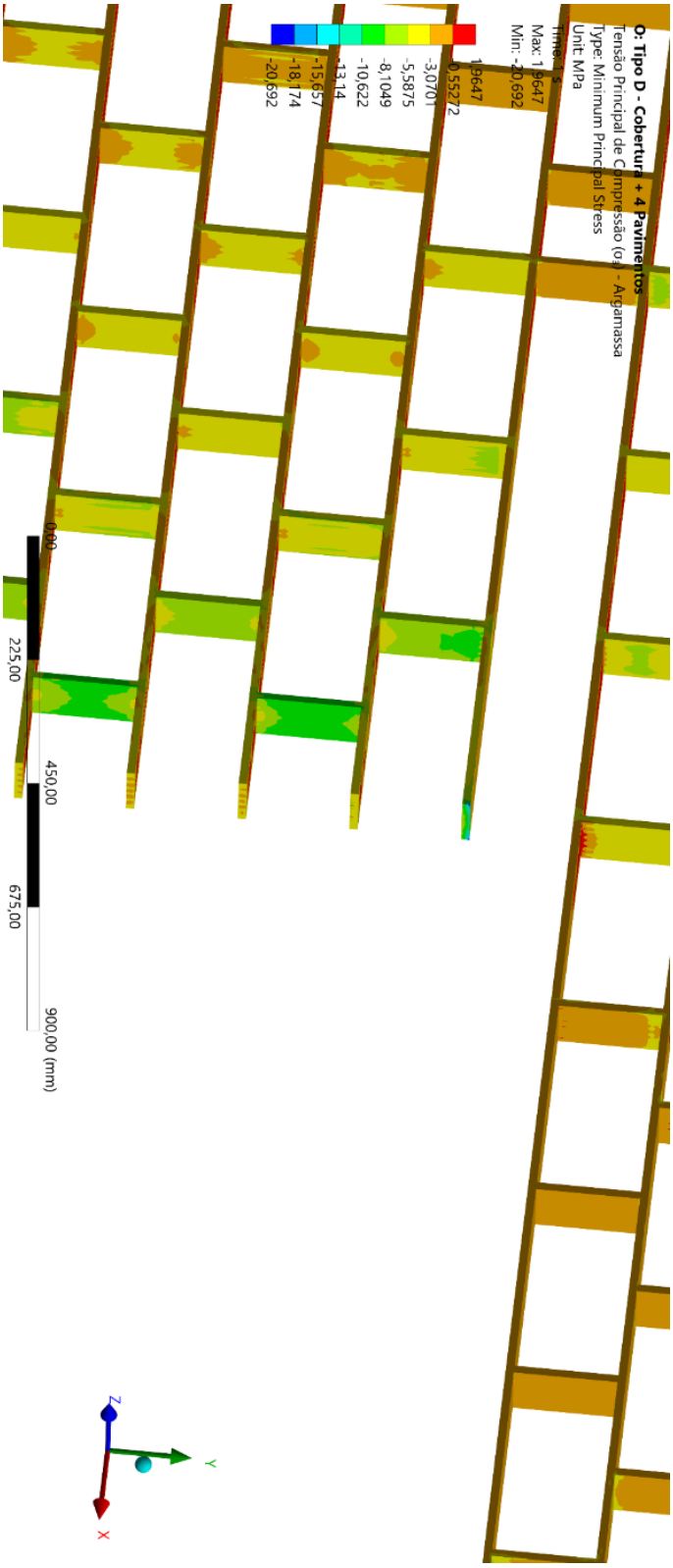
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.36 – Detalhe das tensões principais de compressão (σ_3) na argamassa do Tipo C sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



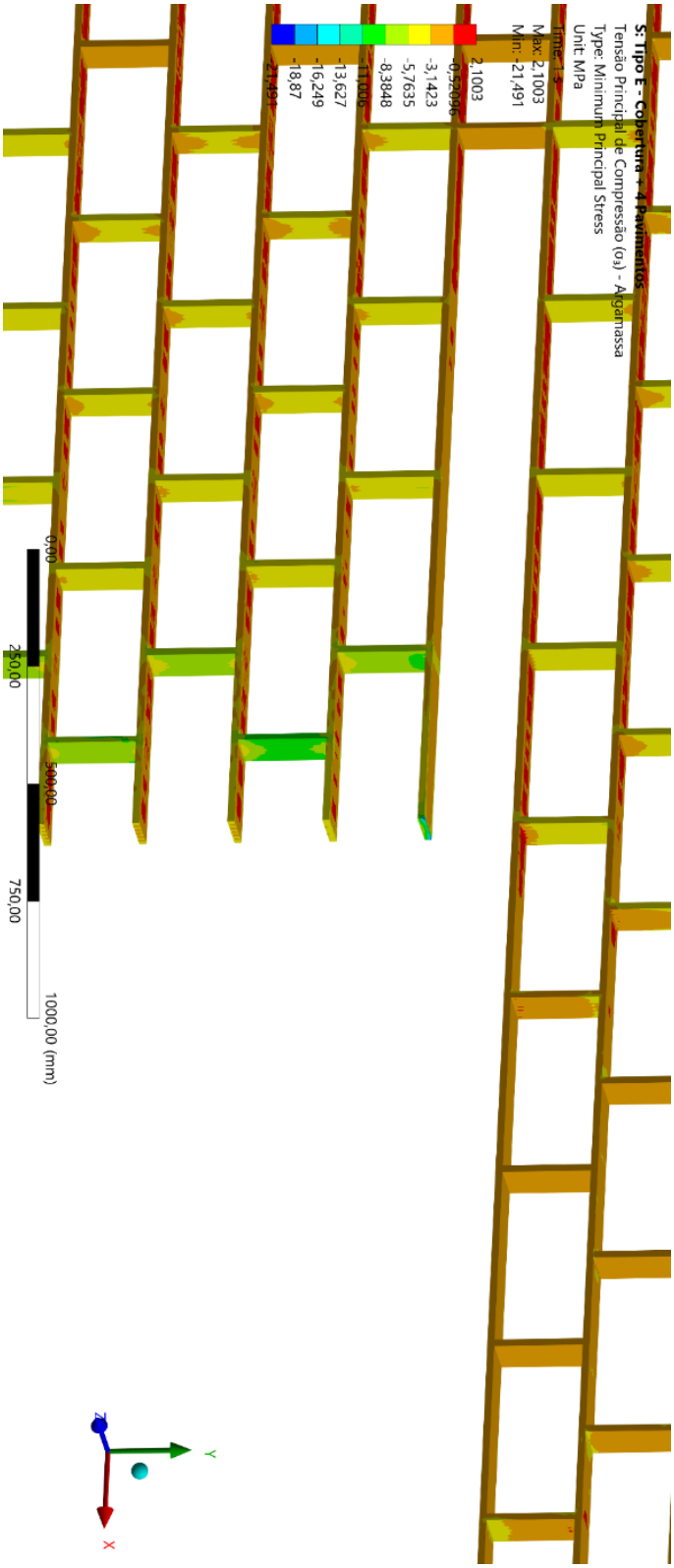
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.37 – Detalhe das tensões principais de compressão (σ_3) na argamassa do Tipo D sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



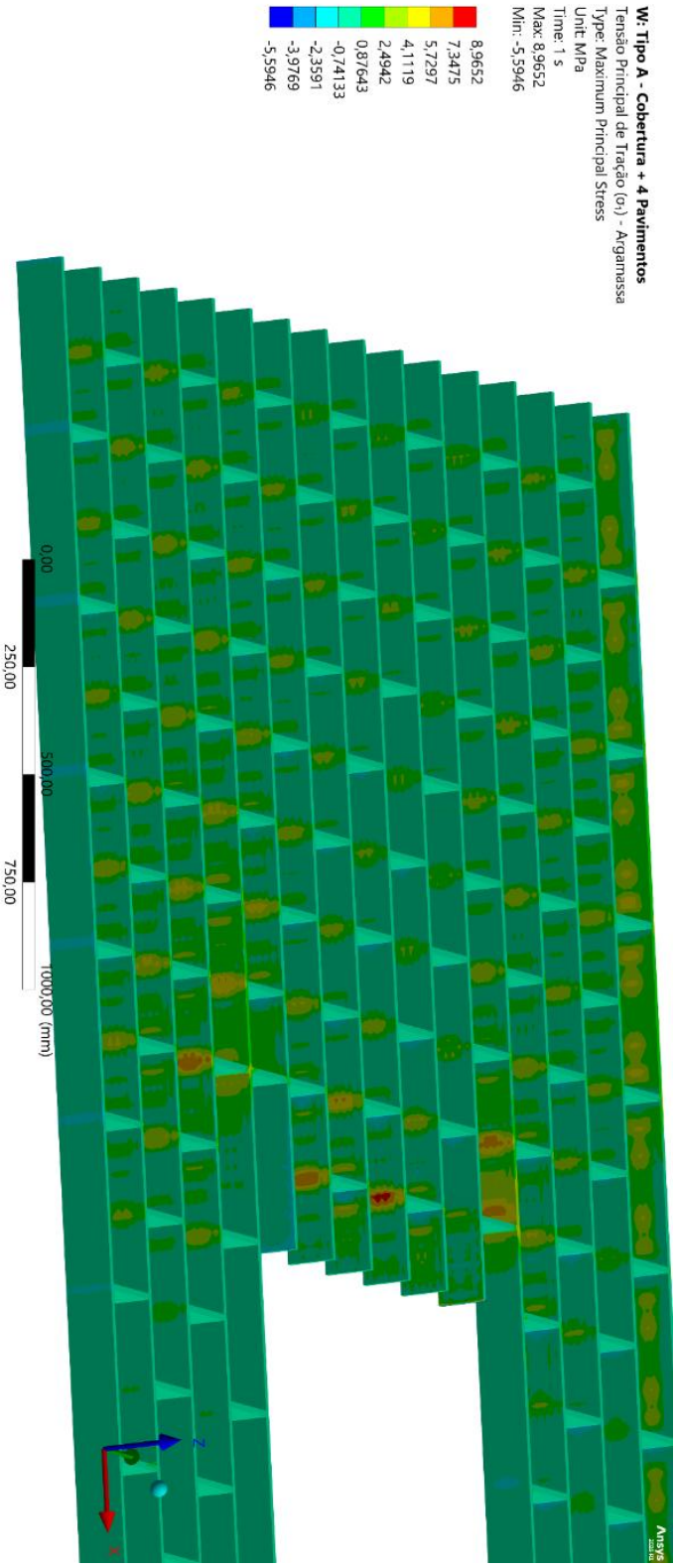
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.38 – Detalhe das tensões principais de compressão (σ_3) na argamassa do Tipo E sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



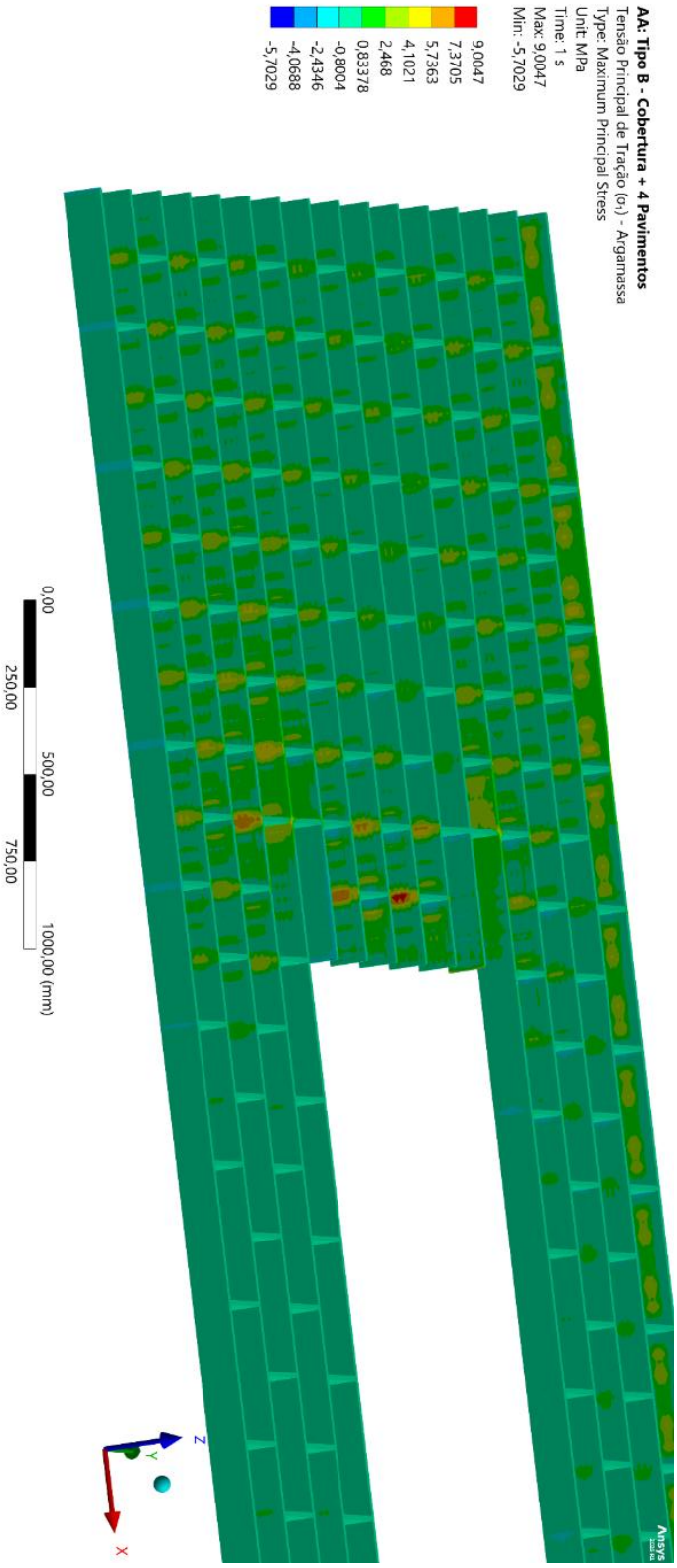
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.39 – Detalhe das tensões principais de tração (σ_1) na argamassa do Tipo A sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



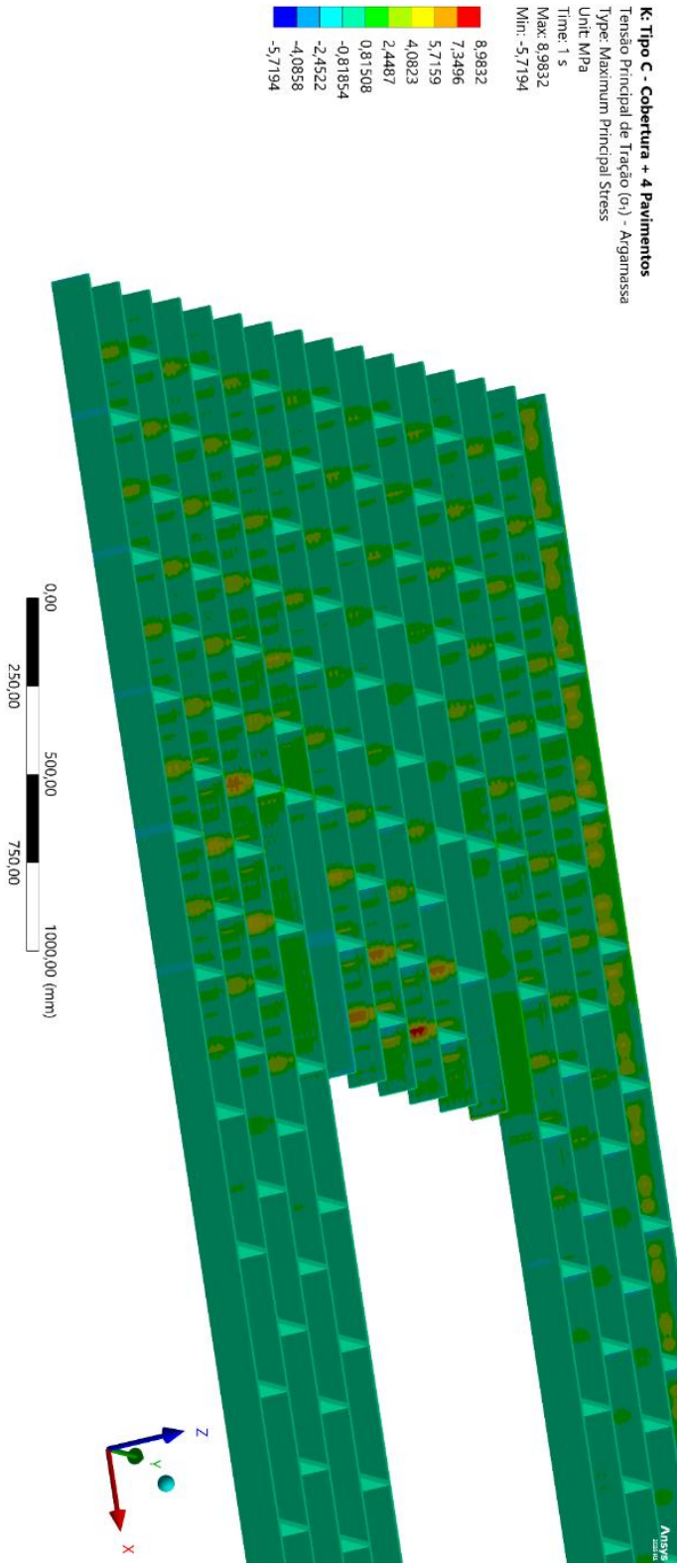
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.40 – Detalhe das tensões principais de tração (σ_1) na argamassa do Tipo B sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



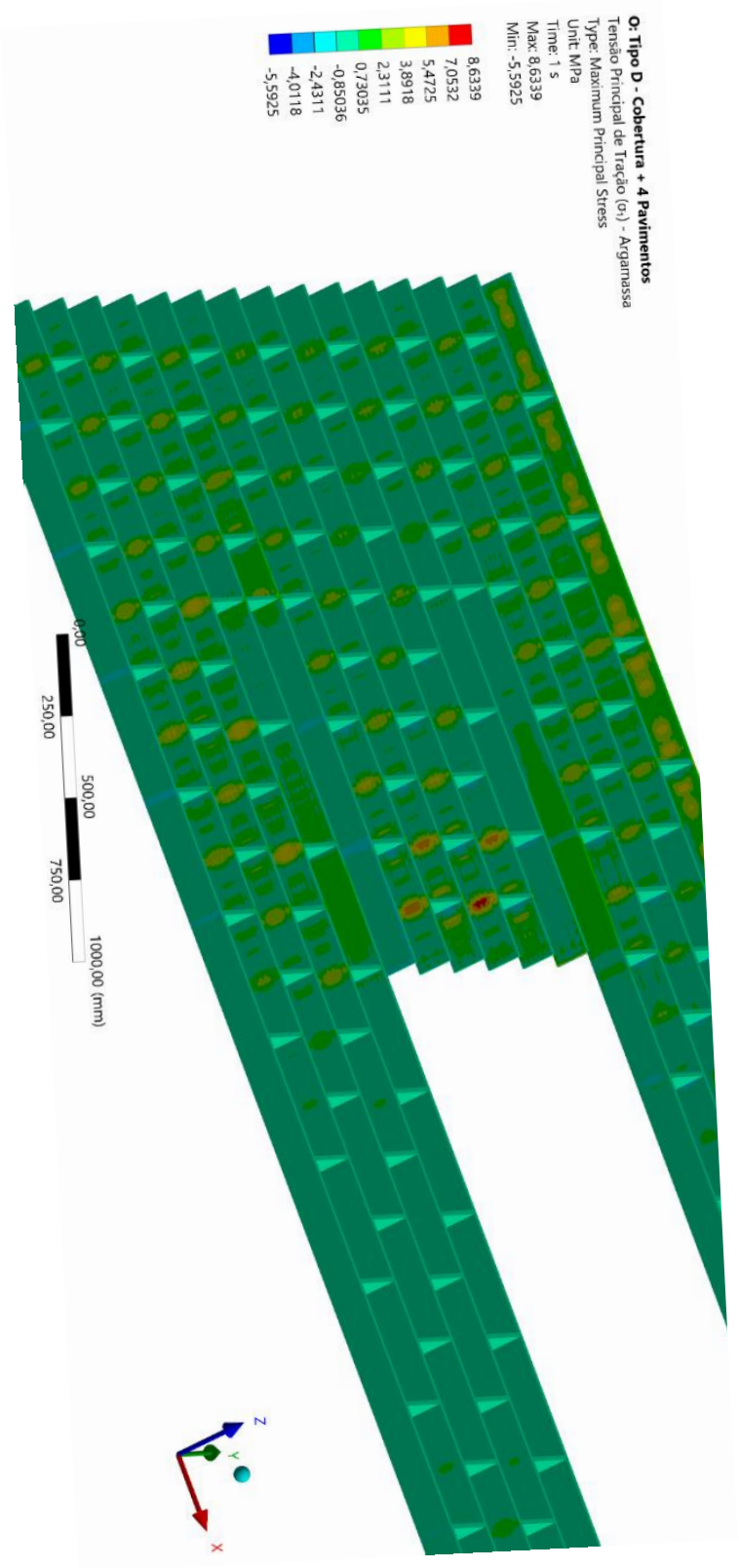
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.41 – Detalhe das tensões principais de tração (σ_1) na argamassa do Tipo C sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



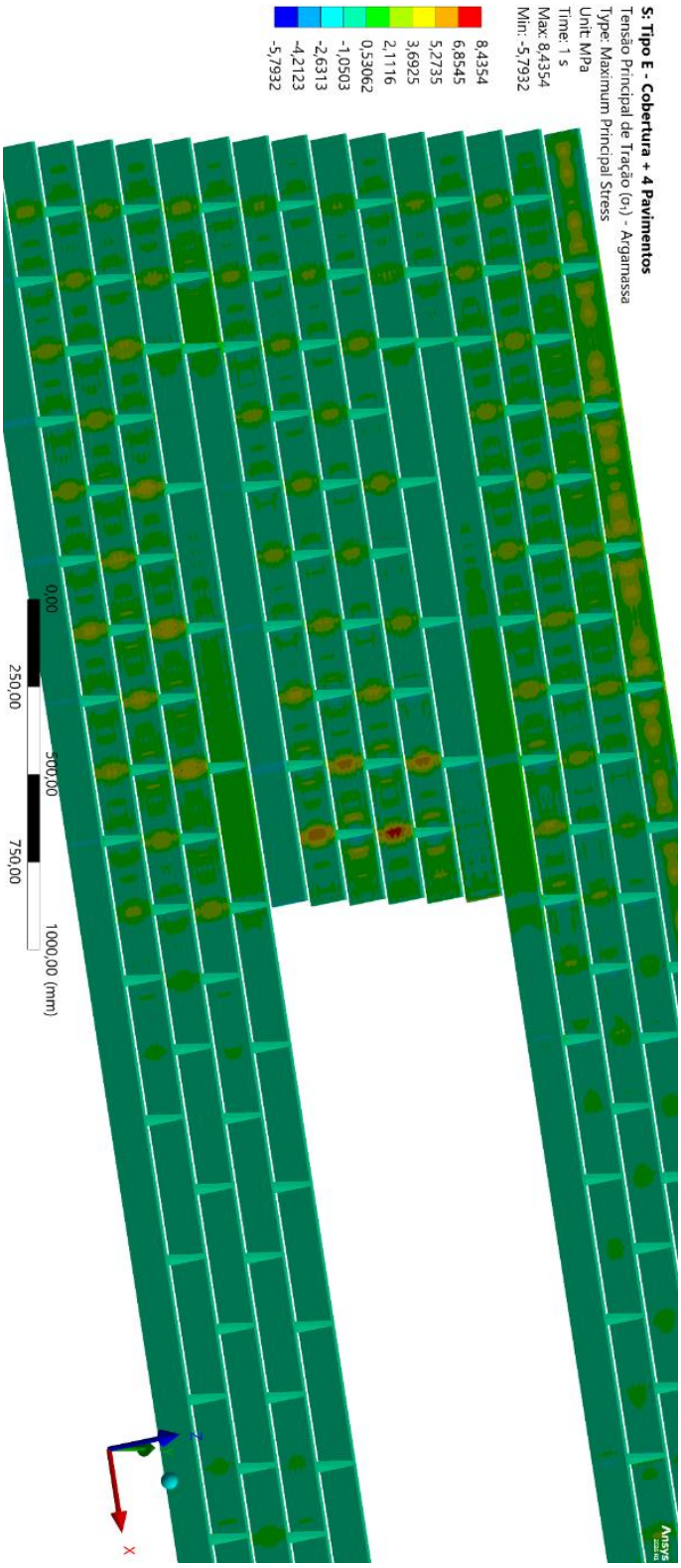
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.42 – Detalhe das tensões principais de tração (σ_1) na argamassa do Tipo D sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

