



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**REBECA VALGUEIRO TEIXEIRA
STEWART CARLOS ALMEIDA SANTOS**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTO DE ESTRUTURA COM LAJES E VIGAS
DE CONCRETO CONVENCIONAL E COM CONCRETO LEVE**

Recife
2018

REBECA VALGUEIRO TEIXEIRA
STEWART CARLOS ALMEIDA SANTOS

**ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTO DE ESTRUTURA COM LAJES E
VIGAS DE CONCRETO CONVENCIONAL E COM CONCRETO LEVE**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção de grau de Bacharel em Engenheiro (a) Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Liliane de Allan Fonseca

Recife

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

- T266A Teixeira, Rebeca Valgueiro.
 Análise comparativa de custo de estrutura com lajes e vigas de concreto convencional e com concreto leve / Rebeca Valgueiro Teixeira, Stewart Carlos Almeida Santos - Recife, 2018.
 59f., il., figs., tabs.
- Orientadora: Profa. Dra. Liliane de Allan Fonseca.
 TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
 Departamento de Engenharia Civil, 2018.
 Inclui Referências.
1. Engenharia Civil. 2. Concreto leve. 3. EPS. 4. Custo. I. Santos, Stewart Carlos Almeida. II. Fonseca, Liliane de Allan (Orientadora). III. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA CONCESSÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL

CANDIDATO(S): 1 – Rebeca Valgueiro Teixeira
2 – Stewart Carlos Almeida Santos

BANCA EXAMINADORA:

Orientador: Liliane de Allan Fonseca

Examinador 1: Paulo Fernando Silva Sousa

Examinador 2: Rachel Perez Palha

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTO DE ESTRUTURA COM LAJES E VIGAS DE CONCRETO CONVENCIONAL E COM CONCRETO LEVE

LOCAL: Centro de Tecnologias e Geociências – CTG/UFPE. Recife-PE.

DATA: 07 / 08 / 2018. **HORÁRIO DE INÍCIO:** 15:00 hrs.

Em sessão pública, após exposição de cerca de 30 minutos, o(s) candidato(s) foi (foram) arguido(s) oralmente pelos membros da banca com NOTA: 9,6 (deixar 'Exame Final', quando for o caso).

1) (X) aprovado(s) (nota > = 7,0), pois foi demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema da monografia e o texto do trabalho aceito.

As revisões observadas pela banca examinadora deverão ser corrigidas e verificadas pelo orientador no prazo máximo de 30 dias (o verso da folha da ata poderá ser utilizado para pontuar revisões).

O trabalho com nota no seguinte intervalo, **3,0 = < nota < 7,0**, será reapresentado, gerando-se uma nota ata; sendo o trabalho aprovado na reapresentação, o aluno será considerado **aprovado com exame final**.

2) () reprovado(s). (nota <3,0)

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da banca e pelo(s) candidato(s).

Recife, 07 de agosto de 2018

Orientador:

Avaliador 1:

Avaliador 2:

Candidato 1:

Candidato 2:

Coordenação do Curso de Engenharia Civil-Dcivil

Rua Acadêmico Hélio Ramos s/nº. Cidade Universitária. Recife-PE CEP: 50740-530.

Fones: (081)2126.8220/8221 Fone/fax: (081)2126.8219.

*Dedicamos esse trabalho a Deus por ser
essencial em nossas vidas.*

*Aos nossos pais e toda nossa família que, com
muito carinho e apoio, não mediram esforços
para que nós chegássemos até esta etapa.*

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente à Deus, pois sem ele não estaríamos aqui. Aos nossos pais e familiares por nos ajudarem e nos apoiarem ao longo da nossa formação. À nossa orientadora Liliane Fonseca e nosso co-orientador Ézio Araújo por toda atenção e tempo dedicado a nos ajudar em todas as etapas deste trabalho. Aos nossos estimados professores que contribuíram em toda jornada de formação acadêmica. Aos técnicos de laboratório de Engenharia Civil da UFPE que colaboraram na nossa pesquisa. À empresa TECOMAT Engenharia e técnicos da empresa que se dispuseram a acolher e ajudar na obtenção de dados para este estudo. E a todos aqueles que de alguma forma nos ajudaram nessa caminhada.

