



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

COLEGIADO DE ENGENHARIA CIVIL

JULIE BARBOSA XAVIER

**SISTEMA CONSTRUTIVO DE PAINÉIS
MONOLÍTICOS DE EPS – DESCRIÇÃO E ESTUDO DE CASO**

VITÓRIA - ES

2023

JULIE BARBOSA XAVIER

SISTEMA CONSTRUTIVO DE PAINÉIS MONOLÍTICOS DE EPS – DESCRIÇÃO E ESTUDO DE CASO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Lorenzo Augusto Ruschi e Luchi.

VITÓRIA - ES

2023

JULIE BARBOSA XAVIER

SISTEMA CONSTRUTIVO DE PAINÉIS MONOLÍTICOS DE EPS – DESCRIÇÃO E ESTUDO DE CASO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Lorenzo Augusto Ruschi e Luchi.

Defendido e Aprovado em 26 de julho de 2023.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Lorenzo Augusto Ruschi e Luchi
Orientador
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Marcos Antônio Campos Rodrigues
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Ronaldo Pilar
Universidade Federal do Espírito Santo

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meu pais, Ivone e Adailton, por todos os ensinamentos, criação, amor, apoio, carinho, suporte e dedicação para que tudo sempre desse certo na minha vida.

Ao meu irmão, aos meus avós, tios, primos e familiares por todo incentivo e amor.

À minha avó Carmelita (in memoriam) por ter me ensinado o que é o amor incondicional, por todas as histórias e risadas e por todos os pedidos à Deus pela minha proteção.

Aos meus amigos e colegas por todo o companheirismo, partilha e bons momentos.

À Julia por sempre deixar tudo mais leve, por me incentivar e acreditar, mesmo quando eu não tinha forças. Por todas as risadas, os carinhos e os cuidados. Por toda a paciência, compreensão e amor.

Ao Adriano, por todos os ensinamentos, compreensão e suporte.

Ao meu professor e orientador, Lorenzo, por todo o suporte e atenção.

"Não posso mudar a direção do vento, mas posso ajustar as minhas velas para sempre alcançar o meu destino." - Jimmy Dean

RESUMO

O presente trabalho reúne informações acerca dos painéis monolíticos de EPS, dos materiais componentes e do método construtivo, realiza o estudo do comportamento estrutural dos painéis e das propriedades geométricas, propõe um método de dimensionamento baseado na NBR 6118:2014 e realiza concepções estruturais para uma edificação. Analisa estruturalmente os painéis dispostos como laje e como parede, estabelece os parâmetros de cálculo e faz uma verificação da resistência dos painéis de acordo com os esforços solicitantes. A utilização dos painéis influencia diretamente na melhora da qualidade das edificações, melhora do conforto térmico, redução do prazo de execução da obra, facilidade na execução e redução da produção de resíduos. Os resultados obtidos para a resistência do painel conforme a configuração utilizada foi satisfatória, com isso conclui-se que a utilização dos painéis como elemento estrutural nas edificações contribui para a melhoria dos desempenhos da edificação além de se mostrar um material resistente.

Palavras-chave: Painéis de EPS. Cálculo estrutural. Dimensionamento. Concepção estrutural.

ABSTRACT

This term paper gathers information regarding EPS sandwich panels, component materials and the constructive method, studies the structural behavior of the panels and the geometric properties, proposes a design method based on NBR 6118:2014 and creates structural conceptions for a building. Structurally analyzes the panels arranged as slab and as wall, stipulates the calculus parameters and does a verification of the panel's resistance according to the requesting loads. The use of panels directly influences the quality and thermal comfort improvement of buildings, reduction of the deadline for the execution and reduction of waste production. The results obtained for the panel's resistance according to the configuration used were satisfying, which indicates that the use of EPS sandwich panels as a structural element in buildings contributes to improve the performance and shows itself as a resistant material.

Keywords: EPS sandwich panels. Structural calculation. Design. Structural design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configuração do painel de EPS	14
Figura 2 – Painel Monolítico de EPS	20
Figura 3 – Comparativo entre alvenaria e parede sanduíche.....	23
Figura 4 – Características exigíveis para o EPS	26
Figura 5 – Características exigíveis para o EPS (continuação).....	26
Figura 6 – Requisitos para caracterização dos materiais de paredes de painel de EPS – Painel de EPS	27
Figura 7 – Requisitos para caracterização dos materiais de paredes de painel de EPS – Tela de aço	28
Figura 8 – Cobrimentos mínimos dos elementos	28
Figura 9 – Tipos de conectores	29
Figura 10 – Tipos de composição dos painéis	30
Figura 11 – Denominações estruturais do painel sanduíche.....	31
Figura 12 – Modos de falha dos conectores	31
Figura 13 – Malhas de reforço.....	32
Figura 14 – Requisitos para caracterização dos materiais de paredes de painel de EPS – Concreto, microconcreto ou argamassa projetados.....	33
Figura 15 – Requisitos para caracterização dos materiais de paredes de painel de EPS – Concreto, microconcreto ou argamassa projetados (continuação)	33
Figura 16 – Tipos de painéis	35
Figura 17 – Tipos de painéis (continuação)	35
Figura 18 – Fundação tipo Radier	38
Figura 19 – Fixação dos painéis nas barras de ancoragem.....	39
Figura 20 – Alinhamento e prumo dos painéis	39
Figura 21 – Detalhe dos reforços no canto das paredes e na janela	40
Figura 22 – Instalações elétricas e hidráulicas.....	41
Figura 23 – Projeção de argamassa nos painéis	41
Figura 24 – Encontro entre paredes e lajes (corte)	42
Figura 25 – Encontro entre paredes (em planta).....	43
Figura 26 – Aberturas de janelas (vista e cortes).....	43
Figura 27 – Ancoragem de parede na fundação (planta e corte).....	44
Figura 28 – Laje atuando como viga (corte).....	44

Figura 29 – Encontro de escada com laje e parede (corte).....	45
Figura 30 – Viga plana armada (corte).....	45
Figura 31 – Seção transversal de um painel de EPS.....	50
Figura 32 – Esquema geométrico da seção transversal do painel de EPS.....	50
Figura 33 – Valores do coeficiente $\gamma_f = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f3}$	53
Figura 34 – Valores do coeficiente γ_{f2}	53
Figura 35 – Valores dos coeficientes γ_c e γ_s	54
Figura 36 – Exemplo de edificação com painéis de EPS	55
Figura 37 – Valores do coeficiente adicional γ_n para pilares e pilares-parede.....	56
Figura 38 – Comprimento equivalente l_e para pilares	57
Figura 39 – Comprimento equivalente l_e para pilares-parede.....	58
Figura 40 – Limites para deslocamentos.....	60
Figura 41 – Domínios de estado-limite último de uma seção transversal	63
Figura 42 – Diagramas $\sigma \times \epsilon$, parábola-retângulo e retangular simplificado.....	63
Figura 43 – Flexo-compressão com grande excentricidade em seção de painel no domínio 2.....	65
Figura 44 – Flexo-compressão com pequena excentricidade em seção do painel de EPS com $d \leq x < h$	68
Figura 45 – Flexo-compressão com pequena excentricidade em seção do painel de EPS com $x \geq h$ e domínio 5.....	69
Figura 46 – Área de influência sobre os conectores	73
Figura 47 – Valores do coeficiente ξ em função do tempo	76
Figura 48 – Planta baixa do pavimento Térreo.....	77
Figura 49 – Plantas de formas das lajes da Cobertura e das paredes do Térreo	80
Figura 50 – Planta das reações de apoio das lajes em kN/m.....	82
Figura 51 – Planta de momentos fletores nas lajes em kN.m/m	84
Figura 52 – Esquema de corpo livre para paredes considerando um nível na edificação	85
Figura 53 – Cargas atuantes na parede P10	86
Figura 54 – Momento resistente do painel em função da altura da linha neutra.....	88
Figura 55 – Valores de M_{Rd} e N_{Rd} em função da altura da LN no domínio 4a.....	89
Figura 56 – Diagrama M-N do painel no domínio 4a.....	90

Figura 57 – Valores de M_{Rd} e N_{Rd} em função da altura da LN no domínio 5 e Reta b	90
Figura 58 – Diagrama M-N do painel no domínio 5 e Reta b	91
Figura 59 – Diagrama de interação M-N domínios 4a e 5 e Reta b	91
Figura 60 – Esquema de corpo livre das paredes considerando dois níveis na edificação	92
Figura 61 – Classificação das lajes de acordo com os apoios das bordas	94
Figura 62 – Momentos fletores nas lajes em planta	95
Figura 63 – Planta de formas da cobertura	96
Figura 64 – Armadura dos pilares	97
Figura 65 – Armadura das vigas	97
Figura 66 – Gráfico de Pizza dos custos referente à Conceção 01.....	99
Figura 67 – Gráfico de Pizza dos custos referente à Conceção 02.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características térmicas de materiais, elementos e componentes construtivos	21
Tabela 2 – Equações de compatibilidade.....	70
Tabela 3 – Momento de Inércia dos painéis.....	79
Tabela 4 – Peso próprio dos painéis	79
Tabela 5 – Valores de cálculo para as cargas atuantes na edificação.....	80
Tabela 6 – Valores das reações de apoio das lajes	81
Tabela 7 – Momentos fletores nas lajes.....	83
Tabela 8 – Cargas totais nas paredes.....	86
Tabela 9 – Cargas nas paredes	93
Tabela 10 – Cálculo dos momentos fletores nas lajes	95
Tabela 11 – Quantitativos de forma, aço e concreto	97
Tabela 12 – Custos da concepção 01	98
Tabela 13 – Custos da concepção 02	99
Tabela 14 – Itens utilizados para composição de custo	101

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Considerações Gerais	14
1.2	Justificativa	16
1.3	Objetivos	16
1.3.1	<i>Objetivo Geral</i>	16
1.3.2	<i>Objetivos Específicos</i>	17
1.4	Metodologia	17
1.5	Delimitações do Trabalho	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Materiais Componentes	23
2.1.1	<i>Poliestireno Expandido (EPS)</i>	23
2.1.2	<i>Aço</i>	27
2.1.2.1	Telas Eletrosoldadas	28
2.1.2.2	Conectores de cisalhamento	29
2.1.2.3	Malhas de Reforço	32
2.1.3	<i>Argamassa Estrutural Projetada</i>	32
2.2	Classificação dos Painéis	34
2.3	Vantagens e Desvantagens do Sistema	36
2.4	Método Construtivo	37
2.5	Detalhes Construtivos	42
3	CONCEITOS ESTRUTURAIS	46
3.1	Propriedades Mecânicas e Geométricas	48
3.1.1	<i>Argamassa</i>	48
3.1.2	<i>Aço</i>	49
3.1.3	<i>Inércia do Painel</i>	49

3.2	Coeficientes de Ponderação.....	52
3.2.1	<i>Coeficiente de Ponderação das Ações</i>	<i>52</i>
3.2.2	<i>Resistência de cálculo.....</i>	<i>54</i>
3.3	Limites para dimensões e deslocamentos	55
3.3.1	<i>Elementos verticais</i>	<i>55</i>
3.3.1.1	Índice de esbeltez e dispensa da análise dos efeitos de 2ª ordem	56
3.3.1.2	Cálculo dos efeitos de 2ª ordem	58
3.3.2	<i>Lajes.....</i>	<i>59</i>
3.3.3	<i>Deslocamentos-limites</i>	<i>60</i>
4	MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO	61
4.1	Estado Limite Último – Hipóteses de Cálculo	62
4.2	Flexão Composta.....	63
4.2.1	<i>Lajes.....</i>	<i>64</i>
4.2.2	<i>Pilares / Paredes</i>	<i>66</i>
4.3	Cortante em Vigas	70
4.4	Cortante em Lajes.....	73
4.5	Estado Limite de Serviço	74
4.5.1	<i>Flecha Imediata.....</i>	<i>75</i>
4.5.2	<i>Flecha diferida no tempo</i>	<i>75</i>
5	CONCEPÇÕES ESTRUTURAIS	77
5.1	Concepção estrutural de painéis monolíticos de EPS	78
5.1.1	<i>Cálculo dos Esforços Resistentes para Lajes</i>	<i>87</i>
5.1.2	<i>Cálculo dos Esforços Resistentes para Paredes.....</i>	<i>88</i>
5.2	Edificação com dois pavimentos	92
5.3	Mudança das restrições das lajes.....	93
5.4	Concepção de concreto armado	96

5.5	Comparação de custos	98
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	102
6.1	Sugestões Para Trabalhos Futuros	103
7	REFERÊNCIAS	104

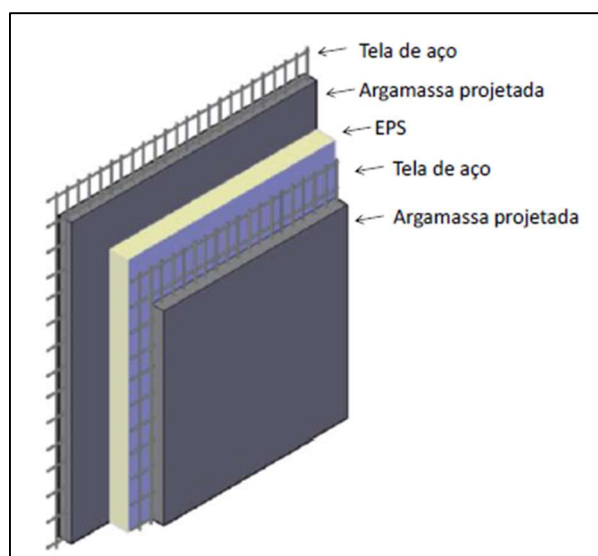
1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Nos últimos anos, no setor de construção civil, tem havido um crescente interesse dos profissionais e da sociedade em encontrar soluções construtivas que sejam econômicas, eficientes e sustentáveis. Como resultado dessa busca, diversos métodos construtivos e sistemas estruturais inovadores, como *drywall*, *light steel frame*, *wood frame*, entre outros, têm sido amplamente estudados e desenvolvidos.

Um desses métodos inovadores é o sistema de painéis monolíticos de poliestireno expandido (EPS). Esse sistema é definido pelo Sistema Nacional de Avaliações Técnicas de Produtos Inovadores na SINAT Nº11 como um "sistema de paredes, moldado no local, formado por painéis de EPS com argamassa, microconcreto ou concreto projetados sobre painel de EPS" (MINISTÉRIO DAS CIDADES, p.3, 2014).

Figura 1 – Configuração do painel de EPS



Fonte: SINAT nº 11, p.3, 2014.

Os painéis de EPS podem ser utilizados tanto como elementos de vedação, substituindo somente a alvenaria convencional, quanto como elementos estruturais, substituindo tanto a alvenaria quanto as vigas, lajes e pilares. As dimensões dos painéis dependem do fabricante e podem variar de 60 cm a 120 cm de largura e de 1,0 m a 3,0 m de altura, entretanto sua produção pode ser realizada de acordo com as dimensões especificadas no projeto, e na obra, apenas seu posicionamento e alinhamento são necessários, seguidos pela projeção da argamassa estrutural.

Um aspecto importante desse método construtivo a ser levado em consideração é a redução do desperdício de materiais durante a construção. Os painéis são produzidos em fábricas sob condições controladas, o que permite uma melhor utilização dos recursos, proporciona uma diminuição dos resíduos gerados no canteiro de obras e contribui para a sustentabilidade ambiental do empreendimento.

Além disso, os painéis monolíticos de EPS são mais leves em comparação com outros sistemas construtivos tradicionais, o que pode resultar em economias significativas nos custos da fundação e da superestrutura da edificação. Sua utilização pode proporcionar uma redução no tempo de execução da obra, uma vez que os painéis são pré-fabricados e chegam no canteiro de obra prontos para serem posicionados. Isso resulta em maior produtividade e agilidade na construção, reduzindo os prazos e os custos associados.

Com todas essas vantagens, os painéis monolíticos de EPS se destacam como uma solução sustentável, eficiente e economicamente viável para a construção civil, isso contribui para um setor mais consciente e responsável em relação ao meio ambiente.

Entretanto, a carência de estudos, testes e normas nacionais quanto ao comportamento estrutural dos painéis e a falta de uma metodologia e procedimento para o projeto são fatores limitantes para sua aplicação como sistema construtivo estrutural. Além de dificultar a expansão do método construtivo e encarecer os produtos relacionados.

Portanto, neste trabalho foram reunidas informações acerca dos materiais componentes desse sistema e do método construtivo, foram definidas as propriedades mecânicas e geométricas e os parâmetros de projeto utilizados para dimensionamento e detalhamento de elementos de painéis de EPS. Foi proposto um método de dimensionamento baseado na NBR 6118:2014 e foram realizadas duas concepções estruturais, uma em painéis de EPS e outra em concreto armado. Além do estudo da influência na mudança de restrições das lajes, análise das cargas em uma concepção com dois pavimentos e uma comparação de custos entre as concepções.

1.2 Justificativa

A construção civil consome de 40 a 70% dos recursos naturais (CBCS, 2009) e é responsável por mais da metade do volume de resíduos sólidos gerados em áreas urbanas, devido às atividades realizadas no setor que, em sua maioria, são geradoras de entulho (VGR, 2020). Portanto, é o impacto ambiental causado pela construção civil que motiva a realização deste trabalho.

Nesse contexto, é então necessário a utilização de materiais que otimizem o processo construtivo, reduzindo o consumo de recursos naturais e a geração de resíduos, sem comprometer os requisitos de desempenho (térmico, acústico e lumínico), conforto, funcionalidade, segurança e durabilidade exigidos pela ABNT NBR 15575:2021, e sem causar um aumento significativo nos custos de construção.

Os painéis monolíticos de EPS surgem como uma solução promissora para atender a todos esses requisitos, por diversas razões. Eles são fabricados industrialmente, possuem dimensões maiores em comparação com blocos cerâmicos ou de concreto, possuem baixo peso próprio, o núcleo é composto por um material 100% reciclável e geram poucos resíduos no canteiro de obras. Esses e outros fatores têm um impacto direto na produtividade e no tempo de execução diminuindo o custo da construção.

Ao contrário de outras tecnologias construtivas inovadoras, esse método apresenta semelhanças significativas com os métodos convencionais de alvenaria, não exigindo uma extensa capacitação da mão de obra, isso facilita sua adoção no mercado da construção. A aplicação da argamassa estrutural nos painéis pode ser comparada à aplicação de reboco e a instalação dos painéis requer apenas o conhecimento de prumo e nível, o mesmo exigido para as alvenarias. Após a aplicação de argamassa, todas as outras etapas permanecem praticamente idênticas às tradicionais.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral reunir informações acerca do sistema construtivo de painéis monolíticos de EPS e dos seus materiais componentes, descrever o método construtivo, avaliar as vantagens e desvantagens, definir as

propriedades geométricas e mecânicas, definir os parâmetros de projetos, bem como propor um método de dimensionamento e realizar uma concepção estrutural.

1.3.2 *Objetivos Específicos*

- Reunir informações acerca das propriedades mecânicas dos painéis;
- Propor método de dimensionamento;
- Realizar proposta de concepção estrutural em EPS de edificação com um pavimento;
- Realizar proposta de concepção estrutural em EPS de edificação com dois pavimentos;
- Realizar proposta de concepção estrutural em concreto armado;

1.4 Metodologia

Para atingir os objetivos listados anteriormente serão realizadas as seguintes tarefas:

- Estudo bibliográfico do método construtivo de painéis monolíticos;
- Resumo das características e propriedades dos painéis, tais como resistência, módulo de elasticidade, diagramas tensão-deformação etc.;
- Desenvolvimento de cálculos estruturais;
- Desenvolvimento de modelos estruturais.

1.5 Delimitações do Trabalho

Por ser um tema recente no âmbito da construção civil, não há muitos métodos de análise estrutural no mercado e muitas vezes não são realizados projetos estruturais por se tratarem, em sua maioria, de edificações térreas. Com a falta de normas, é através de ensaios de laboratório que se demonstra e se verifica as hipóteses de projeto consideradas e as teorias de análises realizadas, porém os ensaios aumentam o custo final da obra, desencorajando muitas vezes o uso desse método construtivo.

A falta de documentos técnicos que descrevem, auxiliam, determinam parâmetros de cálculo e regulamentam a utilização dos painéis de EPS como elementos estruturais pode resultar em inseguranças na utilização do método construtivo por parte dos profissionais e dos proprietários, podendo também ocasionar projetos mal

dimensionados, em estruturas instáveis, desconfiança e resistência por parte dos órgãos reguladores além de dificuldade na obtenção de seguros e financiamentos.

Para utilização dos painéis de EPS como elementos estruturais é necessário realizar a adaptação de normas e outros métodos construtivos que de alguma forma se assemelham a esse sistema, trazendo assim incertezas e variáveis desconhecidas que podem afetar economicamente e patologicamente a edificação, como por exemplo painéis defeituosos, resistência estrutural do painel não condizente com os esforços e/ou cargas, edificação com patologias, entre outros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

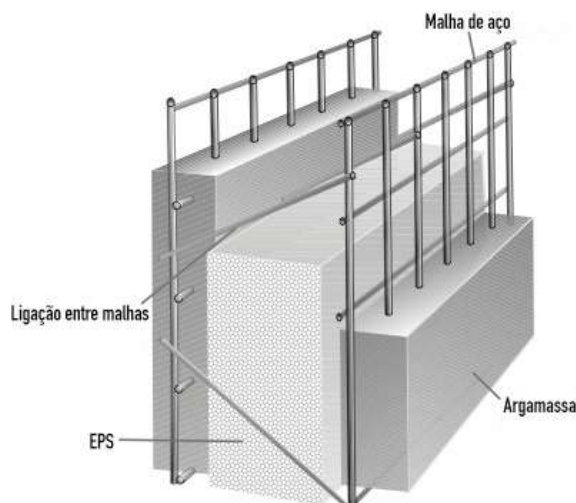
Em um contexto em que cada vez mais se preza pela conservação do meio ambiente e pela redução de resíduos, a procura por sistemas construtivos inovadores é crescente. Aliado à proteção do meio ambiente está a necessidade de atender aos requisitos de desempenho e de qualidade sem influenciar de forma negativa nas características finais da edificação e nos custos da construção. Na última década os painéis monolíticos de EPS vêm se destacando no país por atender a esses quesitos.

Em 2014 foi publicado a Diretriz *SINAT nº 011: Paredes, moldadas no local, constituídas por componentes de poliestireno expandido (EPS), aço e argamassa, microconcreto ou concreto*. Diretriz essa que se aplica “somente para paredes com função estrutural (internas e externas), destinadas a casas térreas ou sobrados, isolados e geminados, casas sobrepostas e edificações multifamiliares de dois pavimentos (térreo mais um pavimento superior).” (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2014).

Segundo Alves (2015) o sistema construtivo de painéis monolíticos de EPS, tem origem na Itália por volta de 1980, na busca por uma estrutura monolítica resistente a terremotos e com bom isolamento térmico, devido às temperaturas extremas da região, invernos rigorosos e verões de altas temperaturas.

Os painéis são constituídos por placas de EPS, com telas metálicas eletrosoldadas nas duas faces e travadas entre si, com posterior projeção de argamassa estrutural em cada face (Figura 2). São elementos autoportantes, ou seja, não necessitam de elementos estruturais para ter estabilidade após sua finalização no canteiro.

Figura 2 – Paineis Monolíticos de EPS



Fonte: Polisopor, 2023.

Os painéis são industrializados, ou seja, produzidos fora do canteiro, sendo, portanto, um produto de alta qualidade, visto que o controle tecnológico nas indústrias é muito maior do que nos canteiros de obras. Segundo Fürh (2017), ao substituir as alvenarias convencionais de lajota cerâmica por painéis de EPS, há uma redução do tempo gasto na obra devido às grandes dimensões dos painéis e à simplicidade de montagem, fato que afeta diretamente no prazo total da obra e no custo.

A produção dos painéis na indústria influencia diretamente na diminuição da produção de resíduos, pois as peças são fabricadas de acordo com a demanda e podem ser personalizadas. Como o EPS é um material 100% reciclável, todo o resíduo produzido durante a produção das peças pode ser utilizado novamente no processo produtivo.

Da indústria, as peças seguem para o canteiro onde são apenas posicionadas e encaixadas diminuindo consideravelmente a geração de resíduo em comparação com alvenarias de blocos cerâmicos e de concreto. Durante a execução das instalações elétricas e hidrossanitárias nos painéis de EPS não há produção de resíduo, pois basta derreter o painel no local desejado com um soprador térmico.

Além da denominação 'Painéis monolíticos de EPS', frequentemente são encontradas outras denominações para se referir a esse sistema, como por exemplo painéis sanduíche de EPS, painéis autoportantes, painéis de EPS, parede sanduíche

em argamassa armada com núcleo de EPS, paredes em EPS, entre outros. Em artigos em inglês foram encontrados os seguintes termos: *EPS core reinforced concrete sandwich panels, structural insulated panels (SIP), EPS sandwich panels, insulated sandwich panels, precast insulated sandwich wall panels, sandwich panels composed by concrete and EPS, precast foamed concrete sandwich panels.*

Medeiros (2017), ao analisar o desempenho térmico de uma parede sanduíche utilizando a ABNT NBR 15220:2005 – Desempenho térmico de edificações (Zona 8), concluiu que a parede sanduíche atende aos requisitos da Norma. Foi observado que a parede de alvenaria de lajotas cerâmicas com características descritas na Figura 3, não atende à Norma quanto ao valor de atraso térmico, sendo assim um sistema ineficiente. Na Tabela 1 estão as definições e formulações utilizadas para referida comparação.

Tabela 1 – Características térmicas de materiais, elementos e componentes construtivos

Grandeza	Definição	Símbolo	Unidade
Transmitância térmica ou Coeficiente global de transferência de calor	Inverso da resistência térmica total ¹⁾	U	W / (m ² .K)
Capacidade térmica de componentes	Quociente da capacidade térmica de um componente pela sua área ²⁾	C _T	J / (m ² .K)
Atraso térmico	Tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor ³⁾	φ	h
<p>1) Resistência térmica total (R_T): Somatório do conjunto de resistências térmicas correspondentes às camadas de um elemento ou componente, incluindo as resistências superficiais interna e externa.</p> $R_T = R_{si} + R_t + R_{se} \text{ [(m}^2\text{.K) / W]}$ <p>Onde: R_{si}: Resistência superficial interna R_{se}: Resistência superficial externa R_t: Resistência superficial núcleo</p>			

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

e : espessura da camada (m)

λ : condutividade térmica do material (W / m.K)

Quanto menor o valor da transmitância térmica menor é a quantidade de calor trocada entre os ambientes interno e externo.

2) Capacidade térmica (C) é a quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema (J / K)

$$C_T = \sum_{i=1}^n e_i c_i \rho_i \text{ [J / (m}^2 \cdot \text{K)]}$$

Onde: e_i : espessura da i-ésima camada (m)

c_i : calor específico da i-ésima camada (J / kg.K)

ρ_i : densidade de massa aparente da i-ésima camada (kg / m³)

Quanto maior a capacidade térmica do material menor é a variação da temperatura no ambiente interno proveniente das mudanças no ambiente externo.