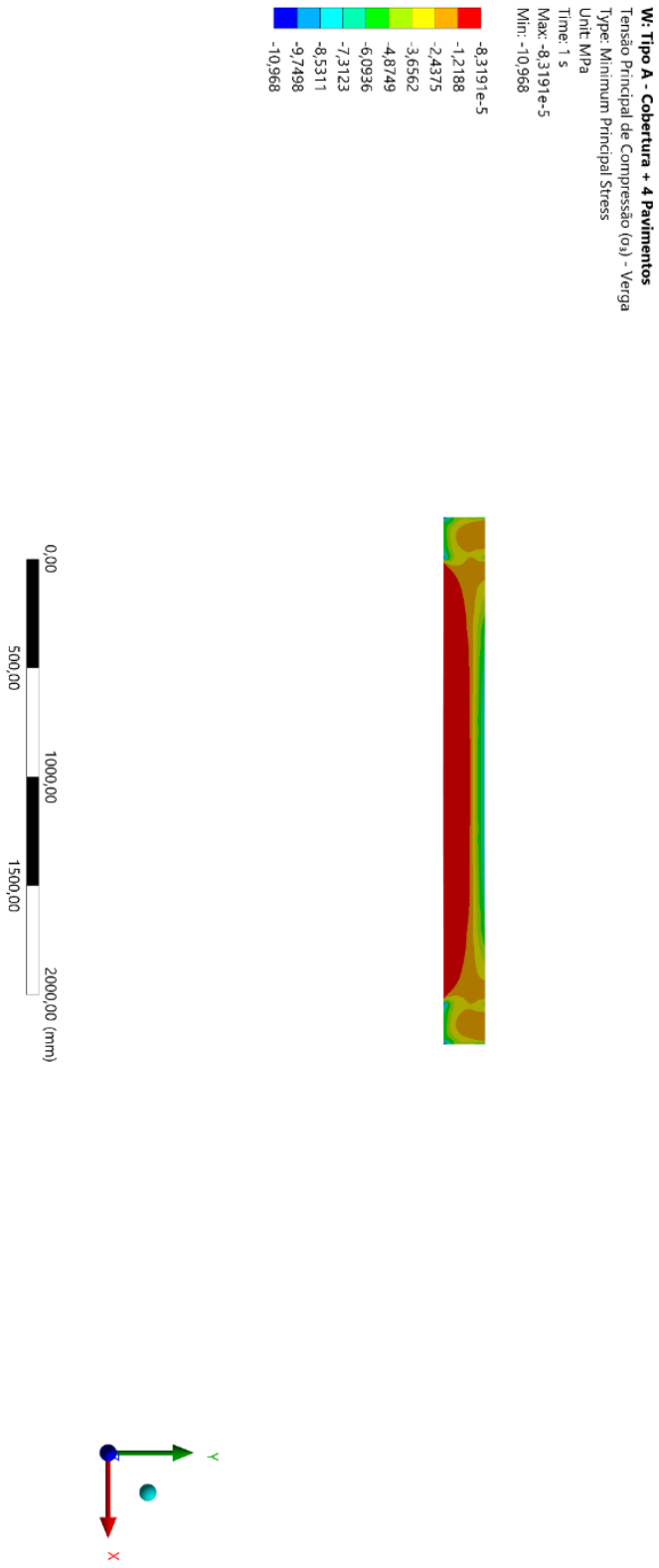
Figura C.43 – Detalhe das tensões principais de tração (σ_1) na argamassa do Tipo E sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

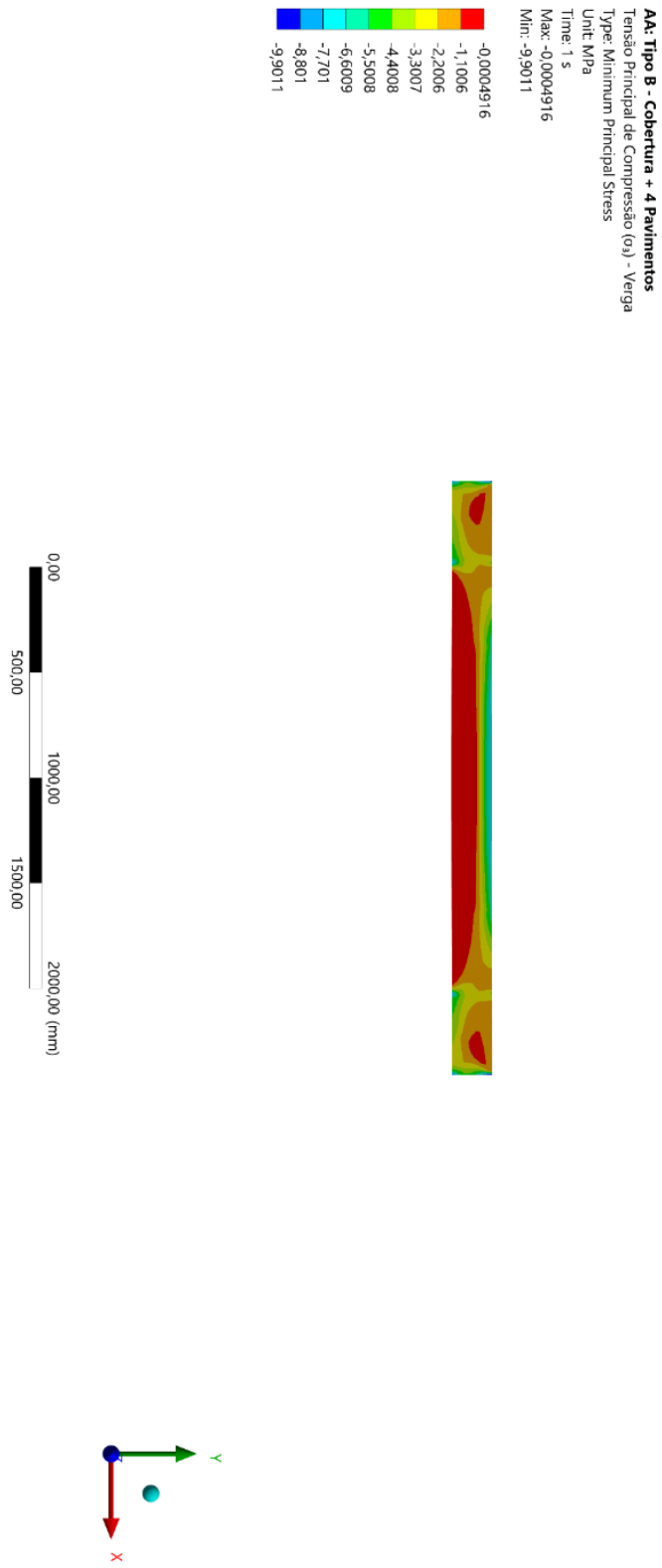
Tensões na verga dos painéis com abertura

Figura C.44 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) na verga do Tipo A sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



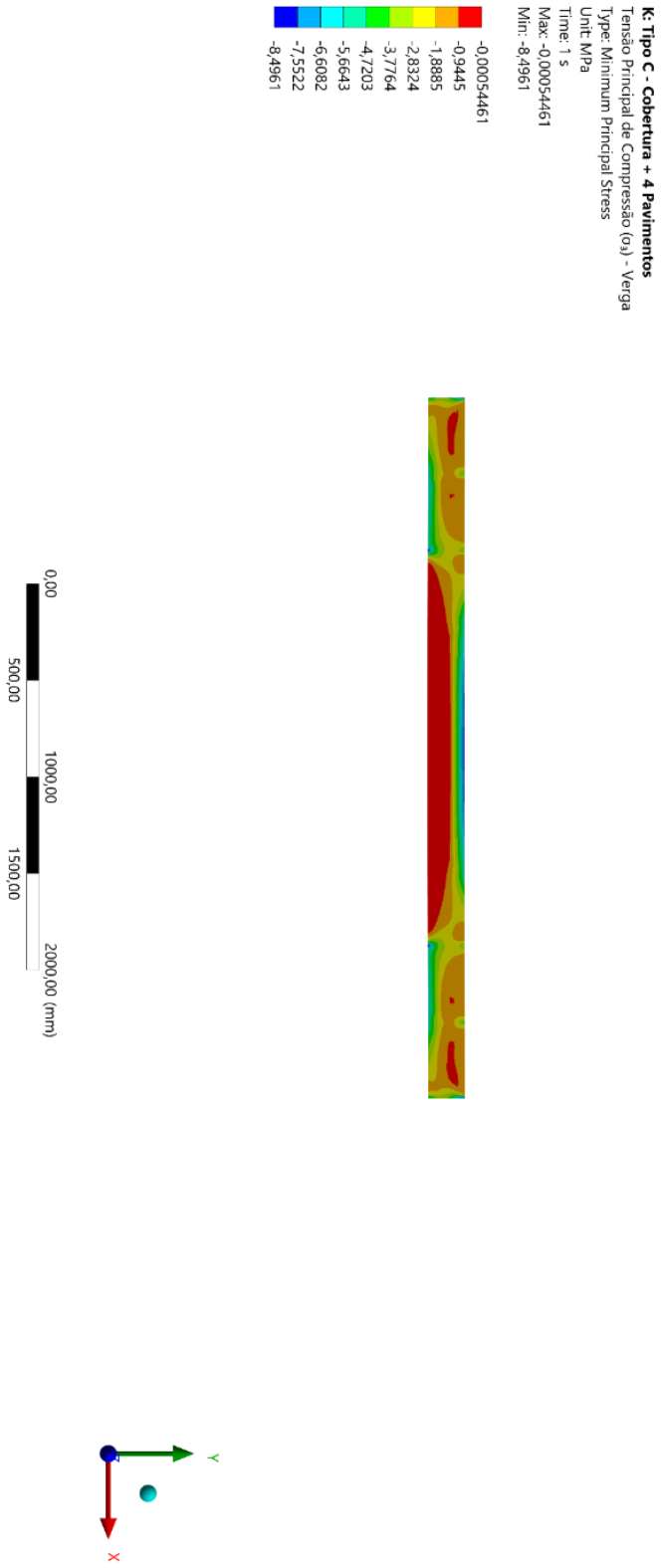
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.45 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) na verga do Tipo B sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



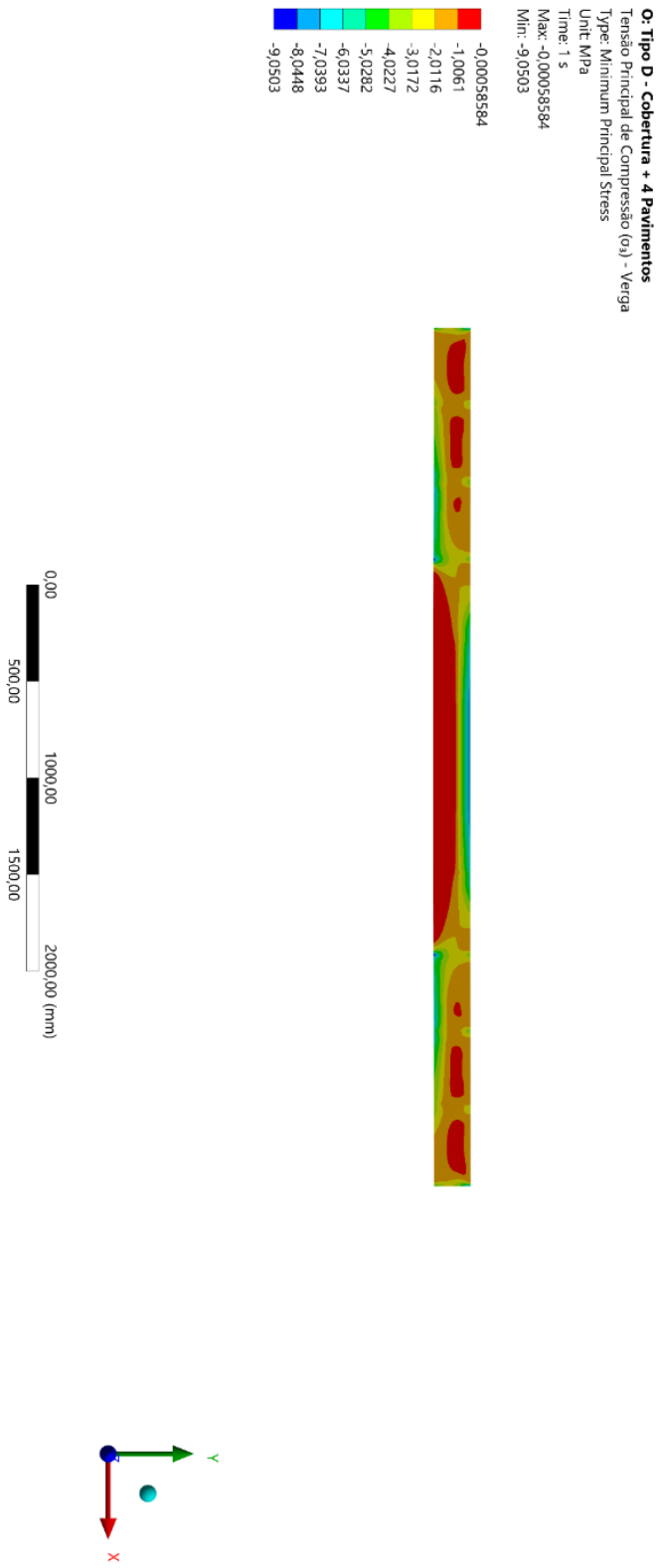
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.46 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) na verga Tipo C sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



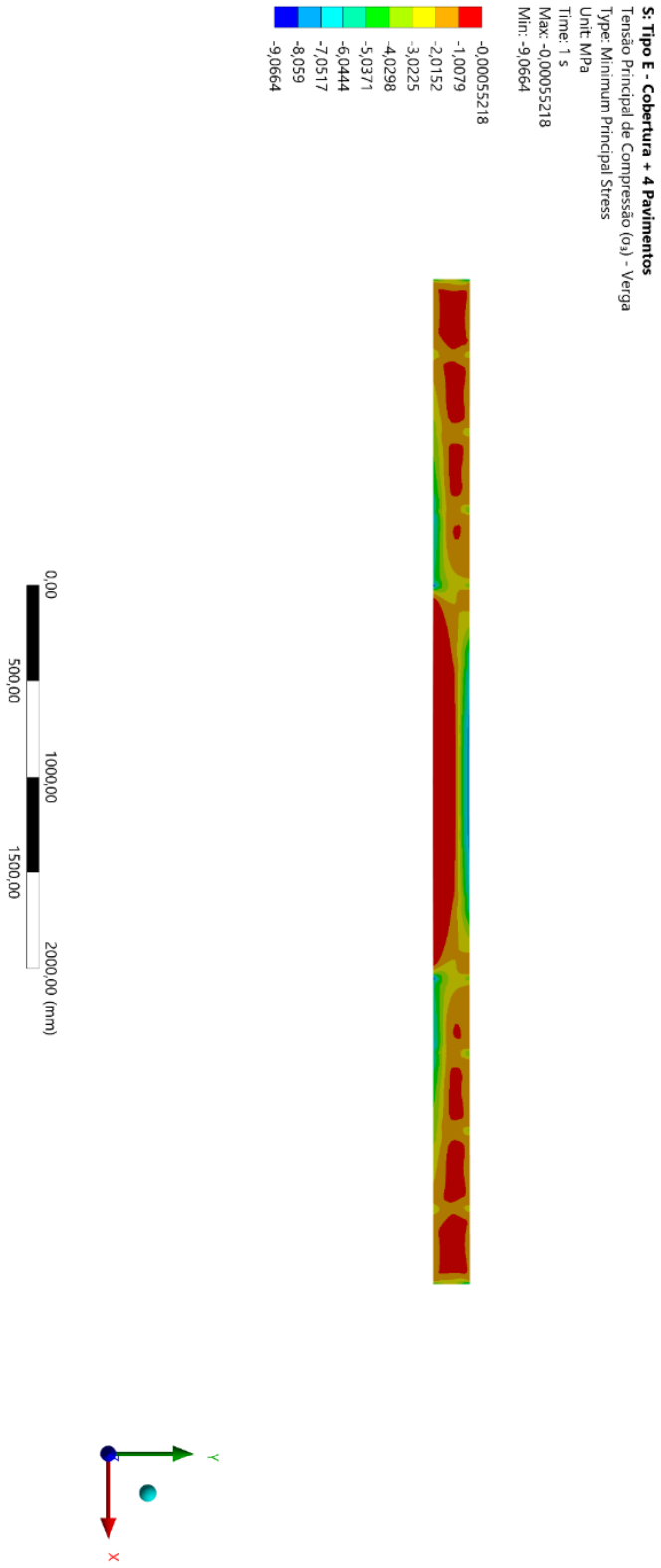
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.47 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) na verga do Tipo D sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



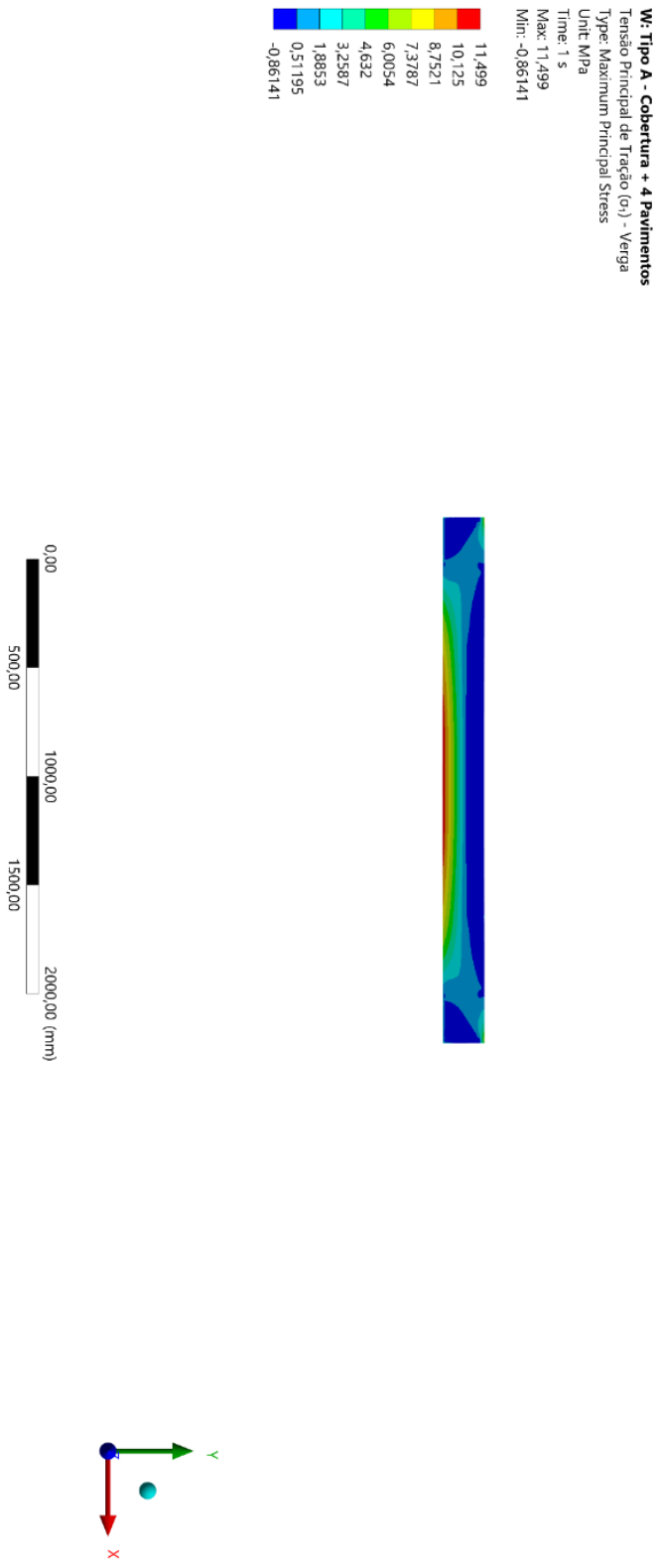
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.48 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) na verga do Tipo E sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



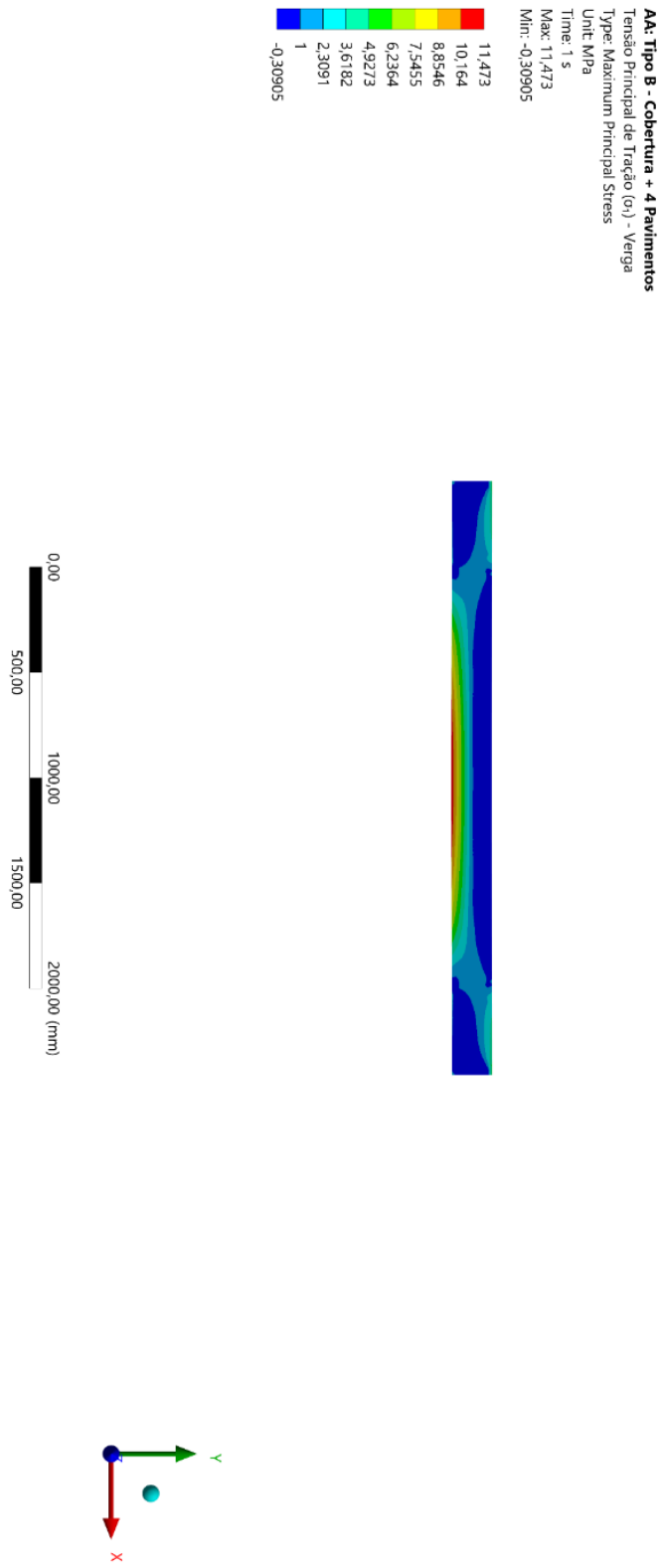
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.49 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) na verga do Tipo A sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