RESUMO

As vigas e lajes maciças utilizadas em edificações representam uma grande porcentagem da quantidade de concreto da edificação total. De forma que elas impõem à estrutura grandes esforços, provocando o aumento da seção dos elementos estruturais, responsáveis por suportar essa carga. Por esse fato, é de extrema importância a análise das características do concreto a ser utilizado para maior melhor distribuição dos recursos do projeto e do seu custo final. Uma alternativa para diminuir os esforços devido ao peso próprio da estrutura é a diminuição do peso próprio das vigas e lajes com a utilização de concreto com menor massa específica. No entanto, em regra geral, o custo por unidade de volume de concreto leve é mais caro que o convencional, quando considerado que ambos são da mesma classe de resistência, o que se torna uma barreira para o amplo uso do concreto leve. Assim, esse estudo comparativo, refere-se às análises de um modelo de projeto de edificação simplificado, de oito pavimentos tipo, onde foi avaliado se há economia no custo da estrutura, devido a diminuição da seção e esforços em elementos estruturais, provocada pela utilização de vigas e lajes feitas com concreto leve, além de ser verificado se o aumento do número de pavimentos tipo ratifica esses resultados. Para o estudo de cada alternativa foi analisado o custo do material necessário, a partir do dimensionamento das lajes, vigas, pilares e fundação superficial, levando em conta as cargas atuantes de uma edificação residencial e o peso próprio da estrutura. Foram consideradas 6 dosagens em corpos de prova cilíndricos de 20x10cm, variando o peso específico do concreto para a realização dessa análise. O cálculo estrutural e o dimensionamento para as opções dadas foram encontrados com o auxílio do software CYPECAD, utilizado em escritórios de cálculo no Brasil. Dessa forma, pode-se concluir que o concreto leve provocou a diminuição significativa das seções e esforços nas estruturas, resultado na diminuição final do custo da edificação, o que sugere que o uso de concreto leve é uma alternativa viável na construção civil.

Palavras-chave: Concreto leve. EPS. Custo.

ABSTRACT

Slabs and beams used in buildings constructions represent a considerable percentage of the total amount of concrete needed in the whole building. Therefore, these elements cause huge stresses on the structure, leading to an increase in structural elements sections, responsible for bearing this load. Consequently, it is extremely important the analysis of the concrete characteristics to be used for better optimization of the project and its final cost. An alternative to lower the loads caused by the structure self-weight is the decrease of slabs and beams weight, using concrete with lower density. However, usually, the unit cost of lightweight concrete is more expensive than the regular concrete, when considering both with the same compressive strength, which becomes an impediment to the wide use of lightweight concrete in civil engineering construction. Thereby, this comparative study shows the analysis of a simplified building model, with 8 reference floor plan, where it was evaluated if there was a reduction on the structure cost, due to the decrease of the section and stresses on structural elements, caused by the usage of beam and slabs made of lightweight concrete. It was also verified if these results are confirmed with the increase of the number of pavements. For the study of each alternative it was analyzed the cost of the necessary material for the slabs, beams, column and superficial foundation, considering the loads of a residential building and the own weight of the structure. It was made in laboratory six batches of cylindrical specimens (20 x 10cm) and in each batch the weight of the specimen was decreasing. The structural analysis was made using the software CYPECAD, widely used in Brazil. Thus, it can be concluded that the usage of lightweight concrete in beams and slabs caused a significant decrease of sections and stresses on the structure, resulting by lowering the final cost of the building, finally confirming that the usage of this concrete is a viable alternative in civil engineering construction.

Keywords: Lightweight concrete. EPS. Cost.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva granulométrica da areia (percentual retido acumulado).....	23
Figura 2 – EPS triturado utilizado no estudo.	23
Figura 3 – Balança utilizada para pesar os corpos de prova	25
Figura 4 – Betoneira utilizada e corpos de prova.....	26
Figura 5 – Corpos de prova antes do ensaio de compressão.....	26
Figura 6 – Prensa utilizada para rompimento dos corpos de prova.	27
Figura 7 – Planta baixa do pavimento térreo.	28
Figura 8 – Planta baixa do pavimento tipo.	29
Figura 9 – Corte A-A.	30
Figura 10 – Corte B-B.....	31
Figura 11 – Planta de formas do pavimento térreo.	32
Figura 12 – Planta de formas do pavimento tipo.	33
Figura 13 – Edificação de 8 pavimentos tipo simplificada das análises	34
Figura 14 – Gráfico da variação da massa específica nos traços.	37
Figura 15 – Gráfico da variação da resistência à compressão nos traços.	38
Figura 16 – Gráfico de variação do custo em função da % de substituição de EPS.....	46
Figura 17 – Gráfico de variação do custo em função da % de substituição de EPS.....	48
Figura 18 – Variação dos esforços na base dos pilares em função da % de EPS.	52
Figura 19 – Variação dos esforços na base dos pilares em função da % de EPS.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–Valores de resistência à compressão de concreto leve estrutural.	18
Tabela 2	–Características exigíveis para o EPS.	19
Tabela 3	–Composição da areia Caxitu.	22
Tabela 4	–Relação dos traços a serem executados.	24
Tabela 5	–Massa específica de cada traço.	37
Tabela 6	–Resistência à compressão e classe de resistência dos traços.	39
Tabela 7	–Preços dos materiais na Região Metropolitana do Recife.	39
Tabela 8	–Preço unitário do aço e dos concretos utilizados.	40
Tabela 9	–Dimensões das vigas e pilares da primeira análise.	41
Tabela 10	–Dimensão das vigas utilizadas para cada traço na segunda análise.	43
Tabela 11	–Dimensão dos pilares utilizados para cada traço na segunda análise.	44
Tabela 12	–Dimensões dos pilares utilizados na terceira análise.	45
Tabela 13	–Volume de concreto e massa de aço para os traços na 1ª análise.	46
Tabela 14	–Custo total do material para cada traço ensaiado na primeira análise.	46
Tabela 15	–Volume de concreto e massa de aço para os traços na 2ª análise.	47
Tabela 16	–Custo total do material para cada traço ensaiado na segunda análise.	48
Tabela 17	–Volume de concreto e massa de aço para os traços na 3ª análise.	49
Tabela 18	–Custo total do material para cada traço ensaiado na terceira análise.	49
Tabela 19	–Variação dos esforços na base dos pilares para cada traço na 1ª análise.	50
Tabela 20	–Variação dos esforços na base dos pilares para cada traço na 2ª análise.	52
Tabela 21	–Variação dos esforços na base dos pilares para cada traço na 3ª análise.	54