3) O atraso térmico depende da capacidade térmica do componente construtivo e da ordem em que as camadas estão dispostas.

$$\varphi = 1,382 \times R_T \sqrt{B_1 + B_2} \text{ (h)}$$

Onde: R_T : resistência térmica total [(m².K) / W]

$$B_1 = 0,226 \times \frac{B_0}{R_T}$$

$$B_2 = 0,205 \times \left(\frac{(\lambda \times \rho \times c)_{ext}}{R_T} \right) \times \left(R_{ext} - \frac{R_T - R_{ext}}{10} \right)$$

$$B_0 = C_T - (e \times \rho \times c)_{ext}$$

ext: camada externa do componente

Na prática quanto maior o atraso térmico maior é o isolamento do material.

Fonte: ABNT NBR 15220:2005 p.2 e 4 (adaptada)

Os valores obtidos por Medeiros (2017), de transmitância térmica (U), capacidade térmica de componentes (C_{Tp}) e de atraso térmico (φ) de uma parede sanduíche e de uma alvenaria de tijolo cerâmico, além dos valores de referência da NBR 15220:2005 para uma edificação na Zona 8 estão descritos na Figura 3.

Figura 3 – Comparativo entre alvenaria e parede sanduíche

Descrição	U [W/(m²K)]	C_{Tp} [kJ/(m²K)]	φ [h]
Parede sanduíche com painel armado e núcleo de EPS, revestido com 2 camadas de argamassa armada. Espessura do EPS: 6 cm Espessura da argamassa (camada): 2 cm Espessura total da parede: 10 cm	0,59	81,28	5,50
Parede de tijolos 8 furos quadrados, assentados na menor dimensão. Dimensões do tijolo: 9,0 x 19,0 x 19,0 cm Espessura da argamassa de assentamento: 1 cm Espessura da argamassa de emboço (camada): 2,5 cm Espessura total da parede: 14 cm	2,49	158,00	3,30
NBR – 15220 (Zona 8)	$\leq 3,00$	$\geq 45,00$	$\geq 4,30$

Fonte: Medeiros, 2017.

Além da análise do desempenho térmico, Medeiros (2017) realizou ensaios para avaliar o comportamento estrutural dos painéis baseado na NBR 15575-2:2013 e na NBR 15575-4:2013 e pôde observar que tanto nos ensaios de corpo mole quanto nos ensaios de corpo duro os painéis monolíticos de EPS possuem capacidade de suportar impactos externos, tendo como resultado valores de deslocamento inferiores ao estabelecidos em Norma e atingindo níveis satisfatórios de desempenho.

2.1 Materiais Componentes

2.1.1 Poliestireno Expandido (EPS)

O EPS, popularmente conhecido como Isopor[®], é um plástico celular rígido obtido através da polimerização do estireno em água, formando pérolas de até 3 milímetros de diâmetro que são expandidas por meio de vapor, aumentando seu tamanho original em até 50 vezes. O produto resultante dessa expansão é um material composto por 98% de ar e apenas 2% de poliestireno. Trata-se de um material inerte, inodoro, atóxico, 100% reciclável e reaproveitável, com resistência mecânica considerável, de extrema leveza e com propriedades isolantes. (ABRAPEX, 2006)

O poliestireno expandido possui inúmeras aplicações na conjuntura atual, sendo amplamente utilizado na indústria de embalagens, de bebidas, utilitários, eletrônicos e fármacos. Na construção civil o EPS vem sendo utilizado como enchimento em lajes

treliçadas, como enchimento para rebaixos, vazios ou detalhes em fachadas, como telhas, como geossintético em aterros sobre solos moles, entre outros (FÜRHR, 2017).

O EPS possui elevado isolamento térmico e segundo Bertoldi (2007), a espessura equivalente do EPS utilizado na parede com painel de EPS, para se ter um mesmo valor de transmitância térmica, seria menor do que 1/3 da espessura do tijolo cerâmico utilizado na alvenaria convencional, ou seja, se uma parede de bloco cerâmico tem 15 cm de espessura, seria necessário menos de 5 cm de espessura de EPS para se ter o mesmo valor de transmitância térmica.

Todos os tipos de EPS são recicláveis, desde que não contenham contaminantes como gesso, terra, cola ou tinta. Assim, é de extremo interesse das empresas do ramo recolher os resíduos do material, pois ele pode lhe ser útil na produção de novos produtos, reduzindo seu custo com matéria prima (AECWEB, 2020).

Segundo Souza (2009) apud Genol (2021) o EPS é um material não higroscópico, o que significa que ele não interage com a água, isso reduz significativamente a probabilidade de ocorrência de infiltrações nas edificações. Além disso, como outros plásticos, o EPS não é suscetível ao consumo por microrganismos e não se degrada. Essa característica confere resistência à proliferação de cupins, mofos e bolor.

Esse material é facilmente cortado e por isso possui enorme versatilidade de formatos e é capaz de atender às diversas geometrias exigidas em projetos. Além de trazer facilidade à obra na etapa de instalação dos equipamentos elétricos e hidráulicos, em que basta utilizar um soprador térmico para derreter o EPS no local desejado da abertura.

Quanto às propriedades químicas, segundo Pérez (2005), o EPS:

[...] não é destruído pela ação prolongada de substâncias como solução salina (água do mar), sabões, alvejantes, ácidos diluídos, álcoois (metanol, etanol) e soluções alcalinas. Já o EPS contrai ou dissolve com a ação de substâncias como ácidos 100% concentrados (sem água), solventes orgânicos (acetona, ésteres), óleo diesel e combustíveis. (p.40)

O painel antes da aplicação de argamassa tem como característica marcante seu baixo peso próprio, visto que o EPS é um material extremamente leve. Um bloco cerâmico de dimensões 9x19x39 cm tem peso igual à 5,29 kg, enquanto um painel de

dimensões 9x300x100 cm pesa 15,19 kg, ou seja, um painel de EPS com as telas eletrosoldadas equivale, em peso, a 2,87 blocos cerâmicos.

Para uma alvenaria de painéis de EPS com uma placa de EPS, com densidade de 22 kg/m^3 e 9 cm de espessura e com malhas de aço nas duas faces de $7,5 \times 7,5$ cm, diâmetro 2,5 mm e peso próprio de $1,03 \text{ kg/m}^2$. Revestida por uma camada de argamassa de 3,5 cm de cada lado com peso próprio de 21 kN/m^3 . Utilizando $9,81 \text{ m/s}^2$ como a aceleração da gravidade, e dividindo o peso próprio da argamassa por esse valor e fazendo a conversão de unidades, obtém-se que o peso total do painel é de $151,04 \text{ kg/m}^2$.

Para se ter uma parede aproximadamente de mesma espessura, 16 cm, será utilizado o bloco cerâmico vazado de 11,5 cm e com 2 cm de revestimento em cada face. Pela NBR 6120:2019, essa alvenaria de vedação possui $1,9 \text{ kN/m}^2$ de peso, utilizando $9,81 \text{ m/s}^2$ como aceleração da gravidade têm-se que seu peso total é de $193,68 \text{ kg/m}^2$.

Nesta comparação, o painel de EPS tem cerca de 78% do peso da alvenaria de bloco cerâmico vazado. Observa-se que o peso de uma alvenaria acabada com painel de EPS não é tão inferior ao peso de uma alvenaria de bloco cerâmico com reboco, a justificativa seria a espessura da camada de argamassa utilizada no painel, visto que ele é um elemento estrutural e sua armadura necessita de cobrimento. Portanto, ao utilizar os painéis de EPS somente como vedação, não necessariamente a estrutura se tornará mais leve dependendo das espessuras das paredes.

Porém, quando os painéis de EPS substituem as vigas e os pilares da edificação, tem-se uma significativa redução no peso total da edificação, pois o concreto armado possui peso específico de 25 kN/m^3 segundo a NBR 6120:2019, isso equivale a aproximadamente 200 kg/m^2 de área construída. Além da consequente redução na utilização de fôrmas e no uso de escoramento durante a execução da estrutura.

Ao comparar um painel com espessura de 15 cm, com revestidos de camadas de argamassas de 3,5 cm de cada lado com um pilar de concreto armado também de 15 cm, têm-se que um painel com 1 metro de largura possui o mesmo peso que um pilar de 45 cm de largura.

A ABNT NBR 11.752 — Materiais Celulares de Poliestireno para Isolamento Térmico na Construção Civil e Refrigeração Industrial — Especificação tem como escopo “estabelecer os requisitos para o uso de materiais celulares de poliestireno para isolamento térmico na construção civil e refrigeração estrutural nas temperaturas entre -54 °C e +74 °C” (ABNT, 2016, p.1).

Nas figuras 4 e 5 encontra-se a Tabela 1 – Características exigíveis para o poliestireno expandido retirada da NBR 11752:2016, em que estão descritos os índices de resistência mínima à flexão, tensão mínima por compressão, densidade mínima, permeância máxima ao vapor d’água, entre outras características dos painéis e suas classificações.

Figura 4 – Características exigíveis para o EPS

Propriedades	Métodos de ensaio	Unidade	EPS	EPS	EPS	EPS	EPS	EPS	EPS	EPS
			1	2	3	4	5	6	7	8
Densidade mínima	ABNT NBR 11949	kg/m ³	10	12	15	18	22	29	38	48
Condutividade térmica aparente máxima, (24 °C)	ASTM C 177 ou ASTM C 518	W/(m.K)	0,046	0,046	0,040	0,038	0,036	0,034	0,034	0,033
Tensão mínima por compressão com deformação de 10 %	ABNT NBR 8082	kPa	35	35	69	90	104	173	276	414
Resistência mínima à flexão	ASTM C 203	kPa	50	70	173	208	240	345	414	517
Absorção máxima de água	ASTM C 272	% em volume	6	4	4	3	3	2	2	2

Fonte: ABNT NBR 11.752, p.2, 2016.

Figura 5 – Características exigíveis para o EPS (continuação)

Propriedades	Métodos de ensaio	Unidade	EPS	EPS	EPS	EPS	EPS	EPS	EPS	EPS
			1	2	3	4	5	6	7	8
Permeância máxima ao vapor da água em 25,4 mm	ASTM E 96/ E 96M	ng/Pa.s.m ²	345	287	287	201	201	143	143	143
Estabilidade dimensional	ASTM D 2126	%	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Ignitabilidade	EN ISO 11925-2	Fs ≤ 150 mm em 20 s								

Fonte: ABNT NBR 11.752, p.3, 2016.

A SINAT nº 11 aconselha a utilização do painel de classificação Tipo 4 ou superior para paredes com função estrutural como mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Requisitos para caracterização dos materiais de paredes de painel de EPS – Painel de EPS

Item	Requisitos	Indicador de conformidade
A	Painel de EPS	
A.1	Caracterização da face do painel (plana/ondulada/outros)	Informação que deve constar do projeto e do DATEC específico
A.2	Espessura do painel	Informação que deve constar do projeto e do DATEC específico
A.3	Classificação quanto ao uso de retardante a chamas	Classe F, conforme ABNT NBR 11752
A.4	Massa específica aparente (nominal e mínima)	(Tipo 4 ou superior, conforme NBR 11752)
A.5	Tensão por compressão com 10% de deformação	Tipo 4 ou superior, conforme ABNT NBR 11752
A.6	Resistência mínima à flexão	Tipo 4 ou superior, conforme NBR 11752
A.7	Absorção de água (g/cm ² .100)	Tipo 4 ou superior, conforme NBR 11752
A.8	Absorção de água total (% , em massa)	Informação que deve constar do projeto e do DATEC específico
A.9	Permeabilidade ao vapor d'água	Tipo 4 ou superior, conforme NBR 11752
A.10	Coefficiente de condutividade térmica máxima (23°C)	Tipo 4 ou superior, conforme NBR 11752

Fonte: SINAT nº 11, p.13, 2014.

Além da SINAT nº 11 (2014) e da NBR 11752:2016 recentemente foi publicada a Norma ABNT NBR 16866:2020 – *Poliestireno expandido (EPS) – Determinação das propriedades – Métodos* que estabelece os procedimentos e métodos de cálculos para determinação das propriedades do EPS como densidade, absorção de água, resistência à compressão, resistência à flexão e índice de oxigênio.

Visto que o painel monolítico é produzido na indústria, cabe ao fornecedor do painel garantir que o EPS utilizado atenda aos requisitos da norma e cabe ao consumidor exigir que o produto a ser adquirido esteja dentro das exigências de Norma, de acordo com seu devido fim.

2.1.2 Aço

O aço que compõem os painéis de EPS podem ser subdivididos em: telas eletrosoldadas, conectores de cisalhamento e malhas de reforço.

2.1.2.1 Telas Eletrosoldadas

Segundo Alves (2015) a tela de aço ideal a ser utilizada nos painéis são telas eletrosoldadas com aço de alta resistência, com limite de escoamento f_{yk} maior que 600 MPa, do tipo comum, galvanizado a quente, zincado e inoxidável. As telas devem ser dimensionadas de acordo com os carregamentos e solicitações obtidos no projeto estrutural e de acordo com as especificações de normas, como a SINAT nº 11.

A SINAT nº 11 determina os requisitos para a tela de aço para utilização nos painéis de EPS, como mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Requisitos para caracterização dos materiais de paredes de painel de EPS – Tela de aço

B	Tela de aço	
B.1	Especificação das telas de aço (tipo, diâmetro, quantidade, etc)	Informação que deve constar do projeto e do DATEC específico, sendo que as telas soldadas devem atender à ABNT NBR 7481
B.2	Resistência de escoamento	Informação que deve constar do projeto e do DATEC específico
B.3	Proteção contra-corrosão (tipo, espessura, etc)	No caso de concreto ou microconcreto projetados, as telas devem ter galvanização de no mínimo 50g/m ² de zinco. No caso de argamassa projetada, as telas precisam ser em aço inoxidável ou galvanizadas com mínimo de 20 µm (140g/m ²) de zinco. Em ambos os casos, deve-se atender às especificações da NBR 6118, conforme item 3.6.5 desse documento (cobrimento mínimo, resistência à compressão, relação a/c).

Fonte: SINAT nº 11, p.13, 2014.

As telas de aço devem ser dimensionadas de acordo com a NBR 6118:2014 devendo obedecer aos requisitos estabelecidos quanto a ancoragem, cobrimento, traspasse entre outros. No item 3.6.5 da SINAT nº 11 estão descritos os cobrimentos mínimos de acordo com a classe de agressividade ambiental da edificação, conforme especificado na Figura 8.

Figura 8 – Cobrimentos mínimos dos elementos

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado comum	Laje	20	25	35	45
	Parede estrutural	25	30	40	50

Nota 1: Classe de agressividade ambiental segundo Tabela 6.1 da ABNT NBR 6118.

Nota 2: Os valores desta Tabela são referentes ao cobrimento nominal, considerando uma variação no cobrimento, Δc , de 10mm.

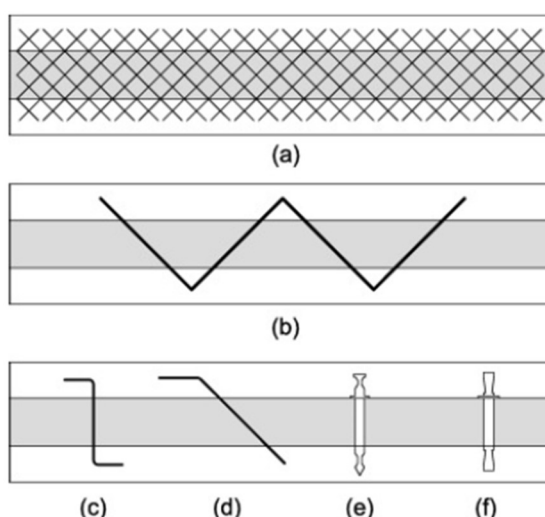
Fonte: SINAT nº 11, p.13, 2014.

2.1.2.2 Conectores de cisalhamento

Os conectores de cisalhamento são peças utilizadas para unir as camadas de argamassa de cada face, fornecendo assim ao painel um comportamento estrutural como se fosse um elemento único (AMRAN, *et al.*, 2020).

Em seu estudo sobre a resposta à flexão de paredes sanduíche Tomlinson e Fam (2016) descrevem que existem conectores de vários tipos e formatos, na Figura 9 tem-se alguns exemplos de tipos de conectores, (a) malha de polímero reforçado com fibra (FRP), (b) treliça metálica ou de FRP, (c) pino metálico, (d) barra dobrada metálica ou de FRP, (e) pino plástico e (f) pino de FRP.

Figura 9 – Tipos de conectores



Fonte: Tomlinson e Fam, p.253, 2006

Ainda não existem especificações de normas brasileiras, porém diversos estudos vêm sendo feitos devido à influência dos conectores na resistência do painel e na transferência do esforço entre as duas telas e as camadas de argamassa.

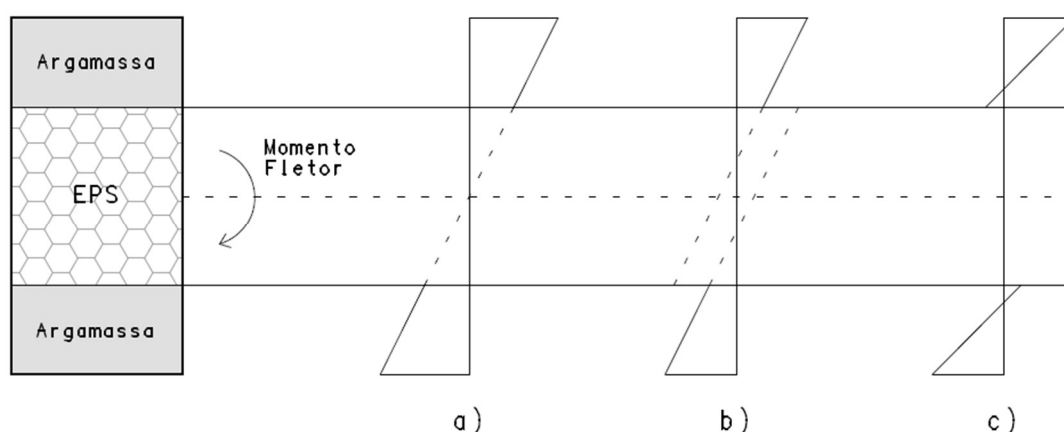
Segundo Amran, *et al.* (2020) a transferência da força cortante pelo sistema de conectores de cisalhamento não é baseada no material do conector e sim na sua disposição longitudinal e transversal ao painel. A disposição dos conectores ajuda a assegurar ao painel ótima eficiência estrutural e promover outros benefícios como redução na fragilidade, aumento de rigidez e de resistência, controle de abertura de fissuras e redução na deflexão.

Segundo a MK2 (2009) para que as duas camadas de concreto projetado trabalhem juntas, devem ser dispostos 80 conectores de aço de 3 mm de diâmetro a cada metro quadrado de superfície do painel. Os conectores devem ser soldados às telas de cada face do painel.

A ação composta entre as duas camadas de argamassa do painel é o principal objetivo dos conectores mecânicos de cisalhamento e o grau de composição do painel é definido por sua capacidade de transmitir os momentos e as cargas de cisalhamento. Vários fatores influenciam na incorporação das camadas de argamassa, como o tipo e o formato do EPS, a quantidade, diâmetro e espaçamento dos conectores de cisalhamento além das especificações da argamassa (AMRAN, *et al.*, 2020).

Segundo Amran, *et al.* (2020) as típicas composições sob flexão dos painéis estão mostradas na Figura 10 e são divididos em: a) sistema totalmente composto, b) parcialmente composto e c) não composto.

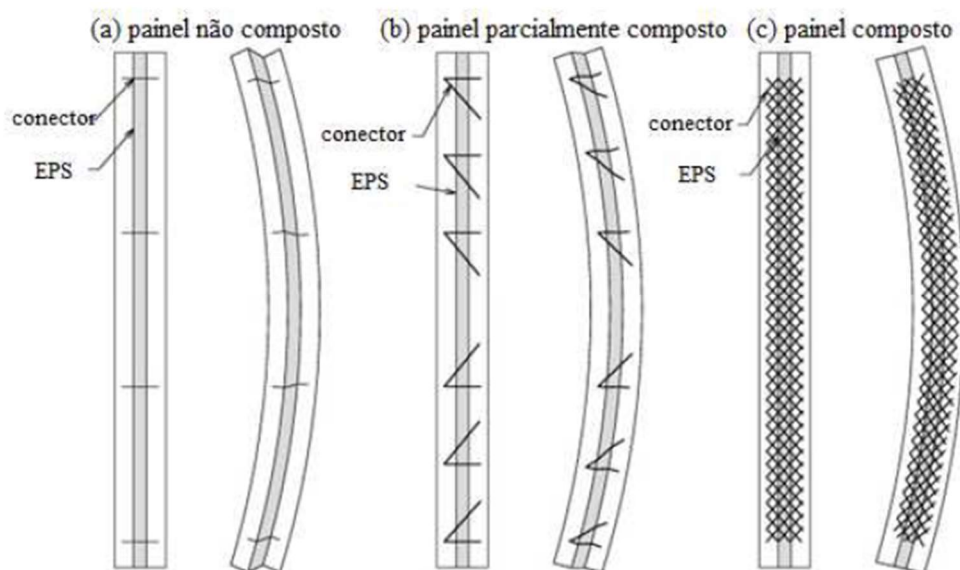
Figura 10 – Tipos de composição dos painéis



Fonte: Amran, *et al.*, 2020, adaptada.

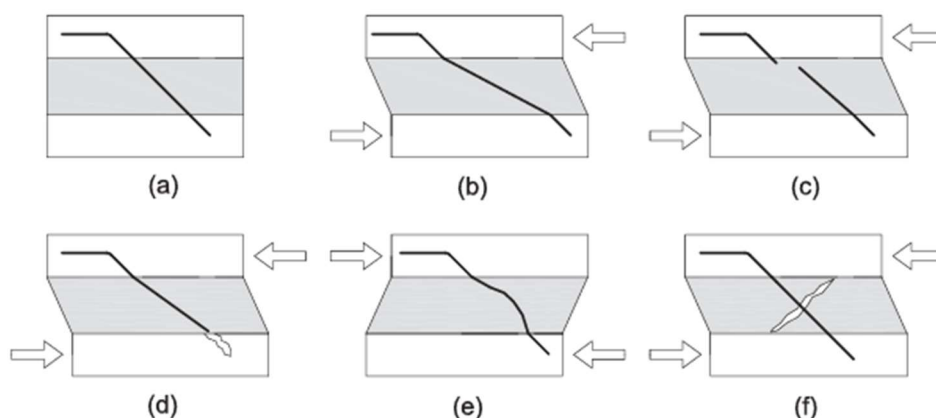
Tomlinson e Fam (2016) também utilizam a mesma nomenclatura para os painéis de acordo com suas composições sob flexão, como mostrado na Figura 11 e descrevem os possíveis modos de falha dos conectores, como mostrado na Figura 12 onde (a) seção indeformada, (b) escoamento do conector (somente metálico), (c) ruptura do conector, (d) arrancamento do conector, (e) flambagem do conector e (f) ruptura do EPS.

Figura 11 – Denominações estruturais do painel sanduíche.



Fonte: Tomlinson, Fam, p.253, 2006, adaptada.

Figura 12 – Modos de falha dos conectores



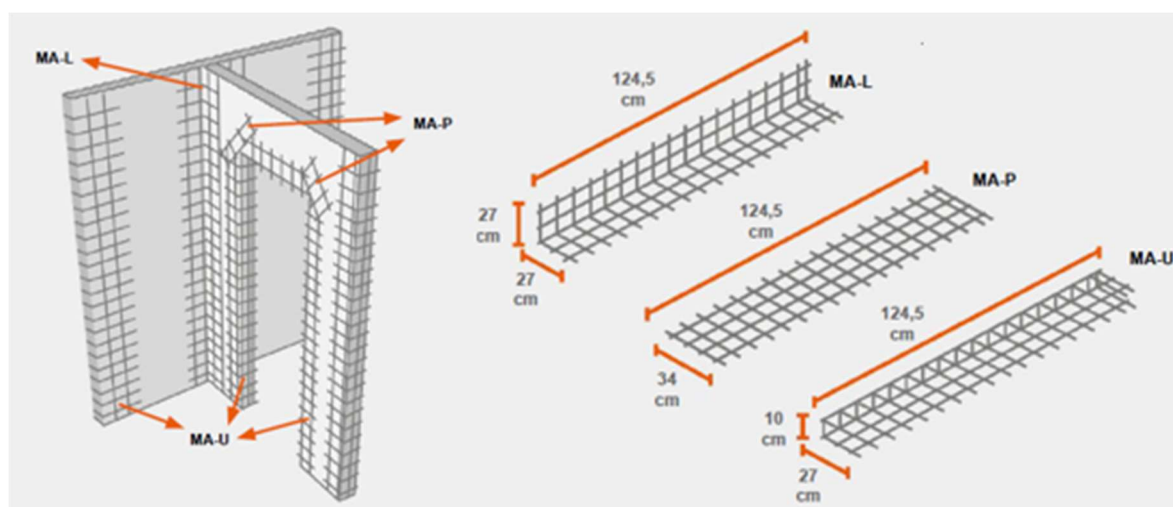
Fonte: Tomlinson, Fam (2016) p.254.

Após analisar o comportamento dos conectores Tomlinson e Fam (2016) concluem que a resistência e a rigidez do painel estão diretamente relacionadas com o aumento do diâmetro do conector e com a redução do espaço entre eles. Através dos parâmetros investigados também concluem que os picos de carga dos painéis com conectores de aço são governados pela flexão, onde a malha se rompe após o escoamento dos conectores.

2.1.2.3 Malhas de Reforço

São utilizadas malhas de reforço em encontros de paredes e próximo de aberturas com o intuito de dar continuidade e reforçar a malha estrutural. As malhas são fixadas aos painéis por meio de arames e podem ser planas (MA-P), em formato L (MA-L) ou em formato U (MA-U) como mostrado na Figura 13. Devem ser realizados traspasses e ancoragens de forma a garantir a transferência de esforços entre malhas.

Figura 13 – Malhas de reforço



Fonte: Monolite, 2022, adaptada.

2.1.3 Argamassa Estrutural Projetada

A NBR 11173:1990 define argamassa como uma “mistura homogênea composta de cimento Portland, agregado miúdo e água, podendo eventualmente conter adições e aditivos que melhorem suas propriedades.”

O tipo de cimento, o traço da mistura e a relação água/cimento (a/c) para produção da argamassa deve ser escolhido de tal forma a alcançar o valor de resistência característica à compressão (f_{ck}) informado no projeto estrutural. A espessura da camada de argamassa estrutural também deve ser definida em projeto estrutural, com espessura mínima suficiente para garantir o cobrimento da armadura conforme previsto na SINAT nº 11 e na NBR 6118:2014.

Os requisitos necessários para argamassa, concreto ou microconcreto descritos pela SINAT nº são mostrados nas figuras 14 e 15.

Figura 14 – Requisitos para caracterização dos materiais de paredes de painel de EPS – Concreto, microconcreto ou argamassa projetados

C	Concreto, microconcreto ou argamassa projetados	
C.1	Espessura da camada	Informação que deve constar do projeto e do DATEC específico, considerando um valor mínimo de cobrimento da armadura conforme a NBR 6118.
C.2	Resistência à compressão axial	Conforme especificação de projeto, considerando um mínimo de resistência conforme a NBR 6118.
C.3	Variação dimensional aos 28 dias (retração ou expansão linear)	Informação que deve constar do DATEC específico

Fonte: SINAT nº 11 (2014), p.13.