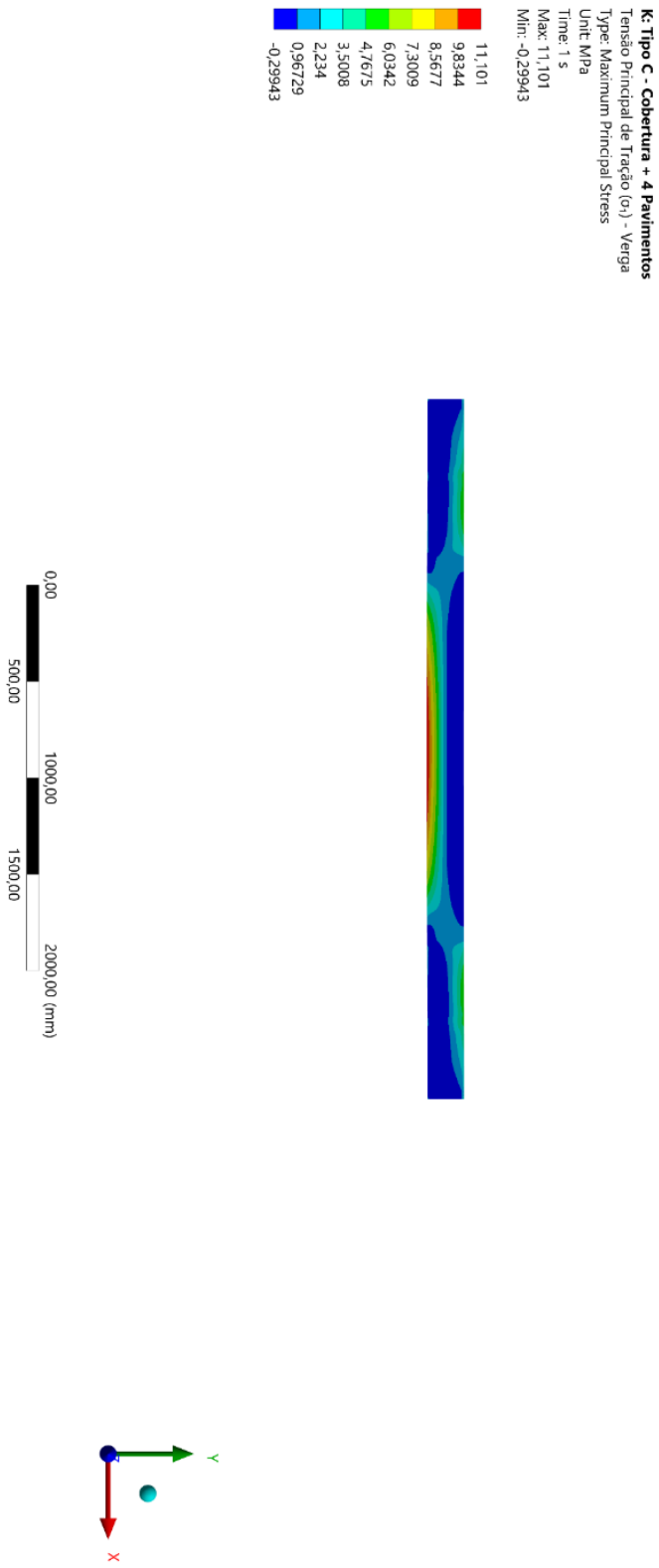
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.50 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) na verga do Tipo B sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



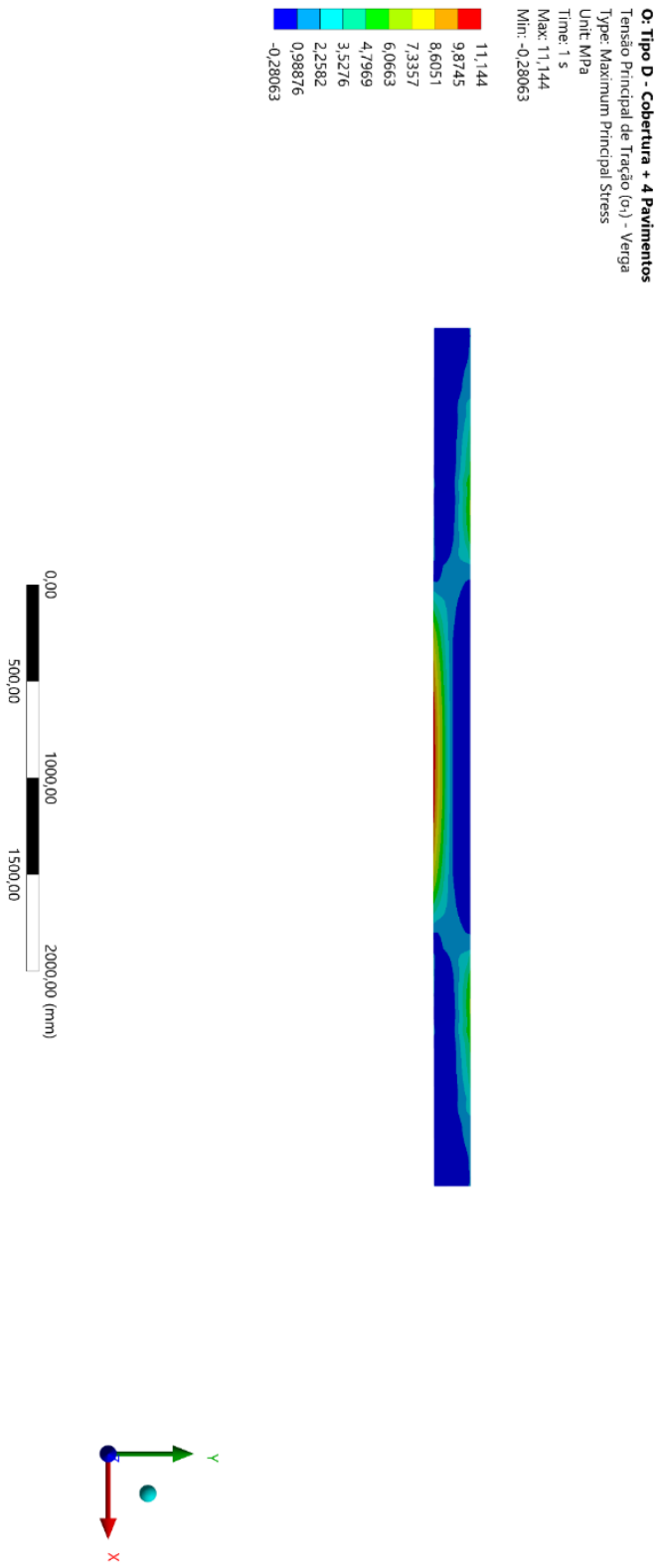
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.51 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) na verga do Tipo C sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



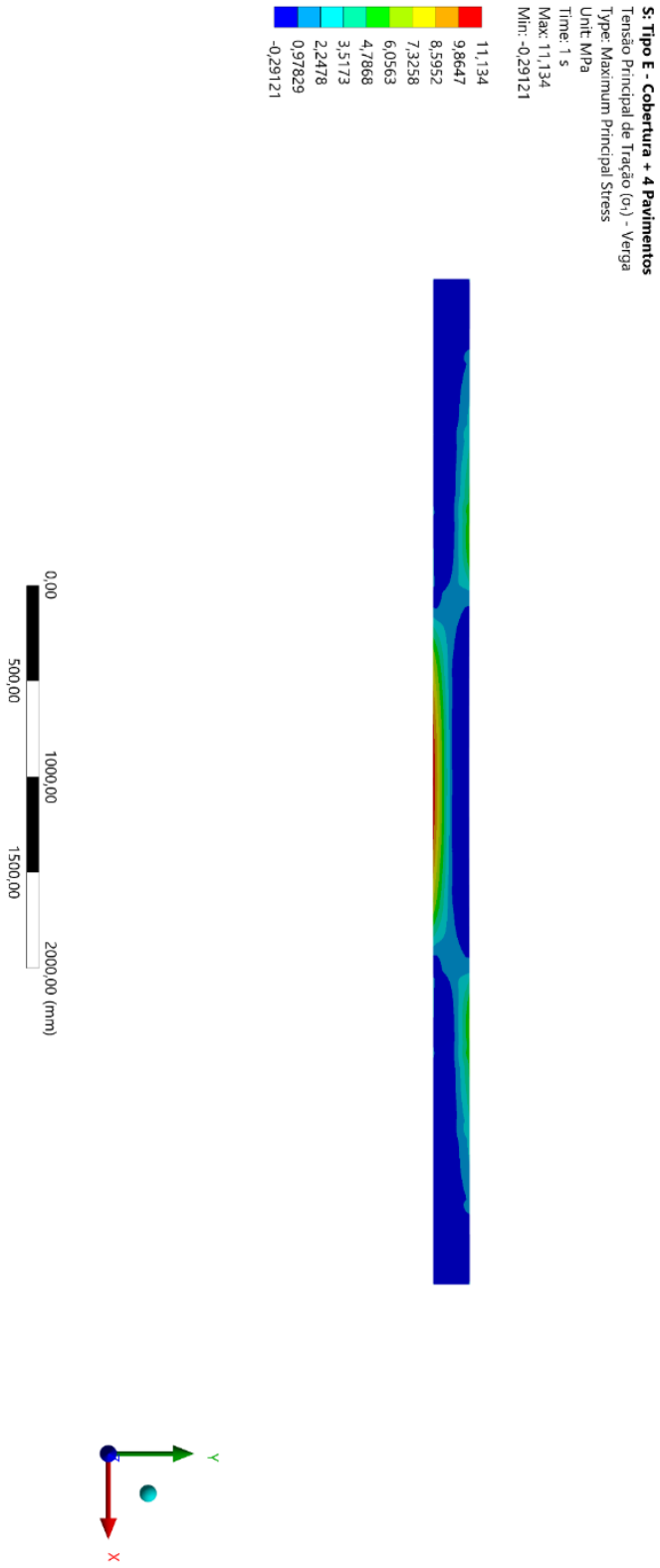
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.52 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) na verga do Tipo D sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

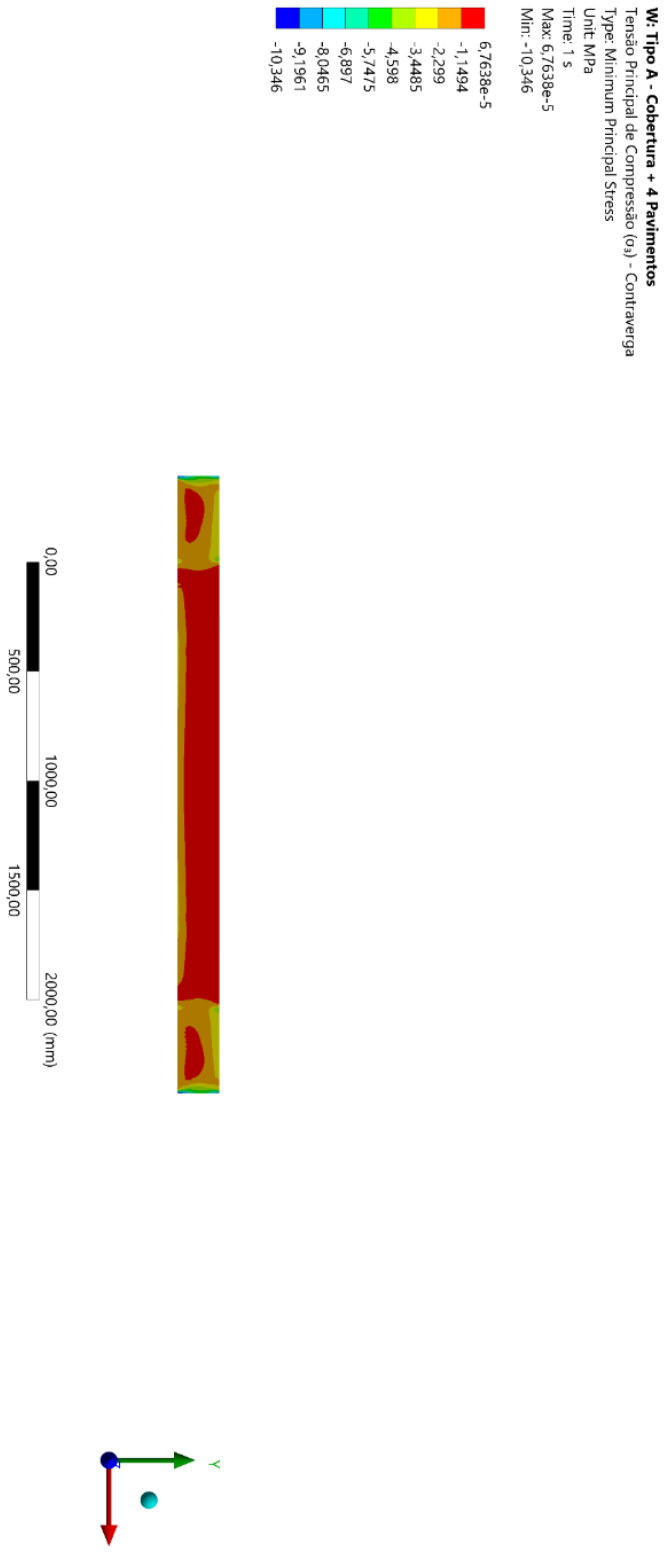
Figura C.53 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) na verga do Tipo E sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

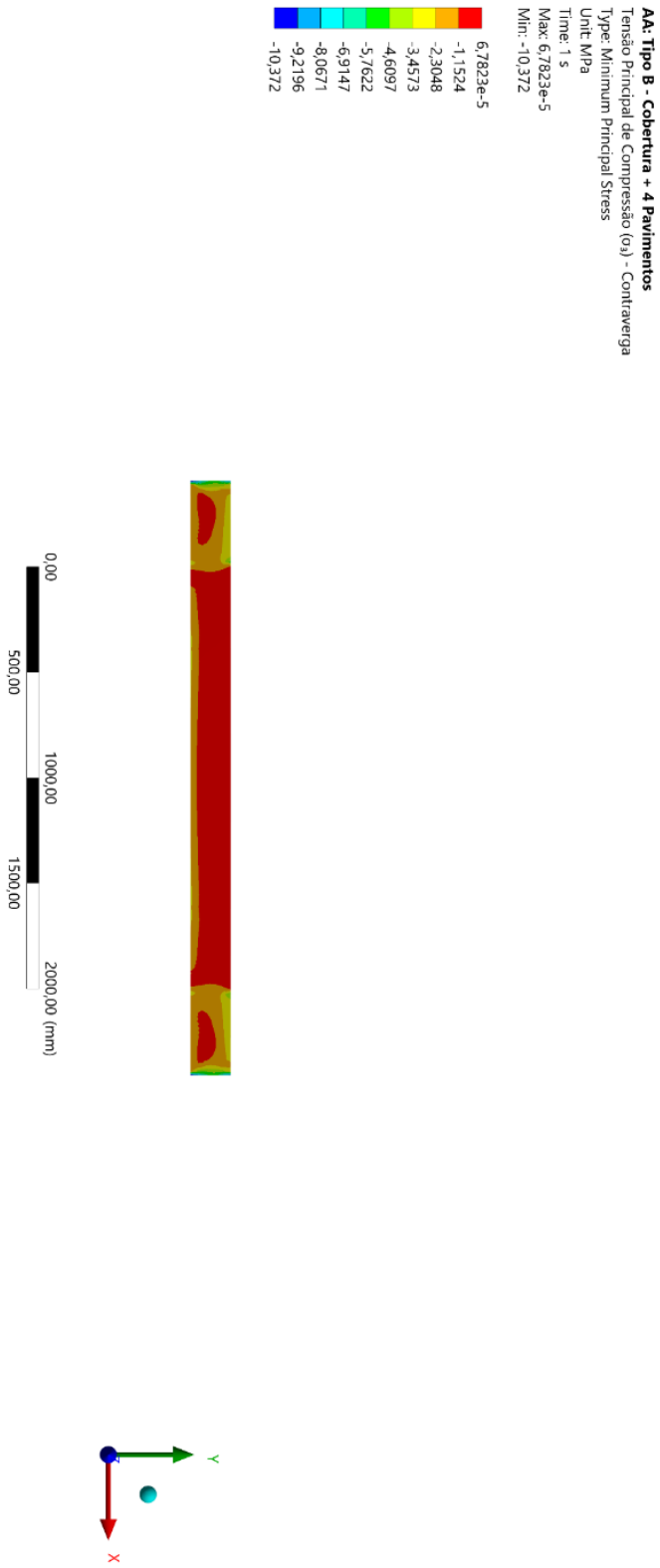
Tensões na contraverga dos painéis com abertura

Figura C.54 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) na contraverga do Tipo A sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



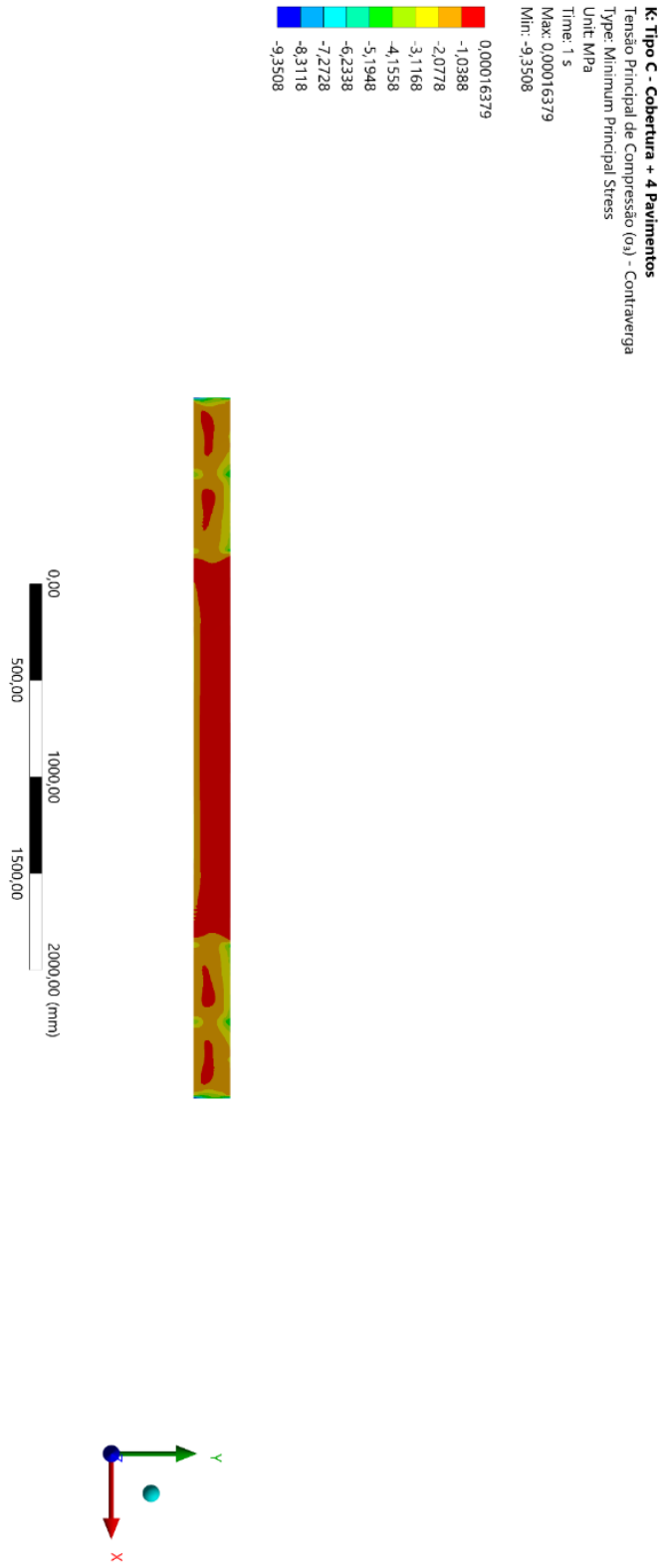
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.55 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) na contraverga do Tipo B sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



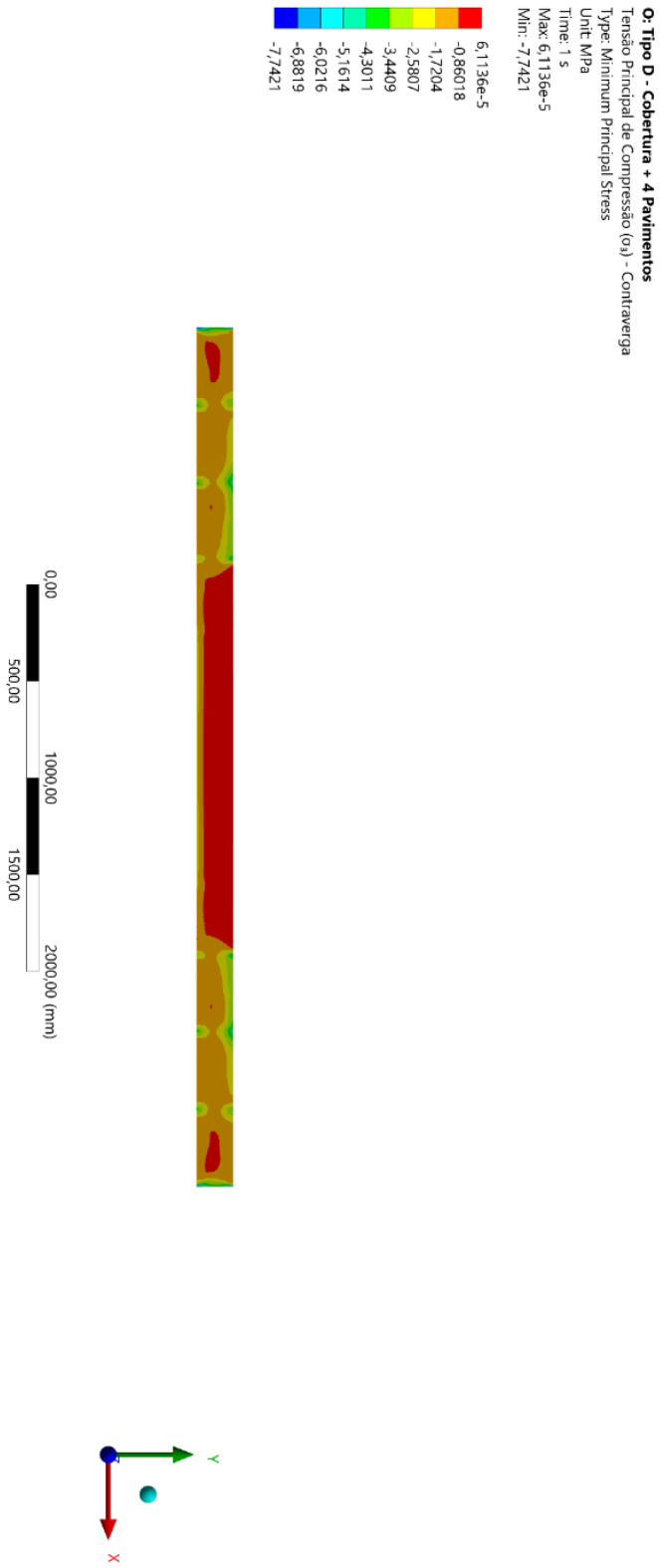
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.56 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) na contraverga Tipo C sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