LISTA DE SÍMBOLOS

$b_{\text{alvenaria}}$ —	Base alvenaria de blocos cerâmicos.
CP_{NBR} —	Carga Permanente com base na NBR 6120/17.
$(CP + SCU)_{\text{inserido}}$ —	Valor da carga permanente e sobrecarga a ser inserida no CYPECAD.
h_{LAJE} —	Espessura da laje.
$h_{\text{pavimento}}$ —	Altura do pé direito da edificação.
h_{viga} —	Altura da viga.
SCU_{NBR} —	Sobrecarga segundo a NBR 6120/17.
$\gamma_{\text{alvenaria}}$ —	Massa específica da alvenaria de blocos cerâmicos.
γ_{CYPECAD} —	Massa específica do concreto armado padrão do CYPECAD.
γ_{REAL} —	Massa específica do concreto armado das dosagens elaboradas.
f_{ck} —	Resistência à compressão característica do concreto.
N —	Esforço normal
M_x —	Momento em relação ao eixo x
M_y -	Momento em relação ao eixo y

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO.....	14
1.2	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS.....	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	ELEMENTOS ESTRUTURAIS EM CONCRETO ARMADO	16
2.2	CONCRETO LEVE	17
2.3	TIPOS DE LAJES.....	19
2.4	DOSAGEM DE CONCRETO LEVE	20
2.5	ANÁLISE DE CUSTO	20
2.6	ESFORÇOS NA ESTRUTURA.....	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1	MATERIAIS	22
3.2	DOSAGEM, MOLDAGEM E ENSAIO DOS CORPOS DE PROVA.....	24
3.3	ANÁLISE DOS ESFORÇOS PARA CADA TIPO DE LAJES E VIGAS.....	27
3.4	ANÁLISE DE CUSTOS.....	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
4.1	CORPOS DE PROVA COM CONCRETO LEVE.....	37
4.2	CUSTO DO M ³ DO CIMENTO DOSADO.....	39
4.3	DIMENSÕES DOS ELEMENTOS UTILIZADAS NO DIMENSIONAMENTO....	40
4.3.1	Análise 1 – Seções com base no pré-dimensionamento	41
4.3.2	Análise 2 – Modificação das seções das vigas e pilares	42
4.3.3	Análise 3 – Modificação das seções dos pilares para 16 pavimentos.....	45
4.4	QUANTIDADE DE CONCRETO E AÇO UTILIZADO EM CADA DIMENSIONAMENTO.....	46
4.4.1	Análise 1– Seções com base no pré-dimensionamento	46
4.4.2	Análise 2– Modificação das seções das vigas e pilares.....	47
4.4.3	Análise 3– Modificação das seções dos pilares para 16 pavimentos	49
4.5	VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS NA BASE DOS PILARES.....	50
4.5.1	Análise 1 – Seções com base no pré-dimensionamento	50
4.5.2	Análise 2– Modificação das seções das vigas e pilares.....	52

4.5.3	Análise 3– Modificação das seções dos pilares para 16 pavimentos	54
5	CONCLUSÕES	56
	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

As primeiras edificações executadas com concreto armado utilizavam lajes maciças, onde o consumo de concreto das lajes chegava a aproximadamente dois terços do volume total de concreto da estrutura (CAIXETA, 1999). Isso representa uma parcela significativa do peso próprio total, provocando a necessidade de grandes seções dos elementos estruturais. As primeiras lajes construídas apresentavam várias limitações devido à resistência do concreto e às hipóteses simplificadoras na modelagem estrutural, o que correspondia a vãos relativamente pequenos que essas lajes conseguiam vencer. Com a evolução da tecnologia computacional e da qualidade dos concretos, foram surgindo novos tipos de opções estruturais, como lajes nervuradas, lajes lisas e protendidas.

Ainda assim, essas lajes representavam uma grande parcela do peso próprio da estrutura. Dessa forma, para diminuir os esforços devido ao peso próprio, uma solução possível é adotar concretos com massa específica menor, tais como o concreto leve.

Analogamente, as vigas maciças de concreto armado também exercem grandes cargas nos pilares devido ao seu peso próprio, a utilização de concreto leve nas lajes e vigas da estrutura, diminui significativamente a carga exercida, podendo assim diminuir as seções da estrutura como um todo.

De acordo com EUROLIGHTCON (2000), não é de hoje que existe o estudo e aplicação de concreto leve em estruturas, no entanto sua aplicação ainda não é tão ampla quanto a do concreto convencional. Esse fato pode ser explicado pelo maior custo do material para fabricação do concreto, bem como pela falta de conhecimento de suas vantagens.