Figura 15 – Requisitos para caracterização dos materiais de paredes de painel de EPS – Concreto, microconcreto ou argamassa projetados (continuação)

C.4	Consistência (estado fresco)	Conforme especificação de projeto e constar do DATEC
C.5	Massa específica (estado endurecido)	Conforme especificação de projeto
C.6	Absorção de água (estado endurecido)	Conforme especificação de projeto
C.7	Absorção de água por capilaridade	Informação que deve constar do DATEC específico
C.8	Índice de vazios (estado endurecido)	Informação que deve constar do DATEC específico
C.9	Permeabilidade à água	Informação que deve constar do DATEC específico

Fonte: SINAT nº 11 (2014), p.14.

A camada de argamassa é o principal componente dos painéis, pois é ela que basicamente resiste aos esforços de compressão, portanto deve possuir alta resistência mecânica, rigidez, estabilidade, além de elevada compacidade e baixa permeabilidade (MEDEIROS, 2017). A adição de fibras (de vidro e de poliéster) à argamassa, segundo Pérez (2005), ajuda a evitar a fissuração e favorece a diminuição da deformação do material.

Segundo Bertoldi (2007) é ideal que o revestimento aplicado ao painel tenha alta resistência, baixa retração além de trabalhabilidade e, para satisfazer esses aspectos, propõe uma relação de 3,0 a 4,5 entre o cimento e a areia, além da sugestão de utilização de aditivos plastificantes e de fibras.

2.2 Classificação dos Painéis

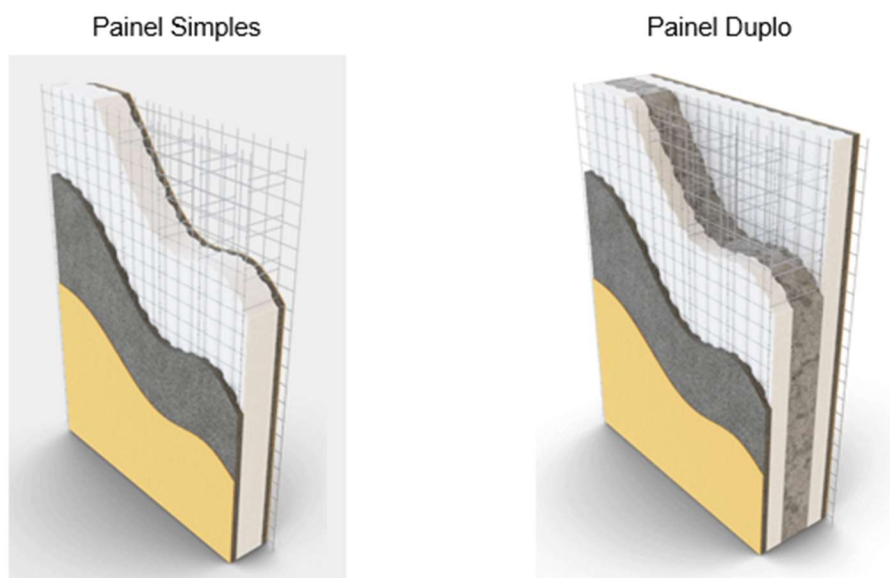
A placa de EPS que compõe o painel tem espessura definida de acordo com projeto arquitetônico e/ou projeto estrutural, podendo ser de 40 a 240 mm. Deve ser atóxica, quimicamente inerte e autoextinguível, ou seja, material capaz de parar de queimar quando é removida a fonte da chama.

As placas podem ser planas ou onduladas, característica que influencia na aderência com a argamassa e favorece a capacidade estrutural. Suas dimensões são definidas de acordo com a necessidade do projeto, porém existem formatos que atendem à maioria das situações:

- Painel Simples: painel composto por núcleo de EPS, telas eletrosoldadas nas duas faces interligadas por conectores e finalizado com a projeção de argamassa, microconcreto ou concreto em cada face.
- Painel Duplo: constituído de duas placas de EPS afastadas e interligadas por conectores. Sua finalização ocorre com preenchimento do núcleo com concreto.
- Painel Laje: painel com sulcos nas duas direções para posicionamento da armadura, com telas de aço na parte inferior e na superior. Finalizado com concreto até atingir a altura de capa definida em projeto.
- Painel de Escada: painel próprio para escadas que permite a passagem de armadura e concreto por todo seu comprimento e com telas de aço em seu entorno.
- Painel Patamar: semelhante ao painel laje, porém com sulcos mais próximos para maior concentração de aço e de concreto.

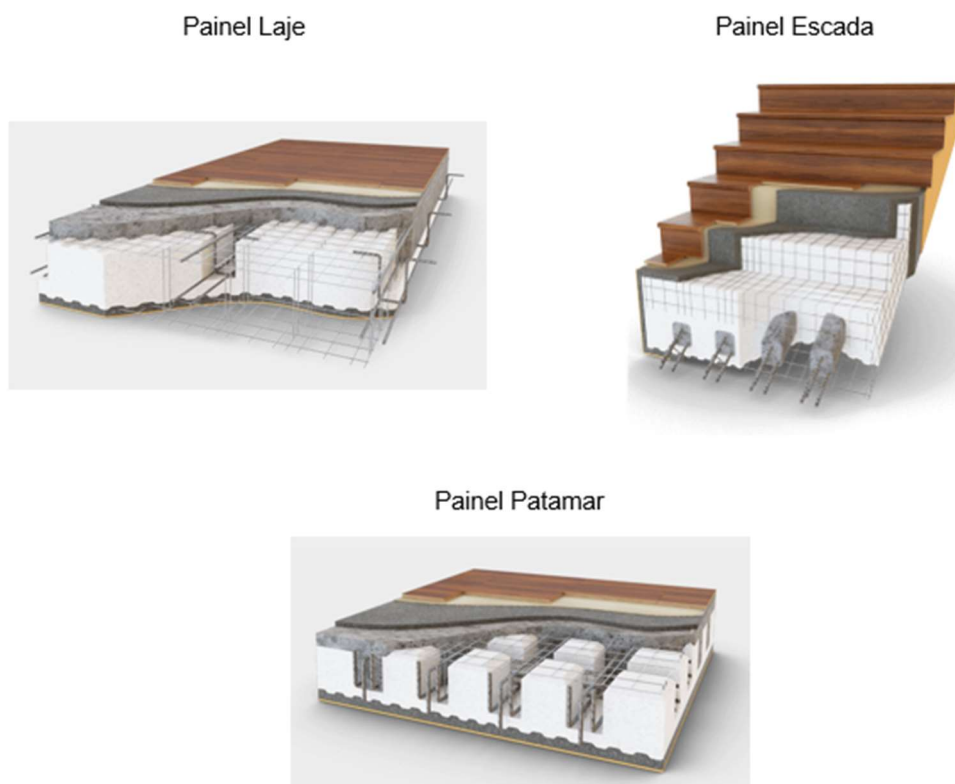
Os tipos dos painéis são mostrados nas figuras 16 e 17.

Figura 16 – Tipos de painéis



Fonte: M2 Emmedue, 2018, (adaptada)

Figura 17 – Tipos de painéis (continuação)



Fonte: M2 Emmedue, 2018, (adaptada)

O painel tratado neste trabalho de forma geral é o painel simples, com faces lisas e conectores de cisalhamento do tipo treliça, que pode ser utilizado tanto em paredes como para lajes.

Segundo Nogueira (2022) nas lajes das construções com painéis de EPS geralmente não são utilizados os painéis de EPS, e sim as lajes treliçadas, composta de treliças intercaladas com blocos de EPS. As lajes treliçadas possuem bom desempenho estrutural, versatilidade e facilidade de execução além da não utilização de fôrmas na sua montagem e do seu baixo custo.

Entretanto, os painéis de EPS podem ser utilizados nas lajes, tanto o painel simples quanto o painel de laje. Para isso devem ser devidamente dimensionados e verificados para resistir aos esforços solicitantes.

2.3 Vantagens e Desvantagens do Sistema

A utilização do painel de EPS nas edificações influencia diretamente no dimensionamento da fundação por conta do seu baixo peso próprio, a depender do tipo de solo e do porte da edificação pode-se reduzir a necessidade de elementos de fundação mais robustos, e às vezes até viabilizar a utilização do Radier que possui fácil execução e baixo custo.

O painel é um material de fácil manuseio e armazenamento, dispensa o uso de grandes máquinas, guinchos ou guias para o transporte durante sua produção na indústria ou dentro do canteiro de obras. Por ser uma estrutura monolítica, que significa “aquilo que se comporta como um conjunto rígido, indivisível”, possui uma maior resistência a fissuras e rachaduras se bem executado.

Apesar do EPS não possuir um bom isolamento acústico devido à sua baixa densidade, quando revestido pelas camadas de argamassa, que é um material fino e não poroso, o sistema possui isolamento acústico melhor do que a alvenaria convencional de bloco cerâmico. Como já mencionado, o EPS é higroscópico sendo assim um material resistente contra mofo, bolor e fungos.

O sistema de painéis autoportantes reduz o uso de fôrmas, o uso de escoras e a geração de resíduo durante as etapas de instalações elétricas e hidrossanitárias o que resulta em economia para a construção.

Como desvantagem se tem que a construção com painéis monolíticos é uma inovação no país, portanto é difícil para os pequenos construtores adotá-la em suas construções. Investimentos em inovações, no geral, têm resultados de médio e longo prazo, além da necessidade de capacitação profissional dos envolvidos.

Entretanto, para as grandes construtoras é mais viável essa adoção, pois o alto custo inicial acaba se anulando em um curto prazo devido à grande quantidade de obras realizadas. À medida que um sistema é difundido e utilizado é de se esperar que ocorra um aumento da oferta no mercado com conseqüente redução no custo do produto e aumento da acessibilidade.

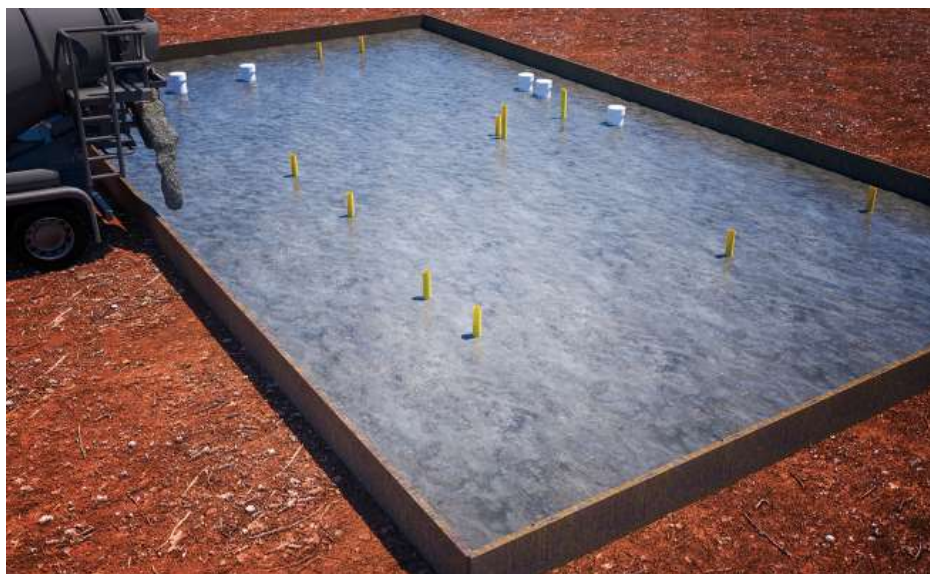
Outra desvantagem relacionada ao sistema é a carência de normas técnicas no Brasil que estabeleçam os requisitos mínimos exigíveis para realização de projetos estruturais, e por conta disso, esse método construtivo não é tão usual ou disseminado como os outros. Como conseqüência acontece pelo país diversas construções amadoras com painéis não verificados e execuções sem controle de qualidade, que podem gerar diversas patologias nas edificações e passar impressão de um sistema falho e inseguro.

2.4 Método Construtivo

Após realizar todo o processo de limpeza, aterro e compactação do terreno, o primeiro passo de construção da edificação deve ser a fundação, que será feita a partir do cálculo estrutural e da análise do solo. Pelo fato de o sistema de painéis monolíticos ser uma estrutura leve, o tipo de fundação mais indicado é o radier (GOMES, OLIVEIRA e GOMES, 2021).

O radier é uma fundação superficial que distribui a carga de maneira uniforme em todo o terreno, como uma laje de concreto, e as seguintes vantagens podem ser observadas: rapidez da execução, diminuição da mão de obra e redução na quantidade de formas utilizadas e dos recalques diferenciais (MEDEIROS, 2017). Porém para cada construção deve ser analisada e estudada a solução a ser adotada, visto que a qualidade e a resistência do solo variam de terreno para terreno. Caso o solo não permita a utilização do Radier (Figura 18) outra opção é a utilização de sapatas corridas ou vigas baldrame e blocos de coroamento.

Figura 18 – Fundação tipo Radier



Fonte: Isorecort, 2021.

Faz-se notar que antes da concretagem, é necessário que os pontos de passagem do sistema de esgoto e os conduítes de alimentação elétrica e a tubulação hidráulica tenham sido previamente instalados de acordo com o projeto (GOMES, OLIVEIRA e GOMES, 2021). Além disso, segundo Alves (2015) a forma de ancoragem mais indicada é a realizada também antes da concretagem, com a fixação de arranques de aço que devem ser alinhados de acordo com o gabarito da obra.

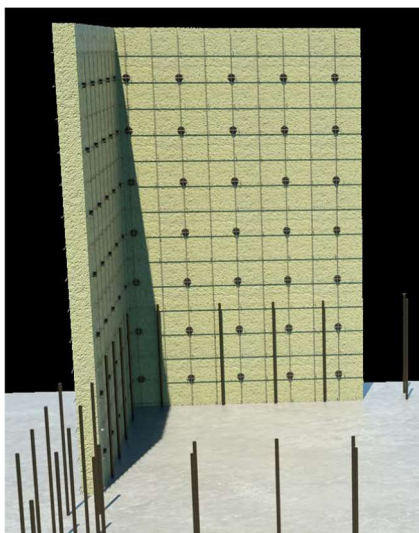
Segundo Melo (2021), os arranques devem ser compostos de barras de aço de 8mm de diâmetro, devem ser posicionados a cada 30 cm e ancorados na fundação pelo menos 10 cm e ancorados nos painéis no mínimo 30 cm. Porém deve ser realizado uma verificação estrutural de acordo com cada edificação e projeto.

Outra forma de ancoragem pode ser realizada após a concretagem da fundação. Nesse caso, as barras são ancoradas na fundação através de furos de 10 cm de profundidade a cada 50 cm. São posicionadas barras nas faces internas e externas do painel. A fixação final fica por conta de utilização de um adesivo epóxi (ISORECORT, 2021).

A montagem dos painéis pode ser feita logo após a finalização e cura da fundação utilizando os arranques previamente instalados. Os painéis são fixados aos arranques por meio da malha do painel (Figura 19) e esse procedimento pode ser realizado com arame galvanizado ou grampeador pneumático (MEDEIROS, 2017). Na SINAT nº 11

(MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2014), em um exemplo de execução, descreve que deve ser realizado traspasse mínimo de 15 cm entre as telas de aço entre painéis consecutivos.

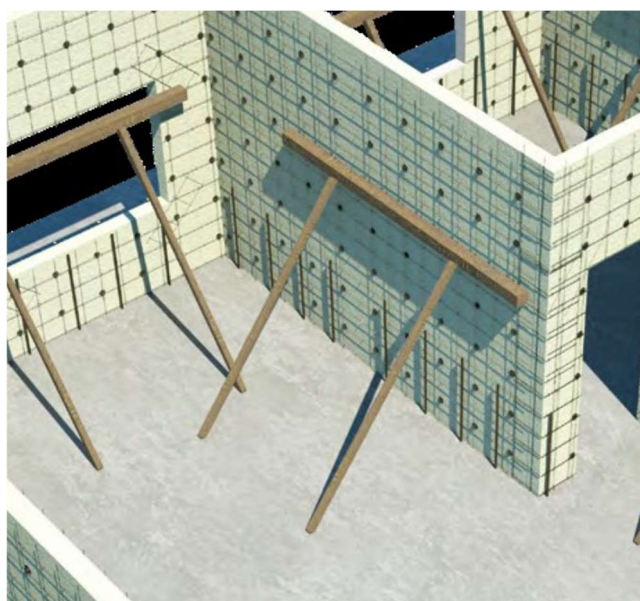
Figura 19 – Fixação dos painéis nas barras de ancoragem



Fonte: Isorecort, 2021.

Para garantir o alinhamento e o prumo dos painéis, podem ser utilizadas régua de madeira ou de alumínio (Figura 20), posicionando-as em ambos os lados do painel. A primeira régua deve estar a 60 cm do piso e a segunda 200 cm acima da primeira. Ainda são utilizadas escoras na diagonal e perpendiculares à régua (GENOL, 2021).

Figura 20 – Alinhamento e prumo dos painéis

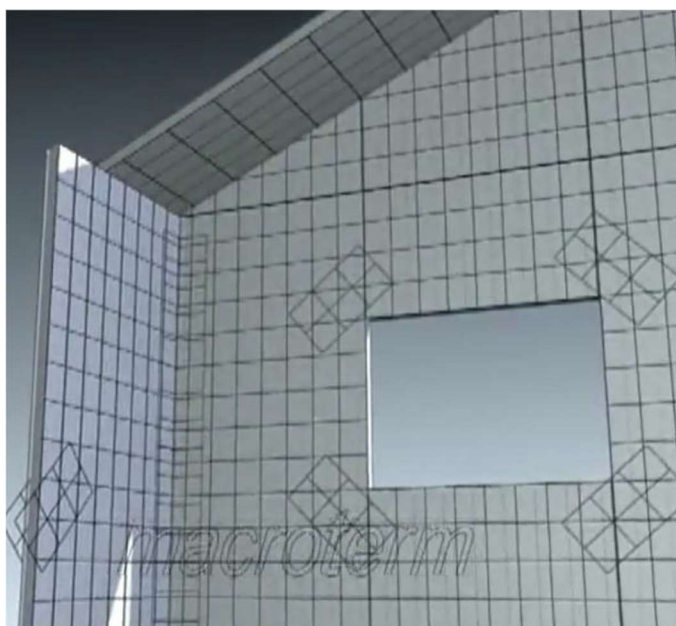


Fonte: Isorecort, 2021

De acordo com o grupo Isorecort (2021), os vãos de janelas, portas e demais aberturas devem ser demarcados com caneta ou tinta para que seja realizado o recorte das telas e dos painéis de EPS. Outra solução é realizar o pedido dos painéis personalizados, ou seja, já com as aberturas realizadas.

Em todos os tipos de aberturas supracitados, deve-se fazer um reforço com telas eletrosoldadas em suas bordas e nos encontros das extremidades. Os reforços utilizados nas bordas são as malhas em formato U, enquanto os utilizados nos encontros das extremidades são as malhas em L. Já nos cantos das aberturas, instala-se um reforço de malha plana, que será colocada na diagonal, como mostrado anteriormente na Figura 13 e a seguir na Figura 21. Esses reforços têm a finalidade de absorver tensões e evitar trincas e fissuras posteriores (ALVES, 2015).

Figura 21 – Detalhe dos reforços no canto das paredes e na janela



Fonte: Alves, 2015.

Após a fase de alinhamento e reforço dos painéis, deve-se fazer as demais instalações elétricas e hidráulicas. Para isso, as marcações são realizadas utilizando tinta ou caneta e os sulcos são feitos com o auxílio de um soprador térmico, que derreterá o EPS (Figura 22). A empresa Isorecort afirma que se for necessário realizar cortes na tela para passagem de tubos, esse ponto deverá ser posteriormente reforçado com uma tela.

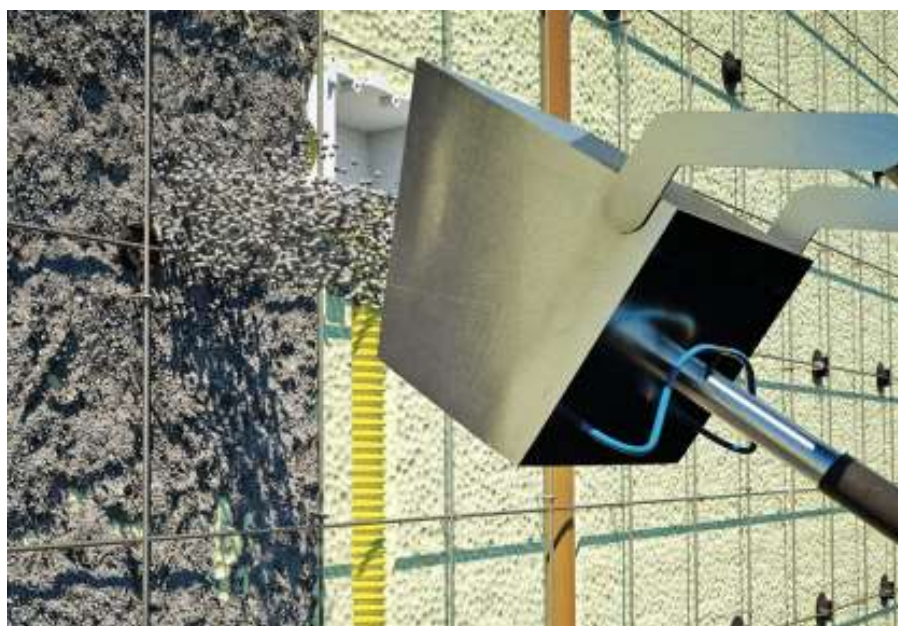
Figura 22 – Instalações elétricas e hidráulicas



Fonte: Isorecort, 2021.

O passo estruturante final é a projeção de argamassa no painel (Figura 23). Ele é realizado em duas camadas, e recomenda-se a utilização de argamassa projetada em ambas, com o traço de 1:3 (cimento e areia), misturada com 200ml de aditivo plastificante e 200g de microfibras de polipropileno por saco de cimento (ISORECORT, 2021). A primeira camada deve cobrir a malha nas duas faces, evitando assim o aparecimento de retração diferencial. Já a segunda camada, após a cura e em até 48 horas, é feita de acordo com a espessura indicada no projeto (GENOL, 2021).

Figura 23 – Projeção de argamassa nos painéis



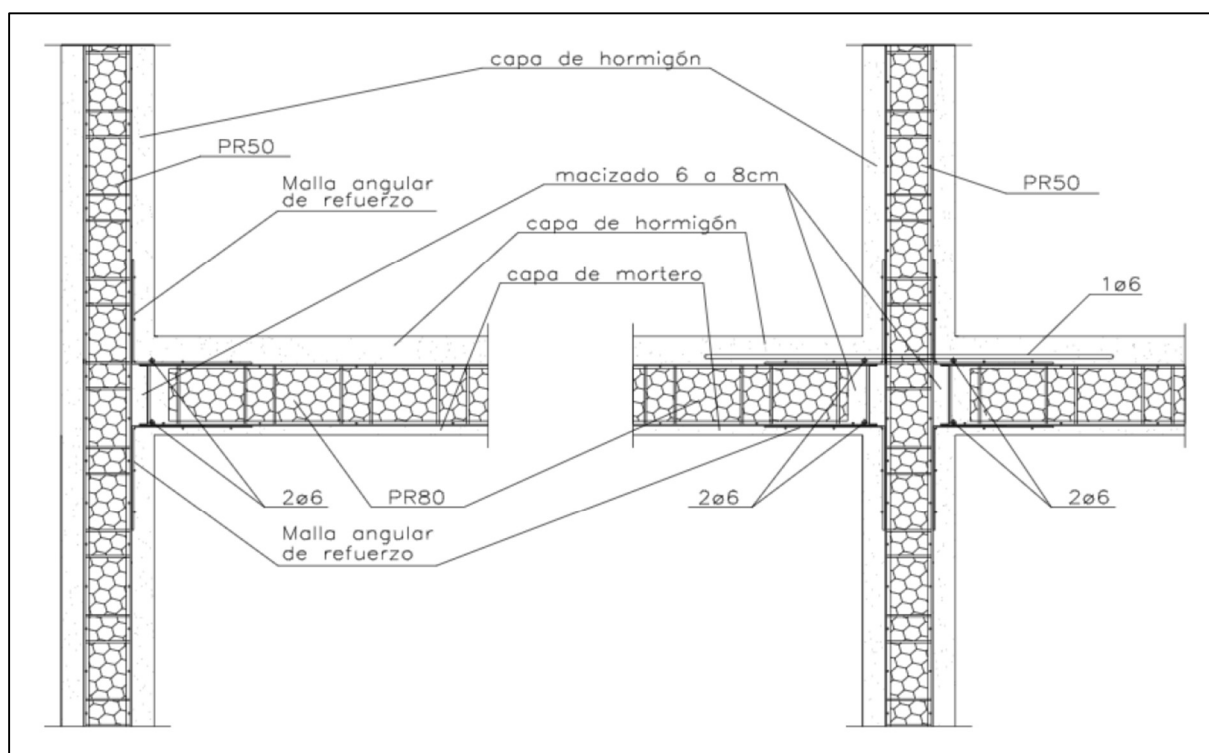
Fonte: Isorecort, 2021.

Medeiros (2017) sugere que a projeção de argamassa seja feita inicialmente nas paredes de cima para baixo sem ultrapassar a espessura de 10 mm e em seguida na face inferior da laje.

2.5 Detalhes Construtivos

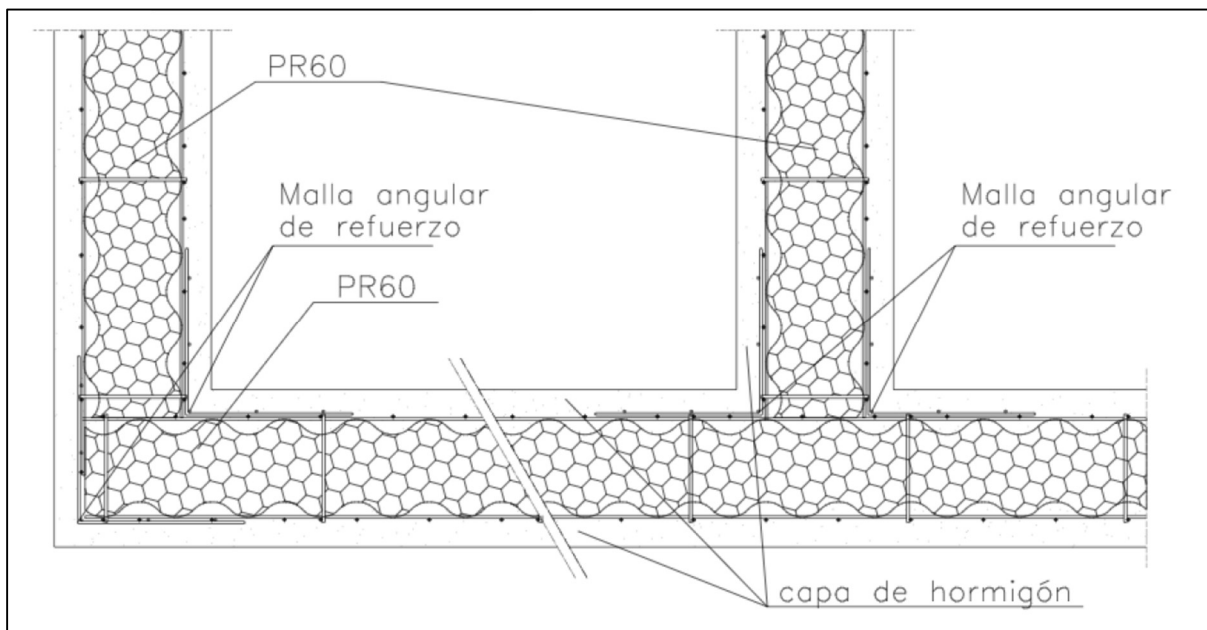
Os encontros entre elementos são essenciais para realizar a união estrutural e garantir a estabilidade da edificação. Devem ser bem detalhados e bem executados. Abaixo seguem algumas imagens do Manual Técnico da MK2 (2009) referente a detalhes construtivos de uma edificação constituída por painéis de EPS.