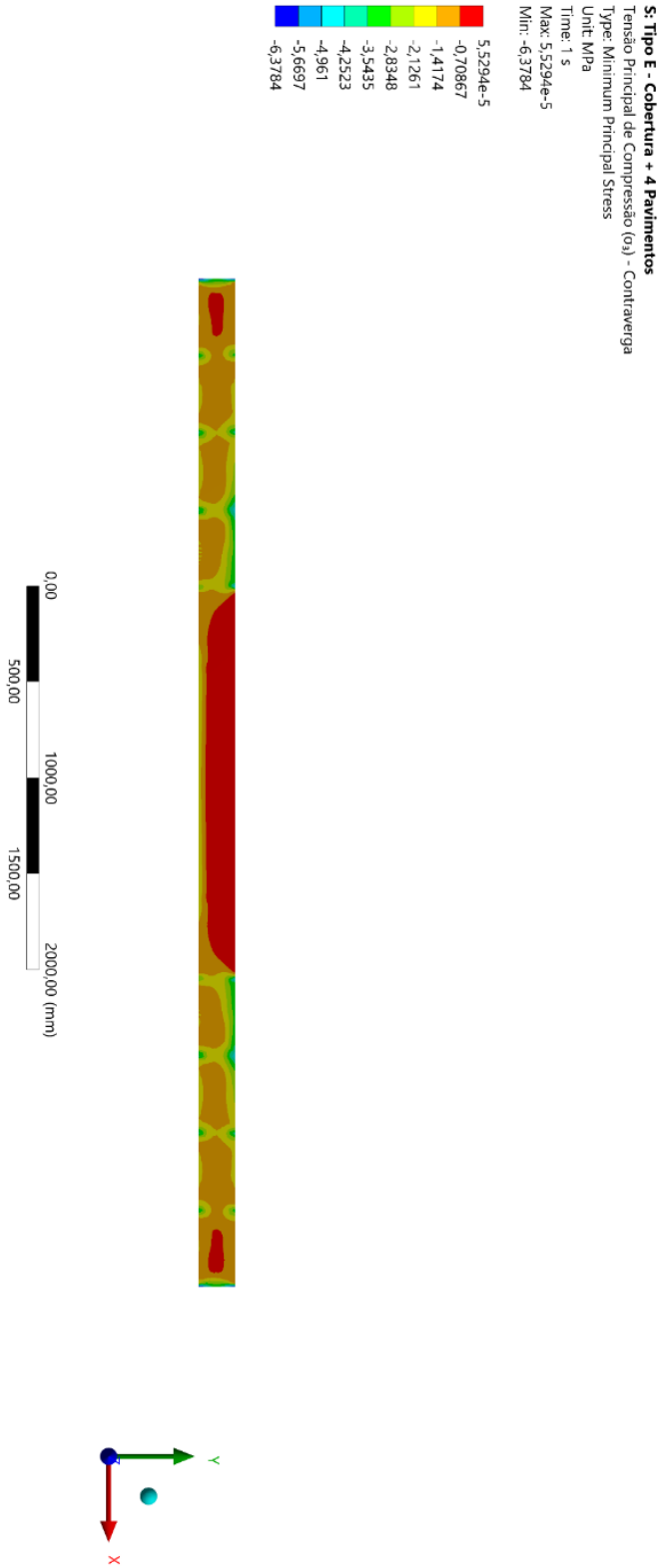
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.57 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) na contraverga do Tipo D sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



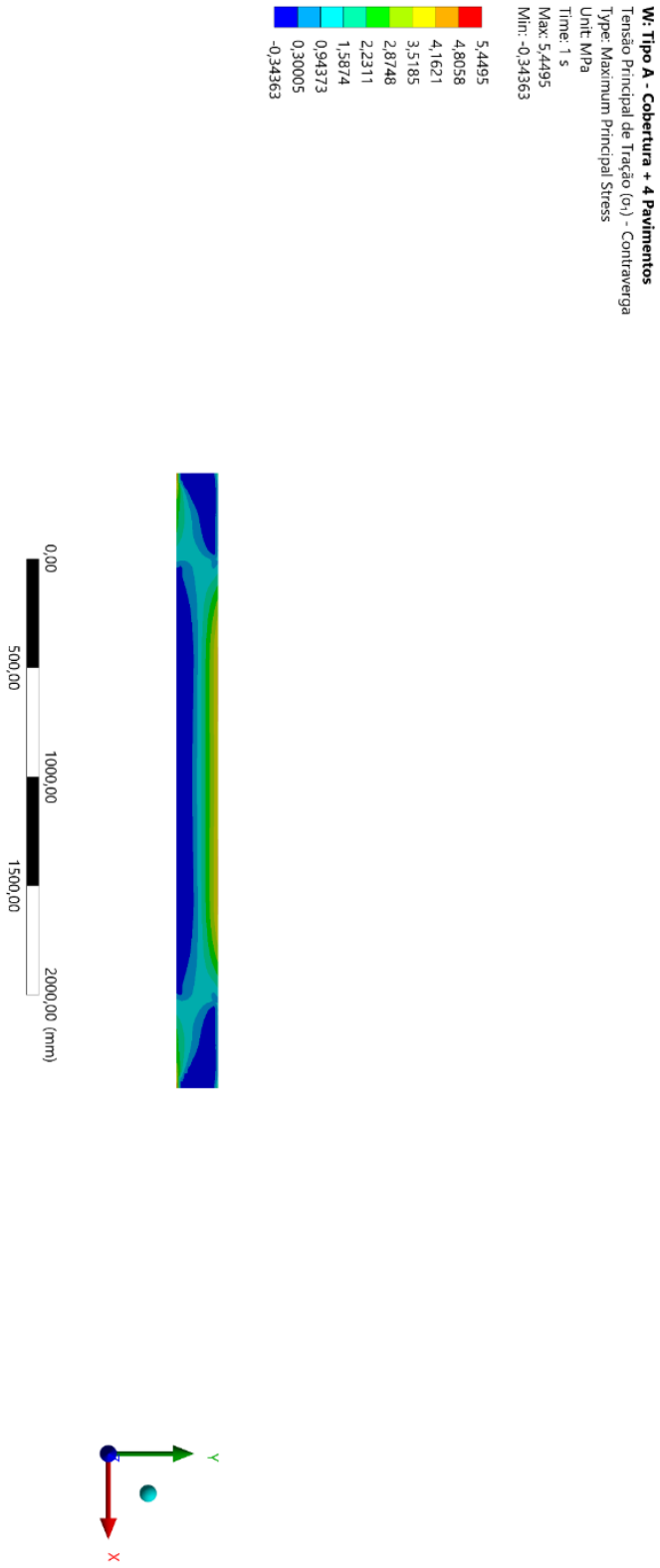
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.58 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) na contraverga do Tipo E sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



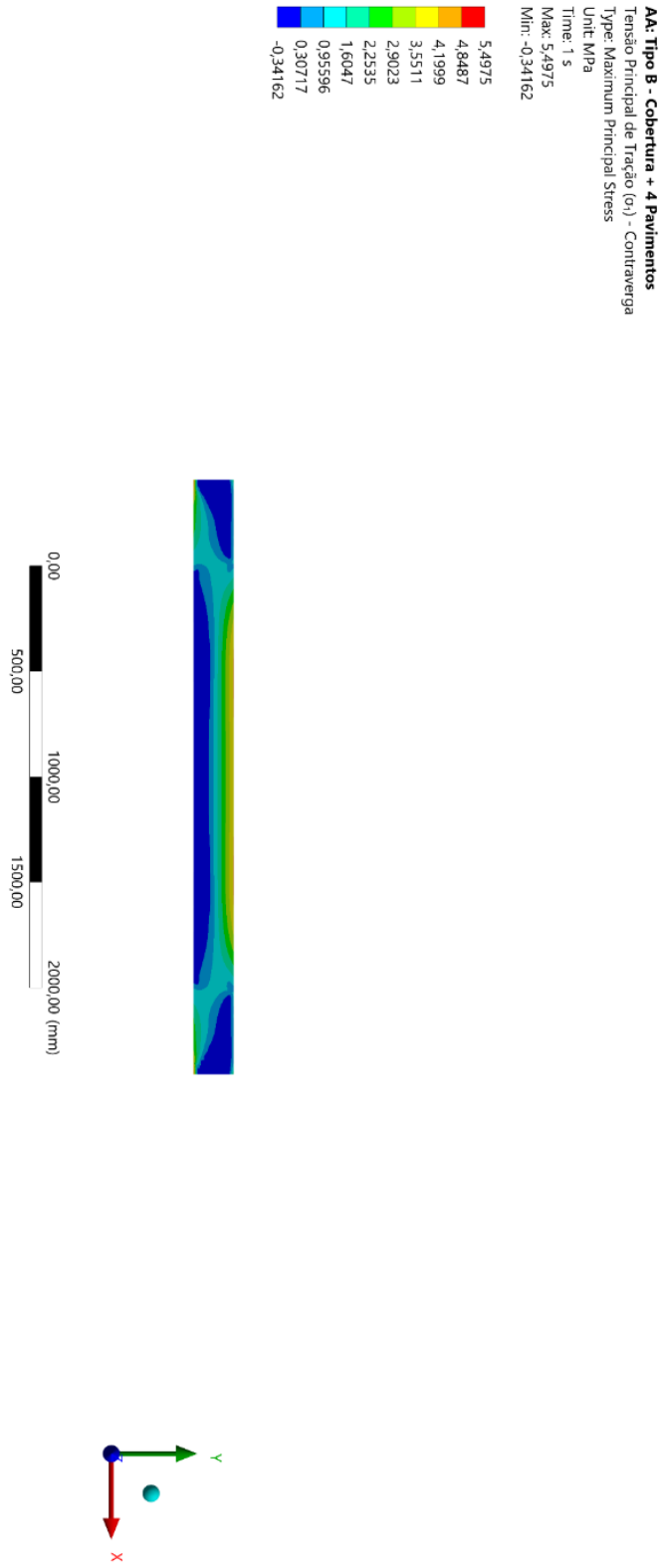
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.59 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) na contraverga do Tipo A sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



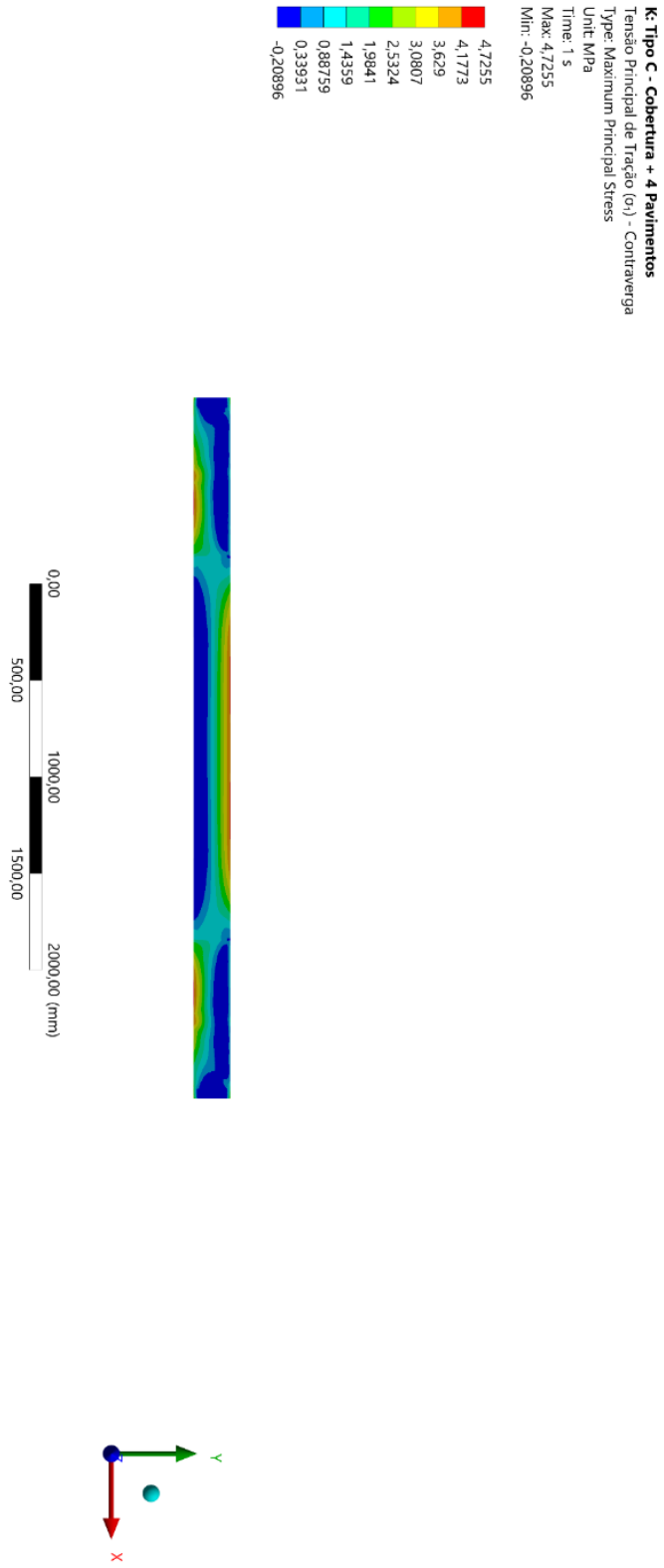
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.60 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) na contraverga do Tipo B sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



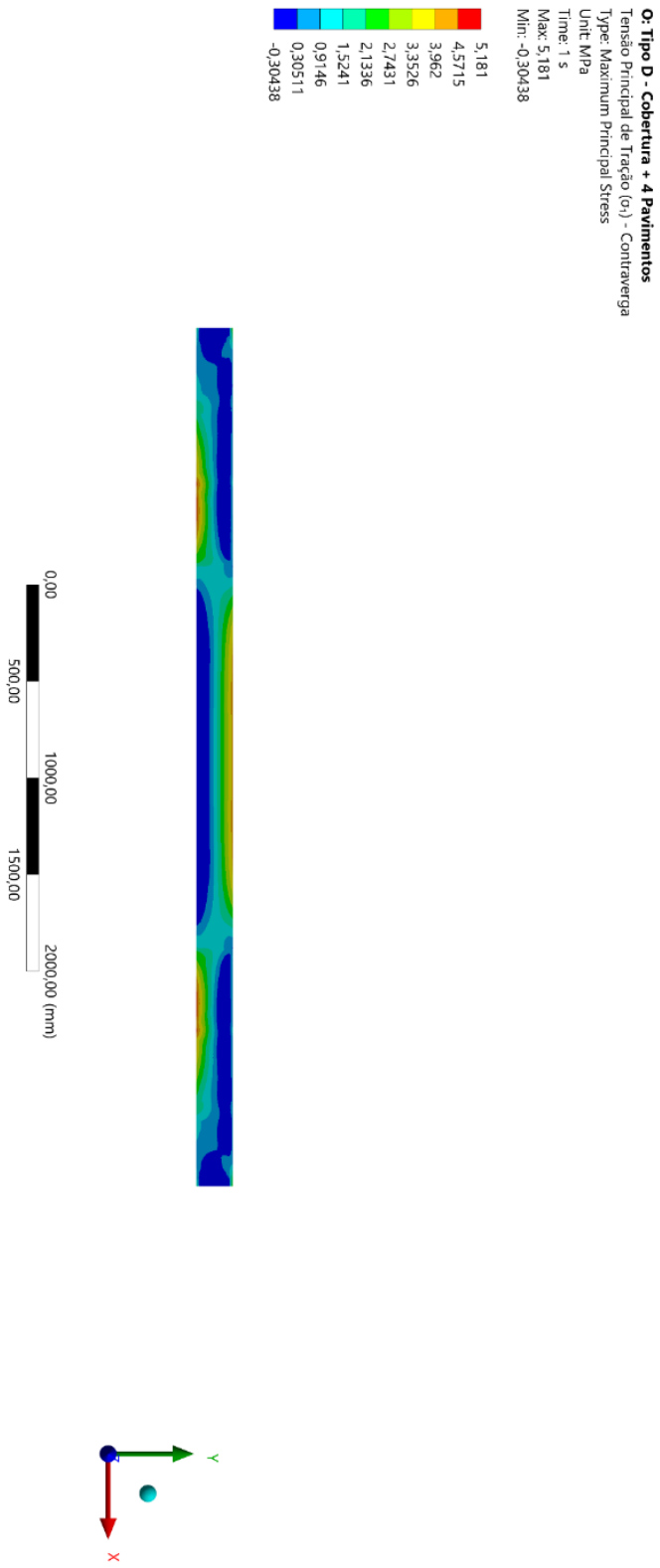
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.61 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) na contraverga do Tipo C sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



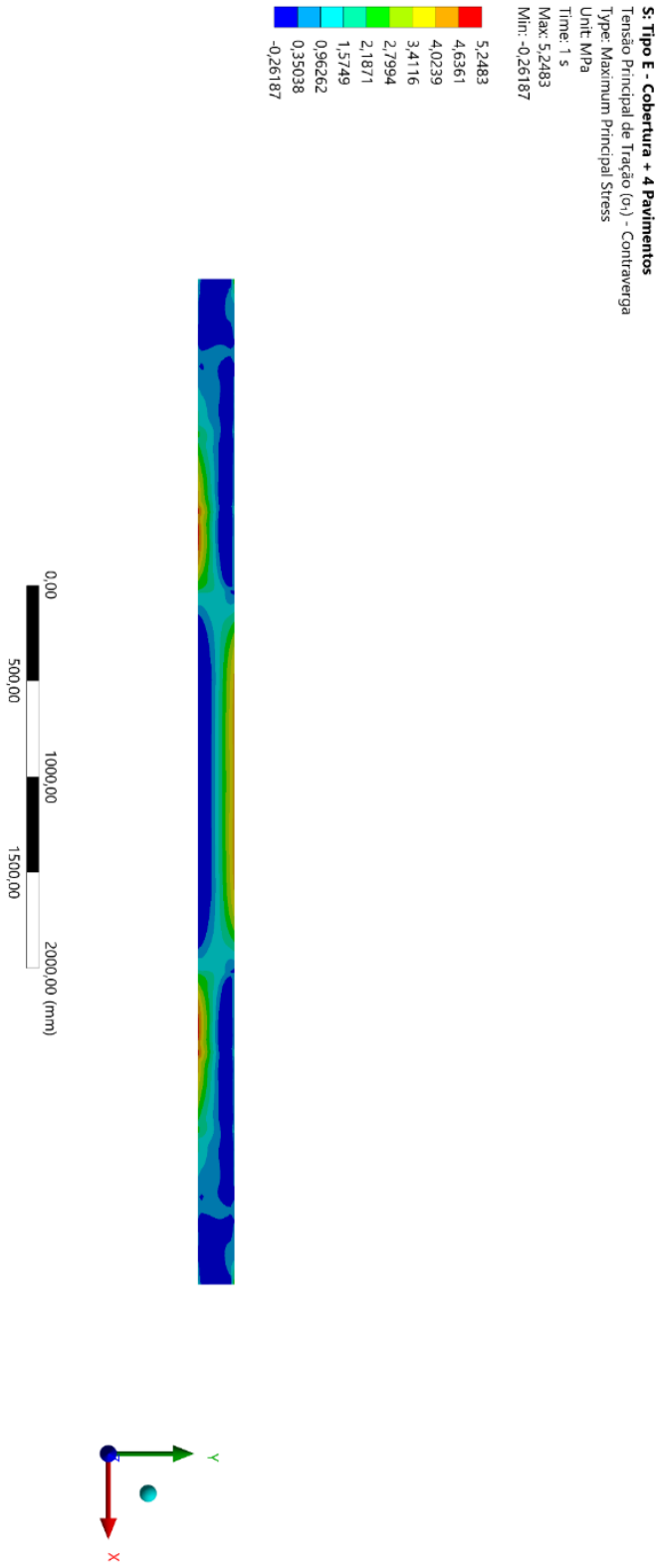
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.62 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) na contraverga do Tipo D sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

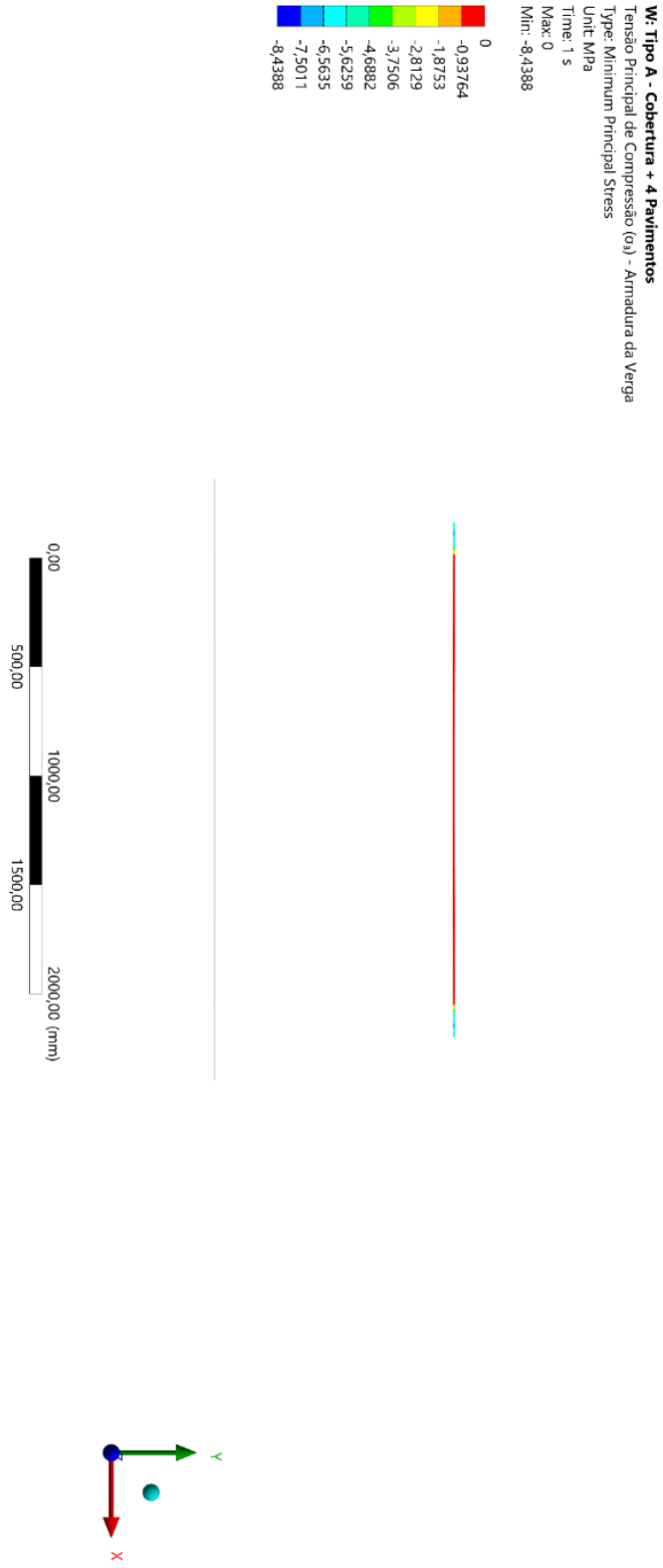
Figura C.63 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) na contraverga do Tipo E sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