Antes da execução de uma obra de engenharia civil, existe a etapa da elaboração do projeto, no qual, os engenheiros e arquitetos definem os métodos construtivos e materiais que serão utilizados na obra. Uma dessas definições é a escolha do tipo de concreto que será utilizado, essa decisão deve levar em conta as imposições arquitetônicas, disposições construtivas e até a disponibilidade de infraestrutura e materiais na região, dessa forma cabe ao projetista determinar, diante das condições impostas, a alternativa que melhor se adapta às exigências do cliente.

Assim a escolha do tipo de laje se torna uma importante decisão no projeto, e que pode representar diferenças significativas quanto a custo, tempo e qualidade da execução. Cada tipo

de laje tem suas limitações e potencialidades, que devem ser estudadas de forma que atendam melhor às exigências impostas.

Este estudo comparativo refere-se a um projeto simplificado de uma edificação de 8 pavimentos; no qual foi avaliado se há economia no custo da estrutura ao substituir o concreto convencional pelo concreto leve em suas lajes e vigas.

Os custos dos materiais para a confecção do concreto armado foram obtidos através da tabela do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) e a partir de pesquisa de mercado local (RMR - Região Metropolitana do Recife).

Para o estudo de cada alternativa foi analisado o custo apenas do material necessário para construção, a partir do dimensionamento das lajes, vigas, pilares e fundação superficial, levando em conta as cargas atuantes de uma edificação residencial e o peso próprio da estrutura.

Vale salientar que não se pretende indicar a solução ideal, mas apresentar um estudo comparativo de custo entre lajes e vigas convencionais e em concreto leve. Os resultados aqui encontrados poderão servir de referência para fazer escolhas em projetos.

1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

Tendo em vista o crescente mercado da construção civil, que fornece cada vez mais inovações estruturais, é de grande importância que o engenheiro responsável pelo desenvolvimento do projeto saiba qual alternativa se encaixa melhor às necessidades de seu cliente. Aliado a isso, estudando a redução de custos e o dimensionamento da estrutura de edificação, observa-se que a parte estrutural de uma construção de concreto armado corresponde a cerca de 15 a 20% do custo total da edificação (ALBUQUERQUE, 1999). Assim, justifica-se um estudo detalhado com a avaliação de cada um de seus elementos, incluindo o sistema de vigas e lajes a ser utilizado. A fim de realizar um projeto econômico é de suma importância analisar os prós e os contras dos métodos construtivos, bem como os custos aliados a cada um.

Uma possibilidade de método construtivo é o uso de lajes e vigas maciças em concreto leve, porém, seu custo é maior quando se compara com o do concreto convencional. Contudo, quando se avalia o custo da estrutura como um todo, o concreto leve poderá ser capaz de diminuir os esforços nos elementos estruturais, reduzindo assim, as seções de vigas, pilares e fundações. Tal redução poderá acarretar em uma economia no custo da estrutura, compensando

o custo do uso do concreto leve. Vale salientar que essa comparação de custo entre os concretos se baseia no fato de ambos terem a mesma classe de resistência.

1.2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O objetivo desse estudo é propor o melhor traço de concreto leve em função da variação da massa específica e do custo da estrutura como um todo. Dessa forma pretende-se encontrar a densidade do concreto leve que forneça o melhor custo para o projeto considerando a variação da seção dos elementos estruturais - vigas e lajes - e a quantidade de aço utilizada.

Como objetivos específicos:

- Determinar as massas específicas do concreto e analisar sua relação com a resistência à compressão;
- Encontrar o custo unitário do concreto de cada traço estudado;
- Avaliar o comportamento dos esforços das estruturas em função do peso próprio das lajes e vigas;
- Avaliar se há diminuição da seção de elementos estruturais, provocando assim a diminuição da quantidade de concreto e aço dessa estrutura;
- Verificar qual dos traço estudados apresenta menor custo relativo ao concreto armado de toda a estrutura, considerando as vigas e lajes com o concreto dosado e pilares e fundação com concreto convencional pré-determinado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Durante a etapa de elaboração de um projeto de engenharia civil, deve-se estudar os métodos construtivos e materiais que serão utilizados na construção. A escolha do tipo de concreto nos elementos estruturais influencia diretamente na qualidade, custo e no tempo de execução da obra.

2.1 ELEMENTOS ESTRUTURAIS EM CONCRETO ARMADO

Antes da execução de uma edificação, a realização do projeto é de suma importância para que os pré-requisitos determinados pelo cliente sejam trabalhados de melhor forma no produto final. Um desses pré-requisitos está relacionado à economia da obra (DE ALBUQUERQUE, 1999).

O projeto de uma edificação inclui a determinação dos elementos estruturais que serão responsáveis por suportar as cargas devido à obra em si e a sua utilização. Dessa forma, para o cálculo do projeto estrutural utilizando concreto, seguem-se as recomendações da NBR 6118/2014 que determina os critérios de segurança que devem ser aplicados e as definições e os valores das ações impostas a estruturas, além da resistência do concreto que deve ser utilizada no cálculo do projeto da estrutura das edificações.