Figura 24 – Encontro entre paredes e lajes (corte)



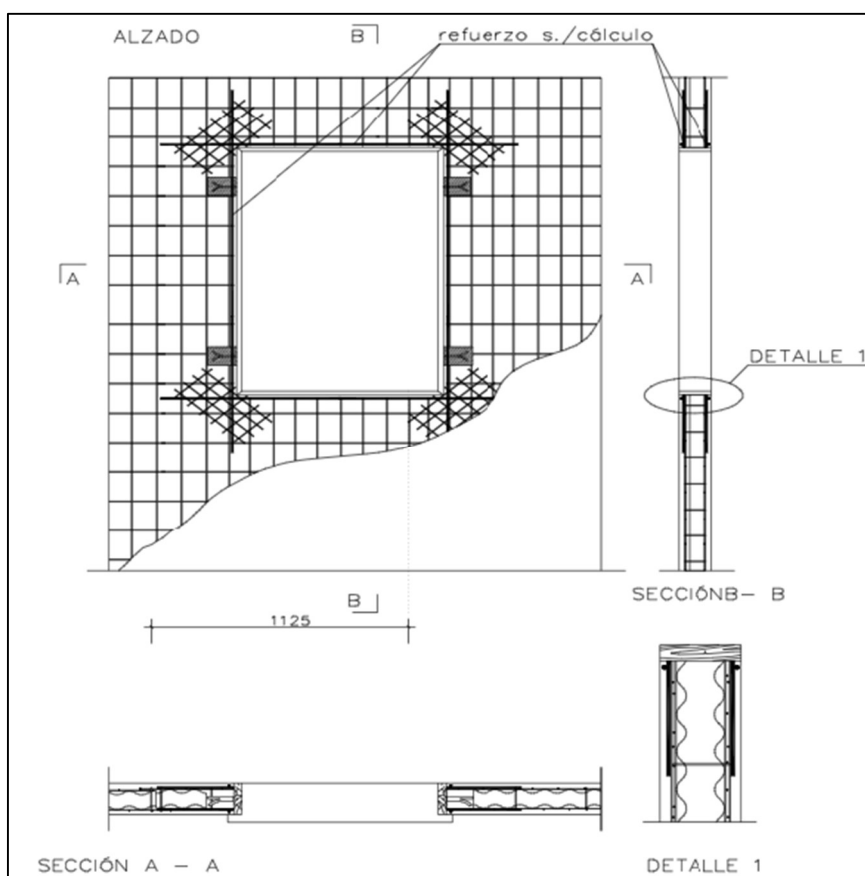
Fonte: MK2, 2009.

Figura 25 – Encontro entre paredes (em planta)



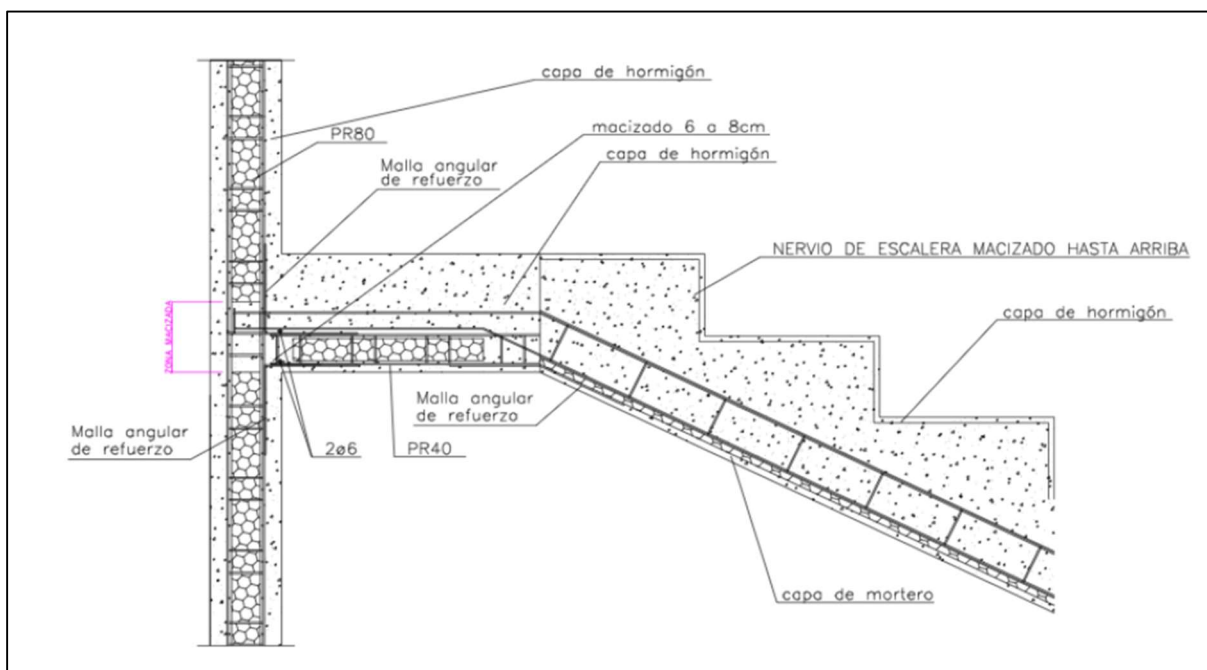
Fonte: MK2, 2009.

Figura 26 – Aberturas de janelas (vista e cortes)



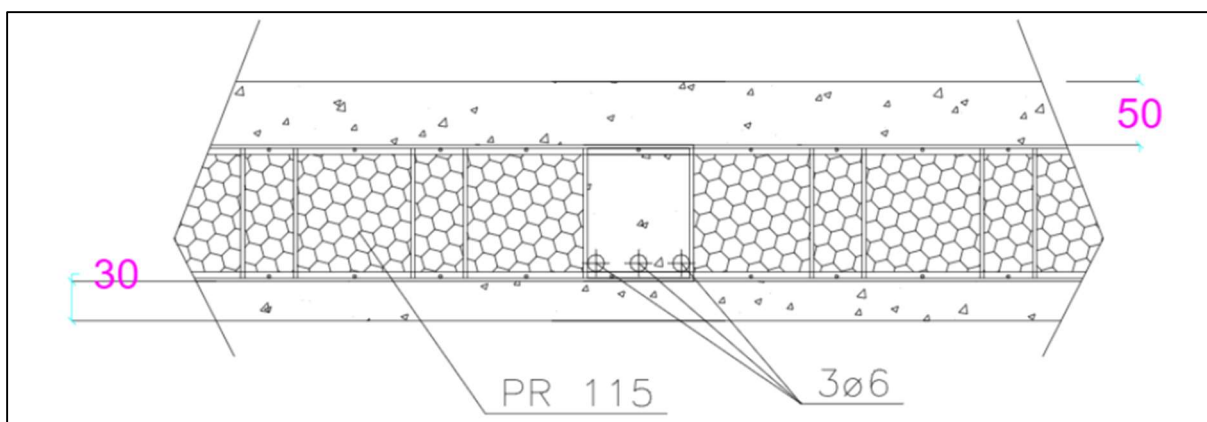
Fonte: MK2, 2009.

Figura 29 – Encontro de escada com laje e parede (corte)



Fonte: MK2, 2009.

Figura 30 – Viga plana armada (corte)



Fonte: MK2, 2009.

3 CONCEITOS ESTRUTURAIS

Para a realização de um projeto estrutural, é necessário não apenas conhecer as propriedades dos materiais, mas também compreender o comportamento da estrutura sob esforços e cargas aplicadas. No caso do sistema de painéis monolíticos, que é uma abordagem construtiva inovadora no país e não possui uma norma específica para cálculo e dimensionamento, não há ainda uma padronização nas análises nem nos métodos desenvolvidos.

Devido à ausência de norma específica, é necessário realizar uma abordagem mais cuidadosa e criteriosa. Isso envolve a consideração de diretrizes e referências técnicas relevantes, a análise de casos similares existentes em outros locais, a utilização de princípios fundamentais de engenharia estrutural e a adoção de boas práticas.

É importante que os profissionais envolvidos no projeto tenham um bom embasamento técnico, conhecimento sólido em análise estrutural e experiência em projetos similares. Além disso, a colaboração e a troca de informações com outros especialistas e pesquisadores podem contribuir para o desenvolvimento de métodos adequados de análise e dimensionamento para o sistema de painéis monolíticos.

Embora não haja uma padronização definida, é fundamental realizar estudos e análises aprofundadas, considerando os princípios da engenharia estrutural, a segurança e o desempenho adequado da estrutura, a fim de garantir a confiabilidade e a eficiência do projeto.

Para a elaboração de um modelo de cálculo estrutural de uma edificação, independentemente do método construtivo, é necessário definir as propriedades mecânicas dos materiais e as propriedades geométricas dos elementos estruturais. Essas informações são essenciais para realizar as análises e dimensionamentos adequados.

Propriedades mecânicas dos materiais: para cada tipo de material utilizado na estrutura (como concreto, aço, EPS, etc.), é necessário conhecer suas propriedades mecânicas, que podem incluir o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson, o módulo de cisalhamento, a resistência à tração, a resistência à compressão, entre

outros. Essas propriedades determinam o comportamento do material sob carga e são fundamentais para realizar os cálculos estruturais.

Propriedades geométricas dos elementos: para cada elemento estrutural (como pilares, vigas, lajes, fundações), é necessário definir suas propriedades geométricas, como dimensões, área da seção transversal, inércia, momento de inércia, raio de giração, entre outros. Essas propriedades são utilizadas para determinar a capacidade de suporte do elemento e sua resposta às cargas aplicadas.

Além disso, é importante considerar outros parâmetros relevantes, como as condições de contorno, as condições de apoio, as cargas atuantes, incluindo as cargas permanentes (como o peso próprio da estrutura e dos revestimentos) e as cargas variáveis (como as cargas móveis e as sobrecargas), as ações climáticas (vento, sismo) e outros fatores relevantes.

Toda essa informação é essencial para realizar a modelagem e a análise estrutural, com o objetivo de garantir a segurança e o desempenho adequado da edificação. Com base nos valores limites estabelecidos pelas normas técnicas, são realizadas as verificações, os dimensionamentos e os detalhamentos dos elementos que compõem a estrutura, levando em consideração deslocamentos máximos, dimensões mínimas e valores máximos de abertura de fissuras. Essas etapas são fundamentais para garantir que a edificação seja capaz de suportar as cargas aplicadas e de atender aos requisitos de segurança e durabilidade exigidos.

Como mencionado anteriormente, é possível construir todos os componentes de uma edificação - verticais, horizontais ou inclinados - utilizando painéis de EPS. Ao sobrepor as malhas e aplicar argamassa estrutural sobre o painel, todos os elementos trabalham em conjunto para resistir aos esforços solicitantes, resultando em uma estrutura rígida e monolítica. No entanto, para fins de cálculo, esse comportamento monolítico não é considerado. Em vez disso, os elementos são dimensionados de forma isolada, pois analisar manualmente o comportamento de toda a edificação como um único elemento seria extremamente difícil.

Será adotado nos cálculos um grau de composição total das camadas de argamassa do painel, o que implica que as duas capas trabalham em conjunto, sem ocorrência de falhas nos conectores de cisalhamento. A partir dessa premissa, nota-se uma semelhança entre os painéis de EPS e os elementos de concreto armado, o

que torna lógica a utilização da *ABNT NBR 6118:2014 – Projetos de Estrutura de Concreto – Procedimento e/ou da ABNT NBR 11173:1990 – Projeto e execução de argamassa armada* no estudo e desenvolvimento de um modelo estrutural simplificado para uma edificação com painéis de EPS.

No âmbito deste trabalho, os painéis de EPS serão dimensionados pelo método do Estado Limite Último (ELU), seguindo as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 6118:2014. Esse método visa garantir que os elementos estruturais atinjam uma condição limite segura, suportando as cargas e solicitações previstas sem falhas ou colapsos.

3.1 Propriedades Mecânicas e Geométricas

Neste item estão resumidos os valores das propriedades mecânicas da argamassa, do concreto e do aço. É importante destacar que, para fins de cálculo, a camada de EPS será desconsiderada em termos de sua resistência, uma vez que o EPS possui um módulo de resistência muito baixo em comparação ao aço e à argamassa. Além dos valores das propriedades dos materiais, a equação de cálculo da inércia da seção transversal do painel foi definida.

3.1.1 Argamassa

No item 4.4.1.2.1 da NBR 11173 as especificações para a argamassa são:

- Massa específica maior que 1800 kg/m^3 ;
- Índice de absorção de água no estado endurecido menor que 8%;
- Resistência característica à compressão maior que 25 MPa.

No item 4.4.1.2.2 da NBR 11173 estão os parâmetros de projeto:

- Resistência característica à compressão da argamassa deve atender às classes indicadas na NBR 8953;

E na falta de determinação experimental, pode-se adotar:

- A resistência característica à tração conforme o disposto na NBR 6118 no item 8.2.5;
- Diagrama tensão-deformação conforme o disposto na NBR 6118 no item 8.2.10.1;

- Módulo de deformação longitudinal (E_c) à compressão igual à 80% do valor calculado conforme o disposto na NBR 6118 no item 8.2.8;
- Coeficiente de Poisson relativo às deformações elásticas igual à 0,20;
- Coeficiente de dilatação térmica para variações normais de temperatura igual a $10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

3.1.2 Aço

Segundo à NBR 11173:1990, as barras e fios de aço devem obedecer à NBR 7480:2022 enquanto as telas de aço soldadas devem obedecer à NBR 7481:2022, e para utilização nos painéis devem ser respeitados os parâmetros definidos anteriormente no subitem 2.1.2 deste trabalho.

No item 4.4.2.2 da NBR 11173:1990 estão definidos os parâmetros de projeto:

- O diagrama tensão-deformação do aço é o disposto na NBR 6118:2014 no item 8.3.6;
- O módulo de deformação longitudinal das telas de aço soldadas é adotado de acordo com o aço que as compõe. Porém no item 8.3.5 NBR 6118:2014 está descrito que na falta de ensaios ou valores fornecidos pelo fabricante, o módulo de elasticidade do aço pode ser admitido igual a 210 GPa.

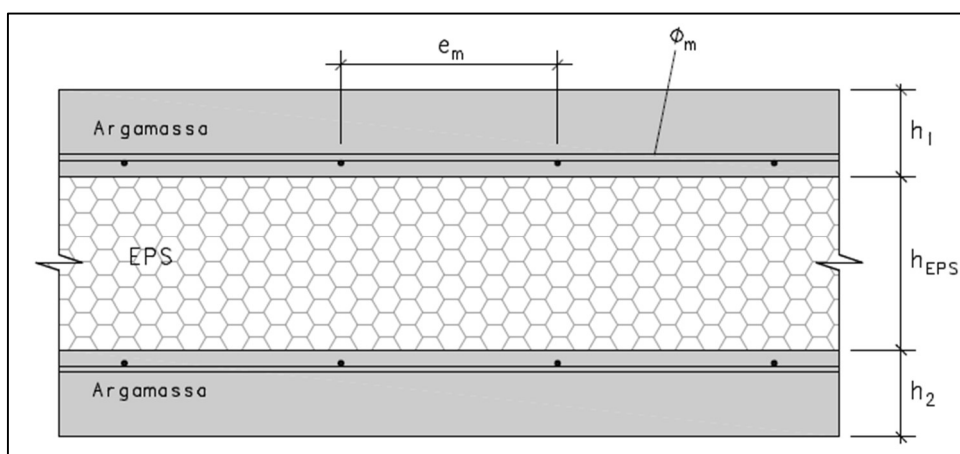
A NBR 6118:2014 estabelece no item 8.3.3 que se pode adotar para a massa específica do aço de armadura passiva o valor de 7850 kg/m^3 e estabelece no item 8.3.4 que o valor de $10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ pode ser considerado para o coeficiente de dilatação térmica do aço, para intervalos de temperatura entre $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ e $150 \text{ }^\circ\text{C}$.

A NBR 8800:2008 estabelece no item 4.5.2.9 que para efeitos de cálculo o coeficiente de Poisson pode ser adotado como igual à 0,3.

3.1.3 Inércia do Painel

Para obtenção do valor da inércia da seção não fissurada do painel de EPS será utilizada a seção transversal genérica mostrada na Figura 31.

Figura 31 – Seção transversal de um painel de EPS.



Fonte: Acervo próprio

Onde:

h_1 : espessura da capa superior de argamassa;

h_2 : espessura da capa inferior de argamassa;

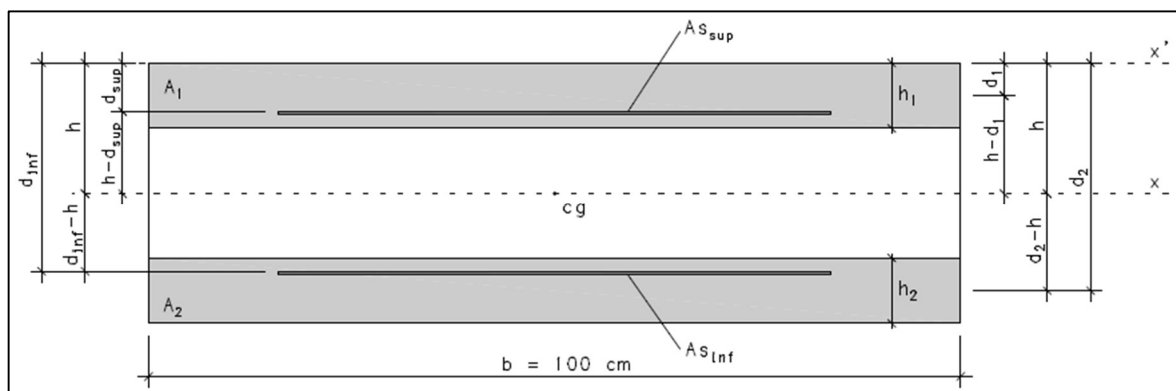
h_{EPS} : espessura da placa de EPS;

ϕ_m : diâmetro da barra da malha de aço;

e_m : espaçamento entre barras da malha de aço;

Considerando 1 metro de largura de painel e considerando o eixo x' passando pelo bordo superior do painel e o eixo x passando pelo centro de gravidade do painel, obtém-se o seguinte esquema:

Figura 32 – Esquema geométrico da seção transversal do painel de EPS



Fonte: Acervo próprio

Onde:

b : largura do painel

h : altura do centro de gravidade da seção;

A_1 e A_2 : área da capa superior e inferior;

d_1 e d_2 : distância dos centros de gravidade das capas à fibra mais comprimida;

$$d_1 = \frac{h_1}{2}$$

$$d_2 = \frac{h_2}{2}$$

A_{sup} e A_{inf} : área de aço superior e inferior;

$$A_{sup} = A_s * n$$

$$A_{inf} = A_s * n$$

n : coeficiente de transformação (homogeneização);

$$n = \frac{E_s}{E_c}$$

E_s e E_c : módulo de elasticidade do aço e do concreto;

A_s é dado por:

$$A_s = \frac{\pi * \phi_m^2}{4} * \frac{b}{e_m}$$

d_{sup} e d_{inf} : distância dos centros de gravidade das armaduras ao eixo x' .

A coordenada do centro geométrico de uma seção transversal de um elemento pode ser obtida através da equação abaixo, em que x é a distância do centro geométrico da área A ao eixo de referência (x').

$$h = \frac{\sum x * A}{\sum A} = \frac{A_1 * d_1 + A_2 * d_2 + A_{sup} * d_{sup} + A_{inf} * d_{inf}}{A_1 + A_2 + A_{sup} + A_{inf}}$$

Sabendo que o momento de inércia de uma seção retangular, de base b e altura h , em relação ao eixo x que passa pelo seu centro geométrico é:

$$I = \frac{b * h^3}{12}$$

Utilizando o teorema dos eixos paralelos, temos que o momento de inércia da seção não fissurada de um painel de EPS é dado por:

$$I = \frac{b * h_1^3}{12} + (b * h_1) * (h - d_1)^2 + A_{S_{sup}} * (h - d_{sup})^2 + \frac{b * h_2^3}{12} + (b * h_2) * (d_2 - h)^2 + A_{S_{inf}} * (d_{inf} - h)^2$$

Entretanto, para um cálculo mais conservador, assim como é realizado para elementos de concreto armado, a parcela referente ao aço não será levada em consideração. A equação para coordenada do centro geométrico da seção é dada então por:

$$h = \frac{A_1 * d_1 + A_2 * d_2}{A_1 + A_2}$$

E o momento de inércia da seção é dado por:

$$I = \frac{b * h_1^3}{12} + (b * h_1) * (h - d_1)^2 + \frac{b * h_2^3}{12} + (b * h_2) * (d_2 - h)^2$$

3.2 Coeficientes de Ponderação

A seguir estão descritos os coeficientes ponderadores a serem utilizados para obtenção dos valores de cálculo das ações ao qual os elementos estruturais estão submetidos e dos valores de cálculo das resistências dos elementos. Sendo que as considerações referentes aos estados limites últimos e de serviços estão definidos na NBR 6118:2014.

3.2.1 Coeficiente de Ponderação das Ações

A NBR 6118:2014 descreve no item 11.7 os coeficientes para majorar as ações ao qual a estrutura está submetida, sendo que os valores das massas específicas dos materiais de construção correntes estão indicados na ABNT NBR 6120:2019. Na Figura 33 e na Figura 34 são mostrados os valores dos coeficientes de ponderação das ações no estado-limite último (ELU).

Figura 33 – Valores do coeficiente $\gamma_f = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f3}$

Combinações de ações	Ações							
	Permanentes (g)		Variáveis (q)		Protensão (p)		Recalques de apoio e retração	
	D	F	G	T	D	F	D	F
Normais	1,4 ^a	1,0	1,4	1,2	1,2	0,9	1,2	0
Especiais ou de construção	1,3	1,0	1,2	1,0	1,2	0,9	1,2	0
Excepcionais	1,2	1,0	1,0	0	1,2	0,9	0	0

onde
D é desfavorável, *F* é favorável, *G* representa as cargas variáveis em geral e *T* é a temperatura.

^a Para as cargas permanentes de pequena variabilidade, como o peso próprio das estruturas, especialmente as pré-moldadas, esse coeficiente pode ser reduzido para 1,3.

Fonte: NBR 6118:2014, p.65.

Figura 34 – Valores do coeficiente γ_{f2}

Ações		γ_{f2}		
		ψ_0	ψ_1^a	ψ_2
Cargas acidentais de edifícios	Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ^b	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas ^c	0,7	0,6	0,4
	Biblioteca, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3

^a Para os valores de ψ_1 relativos às pontes e principalmente para os problemas de fadiga, ver Seção 23.
^b Edifícios residenciais.
^c Edifícios comerciais, de escritórios, estações e edifícios públicos.

Fonte: NBR 6118:2014, p.65

O coeficiente de ponderação das ações no estado-limite de serviço (ELS) é dado pela expressão:

$$\gamma_f = \gamma_{f2}$$

Onde γ_{f2} tem valor variável conforme:

$\gamma_{f2} = 1$ para combinações raras;

$\gamma_{f2} = \psi_1$ para combinações frequentes;

$\gamma_{f2} = \psi_2$ para combinações quase permanentes.

3.2.2 Resistência de cálculo

No item 12.3.1 a NBR 6118:2014 determina que a resistência de cálculo f_d é dada pela expressão:

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_m}$$

Onde f_k é a resistência característica e γ_m é o coeficiente de ponderação.

Para verificações no estado-limite último (ELU) os valores dos coeficientes do concreto e do aço são dados por:

Figura 35 – Valores dos coeficientes γ_c e γ_s

Combinações	Concreto γ_c	Aço γ_s
Normais	1,4	1,15
Especiais ou de construção	1,2	1,15
Excepcionais	1,2	1,0

Fonte: NBR 6118:2014, p.71.

Entretanto será utilizado para o concreto o valor de 1,5 em combinações normais, como forma de aumentar a segurança dos cálculos. Vale ressaltar que os limites estabelecidos para os estados-limites de serviço não necessitam de minoração, portanto, $\gamma_m = 1,0$.

3.3 Limites para dimensões e deslocamentos

A NBR 6118:2014 no item 14.4.1.2, página 84, define pilares como: “Elementos lineares de eixo reto, usualmente dispostos na vertical, em que as forças normais de compressão são preponderantes.” E define no item 14.4.2.4 os pilares-parede como:

Elementos de superfície plana ou casca cilíndrica, usualmente dispostos na vertical e submetidos preponderantemente à compressão. Podem ser compostos por uma ou mais superfícies associadas. Para que se tenha um pilar-parede, em alguma dessas superfícies a menor dimensão deve ser menor que 1/5 da maior, ambas consideradas na seção transversal do elemento estrutural. (p.84)

No sistema construtivo estudado deve-se avaliar cada elemento, sendo os elementos verticais caracterizados como pilares ou como pilares-parede e os elementos horizontais como lajes.

Figura 36 – Exemplo de edificação com painéis de EPS



Fonte: Catálogo Monolite Brasil, sd, adaptada.

3.3.1 Elementos verticais

Pela NBR 6118:2014 tem-se que pilares ou pilares-parede não podem apresentar dimensão menor que 19 cm, qualquer que seja sua forma. Porém, em casos especiais, permite-se a consideração de dimensões entre 19 cm e 14 cm, desde que todos os esforços solicitantes de cálculo sejam multiplicados por um coeficiente adicional γ_n , (Figura 37).

Figura 37 – Valores do coeficiente adicional γ_n para pilares e pilares-parede

b cm	≥ 19	18	17	16	15	14
γ_n	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25

onde

$$\gamma_n = 1,95 - 0,05 b;$$

b é a menor dimensão da seção transversal, expressa em centímetros (cm).

NOTA O coeficiente γ_n deve majorar os esforços solicitantes finais de cálculo quando de seu dimensionamento.

Fonte: NBR 6118:2014, p.73.

3.3.1.1 Índice de esbeltez e dispensa da análise dos efeitos de 2ª ordem

Para elementos isolados de seção constante e armadura constante ao longo de seu eixo submetidos à flexo-compressão a NBR 6118:2014 determina que os pilares devem ter índice de esbeltez menor ou igual a 200 ($\lambda \leq 200$).