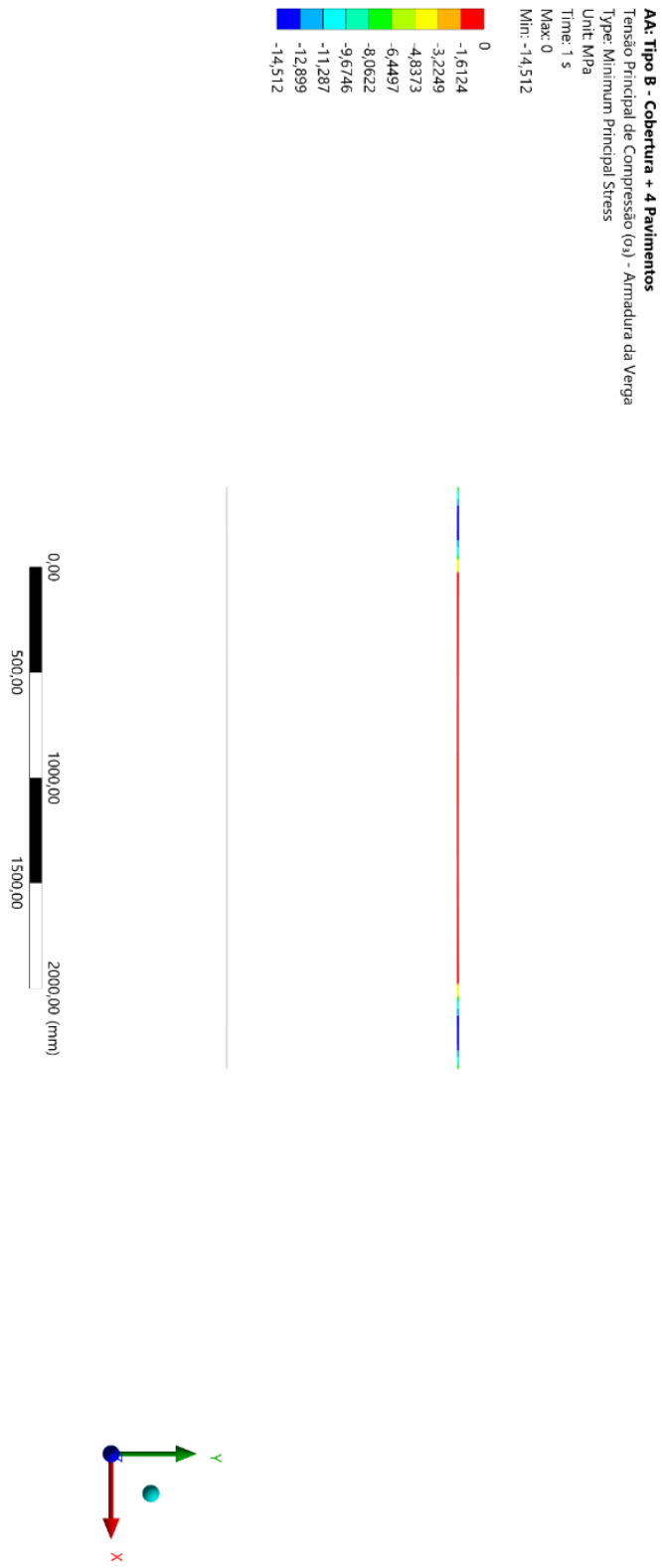
Tensões na armadura da verga dos painéis com abertura

Figura C.64 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) na armadura da verga do Tipo A sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



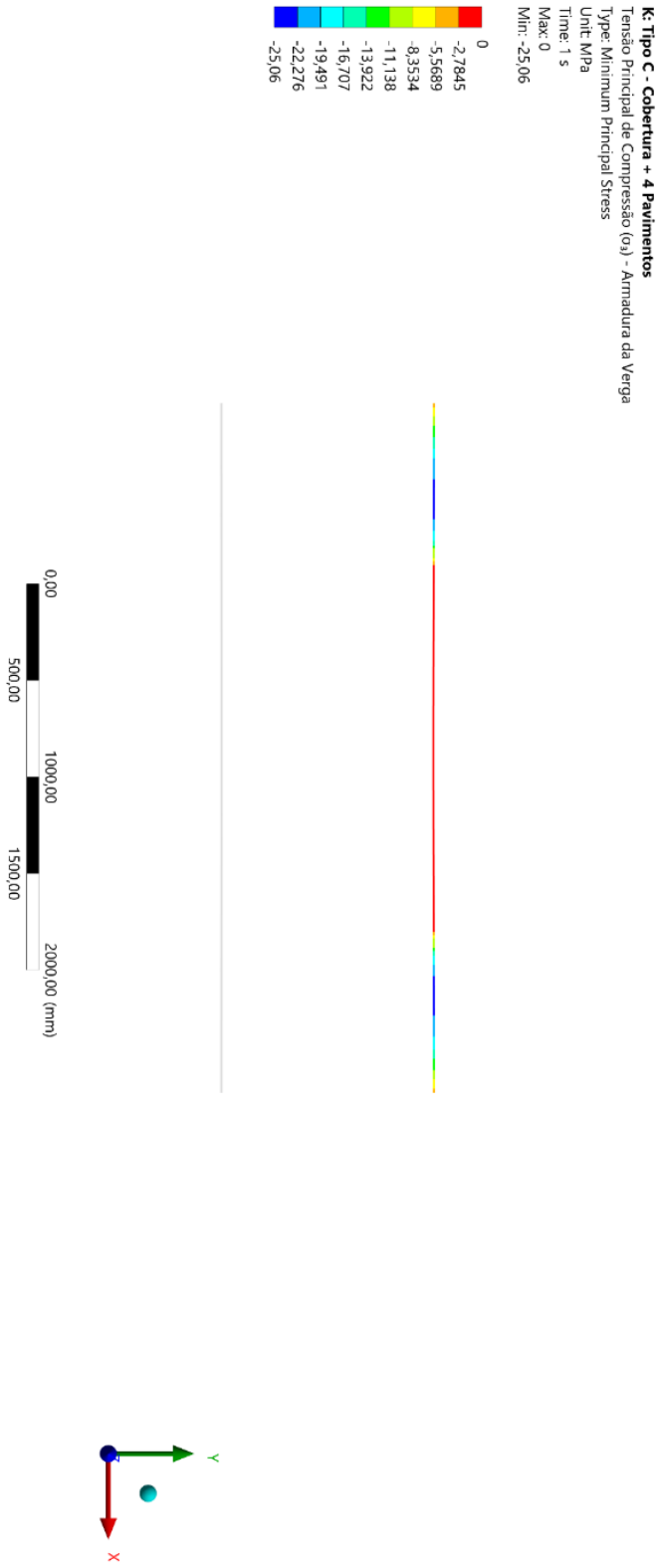
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.65 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) na armadura da verga do Tipo B sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



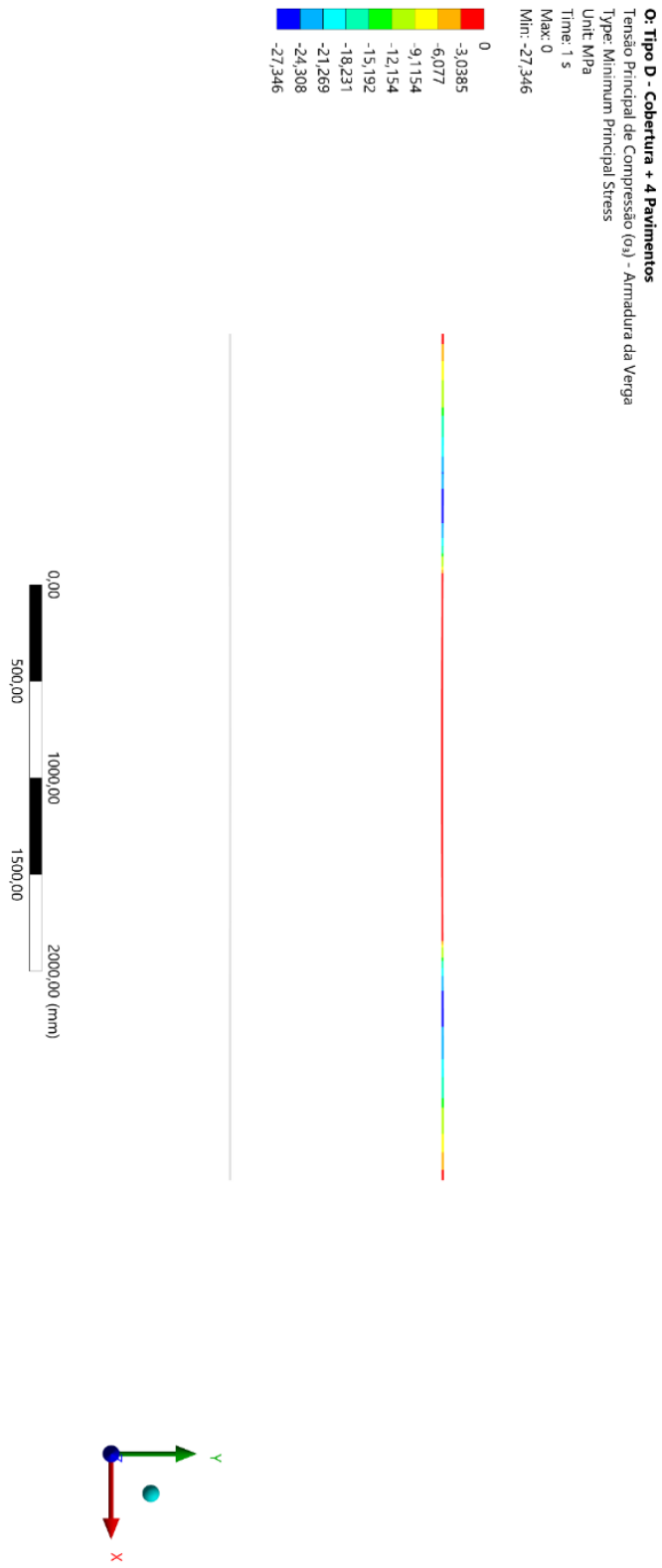
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.66 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) na armadura da verga Tipo C sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



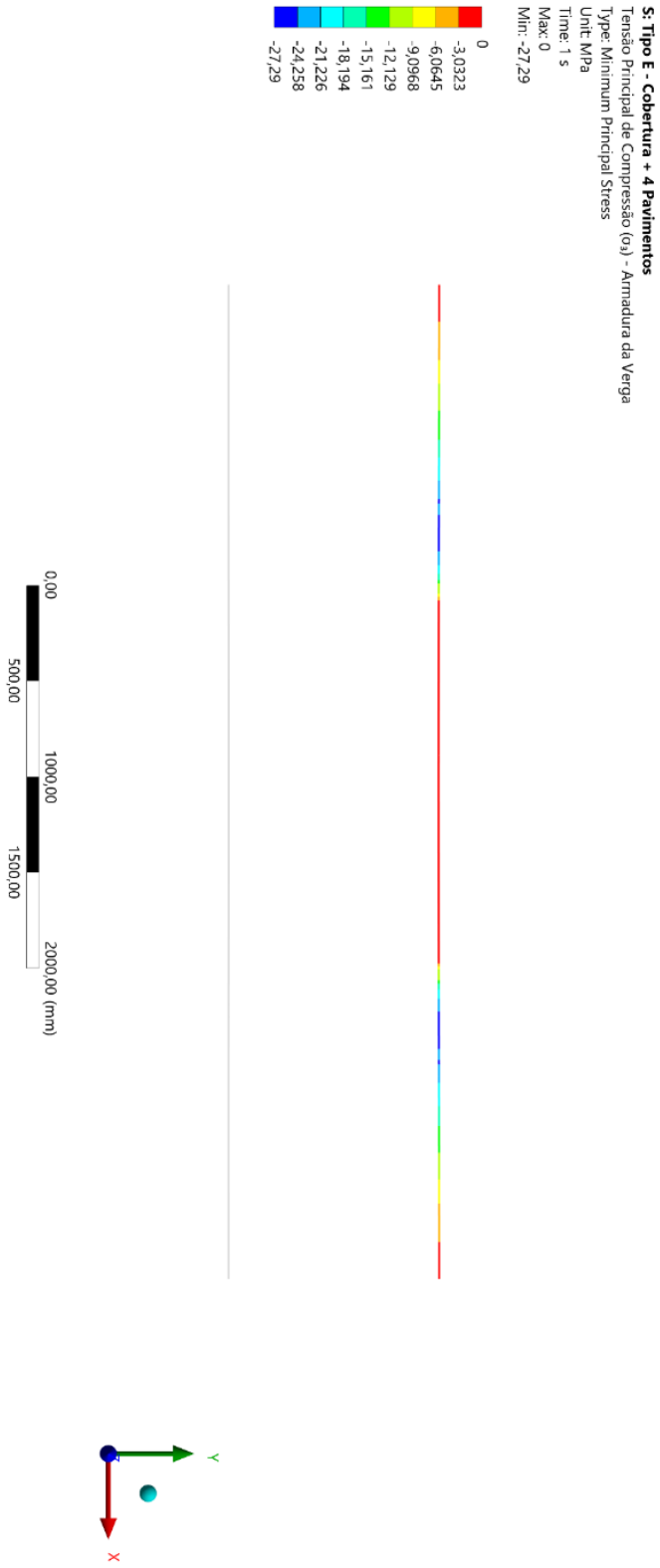
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.67 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) na armadura da verga do Tipo D sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



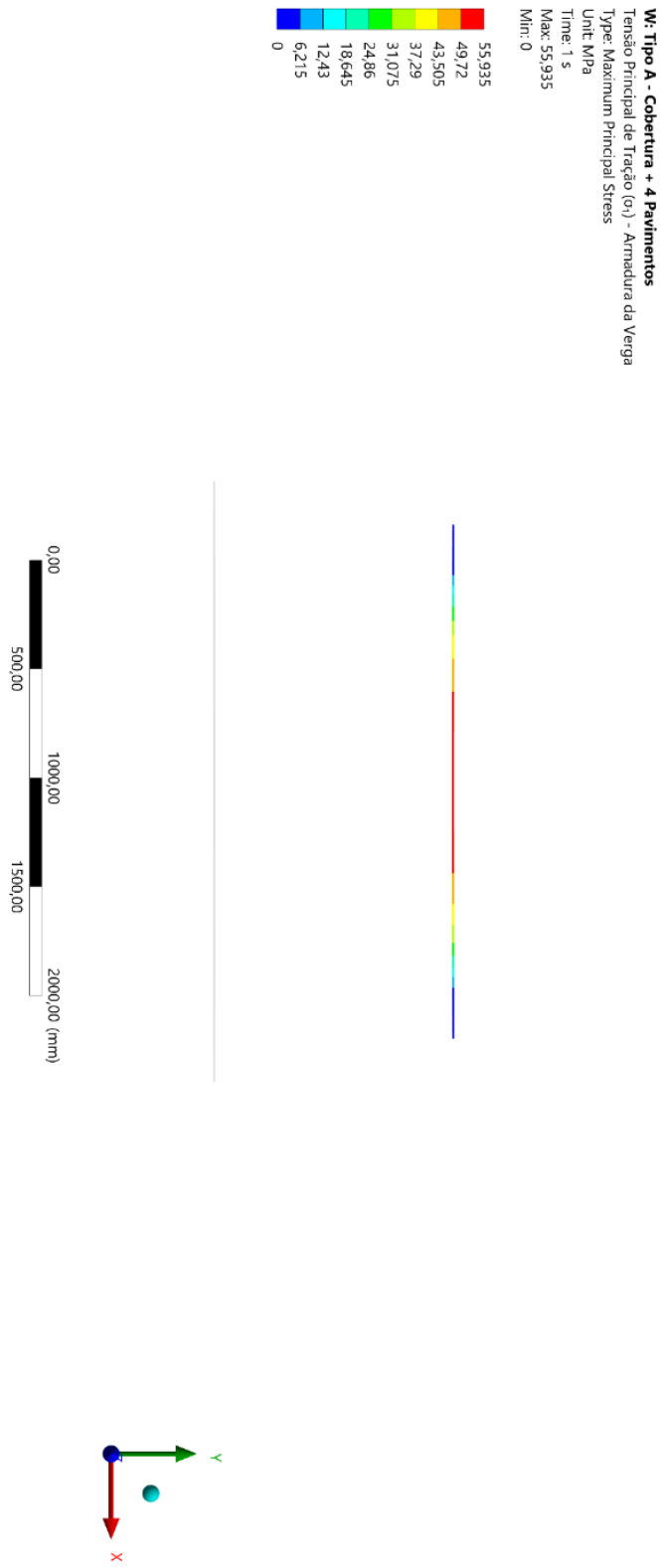
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.68 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) na armadura da verga do Tipo E sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



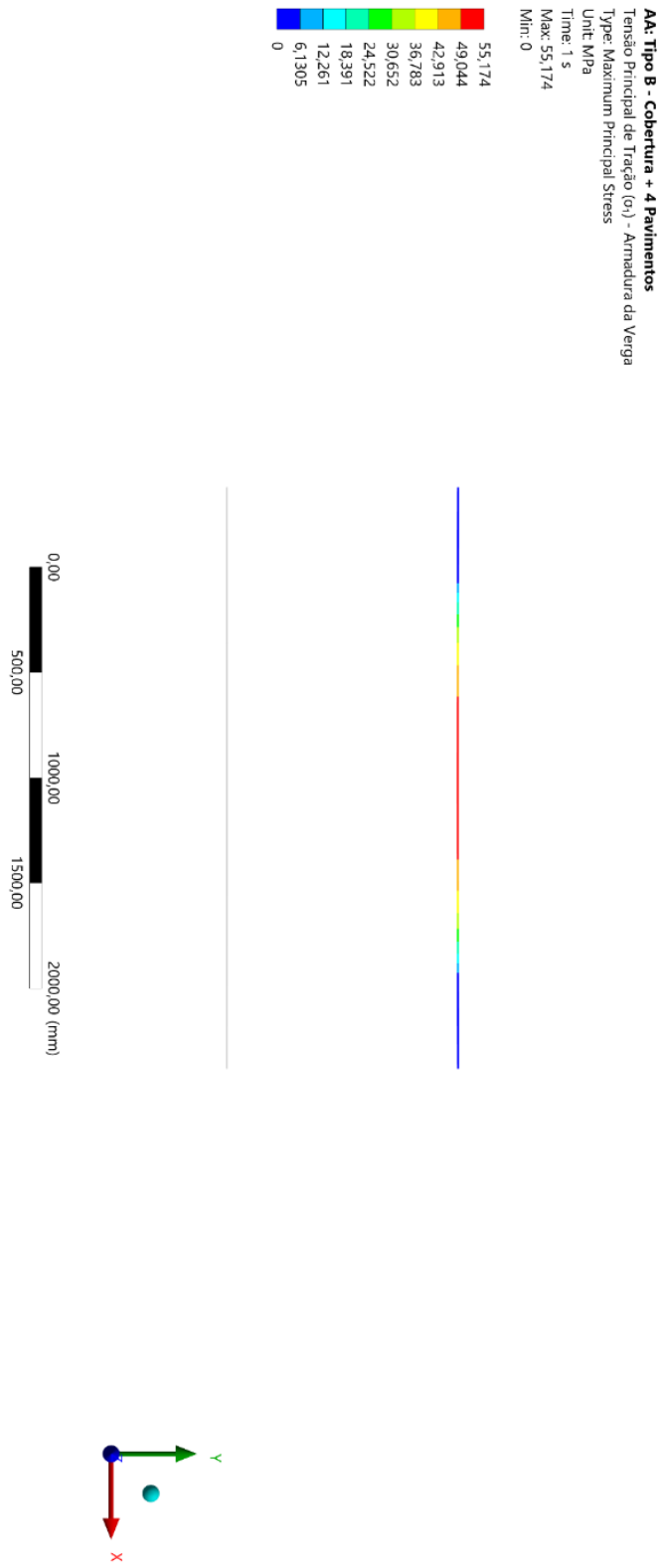
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.69 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) na armadura da verga do Tipo A sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



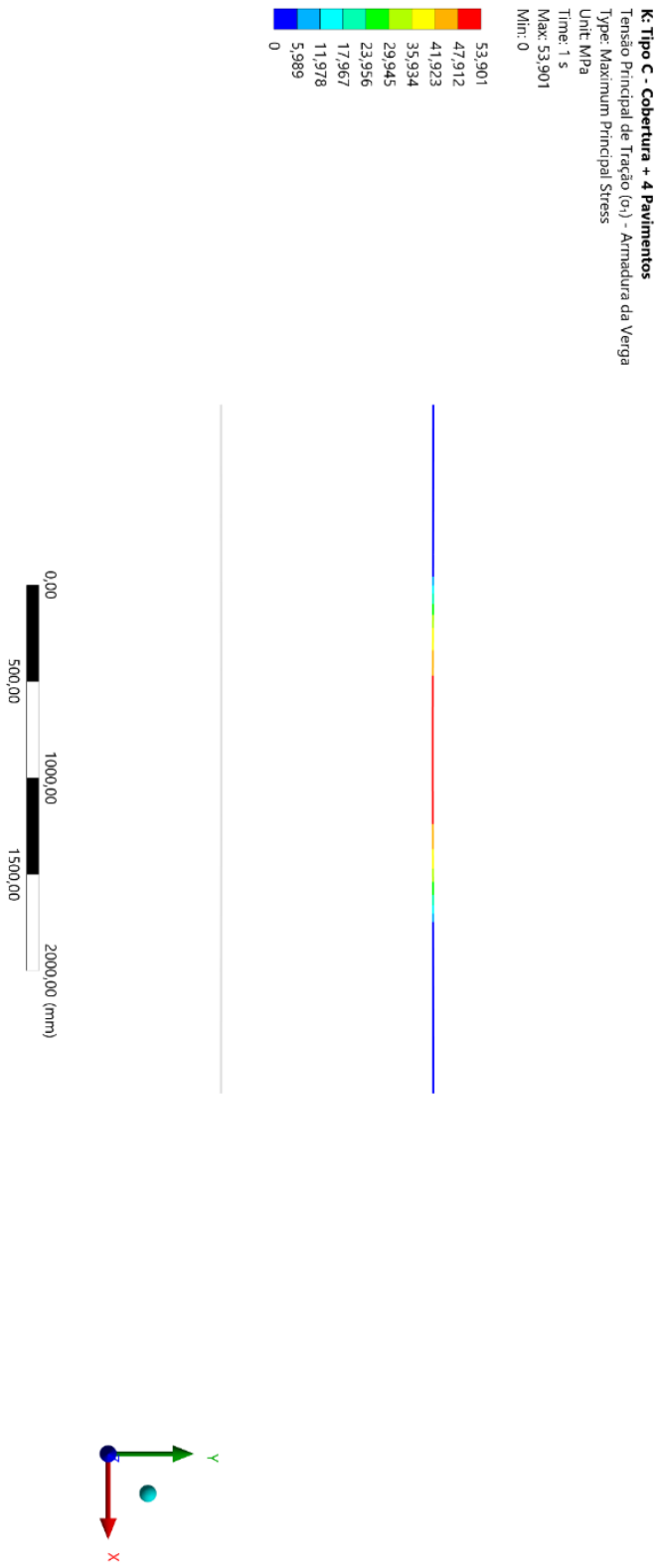
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.70 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) na armadura da verga do Tipo B sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



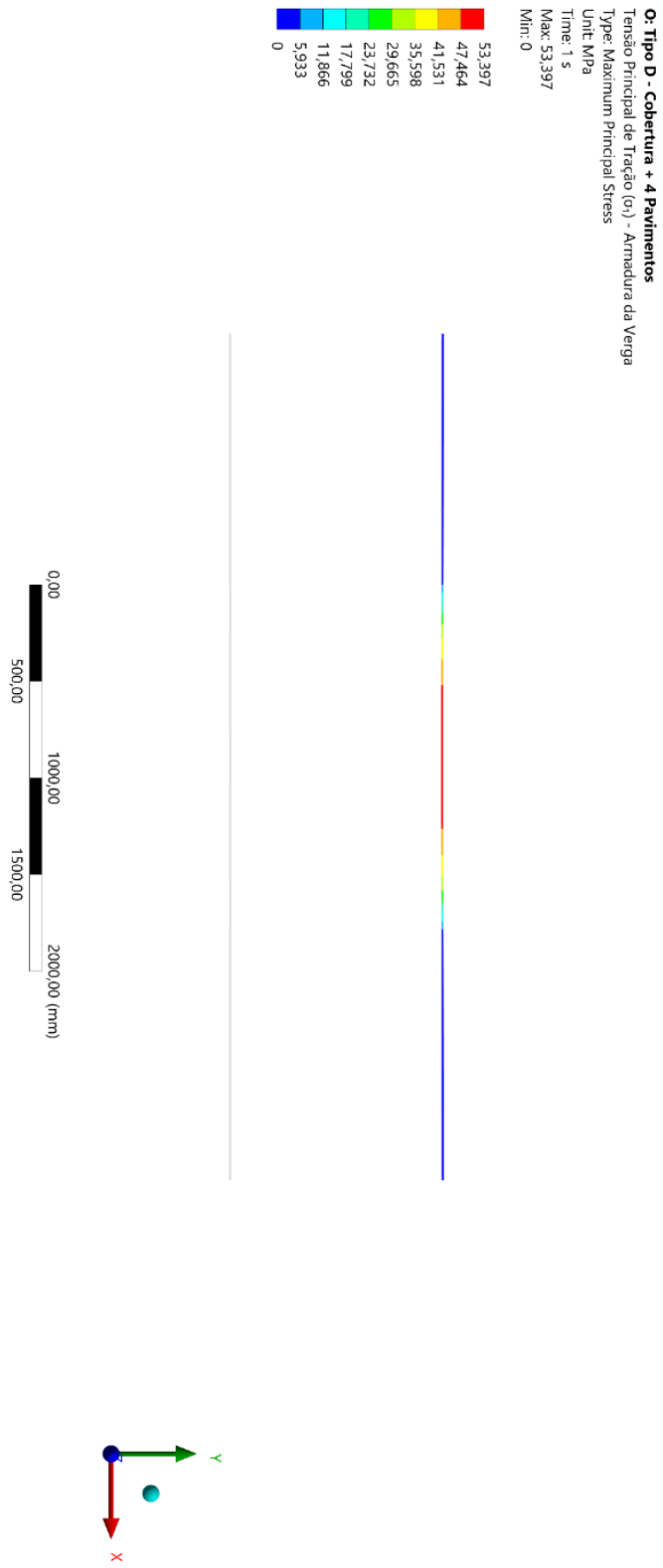
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.71 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) na armadura da verga do Tipo C sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