Segundo SEARBY (1990), o concreto armado teve uma aceitação muito grande no Brasil, por questões de cunho econômico. O concreto é um material de custo relativamente baixo e que não precisa de mão-de-obra qualificada quando comparado a outros métodos construtivos, como a madeira que tem limitações intrínsecas ao material e estruturas industrializadas que requerem material, infraestrutura e mão-de-obra qualificada.

Em NAPPI (2003), define-se os elementos componentes de uma estrutura tradicional de uma edificação feita com concreto armado. Inicialmente, tem-se as lajes que são estruturas laminares, cuja altura é muito menor que as outras duas dimensões, e são solicitadas principalmente por cargas normais de alvenarias e por cargas devido à utilização da edificação. A carga das lajes é distribuída para as vigas que têm como função transmitir os esforços sobre elas impostos para os pilares aos quais estão apoiadas. Os principais esforços encontrados nas vigas são solicitações de flexão e cisalhamento.

Os pilares têm como finalidade principal transmitir os esforços das vigas para a fundação, que pode ser profunda ou superficial. Sua diferenciação geométrica está no fato de que sua

altura é substancialmente maior que as outras duas dimensões. A carga que eles suportam gera, principalmente, esforços de compressão.

Por fim, especificamente a fundação superficial é aquela que transmite os esforços da edificação ao terreno, que suporta a carga predominantemente pelas pressões distribuídas na base da fundação. Sua profundidade no terreno é definida como inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação.

2.2 CONCRETO LEVE

Os concretos convencionais são fabricados geralmente a partir da mistura de cimento Portland, areia, pedra britada e água em quantidades pré-determinadas para garantir as características determinadas em projeto. Adicionalmente, pode-se acrescentar aditivos químicos e adições minerais para melhorar determinada característica do concreto como trabalhabilidade, resistência mecânica, cura retardada, entre outros.

Já o concreto leve, é feito com a substituição total ou parcial do agregado convencional (areia e pedra britada) por alguns agregados leves como argila expandida, perlita expandida, vermiculita, EPS (Poliestireno Expandido), entre outros (CATOIA, 2012). Segundo METHA E MONTEIRO (2008), os agregados leves são definidos como aqueles que possuem densidade menor que 1120 Kg/m^3 e podem ser naturais ou artificiais. Sua grande porosidade é responsável por dar a leveza ao concreto. Os muito porosos, no entanto, são mais frágeis e, portanto, são mais adequados para a produção de concretos de vedação. Já o uso de agregados leves menos porosos é mais conveniente para concretos com função estrutural.

O concreto leve de alta resistência é definido segundo a NBR 12655/2006, como aquele que possui densidade entre 800 e 2000 kg/m^3 . Além disso, quando comparado ao concreto convencional, com faixa de densidade entre 2000 e 2800 Kg/m^3 , é capaz de diminuir substancialmente a carga devido ao peso próprio das estruturas, isso resulta na economia direta nos elementos estruturais da edificação (WANG, 2009). Outra vantagem do concreto leve reside na elevada capacidade de isolamento térmico e acústico.

Além da redução do custo da estrutura, há a diminuição dos custos com transporte e montagem das construções pré-fabricadas além do aumento de produtividade. Na Tabela 1 estão especificados os valores mínimos da resistência à compressão do concreto leve estrutural, segundo o documento NM 35/95, em função de seu peso específico.

Tabela 1 – Valores de resistência à compressão de concreto leve estrutural.

Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Massa específica (kg/m ³)
28	1840
21	1760
17	1680

Fonte: Os autores.

Segundo ROSSIGNOLO (2003), para concretos leves de alta-performance o indicado é utilizar o parâmetro fator de eficiência, definido como a razão entre a resistência à compressão do concreto (MPa) e sua respectiva massa específica (Kg/dm³). Assim, o concreto leve pode ser definido como de alta resistência quando possuir fator de eficiência mínimo no valor de 25 MPa.dm³/kg. E dessa forma pode ser utilizado como substituinte do concreto convencional em elementos estruturais.

O concreto leve feito com adição de pérolas de Poliestireno Expandido (EPS), é uma das formas de se fabricar concreto com alta leveza e alto isolamento. O poliestireno é um polímero capaz de se expandir quando aquecido, transformando-se em um material com baixa densidade e com alta capacidade de isolamento térmico e acústico. No entanto, a sua resistência não é tão expressiva, visto que, uma vez adicionado ao concreto, diminui seu peso, e, conseqüentemente, reduz também as resistências mecânicas do concreto. Durante a expansão do EPS pode-se ter um aumento de volume de até 50 vezes (CATOIA, 2012).

No Brasil não existe uma norma específica para concretos estruturais com o uso de EPS, no entanto, existe a NBR 11752/1993 - Materiais celulares de poliestireno para isolamento térmico na construção civil e em câmaras frigoríficas. As características exigíveis para este produto são detalhadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características exigíveis para o EPS.