A Norma determina também no item 15.8.1, página 107, que “Para pilares com índice de esbeltez superior a 140, na análise dos efeitos locais de 2ª ordem, devem-se multiplicar os esforços solicitantes finais de cálculo por um coeficiente adicional $\gamma_{n1} = 1 + [0,01. (\lambda - 140)/1,4]$ ”.

O índice de esbeltez de um pilar é dado por:

$$\lambda = \frac{l_e}{i}$$

onde

i é o raio de giração mínimo da seção bruta de concreto da peça analisada;

l_e é o comprimento equivalente do elemento comprimido, suposto vinculado em ambas as extremidades, devendo ser o menor valor entre:

$$\begin{cases} l_e = l_0 + h \\ l_e = l \end{cases}$$

onde

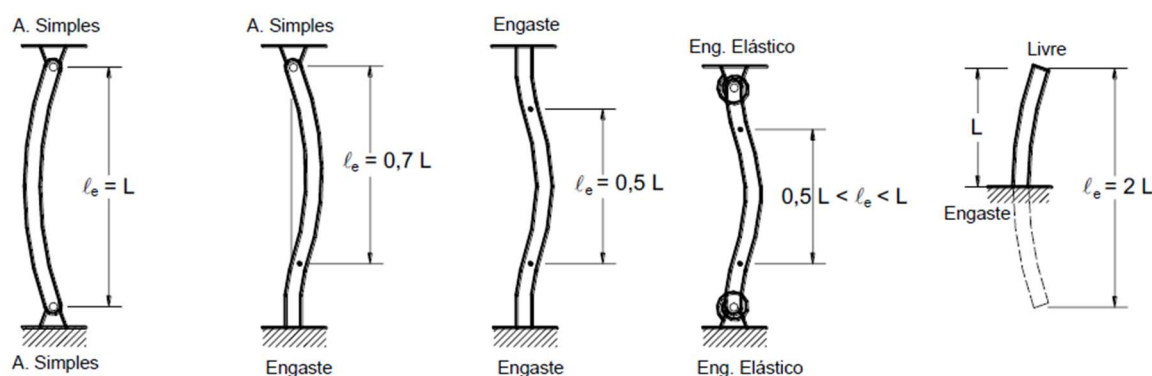
l_0 é a distância entre as faces internas dos elementos estruturais, supostos horizontais, que vinculam o pilar;

h é a altura da seção transversal do pilar, medida no plano da estrutura em estudo;

l é a distância entre os eixos dos elementos estruturais aos quais o pilar está vinculado.

O valor do comprimento equivalente do pilar, l_e , é definido em função dos vínculos das extremidades do pilar, conforme os esquemas mostrados na Figura 38.

Figura 38 – Comprimento equivalente l_e para pilares



Fonte: Bastos (2021a).

O raio de giração i é definido pela raiz da quadrada da relação entre o momento de inércia do pilar (I) e a área da seção transversal (A):

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Segundo a NBR 6118:2014 no item 15.9.1 deve-se garantir que a seção transversal dos pilares-parede tenha sua forma mantida por travamentos adequados e que os efeitos de 2ª ordem locais e localizados sejam convenientemente avaliados para que os pilares-parede possam ser incluídos como elementos lineares no conjunto resistente da estrutura.

Os efeitos localizados de 2ª ordem de pilares-parede podem ser desprezados segundo o item 15.9.2 se forem obedecidas as seguintes condições:

- A base e o topo devem ser convenientemente fixados às lajes do edifício;
- A esbeltez λ_i deve ser menor que 35 dada por:

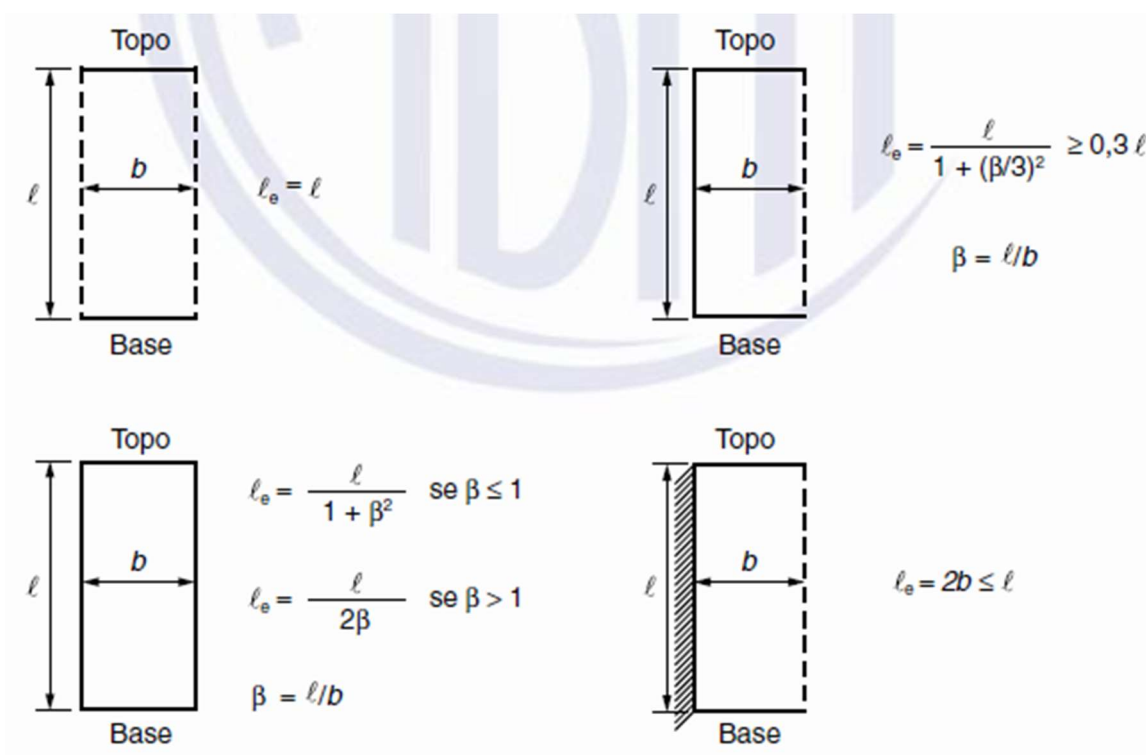
$$\lambda_i = \frac{l_e}{i}$$

onde

i é o raio de giração

l_e é o comprimento equivalente e seu valor depende dos vínculos das extremidades verticais conforme:

Figura 39 – Comprimento equivalente l_e para pilares-parede



Fonte: NBR 6118:2014, p. 112.

Se o topo e a base forem engastados e $\beta \leq 1$, os valores de λ_i podem ser multiplicados por 0,85.

3.3.1.2 Cálculo dos efeitos de 2ª ordem

Caso a esbelteza da parede seja maior que 35, deve ser realizado a determinação dos efeitos de 2ª ordem. O efeito localizado de 2ª ordem de uma parede é similar ao efeito de um pilar isolado equivalente. Não sendo necessário adotar valores de $\alpha_b > 0,6$ quando $M_{yid} < M_{1d,min}$, sendo:

$$M_{yid} = m_{yid} * a_i$$

$$M_{1d,min} = N_d * (0,015 + 0,03 * h)$$

Onde:

$a_i = 3h \leq 100 \text{ cm}$: é a largura da faixa i ;

h : é a altura da seção transversal na direção considerada (expressa em metros para o cálculo de $M_{1d,\min}$);

M_{yid} : é o momento fletor na faixa i ;

$M_{1d,\min}$: é o momento mínimo de 1ª ordem;

N_d : é a força de compressão.

Será utilizado o Método do pilar-padrão com curvatura aproximada segundo prescreve a NBR 6118:2014. Esse método “pode ser empregado apenas no cálculo de pilares com $\lambda \leq 90$, com seção constante e armadura simétrica e constante ao longo do seu eixo.” O momento total máximo no pilar é dado por:

$$M_{d,\text{tot}} = \alpha_b M_{1d,A} + N_d \frac{l_e^2}{10 r} \geq M_{1d,A}$$

Onde:

$$\frac{1}{r} = \frac{0,005}{h(v + 0,5)} \leq \frac{0,005}{h}$$

$$v = N_d / (A_c f_{cd})$$

Os valores de $M_{1d,A}$ e α_b são dados em 15.8.2 da NBR 6118:2014, sendo $M_{1d,A}$ o valor de cálculo de 1ª ordem do momento M_A .

3.3.2 Lajes

Segundo a NBR 6118:2014 as lajes maciças não podem apresentar altura menor que:

- a) *“7 cm para cobertura não em balanço;*
- b) *8 cm para lajes de piso não em balanço;*
- c) *10 cm para lajes em balanço ou que suportem veículos com peso menor ou igual a 30 kN;*
- d) *12 cm para lajes que suportem veículos de peso total maior que 30 kN;”*

Para as lajes nervuradas, ou treliçadas, a NBR 6118:2014 estabelece que “a espessura da mesa, quando não existirem tubulações horizontais embutidas, deve ser maior ou igual a 1/15 da distância entre as faces das nervuras e não menor que 4 cm.

O valor mínimo absoluto da espessura da mesa deve ser de 5 cm, quando existirem tubulações embutidas de diâmetro menor ou igual a 10 mm.”

3.3.3 Deslocamentos-limites

Segundo a NBR 6118:2014 “deslocamentos-limites são valores práticos utilizados para verificação em serviço do estado-limite de deformações excessivas da estrutura.” Os valores prescritos por Norma estão dispostos no capítulo 13.3.

Figura 40 – Limites para deslocamentos

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento-limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	$l/250$
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas acidentais	$l/350$

Fonte: NBR 6118:2014, p. 77.

4 MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO

Tendo como base os critérios definidos na NBR 6118:2014, para a análise de um elemento em Estado Limite Último, o esforço solicitante de cálculo, S_d , deve ser menor ou igual ao esforço resistente de cálculo, R_d . Esse método requer que em qualquer seção a resistência de projeto de um elemento deve ser maior que a solicitação calculada mediante as combinações de cargas majoradas.

O cálculo por esse método exige que se satisfaçam condições básicas: equilíbrio estático e compatibilidade das deformações. A primeira condição exige que as forças de compressão e de tração que atuam na seção transversal estejam em equilíbrio enquanto que a segunda condição exige que também se satisfaça a compatibilidade entre as deformações do concreto e da armadura em condições últimas dentro das hipóteses de dimensionamento.

De acordo com o manual técnico da MK (2009), as edificações construídas com o Sistema Construtivo MK2 são concebidas como estruturas compostas por grandes elementos verticais e horizontais, os quais são formados pelo agrupamento de painéis pré-industrializados que são concretados no local. Esses elementos verticais e horizontais funcionam como seções mistas, devido à conexão proporcionada pelos 80 conectores de aço de 3 mm de diâmetro por metro quadrado de superfície do painel. Essa conexão permite que as duas camadas de concreto projetado trabalhem em conjunto, formando uma seção composta.

No caso dos elementos verticais, a ligação entre cada um deles é articulada, de modo que a rigidez transversal seja desprezível em relação à sua rigidez no plano. Para garantir a estabilidade das edificações, é necessário que os painéis sejam dispostos em ambas as direções, de forma a receberem as cargas das lajes e fornecerem estabilidade transversal em duas direções.

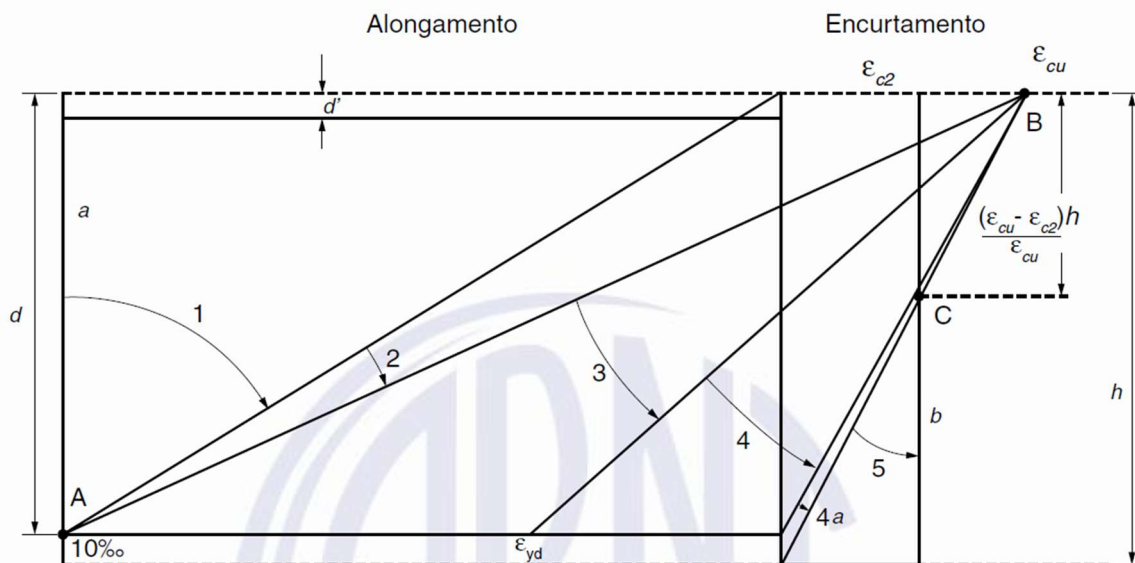
Quanto aos elementos horizontais que compõem as lajes, eles também são considerados articulados em seus apoios, ou seja, são considerados isostáticos, para que nenhum momento seja transmitido aos elementos verticais de apoio. A MK (2009) estabelece que a rigidez à flexão dos elementos horizontais deve ser limitada pela consideração de um módulo de elasticidade longitudinal E igual a 3000 MPa, e os cálculos são realizados dentro da zona de comportamento elástico.

4.1 Estado Limite Último – Hipóteses de Cálculo

Para o dimensionamento dos painéis autoportantes de EPS serão feitas algumas considerações:

- a) as deformações das telas de aço e da camada de argamassa devem ser diretamente proporcionais à distância da linha neutra;
- b) assume-se que as seções planas normais ao eixo de flexão permanecem planas depois da flexão. Isso ocorre devido às vinculações internas por meio do uso de conectores transversais de cisalhamento entre as duas malhas nas faces do EPS;
- c) no dimensionamento dos painéis de EPS solicitados à flexão deve-se desprezar a resistência à tração do concreto;
- d) as máximas tensões de compressão devem ser menores ou iguais à resistência à compressão do painel;
- e) para flexão ou flexo-compressão, o máximo encurtamento da face comprimida de concreto na ruptura se limita a 0,0035 ($\epsilon_{cu} = 3,5\text{‰}$) e no início do patamar elástico se limita a 0,002 ($\epsilon_{c2} = 2,0\text{‰}$);
- f) o máximo alongamento do aço se limita a 0,01 ($\epsilon_u = 10\text{‰}$);
- g) a distribuição de tensões de compressão nos elementos submetidos à flexão pode ser representada por um diagrama retangular, conforme permite a NBR 6118:2014 na alínea e do item 17.2.2;
- h) o estado-limite último é caracterizado quando a distribuição das deformações na seção transversal pertencer a um dos domínios definidos na Figura 41.

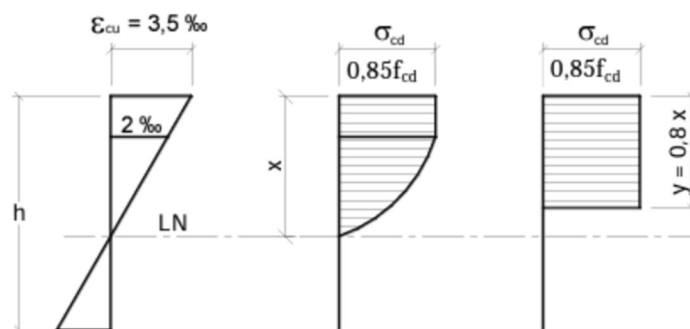
Figura 41 – Domínios de estado-limite último de uma seção transversal



Fonte: NBR 6118:2014, p. 122.

O diagrama retangular simplificado de distribuição de tensões de compressão (σ_{cd}) e altura $y = 0,8x$ (para concretos com $f_{ck} \leq 50$ MPa) é mostrado na Figura 42 onde x é a altura da linha neutra em relação à fibra mais comprimida.

Figura 42 – Diagramas $\sigma \times \epsilon$, parábola-retângulo e retangular simplificado.



Fonte: Bastos (2021a).

A deformação de início de escoamento de cálculo (ϵ_{yd}) é 1,04‰ para o aço CA-25, 2,07‰ para o CA-50 e 2,48‰ para o CA-60.

4.2 Flexão Composta

As paredes formadas por painéis de EPS estão submetidas tanto a esforço normal quanto a momento fletores, caracterizando uma situação de flexão composta. Será considerado um grau de composição total das camadas de argamassa do painel, o

que implica que as duas capas trabalham em conjunto, sem ocorrência de falhas nos conectores de cisalhamento.

Segundo Bastos (2021a) a flexão composta é a atuação conjunta de força normal e momento fletor em determinado elemento, para força normal de tração tem-se a flexo-tração e para força normal de compressão tem-se a flexo-compressão. As equações aplicadas no dimensionamento de tirantes, pilares, vigas e lajes têm como origem os domínios de deformações das seções transversais e seu estudo é dividido quanto aos seguintes tipos de esforços:

- a) tração-simples e flexo-tração com pequena excentricidade: o esforço solicitante predominante é a força normal e as duas armaduras são tracionadas. Os domínios possíveis são a Reta a e domínio 1. A linha neutra (LN) está posicionada entre $-\infty < x < 0$;
- b) flexão composta com grande excentricidade: o esforço predominante é o momento fletor, o que resulta em uma armadura tracionada e a outra comprimida. A LN se encontra entre $0 < x < d$ e os domínios correspondentes são 2, 3 e o 4;
- c) flexo-compressão com pequena excentricidade e compressão simples: o esforço predominante é a força de compressão, as duas armaduras estão comprimidas. A LN se encontra no intervalo entre $d < x < +\infty$, correspondente aos domínios 4a, 5 e Reta b.

4.2.1 Lajes

Na flexão composta com grande excentricidade o esforço predominante é o momento fletor e o ELU é caracterizado pela deformação de alongamento no aço de 10‰ no domínio 2 e pela deformação de encurtamento do concreto de 3,5‰ nos domínios 3 e 4. Esse problema é indeterminado e possui infinitos valores de x como solução, pois existem apenas duas equações de equilíbrio ($\sum F=0$ e $\sum M=0$) e três incógnitas (x , A_s e A_s') (BASTOS, 2021a).

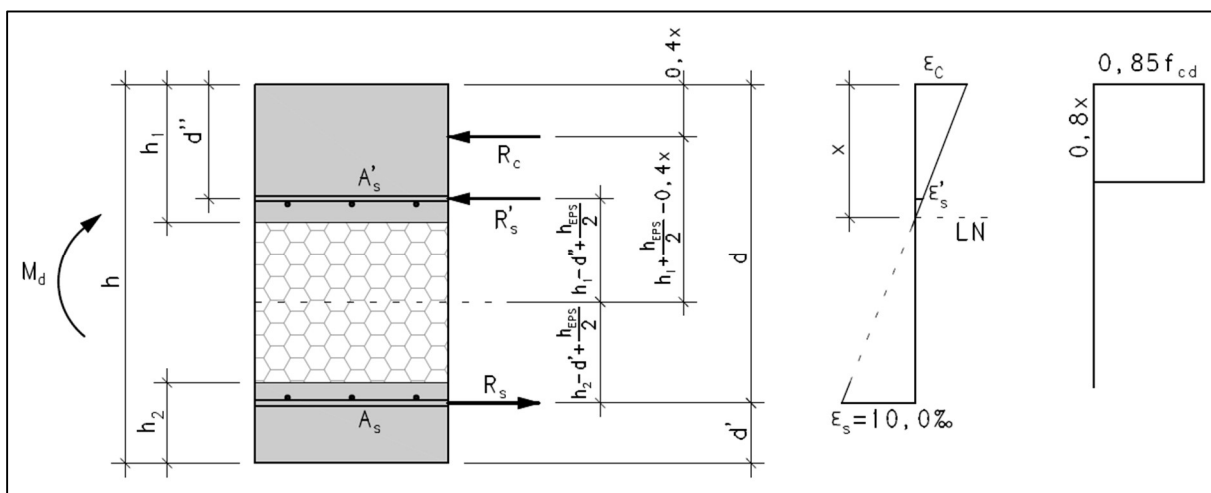
Segundo Bastos (2021a) a solução mais econômica para essa situação é adotar x no limite dos domínios 3 e 4, o que corresponde à deformação de início de escoamento na armadura tracionada e o máximo encurtamento no concreto. No entanto, a NBR 6118 no item 16.6.4.3 apresenta limites para a ductilidade de vigas e

lajes, estabelecendo que a posição da linha neutra no ELU deve obedecer a $x/d \leq 0,45$ para concretos com $f_{ck} \leq 50$ MPa.

Para o estudo do dimensionamento dos painéis será adotado um modelo resistente a flexão em que a linha neutra não ultrapassa a espessura da camada superior de argamassa, ou seja, está entre $0 < x < h_1$. Perez (2005) considera o rompimento da seção atingido quando a deformação do aço atinge o valor de 10‰ e a fibra mais comprimida de argamassa atinge o valor de 2‰, caracterizando assim o domínio 2 de deformações. Porém será utilizado o limite de 3,5‰ para a deformação da camada de argamassa.

Para os painéis utilizados em lajes a MK2 (2009) aconselha a utilização de uma capa de concreto superior, onde ocorrerá a compressão, com espessura de 5 cm e a capa inferior com espessura de 3 cm. Na Figura 35 estão representadas as solicitações em uma seção transversal de um painel de EPS e um diagrama genérico de deformações do domínio 2.

Figura 43 – Flexo-compressão com grande excentricidade em seção de painel no domínio 2.



Fonte: Acervo próprio.

O equilíbrio dos momentos fletores em um ponto no meio da camada de EPS pode ser obtido por:

$$M_{Rd} = R_s * \left(h_2 - d' + \frac{h_{EPS}}{2} \right) + R'_s * \left(h_1 - d'' + \frac{h_{EPS}}{2} \right) + R_c * \left(h_1 + \frac{h_{EPS}}{2} - 0,4x \right)$$

Onde:

R_s e R'_s : forças resultantes nas barras de aço dadas por:

$$R_s = A_s * \sigma_{sd}$$

$$R'_s = A'_s * \sigma'_{sd}$$

R_c : força resultante de compressão no concreto, dada por:

$$R_c = A_c * \sigma_{cd} = b * 0,8x * 0,85f_{cd} = 0,68bx f_{cd}$$

Substituindo R_c , R_s , R'_s na equação de equilíbrio de momento, obtém-se o valor do momento fletor resistente de cálculo do painel:

$$M_{Rd} = A_s * \sigma_{sd} * \left(h_2 - d' + \frac{h_{EPS}}{2} \right) + A'_s * \sigma'_{sd} * \left(h_1 - d'' + \frac{h_{EPS}}{2} \right) + 0,68bx f_{cd} * \left(h_1 + \frac{h_{EPS}}{2} - 0,4x \right)$$

Como a armadura está sob a deformação de 10‰, a tensão no aço, σ_{sd} , corresponde à máxima tensão de escoamento permitida, f_{yd} . As equações de compatibilidade de deformação são dadas por:

$$\frac{\varepsilon_s}{d - x} = \frac{\varepsilon'_s}{x - d''} = \frac{\varepsilon_c}{x}$$

A deformação limite de encurtamento do concreto $\varepsilon_c = 2,0\text{‰}$ foi estabelecida pelas referências utilizadas, entretanto julga-se interessante a avaliação para uma deformação entre 2,0‰ e 3,5‰.

Caso seja calculado um momento solicitante maior que o resistente uma possível solução a ser adotada é acrescentar barras de aço na camada inferior dos painéis mais solicitados.

Utilizando a equação de resistência dos materiais, o momento na laje em determinado ponto y da seção transversal pode ser obtido através da tensão na seção:

$$\sigma = \frac{My}{I} \rightarrow \varepsilon E = \frac{My}{I} \rightarrow M = \frac{\varepsilon EI}{y}$$

4.2.2 Pilares / Paredes

Segundo Bastos (2021a) o esforço predominante nos pilares é a força normal de compressão, e devido à pequena excentricidade da força tem-se uma flexo-

compressão com pequena excentricidade. A seção transversal do elemento terá as duas armaduras comprimidas.

Os domínios correspondentes às deformações nessa situação são os domínios 4a, 5 e a reta b. A linha neutra (LN) se encontra no intervalo $d < x < +\infty$ e o ELU é caracterizado pela deformação de encurtamento do concreto de 3,5‰ no domínio 4a, 2,0‰ a $3h/7$ no domínio 5 e 2,0‰ na reta b.

Esse problema é indeterminado e possui infinitos valores de x como solução, pois existem apenas duas equações de equilíbrio ($\sum F=0$ e $\sum M=0$) e três incógnitas (x , A_s e A_s'). Adota-se então um valor de x e determina-se as deformações (ε_s e ε'_s) e as tensões atuantes nas armaduras (σ_{sd} e σ'_{sd}). Aplica-se então os valores das tensões nas equações de equilíbrio. Segundo Bastos (2021a) a condição econômica é obtida ao fixar a reta b ($\varepsilon_c = \varepsilon_s = \varepsilon'_s = 2\text{‰}$) ou com $A_s = 0$.

Em função da altura da linha neutra na seção são três as situações possíveis:

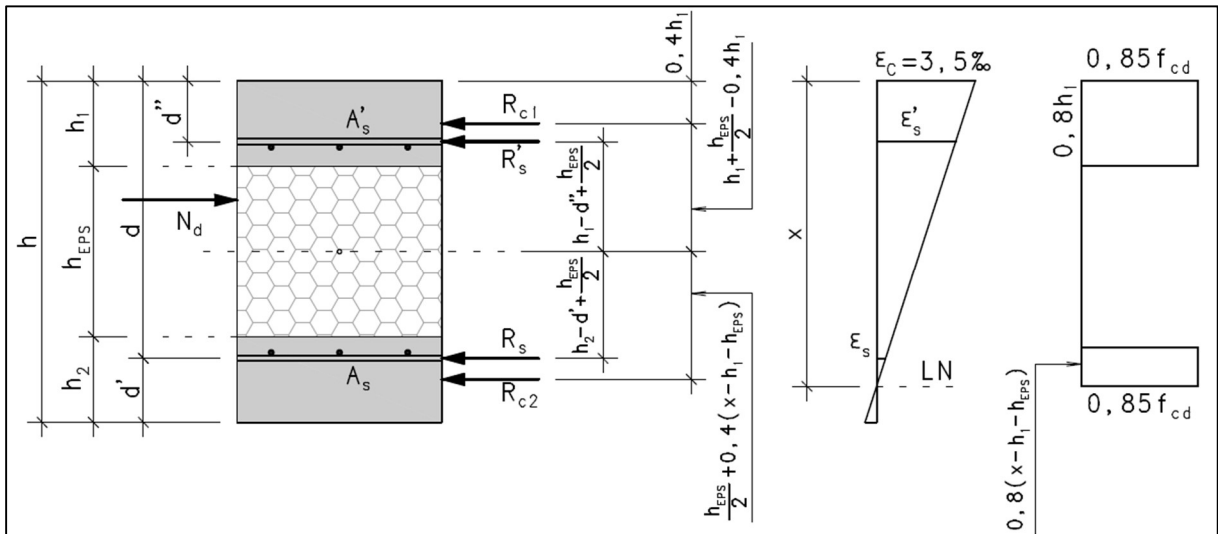
a) $x < d$

Nesse caso uma armadura está tracionada e uma das capas está comprimida. Essa situação é caracterizada como flexo-compressão com grande excentricidade, e como visto para as lajes no item anterior a linha neutra deve permanecer dentro da capa comprimida;

b) $d \leq x < h$

Nesse caso a capa superior está comprimida com deformação de encurtamento de 3,5‰ e a capa inferior possui apenas uma parte sofrendo compressão. As duas armaduras estão comprimidas, como mostrado na Figura 44. A seção encontra-se no domínio 4a e é caracterizada por solicitação de flexo-compressão com pequena excentricidade.