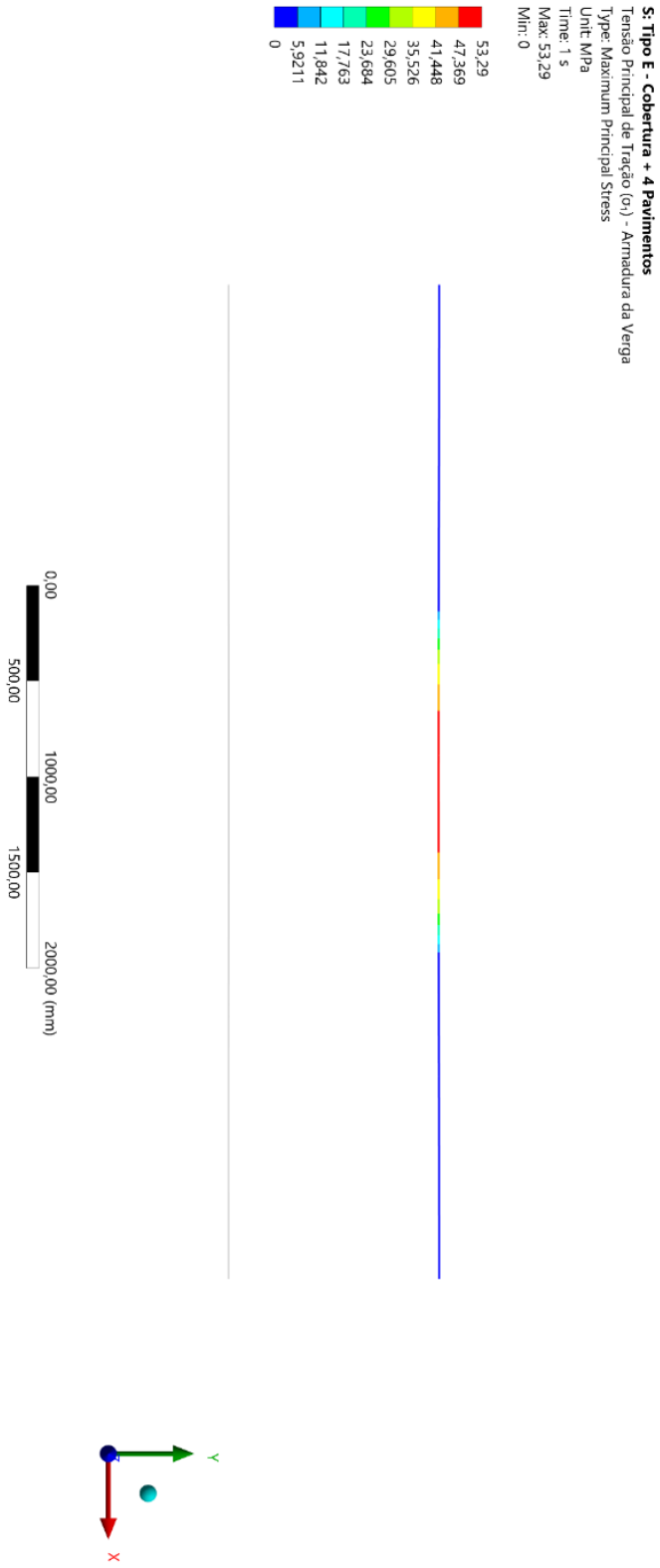
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.72 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) na armadura da verga do Tipo D sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

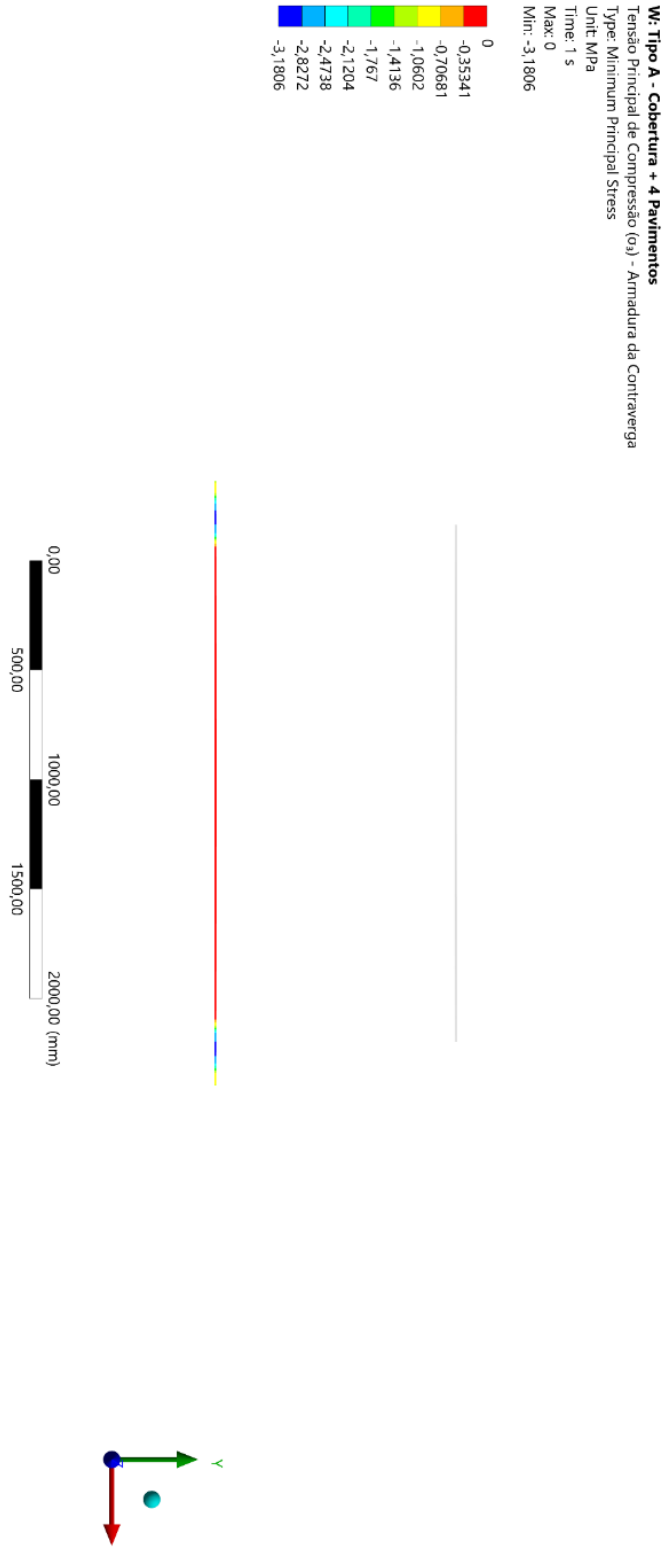
Figura C.73 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) na armadura da verga do Tipo E sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

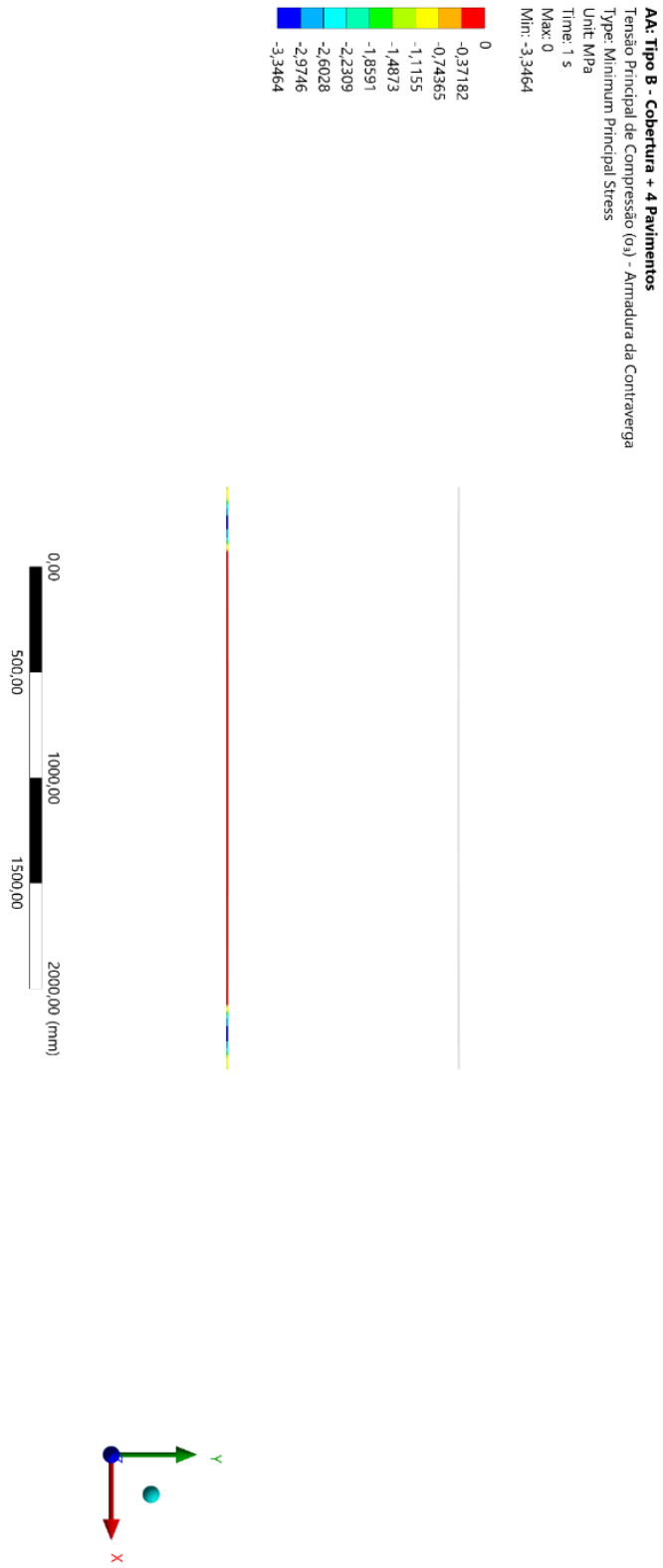
Tensões na armadura da contraverga dos painéis com abertura

Figura C.74 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) na armadura da contraverga do Tipo A sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



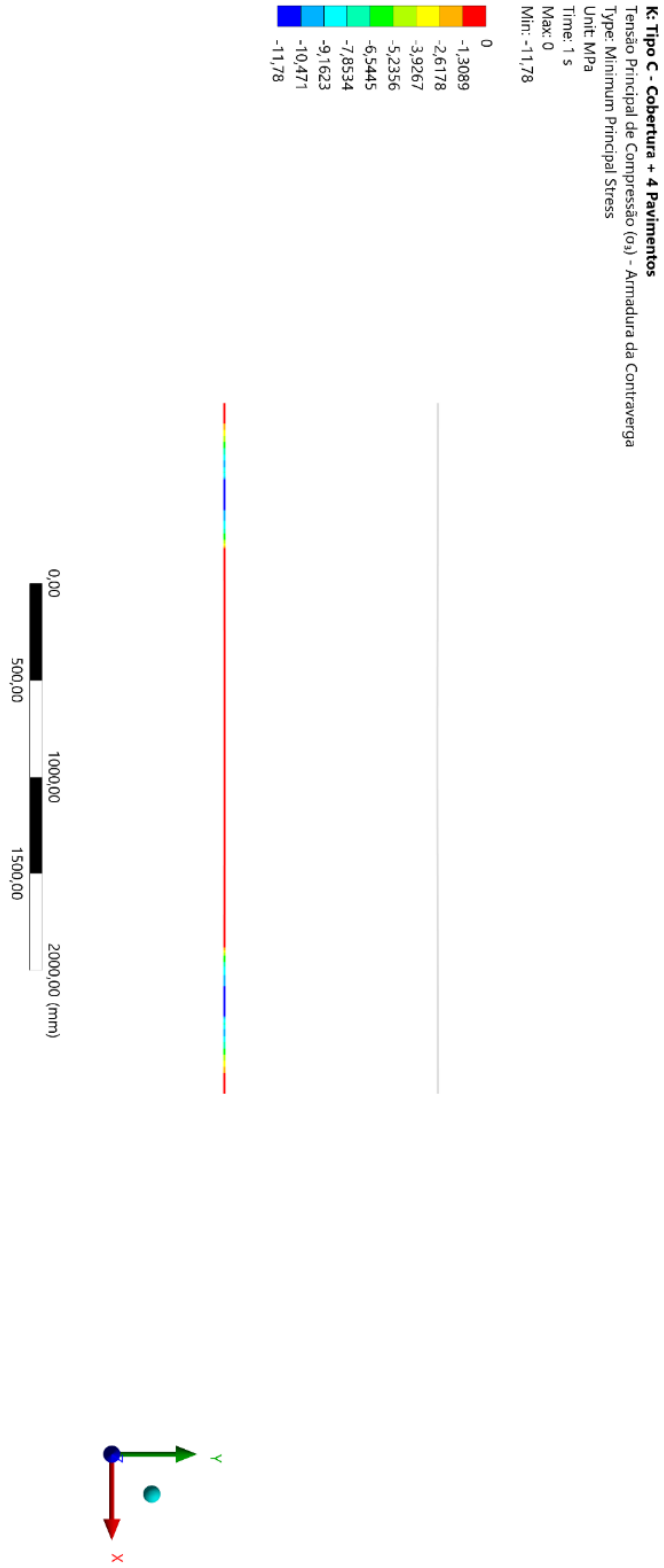
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.75 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) na armadura da contraverga do Tipo B sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



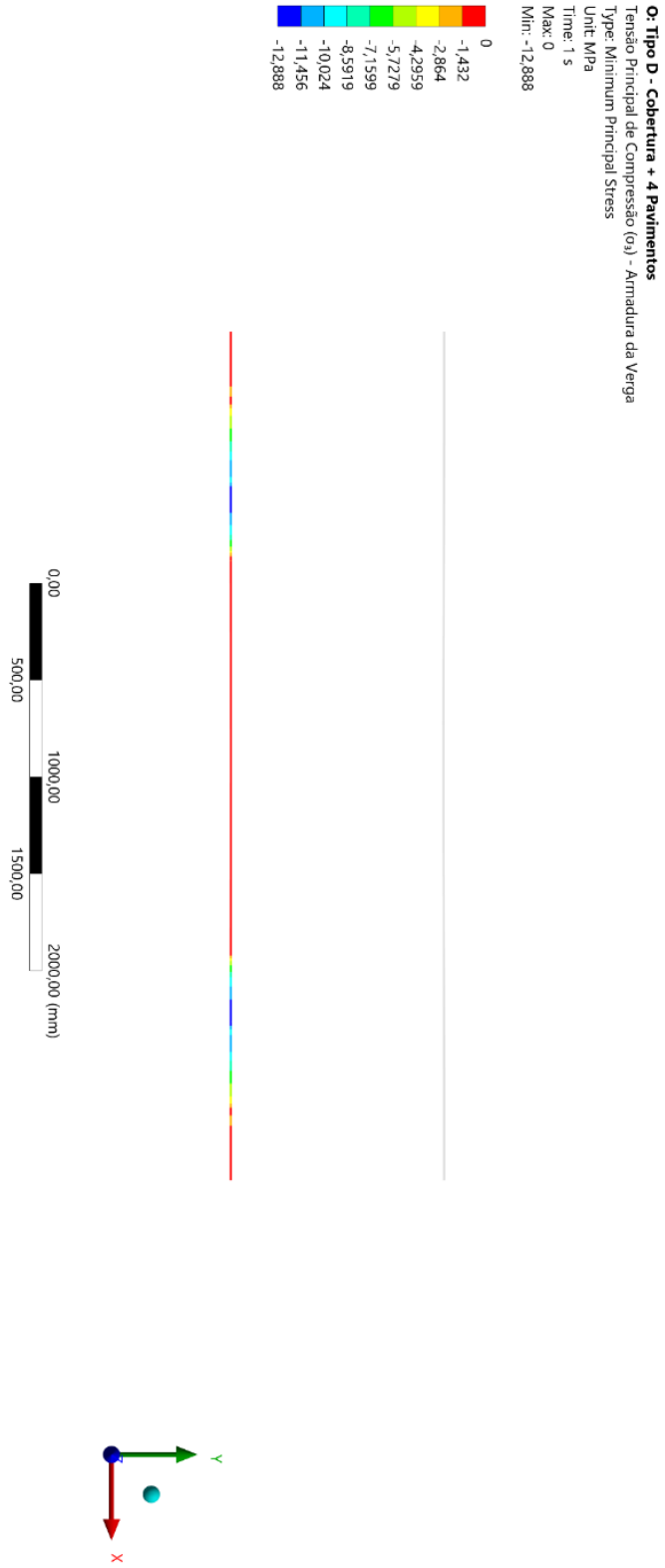
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.76 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) na armadura da contraverga Tipo C sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



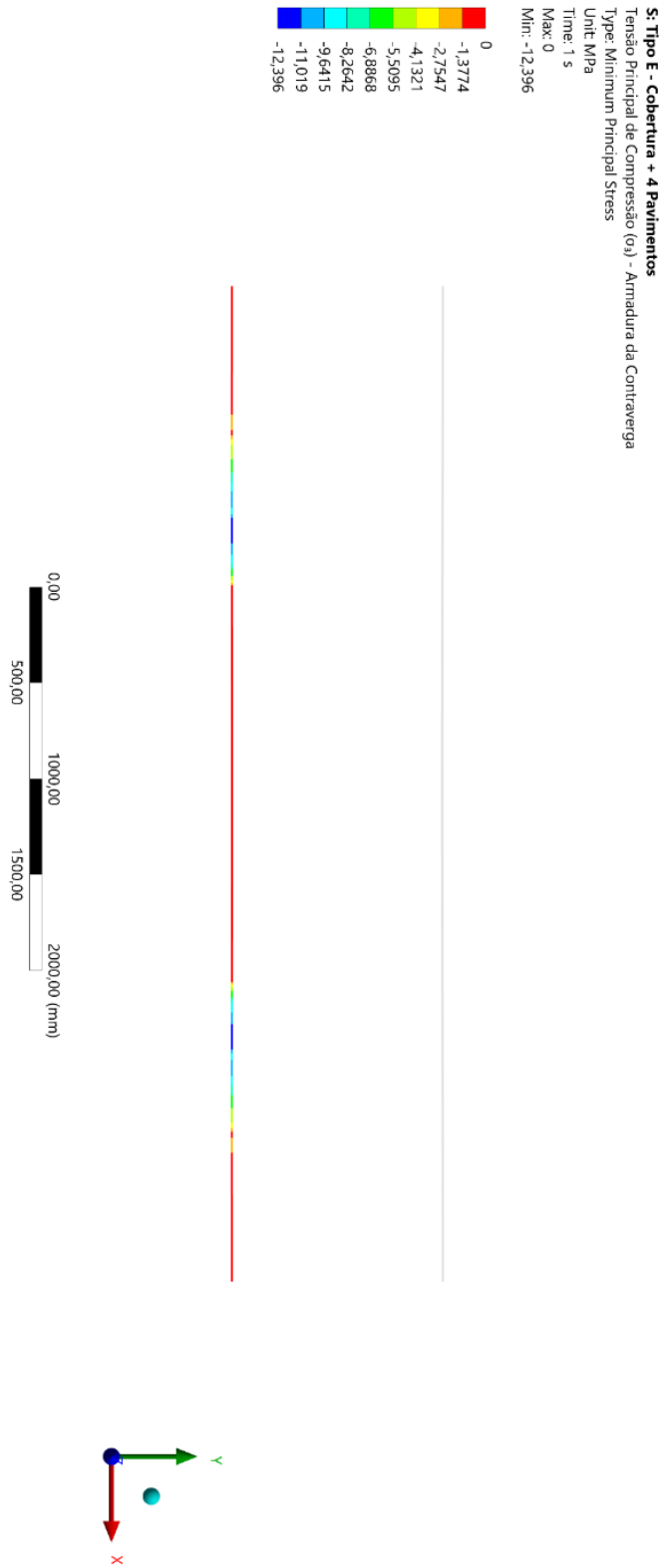
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.77 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) na armadura da contraverga do Tipo D sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



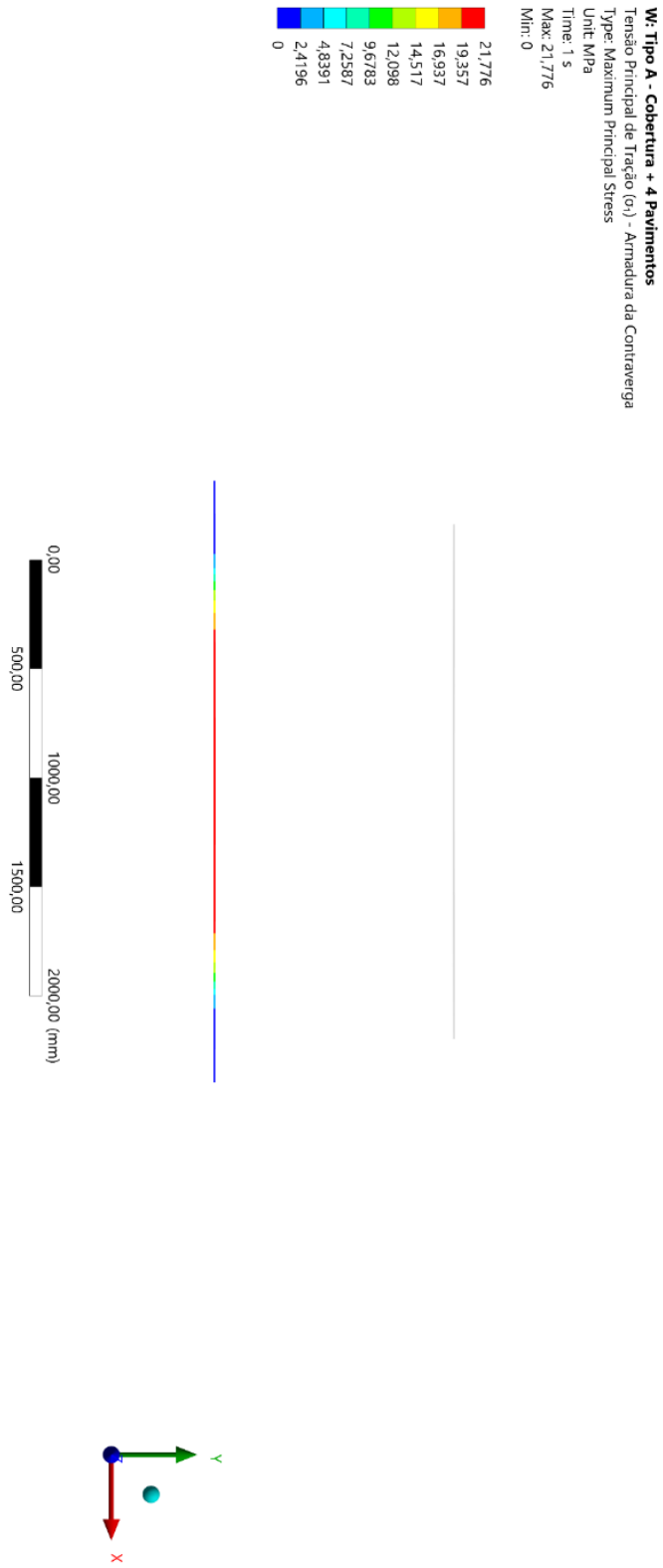
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.78 – Distribuição das tensões principais de compressão (σ_3) na armadura da contraverga do Tipo E sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