Propriedades	Mét. de Ensaio	Unidade	Classe P			Classe F		
<i>Tipo de Material</i>			I	II	III	I	II	III
Massa específica aparente	NBR 11949	Kgm ³	13-16	16-20	20-25	13-16	16-20	20-25
Resistência à compressão com 10% de deformação	NBR 8082	K Pa	≥60	≥70	≥100	≥60	≥70	≥100
Resistência à flexão	ASTM C-203	K Pa	≥150	≥190	≥240	≥150	≥190	≥240
Absorção de água Imersão em água	NBR 7973	g/cm ³ x100	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1
Permeabilidade ao vapor d'água	NBR 8081	ng/Pa.s.m	≤7	≤5	≤5	≤7	≤5	≤5
Coefficiente de condutiv. térmica a 23°C	NBR 12904	X/(m.k)	0,042	0,039	0,037	0,042	0,039	0,037
Flamabilidade	NBR 1948		Material não retardante à chama			Material retardante à chama		

Fonte: ABRAPEX (2000)

De acordo com CATOIA (2012), a substituição de parte ou de todo o agregado convencional por agregado leve, visando a redução da massa pode provocar mudanças em outras características do concreto como a trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de elasticidade, retração, isolamento térmico, resistência ao fogo, entre outros.

2.3 TIPOS DE LAJES

Atualmente, existem diversas alternativas de lajes no mercado como lajes compostas por vigotas treliçadas pré-moldadas, lajes nervuradas, entre outras além das tradicionais lajes maciças moldadas in loco.

As lajes moldadas em obra proporcionam um aspecto monolítico à estrutura, proporcionam facilidade na montagem das fôrmas e no lançamento e adensamento do concreto. Elas não exigem a necessidade de área extra no canteiro para depósito de material inerte, e possuem maior flexibilidade arquitetônica, visto que pode haver descontinuidade em sua superfície. Como desvantagens, citam-se o alto consumo de materiais para fôrmas e escoramentos, além de um tempo de execução maior do que lajes pré-moldadas. Outro inconveniente é a presença de concreto em regiões da laje onde ele não é solicitado, o que representa um material inerte com alto peso específico (CAIXETA, 1998).

As lajes nervuradas têm a otimização do uso do concreto, com sua aplicação apenas nas regiões onde ele é solicitado, e onde não tem esforços de compressão na laje se substitui o concreto por um material inerte de baixo peso específico. Dessa forma o peso final da laje é menor do que o da laje maciça de concreto, permitindo uma maior flexibilidade para vencer

vãos maiores. O tempo de execução também se torna menor, no entanto, sua aplicação exige maiores cuidados, além da necessidade de espaço no canteiro para a estocagem do material inerte. Os materiais mais usados são blocos de poliestireno expandido, concreto celular autoclavado e blocos cerâmicos (KERBAUY, 2010).

O inconveniente das lajes tradicionais maciças moldadas in loco está principalmente no seu alto peso próprio, dessa forma o emprego de concreto leve nas lajes maciças é capaz de minimizar essa desvantagem, apresentando assim a facilidade de construção de uma laje maciça com as propriedades de um concreto leve.

2.4 DOSAGEM DE CONCRETO LEVE

De acordo com ROSSIGNOLO E AGNESINI (2005), os métodos utilizados para dosar concreto convencional podem ser usados para a dosagem de concreto leve desde que se analisem alguns fatores como: a massa específica que se deseja alcançar, a absorção de água dos agregados leves e a influência das características dos agregados leves usados nas propriedades finais do concreto.

Para concretos leves estruturais é altamente indicado o uso de adições minerais, que possuam o efeito *filler*, de forma a melhorar a coesão das partículas e a resistência final do concreto. Além disso, o uso de aditivos com o objetivo de melhorar as propriedades reológicas do concreto, possibilitando a diminuição da razão entre a água e o aglomerante, aumentando assim sua resistência mecânica (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

2.5 ANÁLISE DE CUSTO

Segundo ANDRADE E SOUZA (2002), a análise de viabilidade de um empreendimento é de suma importância a estimativa inicial do seu custo, através da elaboração de uma planilha de orçamento.

Uma maneira de fazer o orçamento é através da composição unitária, que se refere ao custo dos insumos necessários para executar uma unidade de determinado serviço. No caso de peças de concreto, a composição unitária diz respeito ao custo relativo ao fornecimento, lançamento e adensamento de 1 m³ de concreto.

2.6 ESFORÇOS NA ESTRUTURA

A norma brasileira NBR-6120 (2017) classifica as cargas que devem ser consideradas no cálculo dos esforços da edificação em permanentes e acidentais. As cargas permanentes constituem o peso próprio da estrutura e de todos os elementos construtivos fixos. Já as cargas acidentais são representadas por aquelas que atuam na estrutura devido ao seu uso. Além dessas duas cargas é indispensável que sejam levados em consideração efeitos do vento, variação de temperatura, retração, choques, vibrações, entre outros.

A partir dessas cargas e com a resistência à compressão do concreto é possível realizar o dimensionamento de toda a estrutura (lajes, vigas, pilares e fundação).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho visa analisar a variação da resistência à compressão em função da variação da densidade do concreto. Foi implementado um programa experimental envolvendo 6 dosagens de concreto, sendo uma com concreto convencional e cinco com uso de EPS em traço padrão. A fim de classificar o concreto foram realizados ensaios de compressão simples e massa específica, segundo as normas NBR 5739 (1994) e NBR 9833 (1987), respectivamente.