Figura 44 – Flexo-compressão com pequena excentricidade em seção do painel de EPS com $d \leq x < h$



Fonte: Acervo próprio.

A equação de equilíbrio de forças é dada por:

$$N_{Rd} = R_s + R'_s + R_{c1} + R_{c2}$$

$$N_{Rd} = A_s \cdot \sigma_{sd} + A'_s \cdot \sigma'_{sd} + 0,85f_{cd}b(0,8h_1) + 0,85f_{cd}b[0,8(x - h_1 - h_{EPS})]$$

A equação de equilíbrio de momento em $h/2$ é dada por:

$$M_{Rd} = (-A_s \cdot \sigma_{sd}) \cdot \left(h_2 - d' + \frac{h_{EPS}}{2} \right) + (A'_s \cdot \sigma'_{sd}) \cdot \left(h_1 - d'' + \frac{h_{EPS}}{2} \right) + 0,68f_{cd}bh_1 \cdot \left(h_1 + \frac{h_{EPS}}{2} - 0,4h_1 \right) - 0,68f_{cd}b(x - h_1 - h_{EPS}) \cdot \left[\frac{h_{EPS}}{2} + 0,4(x - h_1 - h_{EPS}) \right]$$

Entretanto, a tração no concreto não é levada em consideração, reduzindo a equação acima para:

$$M_{Rd} = (-A_s \cdot \sigma_{sd}) \cdot \left(h_2 - d' + \frac{h_{EPS}}{2} \right) + (A'_s \cdot \sigma'_{sd}) \cdot \left(h_1 - d'' + \frac{h_{EPS}}{2} \right) + 0,68f_{cd}bh_1 \cdot \left(0,6h_1 + \frac{h_{EPS}}{2} \right)$$

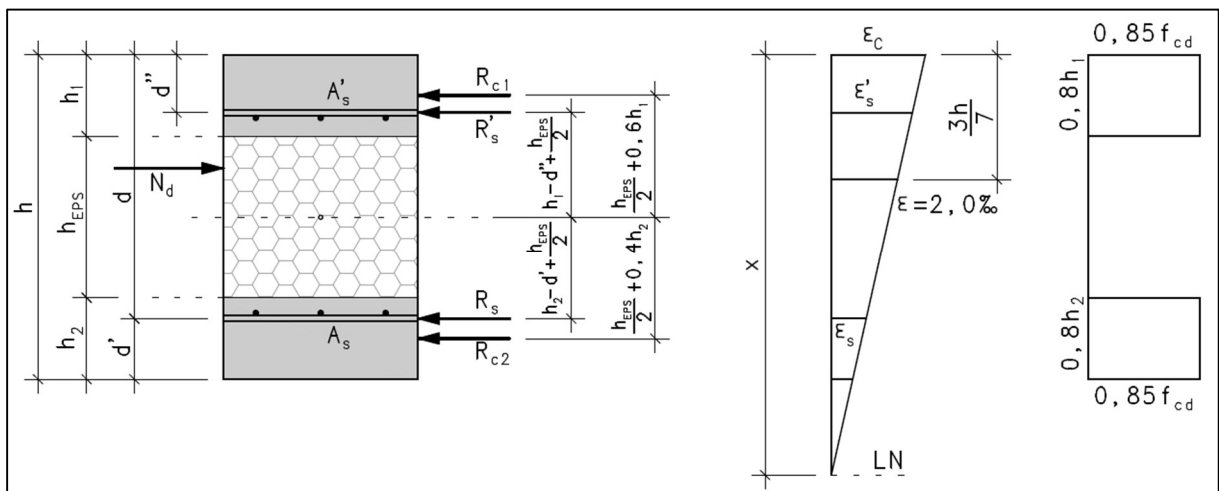
As equações de compatibilidade de deformações são dadas por:

$$\frac{\varepsilon_s}{x - d} = \frac{\varepsilon'_s}{x - d'} = \frac{3,5\text{‰}}{x}$$

c) $x \geq h$

Nesse caso toda a altura da seção está submetida a tensões de compressão e as resultantes de compressão das camadas de concreto estão aplicadas a $0,4h_1$ e a $0,4h_2$, como mostrado na Figura 45. A seção pode estar no domínio 5 ou na Reta b.

Figura 45 – Flexo-compressão com pequena excentricidade em seção do painel de EPS com $x \geq h$ e domínio 5.



Fonte: Acervo próprio.

Fazendo o equilíbrio das forças na seção temos:

$$N_{Rd} = A_s * \sigma_{sd} + A'_s * \sigma'_{sd} + 0,85f_{cd}b(0,8h_1) + 0,85f_{cd}b(0,8h_2)$$

A equação de equilíbrio de momento em $h/2$ é dada por:

$$M_{Rd} = (-A_s * \sigma_{sd}) * \left(h_2 - d' + \frac{h_{EPS}}{2} \right) + (A'_s * \sigma'_{sd}) * \left(h_1 - d'' + \frac{h_{EPS}}{2} \right) + 0,68f_{cd}bh_1 * \left(0,6h_1 + \frac{h_{EPS}}{2} \right) - 0,68f_{cd}bh_2 * \left(\frac{h_{EPS}}{2} + 0,4h_2 \right)$$

Novamente, a parcela de concreto que está sob tração para equilíbrio do momento na seção não é levada em consideração, a equação portanto se resume a:

$$M_{Rd} = (-A_s * \sigma_{sd}) * \left(h_2 - d' + \frac{h_{EPS}}{2} \right) + (A'_s * \sigma'_{sd}) * \left(h_1 - d'' + \frac{h_{EPS}}{2} \right) + 0,68f_{cd}bh_1 * \left(0,6h_1 + \frac{h_{EPS}}{2} \right)$$

As equações de compatibilidade das deformações dependem dos domínios:

Tabela 2 – Equações de compatibilidade

Domínio 5	Reta b
$\frac{\varepsilon_s}{x-d} = \frac{\varepsilon'_s}{x-d'} = \frac{2\text{‰}}{x - \frac{3h}{7}}$	$\varepsilon_c = \varepsilon_s = \varepsilon'_s = 2\text{‰}$ $\sigma_{sd} = 420\text{MPa p/ CA-50}$

Fonte: Acervo próprio.

Para encontrar o esforço normal resistente e o momento resistente de um painel supõe-se valores para a altura da linha neutra, x , para obtenção das deformações e conseqüentemente dos esforços. Caso seja calculado um momento solicitante maior que o resistente uma possível solução a ser adotada é acrescentar barras de aço nas camadas de concreto dos painéis mais solicitados.

4.3 Cortante em Vigas

Segundo o item 17.4.2 da NBR 6118:2014 a resistência cortante do elemento estrutural deve ser considerada satisfatória quando verificada simultaneamente as seguintes condições:

$$V_{sd} \leq V_{Rd2}$$

$$V_{sd} \leq V_{Rd3} = V_c + V_{sw}$$

Onde

V_{sd} é a força cortante solicitante de cálculo na seção;

V_{Rd2} é a força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto;

$V_{Rd3} = V_c + V_{sw}$ é a força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína por tração diagonal, onde V_c é a parcela de força cortante absorvida por mecanismos complementares ao da treliça e V_{sw} a parcela resistida pela armadura transversal.

O modelo I de cálculo prescrito na norma admite diagonais de compressão inclinadas de $\theta = 45^\circ$ em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural e admite

ainda que a parcela complementar V_c tenha valor constante independentemente de V_{sd} .

a) Verificação da compressão diagonal do concreto:

$$V_{Rd2} = 0,27\alpha_{v2}f_{cd}b_wd$$

Onde

$$\alpha_{v2} = \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$$

b) Cálculo da armadura transversal

$$V_{Rd} = V_c + V_{sw}$$

Onde

$$V_{sw} = \left(\frac{A_{sw}}{s}\right) 9df_{ywd}(\text{sen}\alpha + \text{cos}\alpha);$$

$V_c = 0$ nos elementos estruturais tracionados quando a linha neutra se situa fora da seção;

$V_c = V_{c0}$ na flexão simples e na flexo-tração com a linha neutra cortando a seção;

$V_c = V_{c0}\left(1 + \frac{M_0}{M_{sd,max}}\right) \leq 2V_{c0}$ na flexo-compressão;

$$V_{c0} = 0,6f_{ctd}b_wd;$$

$$f_{ctd} = f_{ctk,inf}/\gamma_c;$$

$f_{ctk,inf} = 0,7f_{ct,m}$ e para concretos de classes até C50, onde $f_{ct,m} = 0,3f_{ck}^{2/3}$;

b_w é a menor largura da seção;

d é a altura útil da seção;

s é o espaçamento entre elementos da armadura transversal A_{sw} ;

f_{ywd} é a tensão na armadura transversal, limitada ao valor f_{yd} no caso de estribos e a 70% desse valor no caso de barras dobradas, não se tomando para ambos os casos, valores superiores a 435 MPa;

α é o angulo de inclinação da armadura transversal em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural, podendo-se tomar $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$;

M_0 é o valor do momento fletor que anula a tensão normal de compressão na borda da seção (tracionada por $M_{d,max}$), provocada pelas forças normais de diversas origens concomitantes com V_{sd} ;

$M_{sd,max}$ é o momento fletor de cálculo máximo no treco em análise.

Segundo Pérez (2005) podem ser apresentados três casos de ruptura da armadura transversal que compõe o painel: flambagem de conectores; ruptura por tração nos conectores e ruptura na solda.

a) Flambagem nos conectores

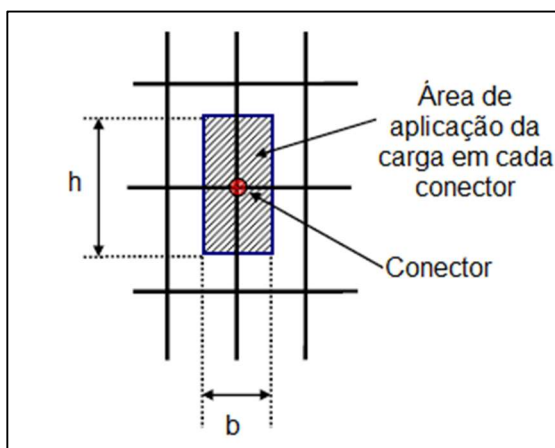
Neste caso, estabelece-se para uma determinada carga o diâmetro mínimo necessário do conector para evitar a flambagem. O comprimento de flambagem do conector com ambas as extremidades travadas pelas camadas de concreto é estabelecido, bem como a carga crítica a partir da fórmula de Euler:

$$P_{crit} = \frac{\pi^2 EI_c}{l^2}$$

O valor da carga crítica em cada conector dependerá da área de aplicação de carga em cada um deles de acordo com a grade que eles formam. Dentro desta carga crítica de Euler, o valor da inércia do conector (I_c) é obtido pelo momento de inércia para uma seção circular:

$$I_c = \frac{\pi \phi^4}{64} = 0,05\phi^4$$

Figura 46 – Área de influência sobre os conectores



Fonte: Pérez (2005), adaptada.

Desta forma, substituindo o valor do momento de inércia na equação de Euler, obtém-se o diâmetro mínimo necessário dos conectores para que não sofram flambagem:

$$\varnothing^4 = \frac{P_{crit} l^2}{0,05\pi^2 E}$$

b) Ruptura por tração

A tensão máxima no conector não deve ser maior que a tensão máxima suportada pelo material (f_{yk}), para que desta forma não ocorra uma ruptura por tração no conector. A tensão nos conectores é obtida por meio da carga que atinge cada conector sobre sua área ($\sigma = F/A$)

c) Ruptura na solda

Assim como no caso anterior, segundo Pérez (2005) a tensão máxima para o conector não deve ser superior ao limite elástico do aço, reduzido em 30% para as soldas das juntas. Evitando assim um desprendimento total da união do conector com a malha que compõe o painel.

4.4 Cortante em Lajes

Segundo a NBR 6118:2014 no capítulo 19.4.1 as lajes maciças ou nervuradas podem prescindir de armadura transversal quando a força cortante de cálculo a uma distância d da face do apoio obedecer a:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd1}$$

Onde:

V_{Rd1} é a força cortante resistente de cálculo e é dada por:

$$V_{Rd1} = [\tau_{Rd}k(1,2 + 40\rho_1) + 0,15\sigma_{cp}]b_wd$$

Onde:

τ_{Rd} é a tensão resistente de cálculo do concreto ao cisalhamento

$$\tau_{Rd} = 0,25f_{ctd} ;$$

$$f_{ctd} = f_{ctk,inf}/\gamma_c ;$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7f_{ct,m} \text{ e para concretos de classes até C50, onde } f_{ct,m} = 0,3f_{ck}^{2/3};$$

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_wd}, \text{ não menor que } |0,02|;$$

$$\sigma_{cp} = N_{sd}/A_c ;$$

K é um coeficiente que é dado por:

$k = |1|$ para elementos onde 50% da armadura inferior não chega até o apoio;

$k = |1,6 - d|$ para os demais casos, não menor que $|1|$ e sendo d a altura útil e em metros;

A_{s1} é a área da armadura de tração que se estende até não menos que $d + l_{b,nec}$ além da seção considerada, com $l_{b,nec}$ definido em 9.4.2.5

b_w é a largura mínima da seção ao longo da altura útil d ;

N_{sd} é a força longitudinal na seção devida à protensão ou carregamento.

4.5 Estado Limite de Serviço

Segundo a NBR 6118:2014 nos estados limites de serviço as estruturas trabalham parcialmente no estágio I e parcialmente no estágio II e a separação entre os dois comportamentos é dada pelo momento de fissuração M_r :

$$M_r = \frac{\alpha f_{ct} l_c}{y_t}$$

Onde:

α : é o fator que correlaciona aproximadamente a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta ($\alpha = 1,2$ para seções T ou duplo T, $\alpha = 1,3$ para seções I ou T invertido e $\alpha = 1,5$ para seções retangulares);

y_t : é a distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada;

I_c : é o momento de inércia da seção bruta de concreto;

f_{ct} : é a resistência à tração direta do concreto e é dado por $f_{ct} = f_{ctk,inf} = 0,7f_{ct,m}$ e para concretos de classes até C50 $f_{ct,m} = 0,3f_{ck}^{2/3}$.

4.5.1 Flecha Imediata

Segundo a NBR 6118:2014 a flecha imediata em vigas e lajes é calculada através da expressão de rigidez equivalente dada no item 17.3.2.1.1 da norma:

$$(EI)_{eq,t0} = E_{cs} \left\{ \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] I_{II} \right\} \leq E_{cs} I_c$$

Onde:

I_c : é o momento de inércia da seção bruta de concreto;

I_{II} : é o momento de inércia da seção fissurada de concreto no estágio II, calculado com $\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}}$;

M_a : é o momento fletor na seção crítica do vão considerado, ou seja, o momento máximo no vão para vigas biapoiadas ou contínuas e momento no apoio para balanços, para a combinação de ações considerada nessa avaliação;

M_r : é o momento de fissuração do elemento estrutural, cujo valor deve ser reduzido à metade no caso de utilização de barras lisas;

E_{cs} : é o módulo de elasticidade secante do concreto.

Se $M_a > M_r \rightarrow EI = (EI)_{eq}$ e se $M_a < M_r \rightarrow EI = E_{cs} I_c$

4.5.2 Flecha diferida no tempo

A flecha adicional diferida, decorrente das cargas de longa duração em função da fluência, segundo a NBR 6118:2014 descreve no item 17.3.2.1.2, pode ser calculada de maneira aproximada pela multiplicação da flecha imediata pelo fator α_f dado pela expressão:

$$\alpha_f = \frac{\Delta\xi}{1 + 50\rho'}$$

Onde:

$$\rho' = \frac{A_s'}{bd}$$

ξ : é um coeficiente função do tempo, dado pela tabela 17.1 da NBR 6118:2014

Figura 47 – Valores do coeficiente ξ em função do tempo

Tempo (t) meses	0	0,5	1	2	3	4	5	10	20	40	≥ 70
Coeficiente $\xi(t)$	0	0,54	0,68	0,84	0,95	1,04	1,12	1,36	1,64	1,89	2

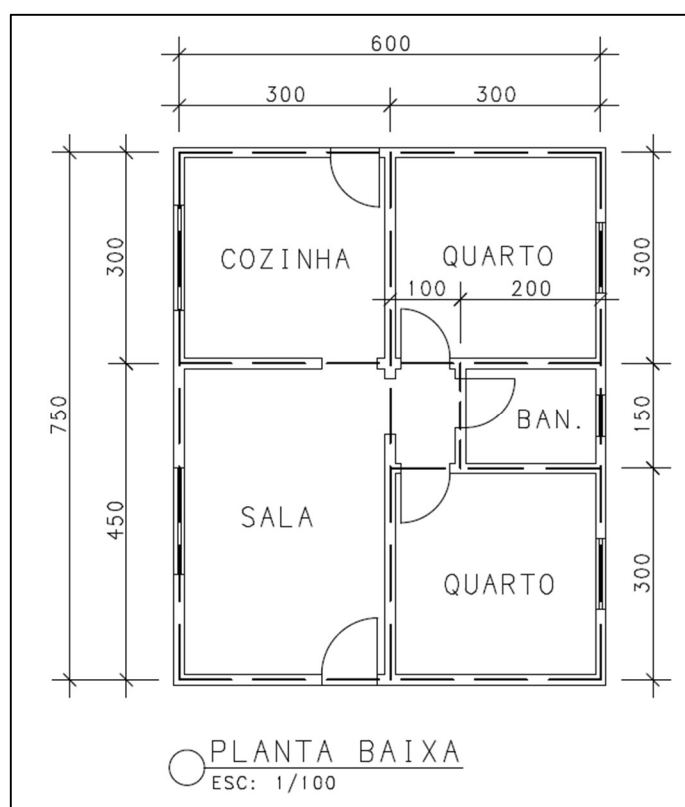
Fonte: NBR 6118:2014, p. 127.

O valor da flecha total é obtido multiplicando a flecha imediata por $(1 + \alpha_f)$.

5 CONCEPÇÕES ESTRUTURAIS

Neste capítulo será desenvolvido um exemplo de cálculo para a estrutura de uma edificação (Figura 48) de um pavimento composta de dois quartos, um banheiro, uma sala e uma cozinha, resultando em uma área de 45 m². O pavimento Térreo será coberto por uma laje impermeabilizada e terá pé-direito de 3 m de altura.

Figura 48 – Planta baixa do pavimento Térreo



Fonte: Acervo próprio.

Propõe-se o desenvolvimento de uma concepção estrutural composta de painéis de EPS simples nas paredes e nas lajes, e para análise e comparação será proposto também o desenvolvimento de uma concepção estrutural de concreto armado com alvenaria de bloco cerâmico. Além da mudança nas restrições das lajes e a criação de um segundo pavimentos para estudo da influência no modelo e realização de uma comparação de custos entre as concepções.

Para desenvolvimento dos cálculos dos painéis de EPS será considerado que as camadas de argamassa trabalham de forma composta, ou seja, possuem grau de composição total e que as lajes somente se apoiam nas paredes. Essas

considerações simplificam o modelo estrutural para que não ocorra esforço de momento fletor nas paredes e nem momentos negativos nas lajes.

5.1 Concepção estrutural de painéis monolíticos de EPS

A argamassa será considerada com resistência à compressão de 25 MPa, módulo de deformação longitudinal (E_{ci}) igual à 15,68 MPa, módulo de deformação secante (E_{cs}) igual à 13,52 MPa, coeficiente de Poisson (ν) igual à 0,2 e coeficiente de dilatação térmica igual à $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. E o aço possui como propriedades o módulo de elasticidade (E) igual à 210 GPa, coeficiente de Poisson (ν) igual à 0,3, coeficiente de dilatação térmica igual à $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e tensão de escoamento (f_{yd}) igual à 500 MPa.

O painel que compõe as paredes possui espessura total de 15 cm e é composto por uma placa de EPS de 8 cm de espessura, por duas camadas de argamassa de 3,5 cm de espessura e por telas de aço eletrosoldadas nas duas faces constituídas por barras de $\varnothing 2,5$ mm com espaçamento de 5 cm.

O painel utilizado na laje possui espessura total de 12 cm e é composto por uma placa de EPS de 4 cm de espessura, por uma camada superior de argamassa de 5 cm e uma inferior de 3 cm de espessura e por telas de aço eletrosoldadas nas duas faces constituídas por barras de $\varnothing 2,5$ mm com espaçamento de 5 cm.

O cálculo da inércia do painel será feito sem considerar o aço. A altura do centro geométrico da seção (h) e o momento de inércia da seção (I) são dados por:

$$h = \frac{A_1 * d_1 + A_2 * d_2}{A_1 + A_2}$$

$$I = \frac{b * h_1^3}{12} + (b * h_1) * (h - d_1)^2 + \frac{b * h_2^3}{12} + (b * h_2) * (d_2 - h)^2$$

Na Tabela 3 estão dispostos os dados utilizados para o cálculo e os valores de h e I para cada painel utilizado

Tabela 3 – Momento de Inércia dos painéis

Painel	b (cm)	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	h _{EPS} (cm)	d ₁ (cm)	d ₂ (cm)	A ₁ (cm ²)	A ₂ (cm ²)	h (cm)	I (cm ⁴)
Parede	100	3,5	3,5	8	1,75	13,3	350	350	7,5	2,39E+04
Laje	100	5	3	4	2,5	10,5	500	300	5,5	1,33E+04

Fonte: Acervo próprio.

As ações que atuam na estrutura são divididas em permanentes (G) e variáveis (Q). As ações permanentes são divididas em peso próprio dos painéis (PP), especificados na Tabela 4, e peso próprio dos revestimentos (REV.), definido de acordo com a NBR 6120:2019 como 1 kN/m². As ações variáveis também são definidas na NBR 6120:2019 e possuem valores específicos para cada cômodo da edificação. Os valores são 1,5 kN/m² para dormitórios, sala, copa, cozinha, sanitários; 2 kN/m² para despensa e área de serviço e 1 kN/m² para cobertura. Como simplificação e consideração para o pior caso foi adotado um valor de 2 kN/m² para as cargas variáveis em todas as lajes.

Para o cálculo do peso próprio (PP) dos painéis foram considerados os valores de 2100 kg/m³ de massa específica da argamassa, 7850 kg/m³ de massa específica do aço e 22 kg/m³ para a densidade do EPS. Os pesos dos painéis são dados na Tabela 4.

Tabela 4 – Peso próprio dos painéis

Painel	A _s (cm ²)	A' _s (cm ²)	γ _{arg} (kg/m ³)	γ _{aço} (kg/m ³)	γ _{EPS} (kg/m ³)	PP (kg/m ²)	PP (kN/m ²)
Parede	1,96	1,96	2100	7850	22	154,91	1,52
Laje	1,96	1,96	2100	7850	22	175,03	1,72

Fonte: Acervo próprio.

Os coeficientes majoradores das cargas utilizados são 1,4 para cargas variáveis, 1,4 para cargas permanentes. Os coeficientes ponderadores dos valores de resistências são 1,15 para o aço e 1,5 para a argamassa. O valor de cálculo para as cargas nas lajes para combinação no estado limite último (F_d) é obtido multiplicando os coeficientes pelas cargas, esses valores são mostrados na Tabela 5.

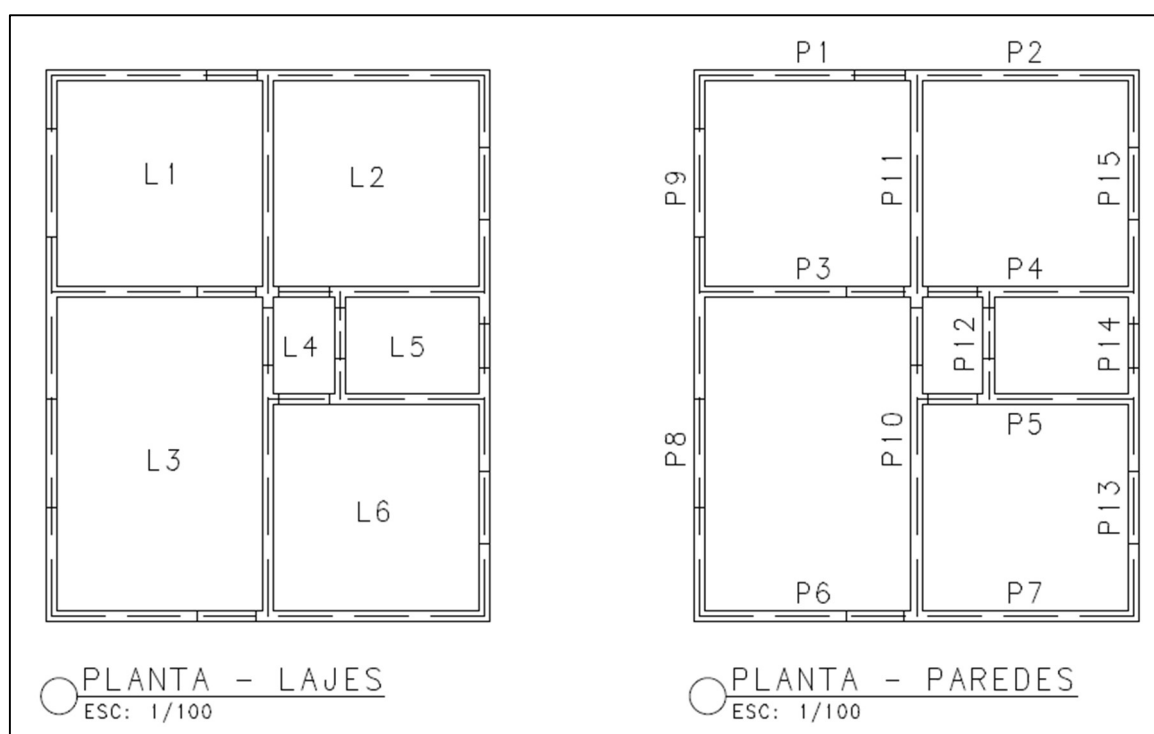
Tabela 5 – Valores de cálculo para as cargas atuantes na edificação

Permanente (G) (kN/m ²)		Variável (Q) (kN/m ²)	Coeficientes de Ponderação		Carga Total (kN/m ²)
Peso Próprio	Revestimento		G	Q	
1,72	1,0	2,0	1,4	1,4	6,61

Fonte: Acervo próprio.

Na Figura 49 seguem a planta de formas das lajes da cobertura e a planta de forma das paredes do térreo. A laje do térreo foi considerada como Radier, e não será calculada nem detalhada neste trabalho.