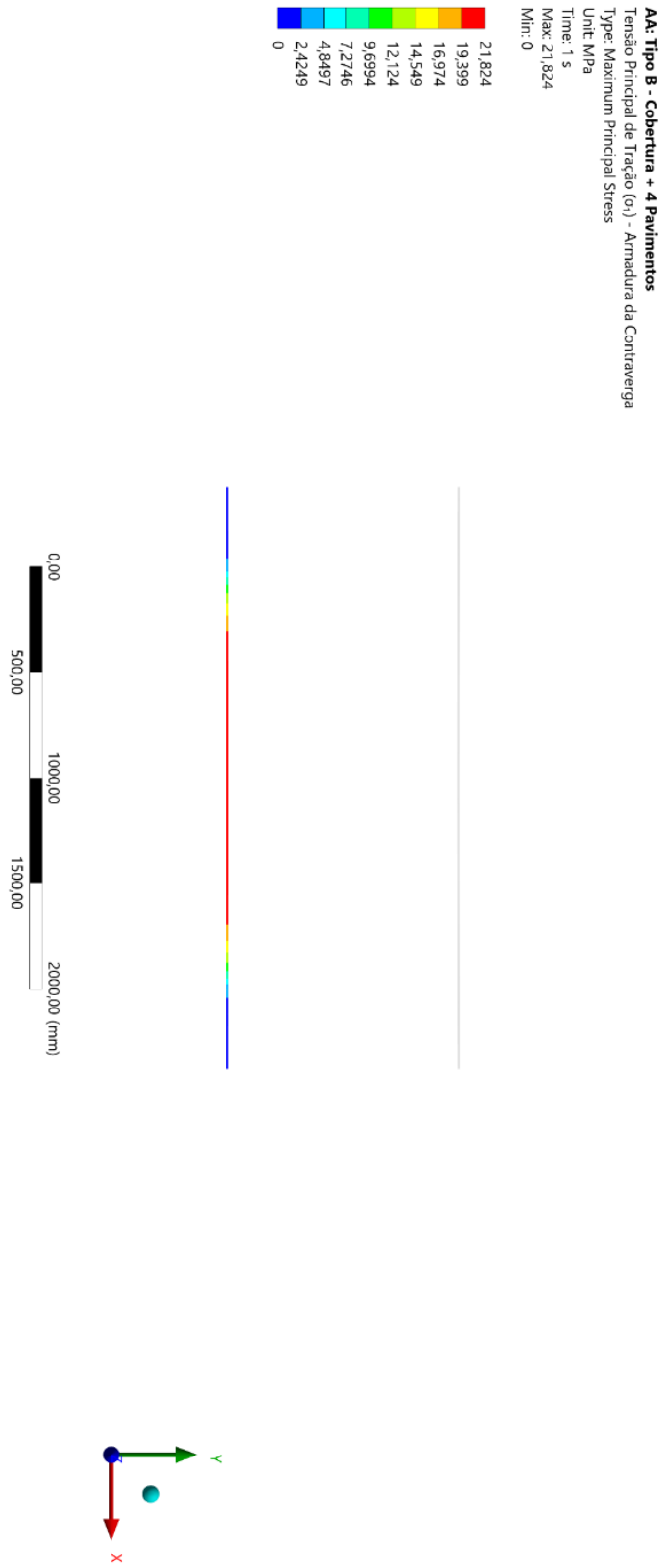
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.79 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) na armadura da contraverga do Tipo A sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



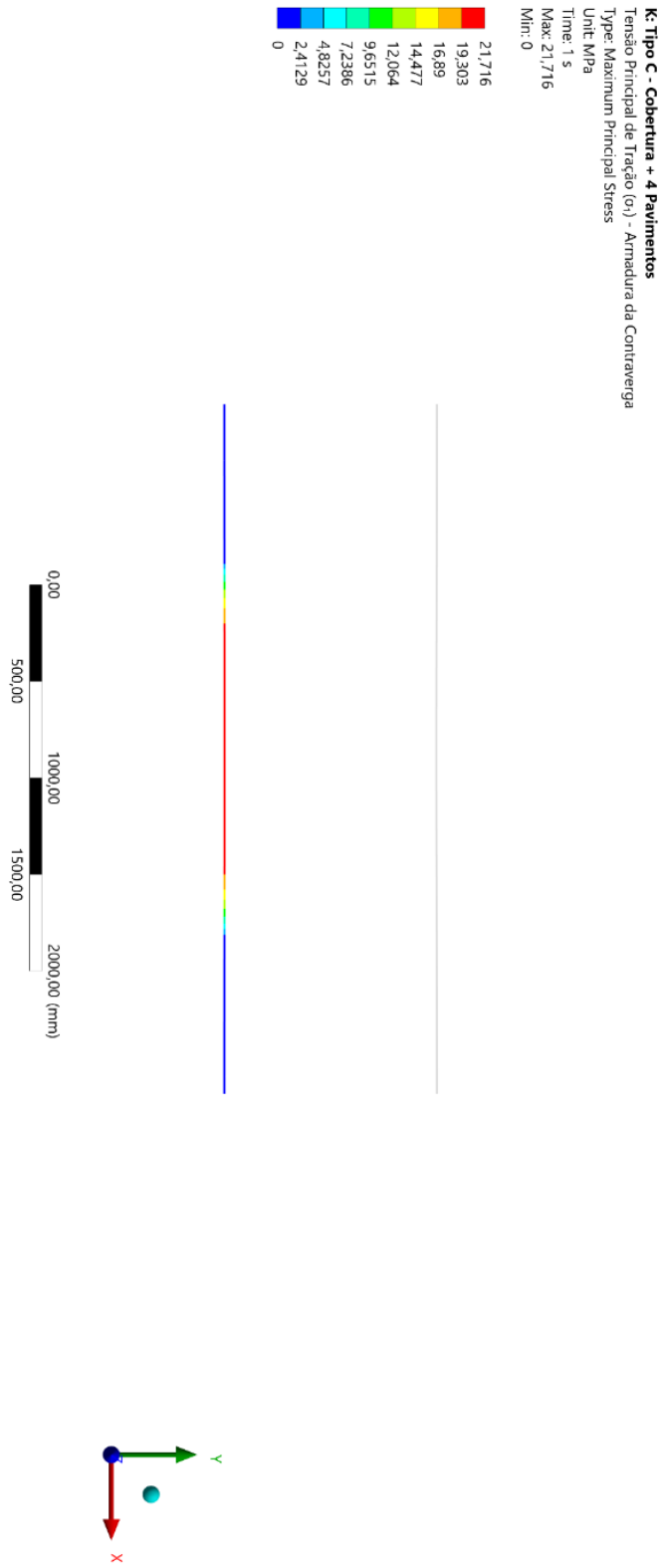
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.80 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) na armadura da contraverga do Tipo B sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



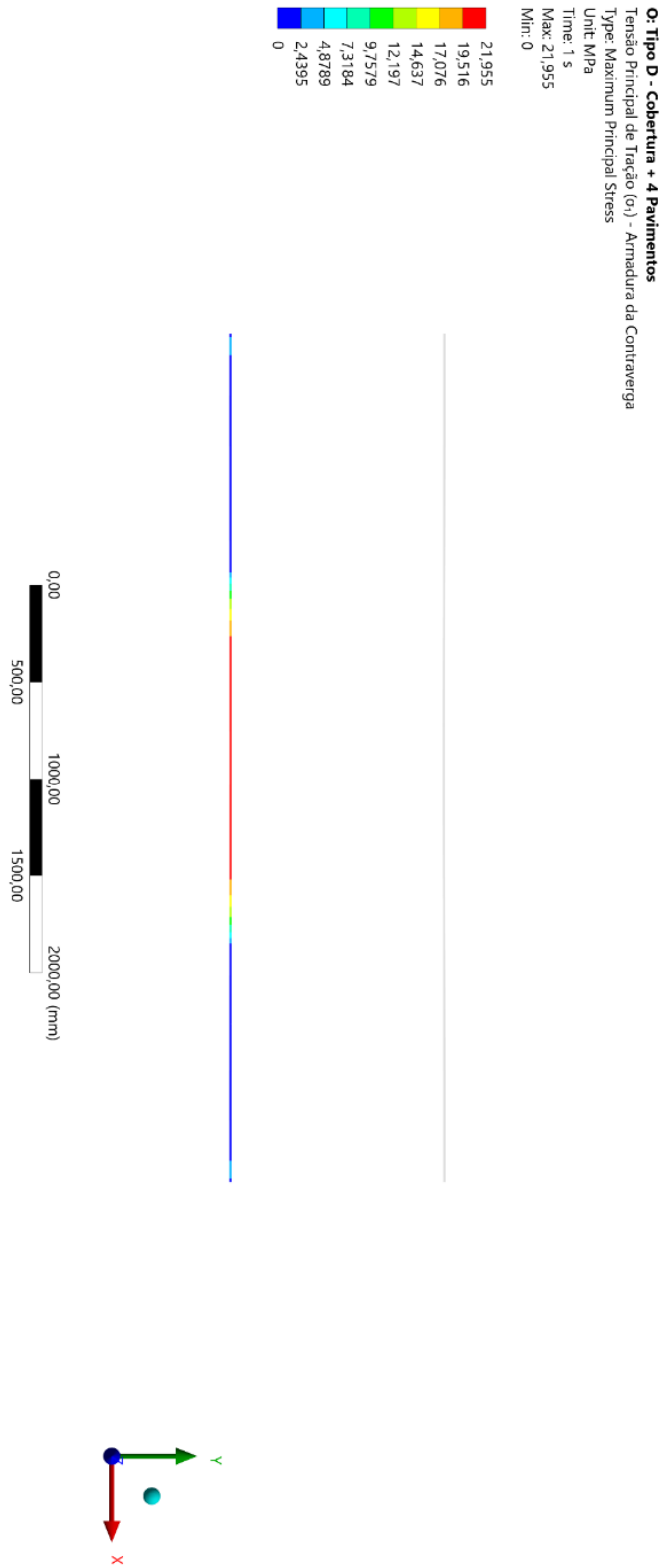
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.81 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) na armadura da contraverga do Tipo C sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



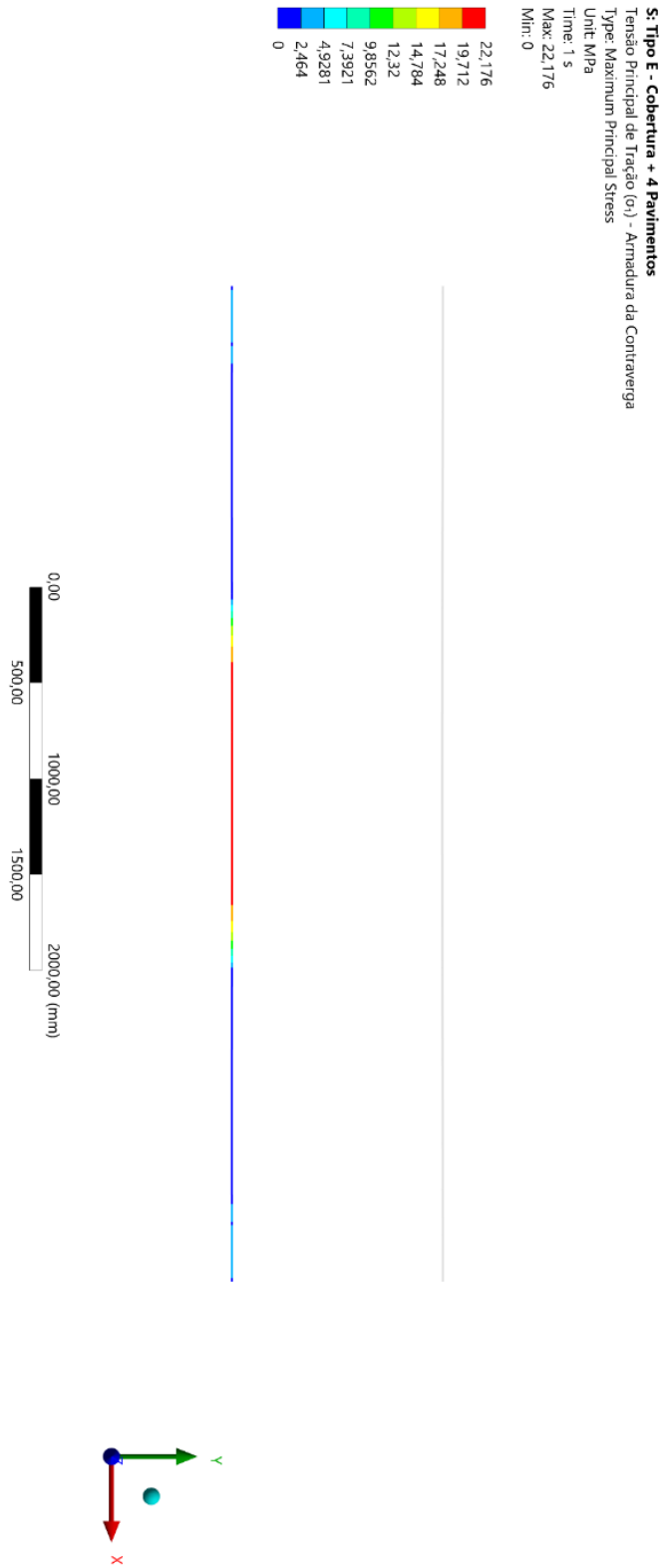
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.82 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) na armadura da contraverga do Tipo D sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

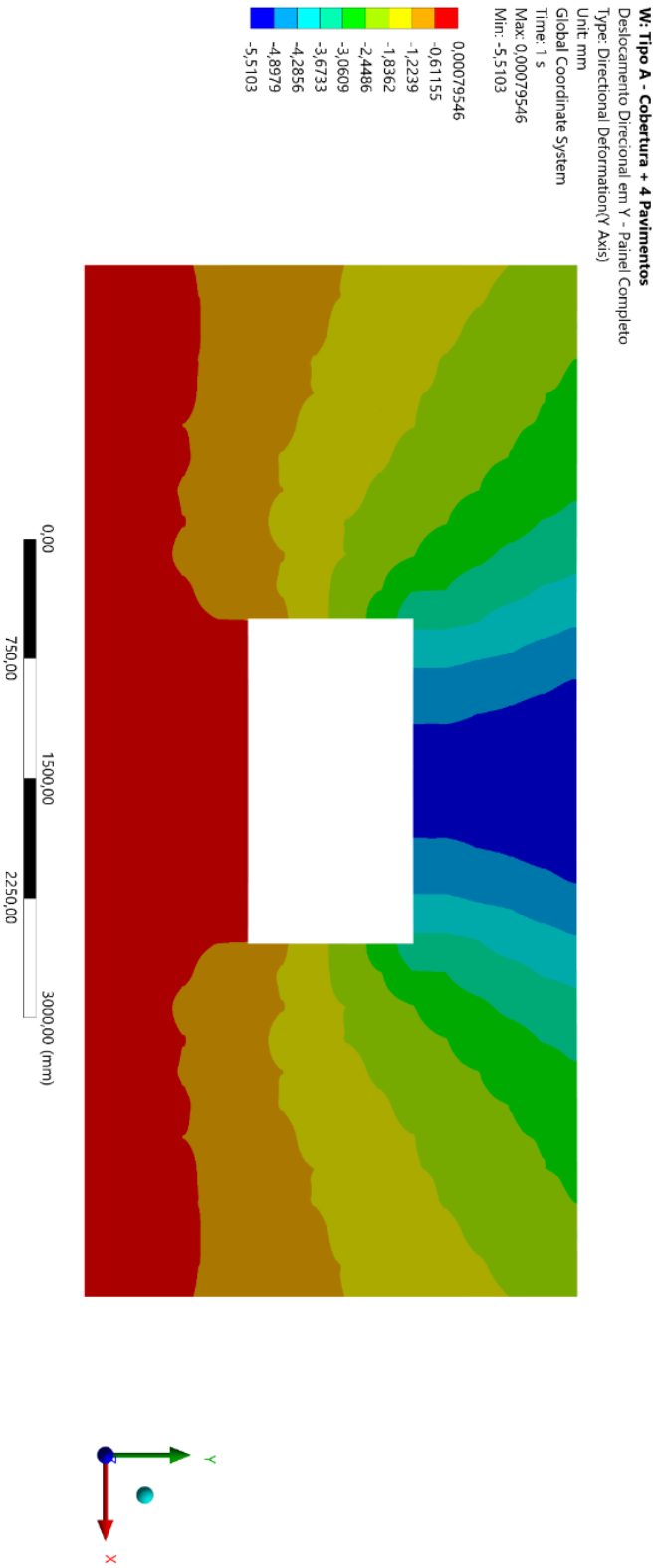
Figura C.83 – Distribuição das tensões principais de tração (σ_1) na armadura da contraverga do Tipo E sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

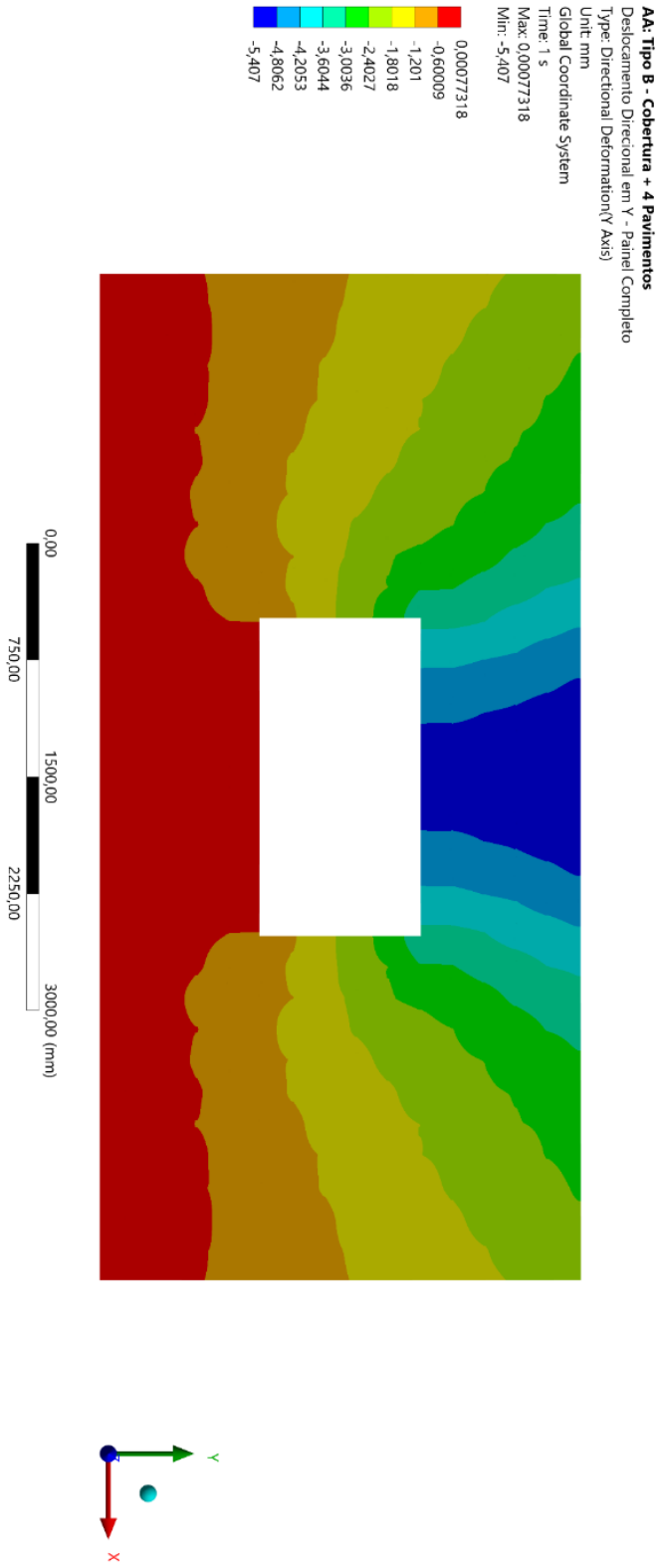
Deslocamentos dos painéis com abertura

Figura C.84 – Distribuição deslocamentos verticais (Uy) no painel do Tipo A sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



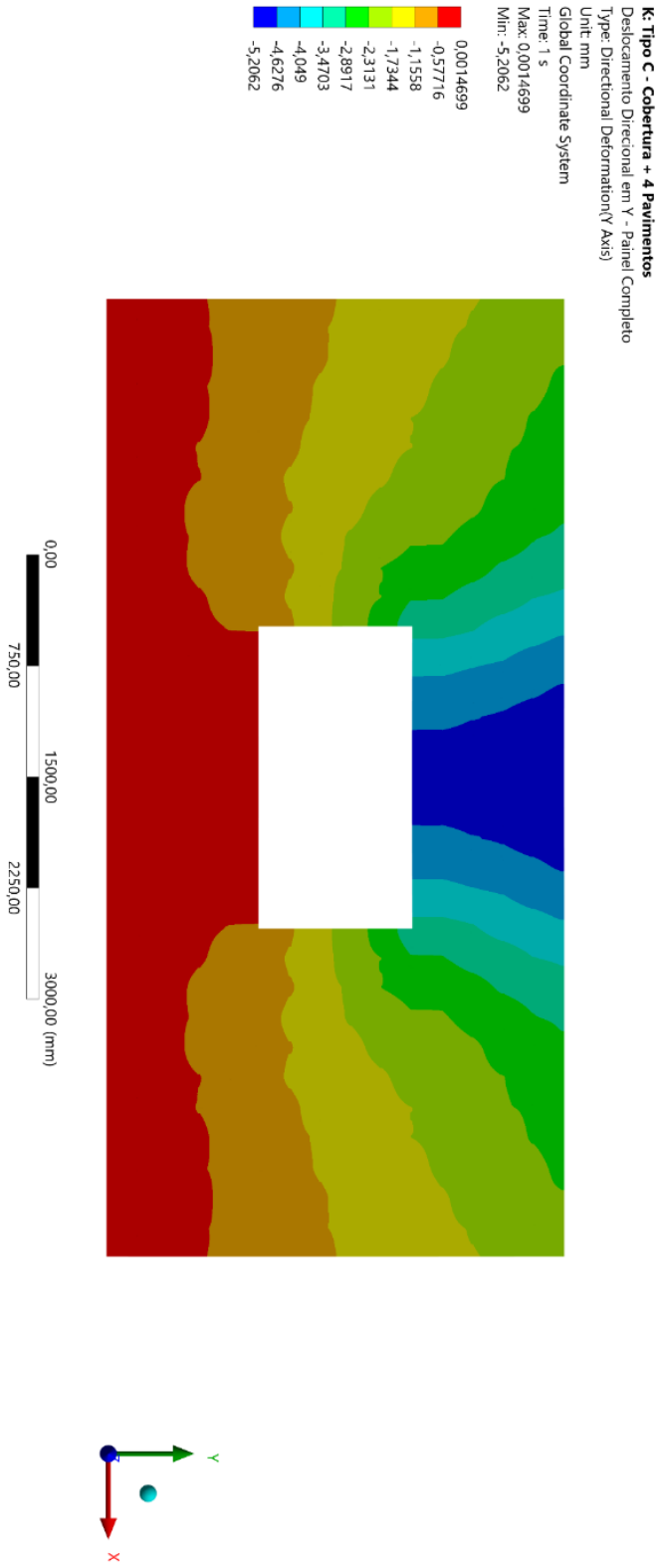
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.85 – Distribuição deslocamentos verticais (Uy) no painel do Tipo B sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