3.1 MATERIAIS

O cimento utilizado em todos os traços foi o CP-II F 40, muito utilizado nas obras da Região Metropolitana do Recife, por possuir alta resistência aos 28 dias e secagem mais rápida, ideal para a confecção de vigas, pilares, lajes e fundações. Com massa específica fornecida pelo fabricante de 3,11 g/cm³.

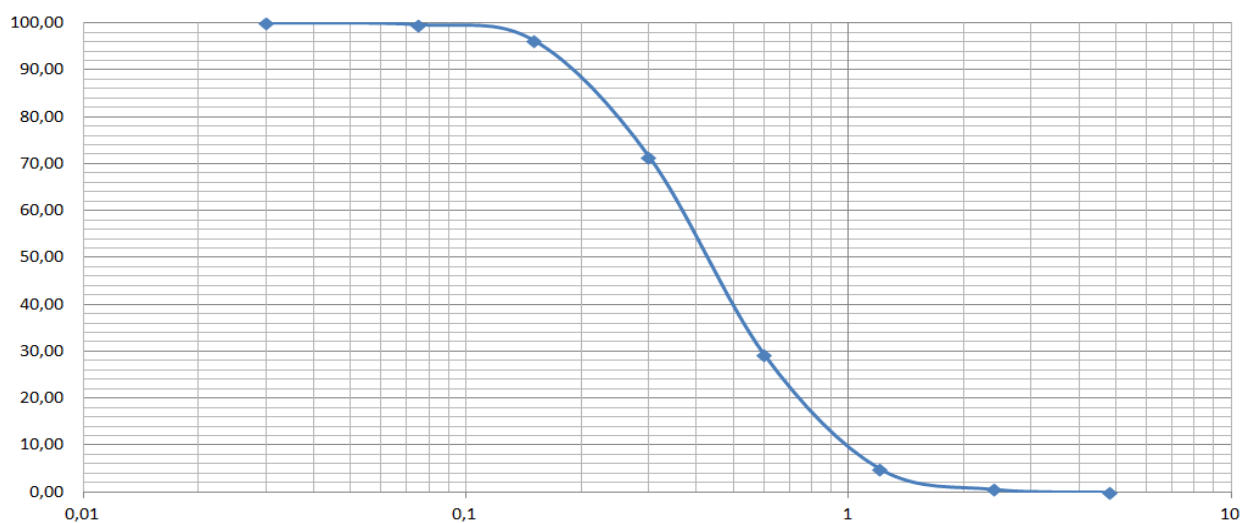
O agregado miúdo empregado foi recolhido da região do Caxitu/PB, consiste em uma areia cuja aparência é clara por apresentar um alto percentual de minerais rico em quartzo. Para a caracterização da areia, foram realizados os ensaios de massa específica e granulometria segundo a NBR NM 52 (2003) e a NBR 7211 (2005), respectivamente. Os resultados estão detalhados na Tabela 3 e na Figura 1.

Tabela 3 – Composição da areia Caxitu.

Peneiras (mm)	Retida (g)	Retida (%)	Retida acumulada (%)
4,8	0	0,0	0,0
2,4	4,85	0,6	0,6
1,2	35,4	4,4	5,0
0,6	194,64	24,3	29,4
0,3	337,37	42,2	71,5
0,15	197,99	24,7	96,3
0,075	26,75	3,3	99,6
< 0,075	3,00	0,4	100
Total	800,00	100	402,4
Módulo de Finura- 4,02			
Massa Específica – 2,65 g/cm ³			

Fonte: Os autores.

Figura 1 – Curva granulométrica da areia (percentual retido acumulado).



Fonte: Os autores.

O agregado graúdo aplicado no estudo, é uma brita granítica nº 12 da Pedreira Guarany, localizada em Jaboatão dos Guararapes, com densidade de $2,70 \text{ g/cm}^3$.

O EPS disposto para a dosagem, apresentado na Figura 2, é proveniente da reciclagem e trituração de resíduos e placas de EPS, com maioria de suas partículas retidas na peneira de abertura 4,8 mm, sua densidade é de $0,015 \text{ g/cm}^3$.

Figura 2 – EPS triturado utilizado no estudo.



Fonte: Os autores.

A água empregada nas dosagens é resultante da rede pública de abastecimento local.

Com a finalidade de melhorar as características reológicas do concreto, foi utilizado como aditivo, um superplastificante sintético, líquido, a base de polímeros policarboxilatos (PCE), com massa específica de $1,07 \text{ g/cm}^3$. A dosagem recomendada pelo fabricante varia de 0,2 a 5 % em massa sobre o peso do cimento.

3.2 DOSAGEM, MOLDAGEM E ENSAIO DOS CORPOS DE PROVA

Foram executadas 6 dosagens, sendo uma sem o emprego de EPS triturado e as demais com substituições parciais e totais pelo agregado graúdo no traço base.