Figura 49 – Plantas de formas das lajes da Cobertura e das paredes do Térreo



Fonte: Acervo próprio.

Segundo a NBR 6118:2014 as reações de apoio das lajes podem ser obtidas através de triângulos e trapézios definidos de acordo com o tipo de apoio. Foi considerado que as lajes são apoiadas nas paredes e como pode se observar na planta baixa, todas as lajes possuem apoio nas 4 bordas.

Bastos (2021b) apresenta tabelas (A-5 a A-7) com coeficientes para auxílio do cálculo das reações de apoio para lajes armadas em duas direções e com carregamento uniformemente distribuído. As reações são calculadas por:

$$V = v \frac{p \ell_x}{10}$$

Onde:

V: é a reação de apoio (kN/m);

v: coeficiente tabelado em função de $\lambda = \ell_y/\ell_x$, onde:

v_x : reação na borda simplesmente apoiada perpendicular à direção de ℓ_x ;

v_y : reação na borda simplesmente apoiada perpendicular à direção de ℓ_y ;

p: valor da carga uniforme atuante na laje (kN/m²);

ℓ_x : menor vão da laje (m).

Tabela 6 – Valores das reações de apoio das lajes

Laje	ℓ_x (m)	ℓ_y (m)	λ	p (kN/m ²)	v_x	V_x (kN/m)	v_y	V_y (kN/m)
L1	3	3	1,00	6,6	2,5	4,73	2,5	4,95
L2	3	3	1,00	6,6	2,5	4,73	2,5	4,95
L3	3	4,5	1,50	6,6	3,33	6,29	2,5	4,95
L4	1	1,5	1,50	6,6	3,33	2,10	2,5	1,65
L5	1,5	2	1,33	6,6	3,11	2,94	2,5	2,48
L6	3	3	1,00	6,6	2,5	4,73	2,5	4,95

Fonte: Acervo próprio.

As reações de apoio das lajes são mostradas em planta na Figura 50.

μ_y : coeficiente para cálculo do momento fletor positivo atuante na direção paralela à direção de ℓ_y ;

p: valor da carga uniforme atuante na laje (kN/m²);

ℓ_x : menor vão da laje (m).

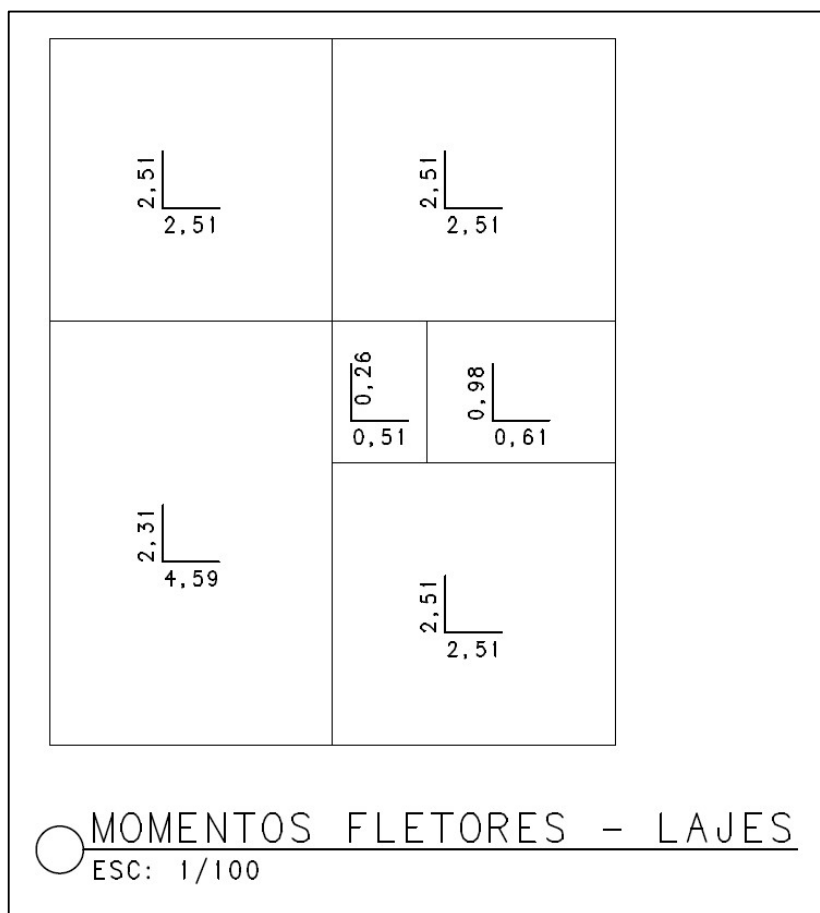
Tabela 7 – Momentos fletores nas lajes

Laje	Tipo	ℓ_x (m)	ℓ_y (m)	λ	p (kN/m ²)	μ_x	M_x (kN.m/m)	μ_y	M_y (kN.m/m)
L1	1	3	3	1,00	6,6	4,23	2,51	4,23	2,51
L2	1	3	3	1,00	6,6	4,23	2,51	4,23	2,51
L3	1	3	4,5	1,50	6,6	7,72	4,59	3,89	2,31
L4	1	1	1,5	1,50	6,6	7,72	0,51	3,89	0,26
L5	1	1,5	2	1,33	6,6	6,605	0,98	4,09	0,61
L6	1	3	3	1,00	6,6	4,23	2,51	4,23	2,51

Fonte: Acervo próprio.

Na imagem Figura 51 estão representados os valores dos momentos fletores em cada direção de cada laje.

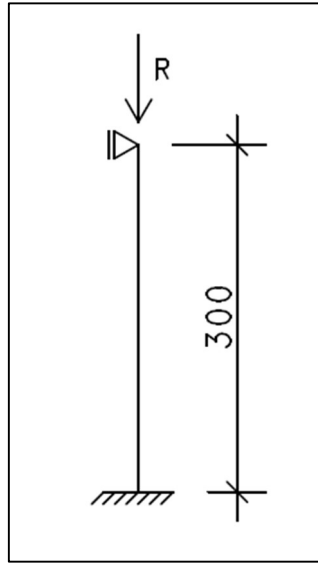
Figura 51 – Planta de momentos fletores nas lajes em kN.m/m



Fonte: Acervo próprio.

Para as paredes será considerado engaste na base da parede e apoio de primeiro gênero no topo, como mostra a Figura 52. Será considerado que a ligação entre elementos verticais adjacentes é articulada.

Figura 52 – Esquema de corpo livre para paredes considerando um nível na edificação



Fonte: Acervo próprio.

Segundo a NBR 6118:2014 o comprimento equivalente das paredes será $l_e = l$, portanto a esbeltez da parede é dada por:

$$\lambda_i = \frac{l_e}{i} = \frac{l}{\sqrt{\frac{I}{A}}} = \frac{300}{\sqrt{\frac{2,39E4}{1500}}} = 75,22$$

,

ordem. Como mostrado anteriormente o momento $M_{1d,min}$ é dado por:

$$M_{1d,min} = N_d * (0,015 + 0,03 * 0,15)$$

E o $M_{d,tot}$ é dado por:

$$M_{d,tot} = \alpha_b M_{1d,A} + N_d \frac{l_e^2}{10 r} \geq M_{1d,A}$$

As cargas verticais atuantes nas lajes são totalmente transferidas para as paredes, portanto a partir dos valores mostrados na Tabela 9 e na Figura 53 pode-se estabelecer quais as cargas em cada parede. Os momentos e as cargas estão dispostos na Tabela 8.

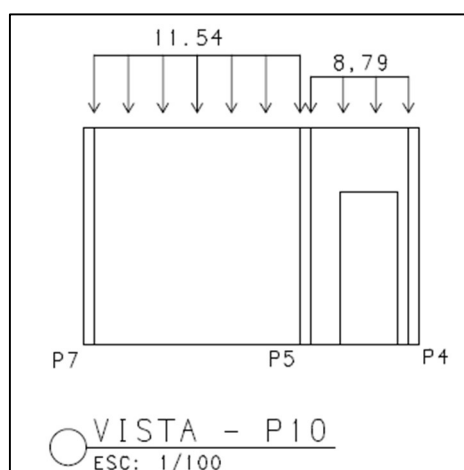
Tabela 8 – Cargas totais nas paredes

Paredes	Cargas (kN/m)		$M_{1d,min}$ (kN.m/m)		$M_{d,tot}$ (kN.m/m)	
	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 1	Trecho 2
P1	4,95	-	0,10	-	0,21	-
P2	4,95	-	0,10	-	0,21	-
P3	9,90	-	0,19	-	0,41	-
P4	6,60	8,03	0,13	0,16	0,28	0,33
P5	6,60	8,03	0,13	0,16	0,28	0,33
P6	4,95	-	0,10	-	0,21	-
P7	4,95	-	0,10	-	0,21	-
P8	6,59	-	0,13	-	0,27	-
P9	4,95	-	0,10	-	0,21	-
P10	11,54	8,79	0,23	0,17	0,48	0,37
P11	9,90	-	0,19	-	0,41	-
P12	4,68	-	0,09	-	0,20	-
P13	4,95	-	0,10	-	0,21	-
P14	2,48	-	0,05	-	0,10	-
P15	4,95	-	0,10	-	0,21	-

Fonte: Acervo próprio.

Na Figura 53 está representado as cargas atuantes na parede P10.

Figura 53 – Cargas atuantes na parede P10



Fonte: Acervo próprio.

5.1.1 Cálculo dos Esforços Resistentes para Lajes

O painel utilizado na laje possui espessura total de 12 cm e é composto por uma placa de EPS de 4 cm de espessura, por uma camada superior de argamassa de 5 cm e uma inferior de 3 cm de espessura e por telas de aço eletrosoldadas nas duas faces constituídas por barras de $\varnothing 2,5$ mm com espaçamento de 5 cm.

Sendo o cobrimento da armadura inferior, d' , igual à 2,5 cm, a altura útil d é dada por:

$$d = h - d' = 9,5 \text{ cm}$$

A altura da linha neutra, x , para uma deformação $\varepsilon_c = 2,0\text{‰}$ e $\varepsilon_s = 10,0\text{‰}$, é dada por:

$$\frac{\varepsilon_s}{d - x} = \frac{\varepsilon_c}{x} \rightarrow \frac{10}{9,5 - x} = \frac{2,0}{x} \rightarrow x = 1,58 \text{ cm}$$

Com isso o momento resistente de cálculo desse painel é de:

$$M_d = 10,51 \text{ kN.m/m}$$

A deformação limite de encurtamento do concreto $\varepsilon_c = 2,0\text{‰}$ foi estabelecida pelas referências utilizadas, entretanto julga-se interessante a avaliação para uma deformação entre 2,0‰ e 3,5‰, valores referentes ao encurtamento do concreto estabelecida na NBR 6118:2014.

Ao estabelecer $\varepsilon_c = 3,5\text{‰}$ obtém-se x igual à 2,47 cm e um momento resistente de cálculo M_{Rd} igual à 15,43 kN.m/m. E para o limite estabelecido em norma onde valor de x deve ser menor ou igual à $0,45d$ obtém-se $x = 4,278$ resultando em um momento M_{Rd} igual à 24,18 kN.m/m.

A seguir estão representados os valores de cálculo obtidos dos momentos fletores para esse exemplo ao variar a altura da linha neutra.

Figura 54 – Momento resistente do painel em função da altura da linha neutra

	x (cm)	ε_s (‰)	σ_{sd} (kN/cm ²)	ε_c (‰)	ε'_s (‰)	σ'_{sd} (kN/cm ²)	M _{Rd} (kN.m/m)
Domínio 2	0,2	-10,00	43,48	0,22	-4,62	-43,48	1,46
	0,4	-10,00	43,48	0,44	-4,51	-43,48	2,87
	0,6	-10,00	43,48	0,67	-4,38	-43,48	4,26
	0,8	-10,00	43,48	0,92	-4,25	-43,48	5,60
	1	-10,00	43,48	1,18	-4,12	-43,48	6,91
	1,2	-10,00	43,48	1,45	-3,98	-43,48	8,19
	1,4	-10,00	43,48	1,73	-3,83	-43,48	9,42
	1,6	-10,00	43,48	2,03	-3,67	-43,48	10,63
	1,8	-10,00	43,48	2,34	-3,51	-43,48	11,79
	2	-10,00	43,48	2,67	-3,33	-43,48	12,92
	2,2	-10,00	43,48	3,01	-3,15	-43,48	14,01
	2,4	-10,00	43,48	3,38	-2,96	-43,48	15,07
	2,47	-10,00	43,48	3,50	-2,88	-43,48	15,43
Domínio 3	2,47	9,96	43,48	3,50	-2,88	-43,48	15,43
	2,6	9,29	43,48	3,50	-2,56	-43,48	16,09
	2,8	8,38	43,48	3,50	-2,13	-43,48	17,07
	3	7,58	43,48	3,50	-1,75	-36,75	18,19
	3,2	6,89	43,48	3,50	-1,42	-29,86	19,27
	3,4	6,28	43,48	3,50	-1,13	-23,78	20,29
	3,6	5,74	43,48	3,50	-0,87	-18,38	21,26
	3,8	5,25	43,48	3,50	-0,64	-13,54	22,18
	4	4,81	43,48	3,50	-0,44	-9,19	23,05
	4,275	4,28	43,48	3,50	-0,18	-3,87	24,18

Fonte: Acervo próprio.

Para a equação da tensão pode-se calcular o valor máximo de momento fletor atuante na laje. Considerando o valor de módulo de elasticidade igual à 3000 MPa como sugerido pela MK (2009), sendo y igual à 6,5 cm, I igual à 1,33E4 cm⁴ e considerando um valor de deformação longitudinal no concreto $\varepsilon_c = 3,5\text{‰}$ obtém-se um momento fletor máximo igual à:

$$M = \frac{0,0035 * 1,33E4 * 300}{65} = 2143,07 \text{ kN.cm} = 21,43 \text{ kN.m/m}$$

Observa-se que o momento máximo será atingindo antes da linha neutra atingir o valor limite de 0,45d. sendo, portanto, a favor da segurança.

5.1.2 Cálculo dos Esforços Resistentes para Paredes

O painel que compõe as paredes possui espessura total de 15 cm e é composto por uma placa de EPS de 8 cm de espessura, por duas camadas de argamassa de

3,5 cm de espessura e por telas de aço eletrosoldadas nas duas faces constituídas por barras de $\varnothing 2,5$ mm com espaçamento de 5 cm.

Sendo o cobrimento das armaduras, $d' = d'' = 3,0$ cm, a altura útil, d , do painel é dada por:

$$d = h - d' = 12 \text{ cm}$$

Ao variar o valor da altura da linha neutra, x , obtém-se um diagrama de interação M-N com os esforços resistentes para essa configuração de painel para cada domínio.

Para x entre 12 e 15 cm a seção é caracterizada pelo domínio 4a de deformações, portanto os esforços resistentes para esse domínio são:

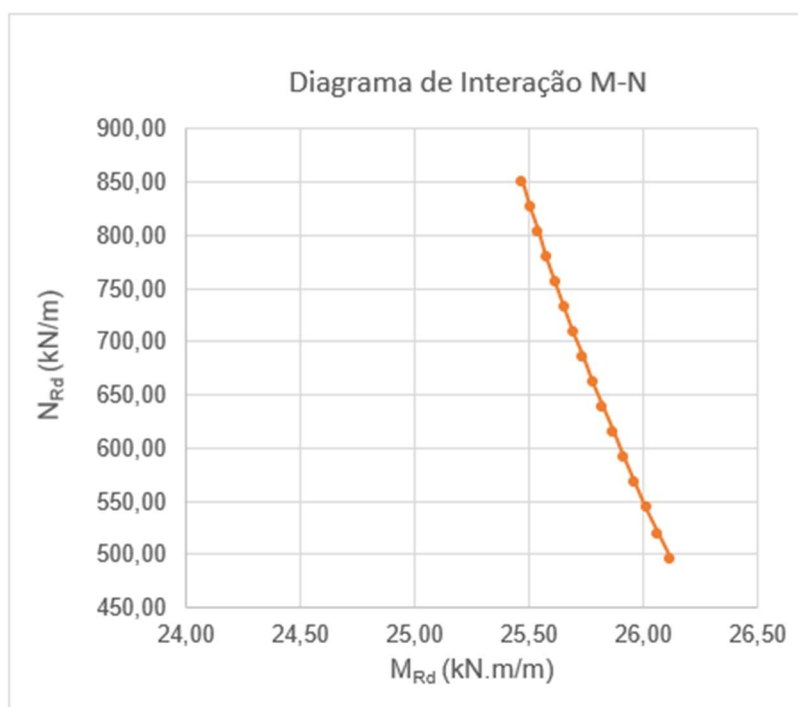
Figura 55 – Valores de M_{Rd} e N_{Rd} em função da altura da LN no domínio 4a

x	ε_s	σ_{sd} (kN/cm ²)	ε_c	ε'_s	σ'_{sd} (kN/cm ²)	M_{Rd} (kN.m/m)	N_{Rd} (kN/m)
12	0,00	0,00	3,50	2,07	43,47	26,12	496,01
12,2	0,06	1,20	3,50	2,07	43,47	26,06	519,86
12,4	0,11	2,37	3,50	2,07	43,47	26,01	543,67
12,6	0,17	3,50	3,50	2,07	43,47	25,96	567,45
12,8	0,22	4,59	3,50	2,07	43,47	25,91	591,19
13	0,27	5,65	3,50	2,07	43,47	25,87	614,89
13,2	0,32	6,68	3,50	2,07	43,47	25,82	638,57
13,4	0,37	7,68	3,50	2,07	43,47	25,78	662,22
13,6	0,41	8,65	3,50	2,07	43,47	25,74	685,83
13,8	0,46	9,59	3,50	2,07	43,47	25,69	709,42
14	0,50	10,50	3,50	2,07	43,47	25,65	732,98
14,2	0,54	11,39	3,50	2,07	43,47	25,61	756,52
14,4	0,58	12,25	3,50	2,07	43,47	25,58	780,04
14,6	0,62	13,09	3,50	2,07	43,47	25,54	803,53
14,8	0,66	13,91	3,50	2,07	43,47	25,50	826,99
15	0,70	14,70	3,50	2,07	43,47	25,47	850,44

Fonte: Acervo próprio.

O diagrama de interação é dado por:

Figura 56 – Diagrama M-N do painel no domínio 4a



Fonte: Acervo próprio.

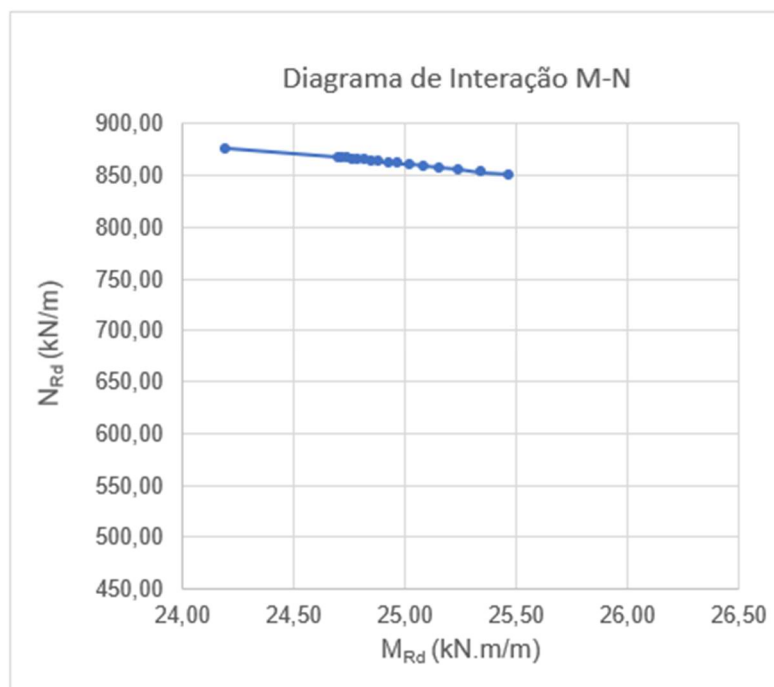
Para x maior que 15 cm a linha neutra se encontra fora da seção transversal, portanto, tem-se o domínio 5 e a Reta b de deformações. Os esforços resistentes e o diagrama M-N são dados por:

Figura 57 – Valores de M_{Rd} e N_{Rd} em função da altura da LN no domínio 5 e Reta b

x	ε_s	σ_{sd} (kN/cm ²)	ε_c	ε'_s	σ'_{sd} (kN/cm ²)	M_{Rd} (kN.m/m)	N_{Rd} (kN/m)
15	0,70	14,70	2,00	2,07	43,47	25,47	850,44
16	0,84	17,55	2,00	2,07	43,47	25,34	853,24
17	0,95	19,86	2,00	2,07	43,47	25,24	855,51
18	1,04	21,78	2,00	2,07	43,47	25,15	857,39
19	1,11	23,39	2,00	2,07	43,47	25,08	858,97
20	1,18	24,76	2,00	2,07	43,47	25,02	860,32
21	1,24	25,94	2,00	2,07	43,47	24,97	861,48
22	1,28	26,97	2,00	2,07	43,47	24,93	862,49
23	1,33	27,88	2,00	2,07	43,47	24,89	863,38
24	1,37	28,68	2,00	2,07	43,47	24,85	864,17
25	1,40	29,40	2,00	2,07	43,47	24,82	864,87
26	1,43	30,04	2,00	2,07	43,47	24,79	865,51
27	1,46	30,63	2,00	2,07	43,47	24,76	866,08
28	1,48	31,15	2,00	2,07	43,47	24,74	866,59
29	1,51	31,63	2,00	2,07	43,47	24,72	867,07
30	1,53	32,07	2,00	2,07	43,47	24,70	867,50
∞	2,00	42,00	2,00	2,00	42,00	24,20	875,80

Fonte: Acervo próprio.

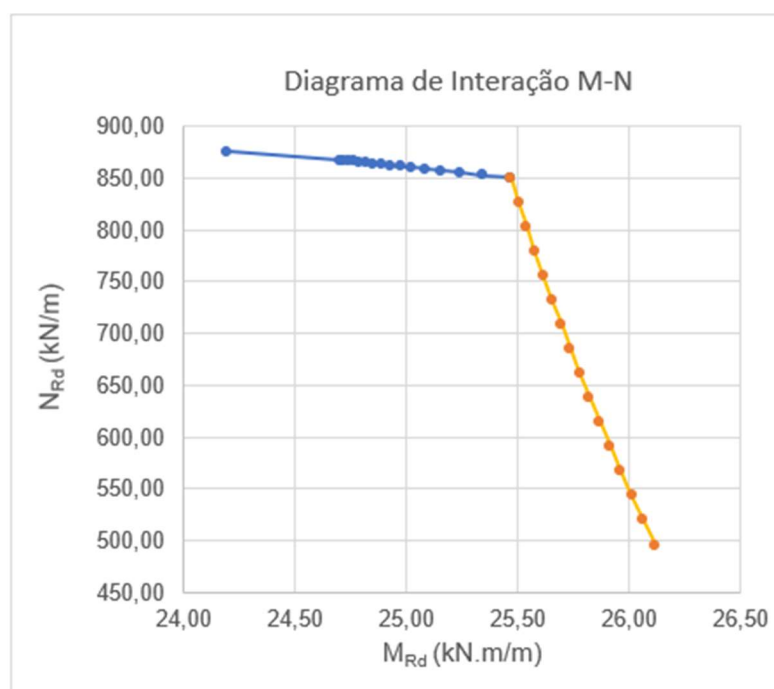
Figura 58 – Diagrama M-N do painel no domínio 5 e Reta b



Fonte: Acervo próprio.

Ao unir as duas tabelas é possível montar um diagrama M-N para a seção com x variando de 12 a infinito.

Figura 59 – Diagrama de interação M-N domínios 4a e 5 e Reta b



Fonte: Acervo próprio.

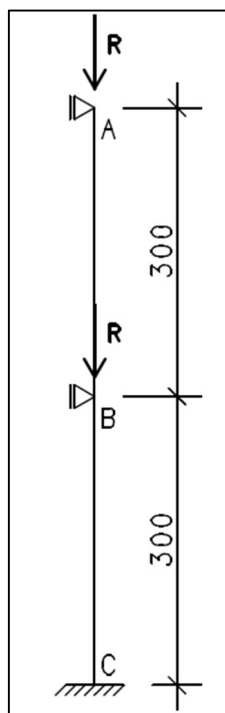
As curvas obtidas correspondem à resistência da seção à compressão centrada na ordenada e à capacidade de flexão simples na abscissa para um painel de configuração específica variando a altura da linha neutra. Os valores de esforços obtidos da análise estrutural podem ser inseridos no diagrama do painel desejado para verificação do elemento.

Comparando os valores de esforços solicitantes com os esforços resistentes de cálculo das lajes e das paredes, pode-se concluir que o painel resiste aos esforços solicitantes.

5.2 Edificação com dois pavimentos

Para uma edificação com dois pavimentos e mesmas disposições construtivas, como as lajes são rotuladas tem-se que as cargas nas lajes dos dois pavimentos serão as mesmas, portanto analisa-se somente a alteração nas cargas verticais das paredes. O esquema das paredes, como mostra a Figura 60, será dividido em 3 pontos, o ponto A no nível do último pavimento da edificação, o ponto B no nível do pavimento intermediário e o ponto C na base da parede no pavimento térreo.

Figura 60 – Esquema de corpo livre das paredes considerando dois níveis na edificação



Fonte: Acervo próprio.

As cargas nas paredes serão dadas pela soma das cargas de reação das lajes com o peso próprio da parede.

Tabela 9 – Cargas nas paredes

Parede	Ponto	Cargas (kN/m)	
		Trecho 1	Trecho 2
P1	A	4,95	-
	B	14,40	-
	C	18,90	-
P2	A	4,95	-
	B	14,40	-
	C	18,90	-
P3	A	9,90	-
	B	24,30	-
	C	28,80	-
P4	A	6,60	8,03
	B	17,70	20,56
	C	22,20	25,06
P5	A	6,60	8,03
	B	17,70	12,53
	C	22,20	17,03
P6	A	4,95	-
	B	14,40	-
	C	18,90	-
P7	A	4,95	-
	B	14,40	-
	C	18,90	-
P8	A	6,59	-
	B	17,68	-
	C	22,18	-
P9	A	4,95	-
	B	14,40	-
	C	18,90	-
P10	A	11,54	8,79
	B	27,58	13,29
	C	32,08	17,79
P11	A	9,90	-
	B	24,30	-
	C	28,80	-
P12	A	4,68	-
	B	13,86	-
	C	18,36	-
P13	A	4,95	-
	B	14,40	-
	C	18,90	-
P14	A	2,48	-
	B	9,46	-
	C	13,96	-
P15	A	4,95	-
	B	14,40	-
	C	18,90	-

Fonte: Acervo próprio.