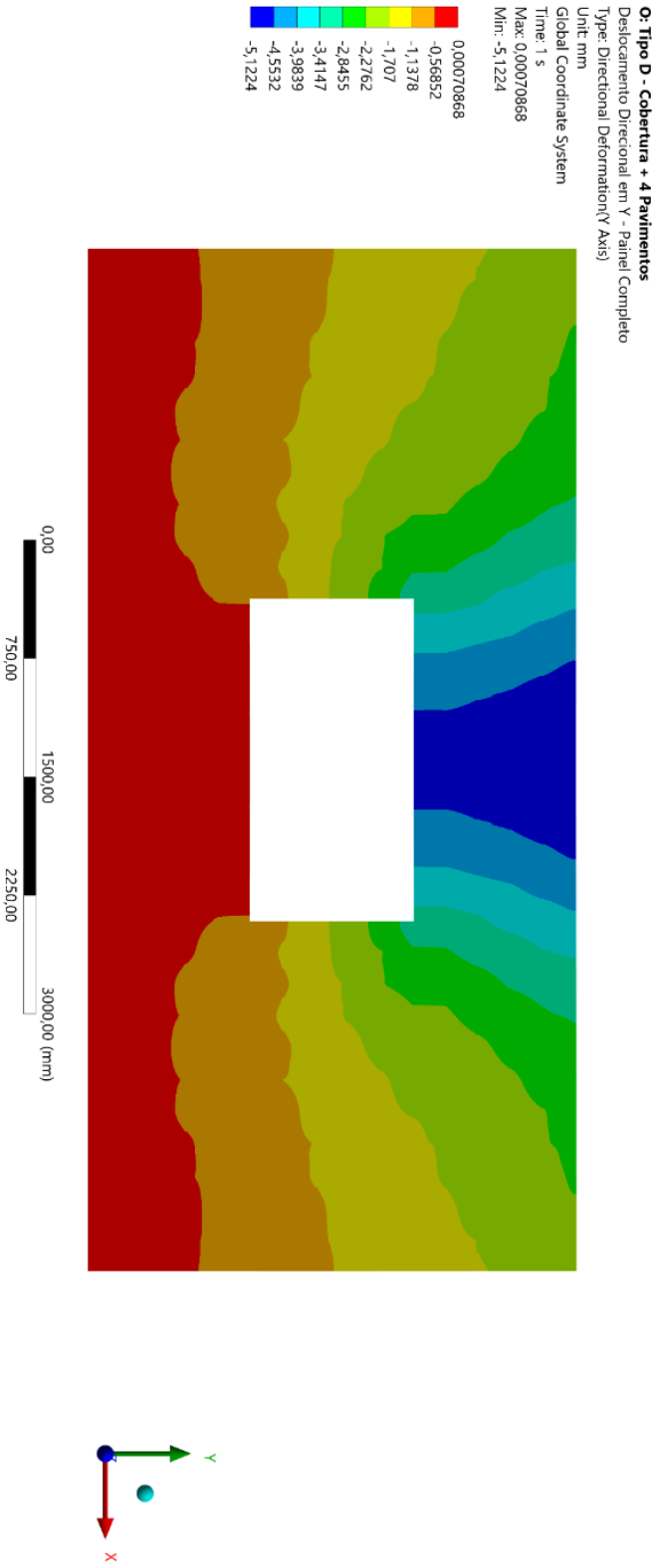
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.86 – Distribuição deslocamentos verticais (Uy) no painel do Tipo C sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



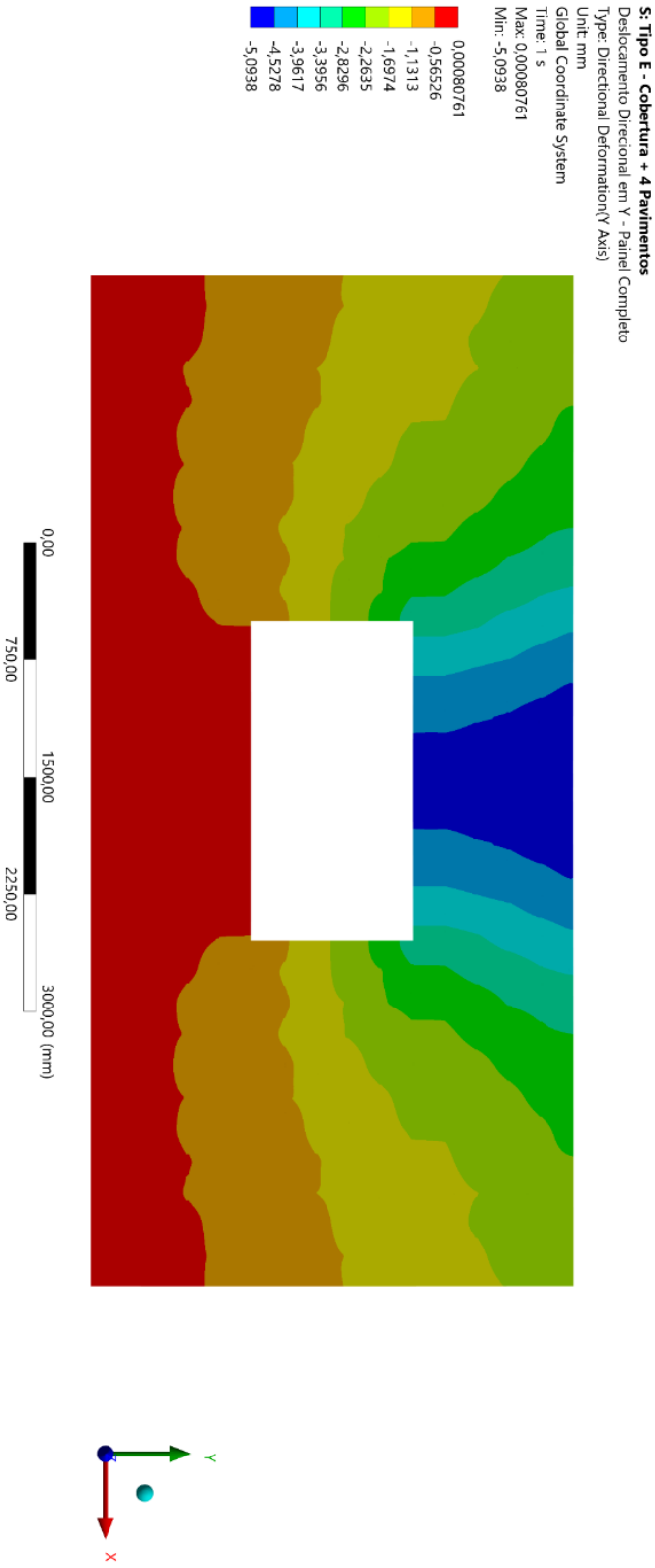
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.87 – Distribuição deslocamentos verticais (Uy) no painel do Tipo D sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



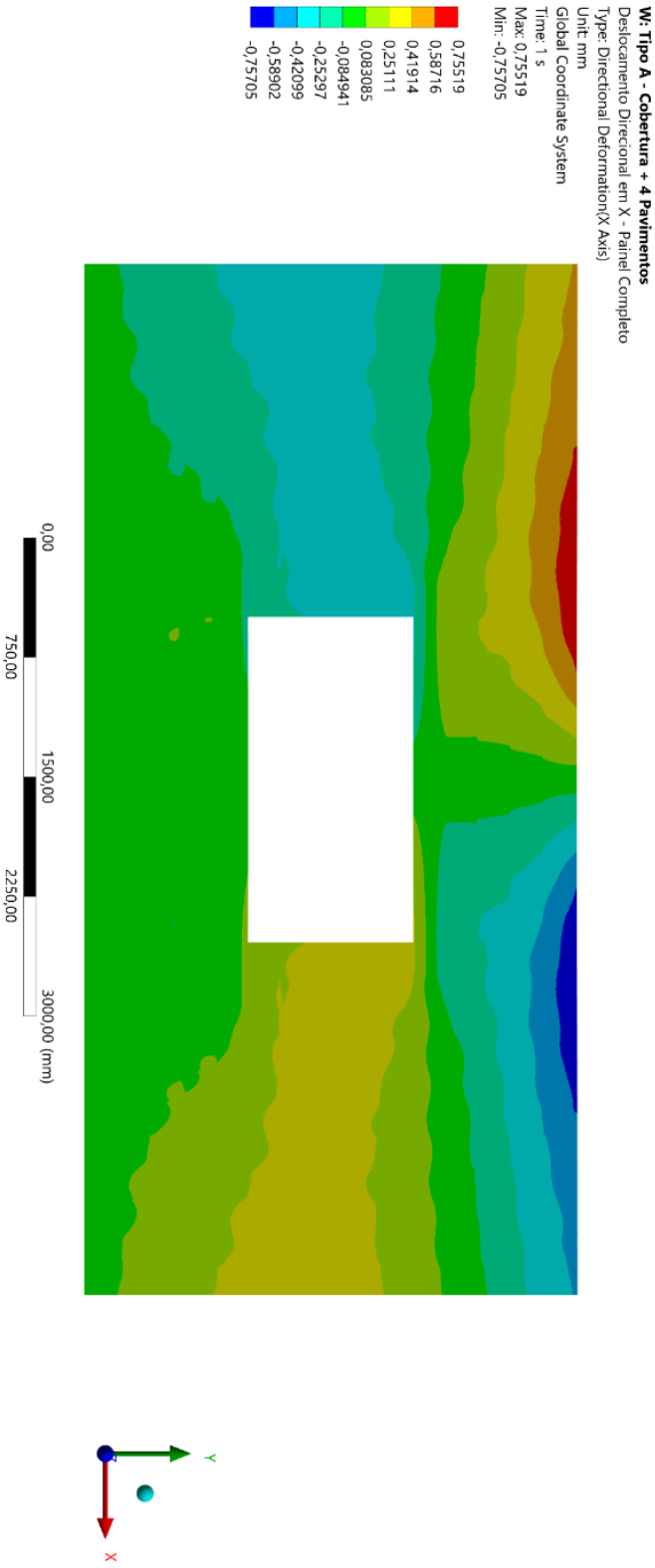
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.88 – Distribuição deslocamentos verticais (Uy) no painel do Tipo E sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



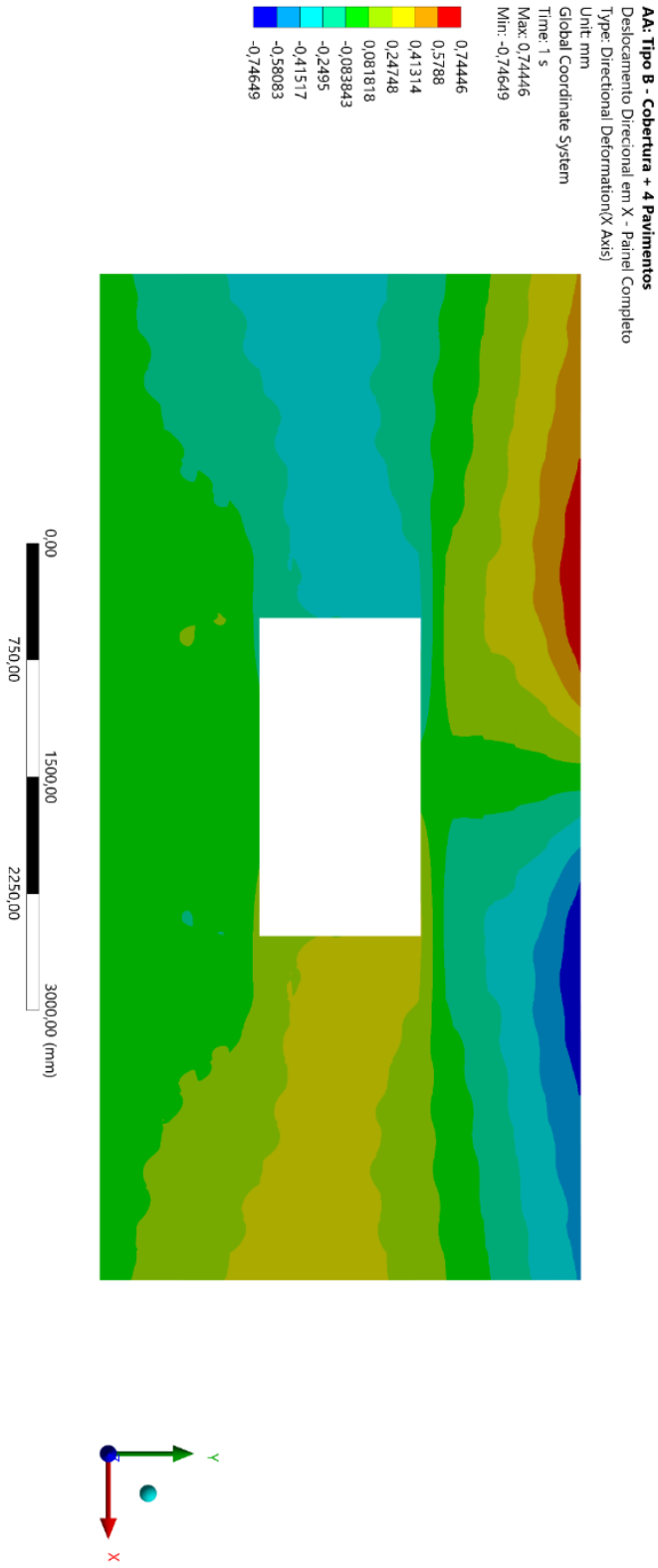
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.89 – Distribuição dos deslocamentos horizontais (Ux) no painel do Tipo A sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



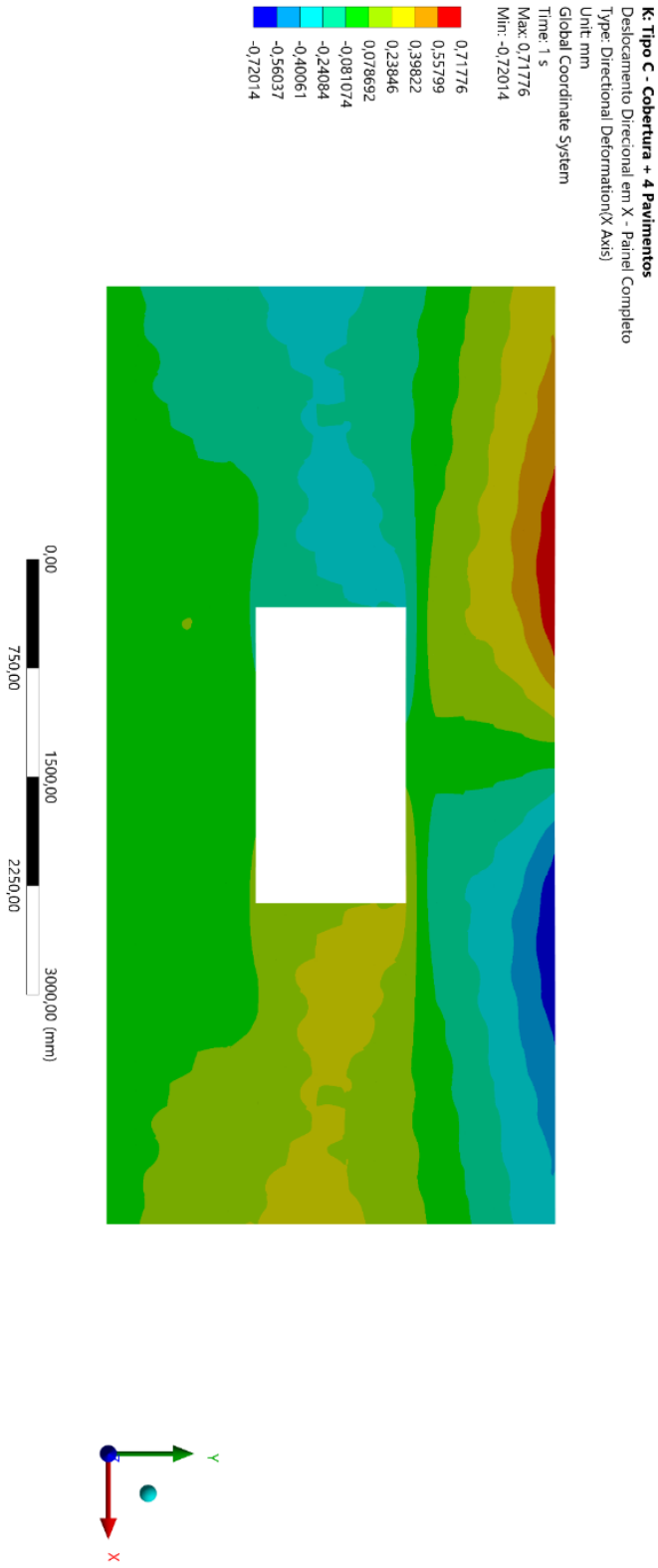
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.90 – Distribuição dos deslocamentos horizontais (Ux) no painel do Tipo B sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



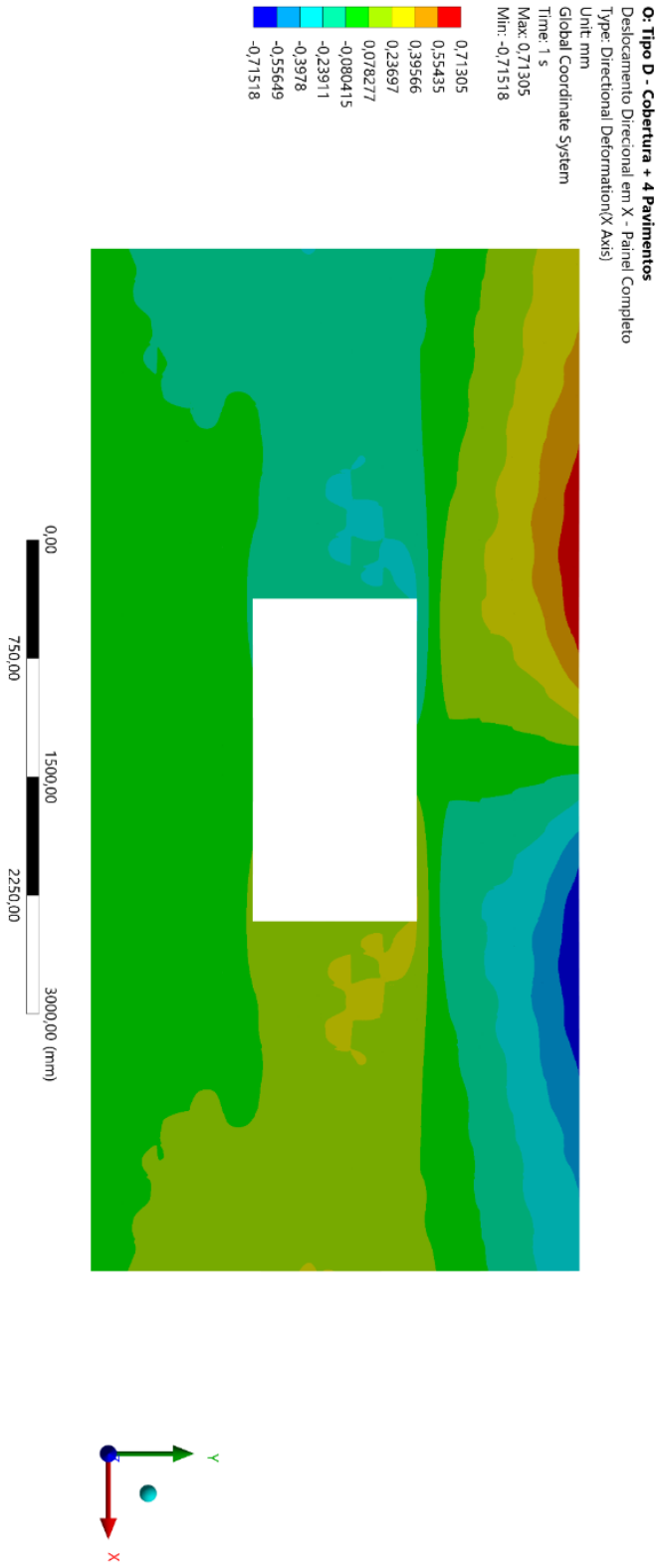
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.91 – Distribuição dos deslocamentos horizontais (Ux) no painel do Tipo C sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



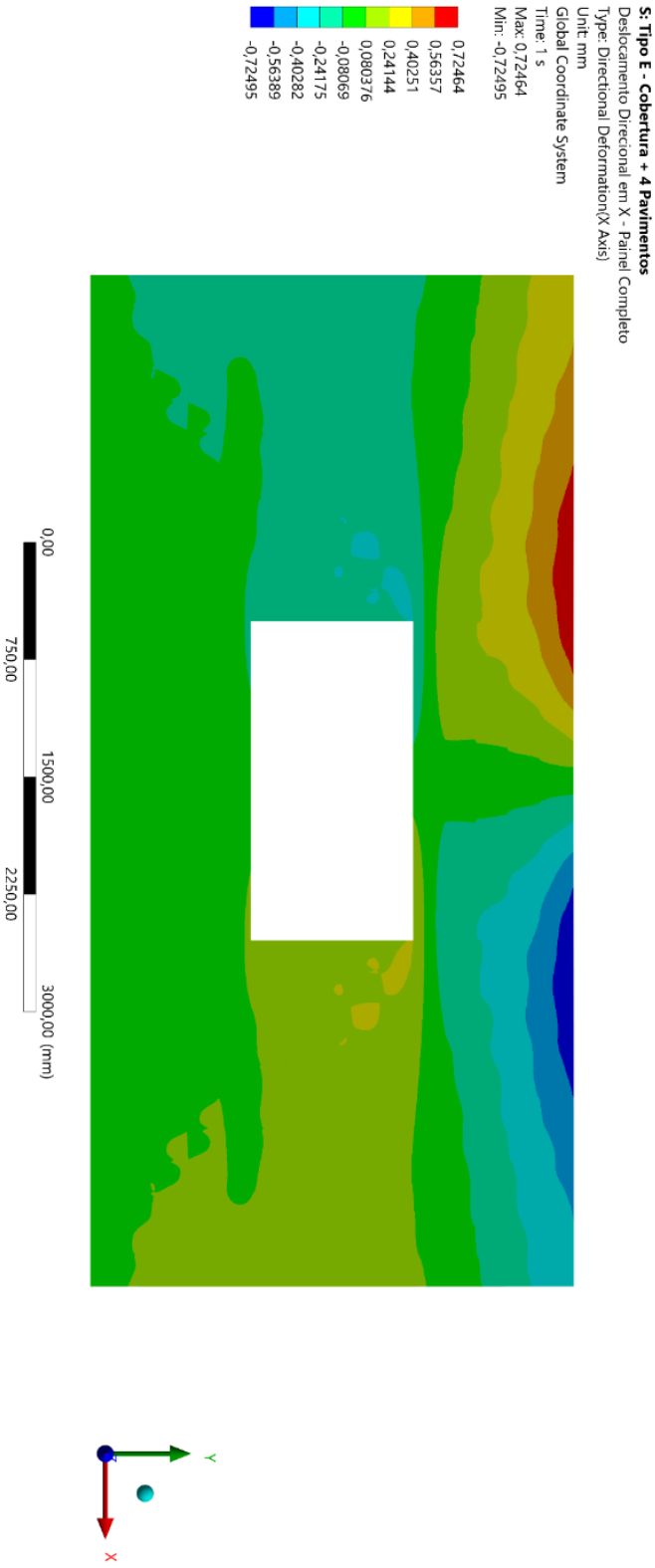
Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.92 – Distribuição dos deslocamentos horizontais (Ux) no painel do Tipo D sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026

Figura C.93 – Distribuição dos deslocamentos horizontais (Ux) no painel do Tipo E sob o carregamento correspondente à cobertura + 4 pavimentos



Fonte: Resultados da pesquisa, 2026