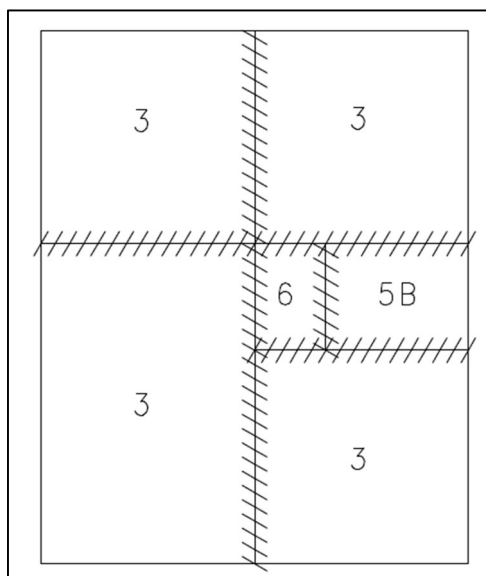
Observa-se que a parede com maior valor de carga permanece sendo a parede P10, e comparando o valor da carga com o valor resistente do painel temos que o painel resiste ao esforço solicitante.

5.3 Mudança das restrições das lajes

Será analisado neste capítulo o comportamento das lajes se elas fossem consideradas engastadas nas paredes. Segundo Bastos (2021b) podemos classificar

as lajes de acordo com os tipos na Figura 61, onde 3 significa lajes com duas bordas engastadas e duas bordas apoiadas, 5B as lajes que possuem as duas bordas maiores e uma borda menor engastadas e uma borda menor apoiada e 6 as lajes com todas as bordas engastadas.

Figura 61 – Classificação das lajes de acordo com os apoios das bordas



Fonte: Acervo próprio.

As reações verticais de apoio geradas nas paredes permanecerão inalteradas, o que mudará serão os esforços nas paredes e os momentos nas lajes. Ao engastar as bordas das lajes que possuem continuidade os momentos positivos atuantes nas lajes reduzem e surgem os momentos negativos nos encontros dessas lajes.

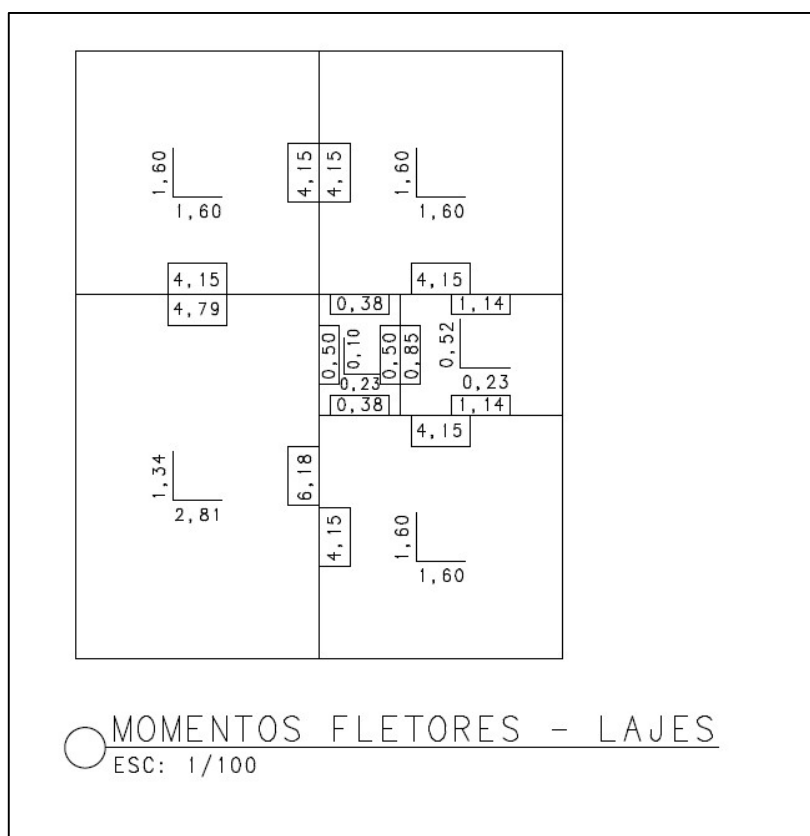
Na Tabela 10 estão descritos os momentos positivos (M_x^+ e M_y^+) e os momentos negativos (M_x^- e M_y^-) atuantes nas lajes e a Figura 62 resume esses esforços. Nota-se que nas bordas apoiadas os momentos negativos são nulos, que os momentos positivos são representados no meio das lajes e os momentos negativos são representados nas bordas.

Tabela 10 – Cálculo dos momentos fletores nas lajes

Laje	Tipo	l_x (m)	l_y (m)	λ	p (kN/m ²)	μ_x	M_x^+ (kN.m/m)	μ_y	M_y^+ (kN.m/m)	μ'_x	M_x^- (kN.m/m)	μ'_y	M_y^- (kN.m/m)
L1	3	3	3	1,00	6,6	2,69	1,60	2,69	1,60	6,99	4,15	6,99	4,15
L2	3	3	3	1,00	6,6	2,69	1,60	2,69	1,60	6,99	4,15	6,99	4,15
L3	3	3	4,5	1,50	6,6	4,73	2,81	2,25	1,34	10,4	6,18	8,06	4,79
L4	6	1	1,5	1,50	6,6	3,53	0,23	1,49	0,10	7,57	0,50	5,72	0,38
L5	5B	1,5	2	1,33	6,6	3,50	0,52	1,55	0,23	7,70	1,14	5,75	0,85
1L6	3	3	3	1,00	6,6	2,69	1,60	2,69	1,60	6,99	4,15	6,99	4,15

Fonte: Acervo próprio.

Figura 62 – Momentos fletores nas lajes em planta



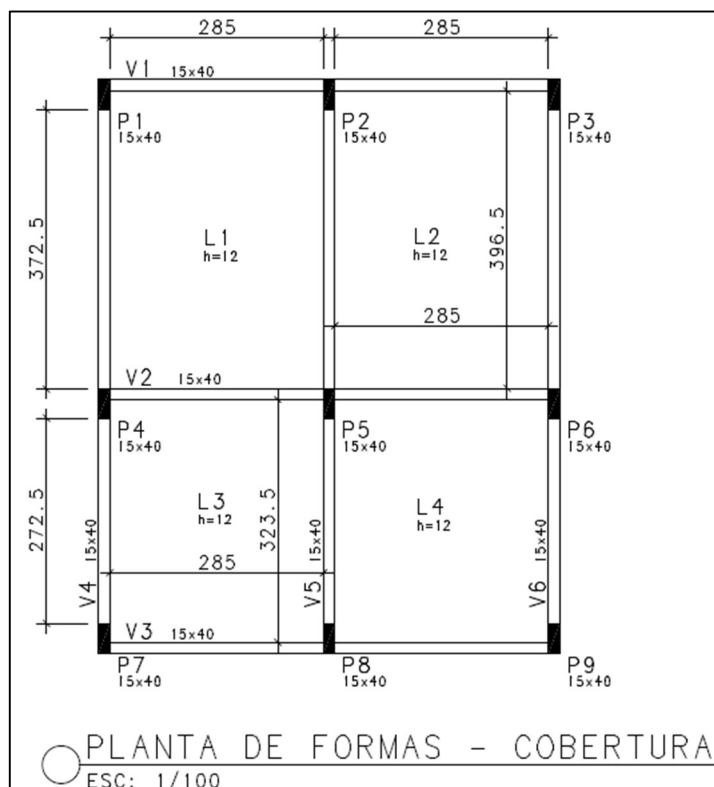
Fonte: Acervo próprio.

O momento limite máximo para a configuração, demonstrado no cap 5.1.1 é de 24,18 kN.m/m portanto as lajes continuam resistindo aos esforços solicitantes.

5.4 Concepção de concreto armado

Para a mesma planta baixa e para os mesmos parâmetros de projeto, foi realizada uma concepção estrutural de concreto armado. As dimensões dos elementos foram definidas como 12 cm de espessura para as lajes, vigas e pilares de base 15 cm e altura de 40 cm, como mostrado na planta de formas na Figura 63.

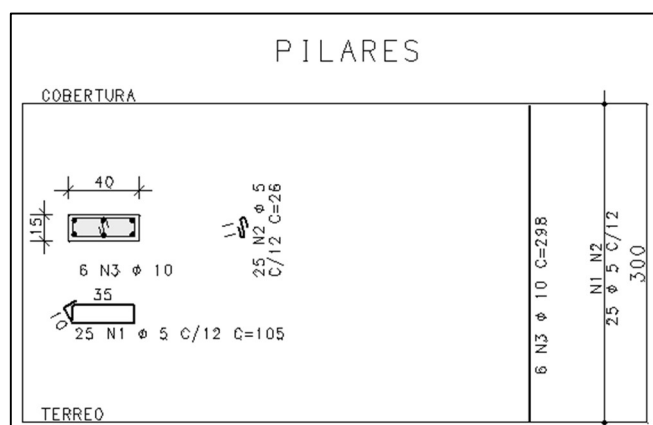
Figura 63 – Planta de formas da cobertura



Fonte: Acervo próprio.

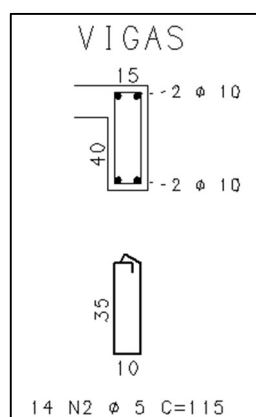
Após realizada a análise estrutural, todos os elementos foram dimensionados de acordo com os parâmetros estabelecidos na NBR 6118:2014. Para o dimensionamento dos elementos foram adotadas as seguintes armaduras, como mostrado nas figuras 64 e 65. Para as lajes foram utilizados ferro de diâmetro de 6,3 mm a cada 15 cm para a armadura negativa e ferro de diâmetro de 5 mm a cada 20 cm para a armadura positiva.

Figura 64 – Armadura dos pilares



Fonte: Acervo próprio.

Figura 65 – Armadura das vigas



Fonte: Acervo próprio.

O quantitativo de aço total dos pilares é igual à 145 kg, o quantitativo de aço total das vigas é de 142 kg e o quantitativo de aço total das as lajes é de 176 kg. Com isso o aço total do pavimento cobertura (vigas, lajes e pilares) é de 463 kg. O volume de concreto total do pavimento é igual à 8,7 m³ e a área de formas é 100 m².

Tabela 11 – Quantitativos de forma, aço e concreto

Quantitativos				
	Vigas	Pilares	Lajes	Total
Aço (kg)	142	145	176	463
Forma (m ²)	29	30	41	100
Concreto (m ³)	2,2	1,6	4,9	8,7

Fonte: Acervo próprio.

5.5 Comparação de custos

Na tabela do DER – ES (2022) não existe descrição de serviço de reboco paulista com mais de 25 mm de espessura, portanto para o cálculo do consumo de reboco dos painéis foi realizada uma regra de três simples para obtenção dos valores dos serviços de reboco com 30 mm e 35 mm. No entanto, é importante ressaltar, que essa é apenas uma aproximação do custo, visto que a aplicação da argamassa, pode ser feita de forma manual ou projetada e o traço da argamassa pode ser diferente para revestimento dos painéis. Para a camada superior das lajes de 5 cm foi considerado o uso de concreto usinado de 25 MPa, o mesmo utilizado para a concepção de concreto armado.

Utilizando a Tabela do DER – ES (2022) e catálogos de fabricantes de painéis pode-se realizar a comparação de custos entre os dois métodos construtivos. Não foram consideradas as esquadrias para o cálculo, essas aberturas foram consideradas como alvenaria. A partir dos quantitativos de materiais de cada concepção foi possível montar as tabelas 11 e 12 e os gráficos das figuras 66 e 67.

Tabela 12 – Custos da concepção 01

Concepção 01 - Painéis de EPS			
Material	QTD	Preço	Total
EPS estrutural (m ²)	180	R\$ 160,00	R\$ 27.000,00
Concreto (m ³)	2,25	R\$ 624,52	R\$ 1.405,17
Reboco paulista espessura 30 mm (m ²)	45	R\$ 66,01	R\$ 2.970,45
Reboco paulista espessura 35 mm (m ²)	270	R\$ 77,01	R\$ 20.792,70
Total			R\$ 53.968,32

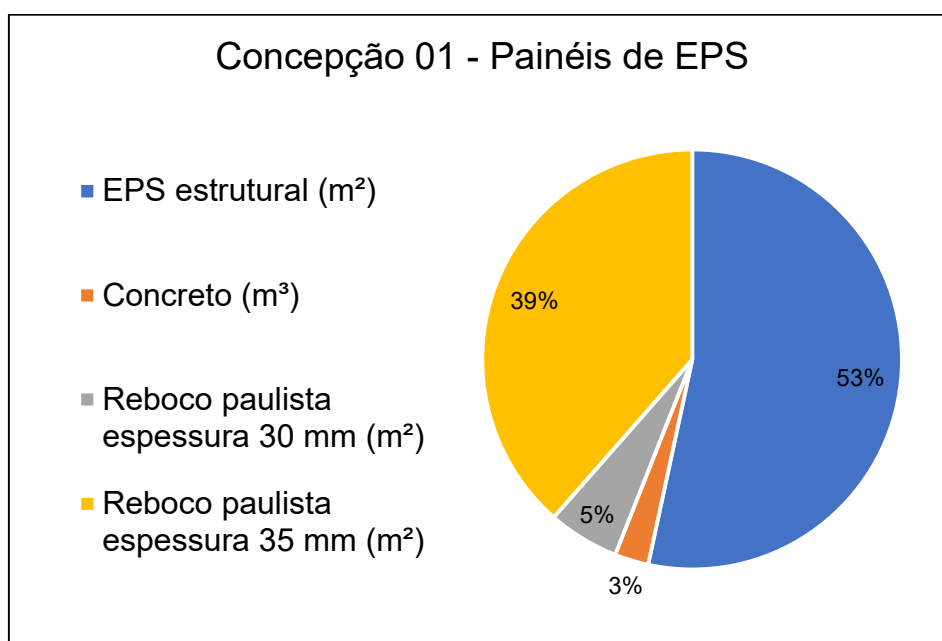
Fonte: Acervo próprio.

Tabela 13 – Custos da concepção 02

Concepção 02 - Concreto Armado + Alvenaria			
Material	QTD	Preço	Total
Aço (kg)	463	R\$ 11,01	R\$ 5.097,63
Concreto (m ³)	8,7	R\$ 624,52	R\$ 5.433,32
Forma de madeira (m ²)	100	R\$ 124,07	R\$ 12.407,00
Alvenaria de bloco cerâmico 9x19x19 (m ²)	117	R\$ 76,57	R\$ 8.958,69
Reboco paulista espessura 25 mm (m ²)	234	R\$ 55,01	R\$ 12.872,34
Total			R\$ 46.749,34

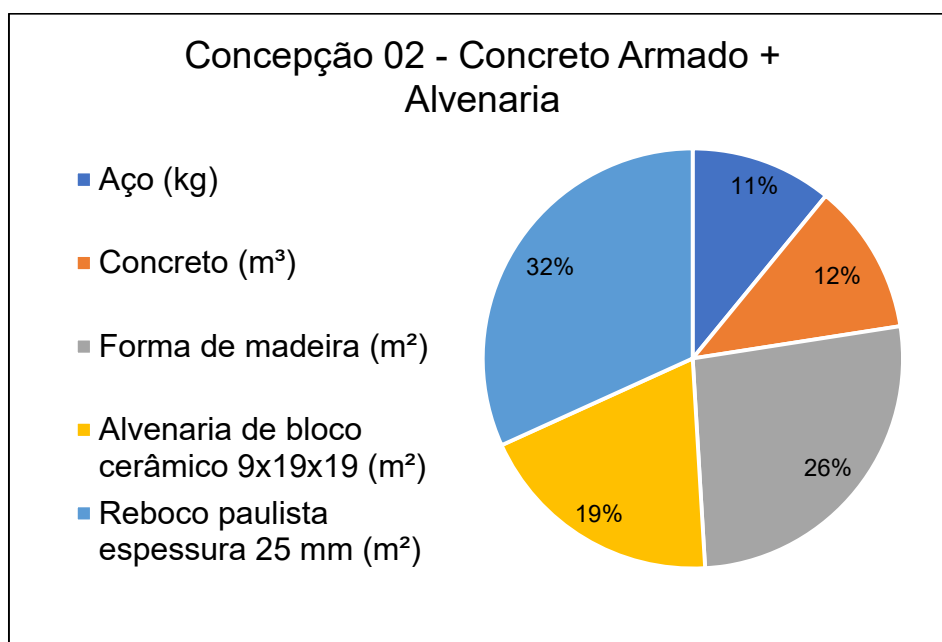
Fonte: Acervo próprio.

Figura 66 – Gráfico de Pizza dos custos referente à Concepção 01



Fonte: Acervo próprio.

Figura 67 – Gráfico de Pizza dos custos referente à Concepção 02



Fonte: Acervo próprio.

A partir da comparação de custos realizada observa-se que a concepção de painéis de EPS possui um custo somente 15,4% maior do que a concepção de concreto armado com alvenaria de bloco cerâmico, isso é devido ao alto custo do painel de EPS no mercado, visto que sua comercialização ainda é pequena no país comparada à alvenaria e ao concreto. Contudo, não foi levado em conta o tempo de execução das edificações e é válido ressaltar que o uso dos painéis de EPS diminui o tempo da obra no geral devido à sua facilidade de execução diminuindo assim o custo final da obra.

A Tabela 13 discretiza os itens utilizados para a composição de custos retirados da tabela de serviços do DER-ES:

Tabela 14 – Itens utilizados para composição de custo

Item	Especificação do serviço	Unid	Custo unitário
040328	Fornecimento, dobragem e colocação em fôrma, de armadura CA-50 A média, diâmetro de 6.3 a 10.0 mm	kg	11,01
040330	Fornecimento e aplicação de concreto USINADO Fck=25 MPa - considerando BOMBEAMENTO (5% de perdas já incluído no custo) (6% de taxa p/ concr.bombeavel)	m ³	624,52
040337	Fôrma em chapa de madeira compensada plastificada 12mm para estrutura em geral, 5 reaproveitamentos, reforçada com sarrafos de madeira 2.5x10cm (incl material, corte, montagem, escoras em eucalipto e desforma)	m ²	100,85
050605	Alvenaria de blocos cerâmicos 10 furos 10x20x20cm, assentados c/argamassa de cimento, cal hidratada CH1 e areia traço 1:0,5:8, juntas 12mm e esp. das paredes de Vitória, posto obra) s/revestimento, 10cm (bloco comprado na praça	m ²	76,57
120303	Reboco tipo paulista de argamassa de cimento, cal hidratada CH1 e areia média ou grossa lavada no traço 1:0.5:6, espessura 25 mm	m ²	55,01

Fonte: DER-ES (2023), adaptada.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho foi realizado com o intuito de reunir informações referentes ao método construtivo de painéis monolíticos de EPS, propor um método de dimensionamento e realizar concepções estruturais para uma edificação, analisando o comportamento dos painéis frente aos esforços atuantes. Além disso buscou-se esclarecer e aprofundar sobre essa metodologia construtiva que é pouco conhecida e difundida.

Os painéis de EPS possuem como característica marcante o seu baixo peso próprio, o que facilita sua instalação e manuseio, possuem um bom isolamento acústico e térmico, reduzem a ocorrência de mofo e bolores, o uso das fôrmas utilizadas para estruturas de concreto armado, a geração de resíduo no canteiro de obras e o prazo de execução da obra.

No estudo realizado para o dimensionamento dos painéis pelo método do Estado Limite Último foram estabelecidas hipóteses de cálculo e equações para obtenção dos esforços resistentes dos painéis, tanto para consideração do painel como laje quanto para os painéis como paredes.

Foi realizado um estudo e concepção estrutural para uma edificação térrea utilizando painéis de EPS e outra concepção estrutural de concreto armado com o intuito de realizar uma comparação entre as duas. A partir do cálculo dos esforços solicitantes e dos esforços resistentes pôde-se verificar que as duas concepções atendem e resistem aos esforços.

Realizou-se uma avaliação na mudança nas restrições das lajes e na influência da consideração de dois pavimentos para a mesma edificação. Para todas as situações verificou-se que os painéis de EPS resistem aos esforços solicitantes com folga.

Por fim foi realizada uma comparação de custo entre as duas concepções estruturais obtendo como resultado um custo total da edificação com painéis de EPS de aproximadamente 16% maior que o custo para a concepção de concreto armado e alvenaria de blocos cerâmicos. Entretanto, o tempo de execução das edificações não foi levado em conta e é válido ressaltar que o uso dos painéis de EPS diminui o tempo da obra diminuindo assim o custo final da obra.

Devido à falta de Normas e métodos de cálculos estabelecidos nacionalmente foi necessário realizar a adaptação de normas existentes, sendo assim, o modelo de cálculo proposto não representa fielmente o comportamento dos painéis nas edificações. De acordo com os resultados obtidos conclui-se que a utilização dos painéis como elemento estrutural contribui para a melhoria dos desempenhos da edificação além de ser um material resistente.

6.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros

- Análise do tempo para realização de uma obra com painéis de EPS e comparação com o método convencional, envolvendo todas as etapas da obra.
- Análise da influência dos conectores no comportamento dos painéis.
- Realização de ensaios em painéis para comparação com cálculos teóricos.

7 REFERÊNCIAS

- ABRAPEX. **Manual de Utilização: EPS na Construção Civil**. São Paulo: PINI, 2006.
- AECWEB. **Reciclagem faz do EPS uma matéria-prima circular**, 2020. Disponível em: <<https://www.aecweb.com.br/especiais/grupoisorecort/materia/reciclagem-faz-do-eps-uma-materia-prima-circular/19618>>. Acesso em: 09 ago. 2022.
- ALVES, J. P. D. O. **Sistema construtivo em painéis de EPS**, p. 73, 2015. Dissertação (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Católica de Brasília, Brasília, DF. Disponível em: <<https://repositorio.ucb.br:9443/jspui/handle/123456789/8028>>. Acesso em: 10 jul. 2022.
- AMRAN, Y. H. M. et al. **Design innovation, efficiency and applications of structural insulated panels: A review**, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.07.044>>. Acesso em: 15 dez. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11173: Projeto e execução de argamassa armada**, Rio de Janeiro, 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações**, Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**, Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11752: Materiais Celulares de Poliestireno para Isolamento Térmico na Construção Civil e Refrigeração Industrial — Especificação**, Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações**, Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16866 - Poliestireno Expandido (EPS) - Determinação das propriedades - Métodos de ensaio**, Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15575: Edificações habitacionais - Desempenho**, Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7480: Aço destinado às armaduras para estruturas de concreto armado - Requisitos**, Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7481: Tela de aço soldada nervurada para armadura de concreto - Requisitos**, Rio de Janeiro, 2022.

BASTOS, P. S. **Flexão composta e pilares de concreto armado**, 2021a. Disponível em: <https://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/pag_concreto2.htm>. Acesso em: 10 abr. 2023.

BASTOS, P. S. **Lajes de concreto armado**, 2021b. Disponível em: <https://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/pag_concreto2.htm>. Acesso em: 20 abr. 2023.

BERTOLDI, R. H. **Caracterização de sistema construtivo com vedações constituídas por argamassa projetada revestindo núcleo composto de poliestireno expandido e telas de aço: dois estudos de caso em Florianópolis**, 2007. Dissertação (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/89757>>. Acesso em: 20 julho 2022.

CBCS. **Materiais, Componente e a Construção Sustentável**, 2009. Disponível em: <<http://www.cbcs.org.br/website/posicionamentos/show.asp?ppsCode=73BB1FC6-8469-4254-93E6-0C92A3F970B8>>. Acesso em: 02 jul. 2022.

EMMEDUE. **Sistema Construtivo - O Painel Emmedue**, 2018. Disponível em: <<https://www.mdue.it/pt/sistema-construtivo/produtos/painel-emmedue/>>. Acesso em: 10 jul. 2022.

FÜRH, A. G. **Análise estrutural e de custos de estruturas de concreto armado com vedações verticais com painéis monolíticos em EPS e com blocos cerâmicos**, p. 116, 2017. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS. Disponível em: <<http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/6698>>. Acesso em: 15 maio 2022.

GENOL, K. A. **Construção com painéis monolíticos de EPS autoportante para residências**, 2021. Dissertação (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, SC. Disponível em: <<https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/13702>>. Acesso em: 23 mar. 2022.

GOMES, J. B. M.; OLIVEIRA, L. G. D. P.; GOMES, O. D. B. **Sistema construtivo em painel monolítico de EPS: Estudo do processo executivo**, 2021. Artigo Científico (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, UNA, Pouso Alegre, MG. Disponível em: <<https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/19366>>. Acesso em: 23 mar. 2022.

GOVERNO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. **Tabela de Custos Unitários Referenciais para Licitações de Obras Públicas**, 2023. Disponível em: <<https://der.es.gov.br/referencial-de-precos-edificacoes>>. Acesso em: 30 jun. 2023.

ISORECORT. **Monopainel Isorecort – Manual de Execução**, Ribeirão Pires, SP, 2021. Disponível em: <<https://monopainel.com.br/>>. Acesso em: 20 maio 2022.

M2 EMMEDUE. **O Sistema Construtivo - O Painel Emmedue**, 2018. Disponível em: <<https://www.mdue.it/pt/sistema-construtivo/produtos/painel-emmedue/>>. Acesso em: 15 out. 2022.

MEDEIROS, G. Á. N. **Avaliação de paredes sanduíche em argamassa armada com núcleo de EPS**, 2017. Dissertação (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/13749>>. Acesso em: 02 out. 2022.

MELO, A. F. **Sistemas construtivos com ênfase em Poliestireno Expandido - EPS**, 2021. Dissertação (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário do Planalto Central Aparecido dos Santos, Brasília, DF. Disponível em: <<https://dspace.uniceplac.edu.br/handle/123456789/1776>>. Acesso em: 05 jan. 2023.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Diretriz SINAT nº 011: Paredes, moldadas no local, constituídas por componentes de poliestireno expandido (EPS), aço e argamassa, microconcreto ou concreto**, Brasília, 2014.

MK2. **Memoria Tecnica - Sistema constructivo MK2**, 2009.

MONOLITE BRASIL. **Catalogo de Preços**, 2021.

NOGUEIRA, D. F. **Aspectos construtivos e de dimensionamento de uma habitação unifamiliar em painéis monolíticos de poliestireno expandido (EPS)**, 2022. Dissertação (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia, GO. Disponível em: <<http://repositorio.ifg.edu.br:8080/handle/prefix/995>>. Acesso em: 29 jan. 2023.

PÉREZ, M. D. M. C. **Sistema constructivo de paneles aligerados con poliestireno expandido y malla electrosoldada espacial: estudio estructural y optimización**, 2005. Tese (Doutorado), Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanha. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/2117/93477>>. Acesso em: 15 nov. 2022.

POLISOPOR. **Painel Monolítico em EPS**, 2023. Disponível em: <<https://polisopor.com.br/painel-monolitico-em-eps/>>. Acesso em: 26 jul. 2023.

TOMLINSON, D.; FAM, A. **Analytical approach to flexural response of partially composite insulated concrete sandwich walls used for cladding**, 2016. Artigo,

Engineering Structures. Disponível em:
<<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.04.059>>. Acesso em: 02 dez. 2022.

VGR. **Resíduos da Construção Civil**: construindo valores de sustentabilidade, 15 set. 2020. Disponível em: <<https://www.vgresiduos.com.br/blog/residuos-da-construcao-civil-construindo-valores-de-sustentabilidade/>>. Acesso em: 09 jul. 2022.