Segundo a NBR 6118/2014, a resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}) para elementos com fins estruturais deve ser maior que 20 MPa. Presumindo que com o uso de EPS no concreto convencional sua resistência diminuirá e, para garantir as especificações da Norma para este concreto leve, o traço padrão escolhido é um traço rico com proporção 1:3, de relação cimento:agregado, a fim de assegurar uma resistência mínima de 40 MPa aos 28 dias. O teor de argamassa de 58%, o uso de aditivo de superplastificante de 0,45% em relação à massa do cimento e a relação água/cimento de 0,32 foram estabelecidos experimentalmente com o intuito de se obter um concreto com alta trabalhabilidade. O traço base em massa ficou então 1:1,32:1,68.

Nas dosagens realizadas com o uso de EPS foram feitas as substituições volumétricas do agregado graúdo nas porcentagens: 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. As dosagens estão detalhadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Relação dos traços a serem executados.

Traços	Pérolas de EPS (% de substituição no agregado graúdo)
C1	100
C2	80
C3	60
C4	40
C5	20
C6	-

Fonte: Os autores.

Para cada dosagem, executou-se 10 corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura. Todos os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de massa específica e ensaio de resistência à compressão simples aos 28 dias.

Os concretos foram confeccionados no departamento de Engenharia Civil da UFPE, utilizando uma betoneira com capacidade de 145 litros, mostrada na Figura 4, em que se executou os 10 corpos de prova para cada traço, ilustrados na Figura 5. Estes foram moldados manualmente com o auxílio de soquetes disponíveis no laboratório, seguindo a NBR 5738/2003. Em seguida, os cilindros foram desmoldados e pesados em balança com precisão de 5g, apresentada na Figura 3, e submetidos à cura submersa em água.

Figura 3– Balança utilizada para pesar os corpos de prova



Fonte: Os autores.

Figura 4– Betoneira utilizada e corpos de prova



Fonte: Os autores.

Figura 5 – Corpos de prova antes do ensaio de compressão



Fonte: Os autores.

Após cura de 28 dias os corpos de prova foram rompidos na prensa, mostrada na Figura 6, cedida pela empresa TECOMAT engenharia, foi utilizada para a realização o ensaio de resistência à compressão.

Figura 6 – Prensa utilizada para rompimento dos corpos de prova.



Fonte: Os autores.

3.3 ANÁLISE DOS ESFORÇOS PARA CADA TIPO DE LAJES E VIGAS

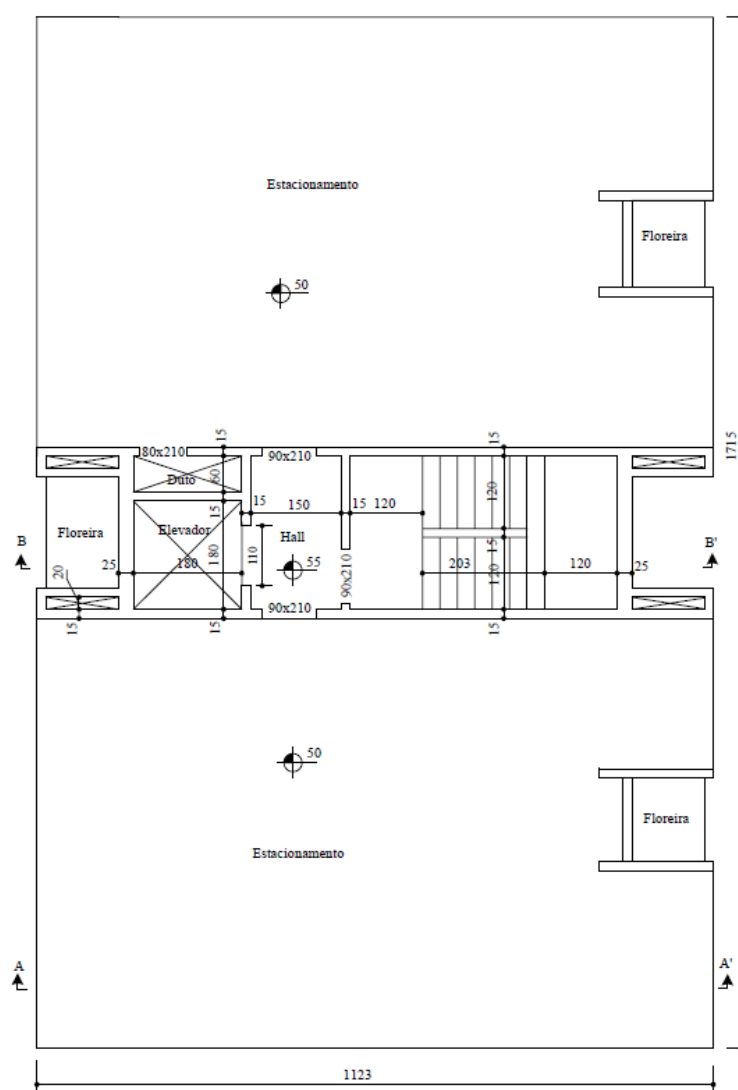
Para cada traço, foi realizada uma simulação das lajes e vigas com as propriedades de massa específica e resistência obtidas em laboratório, a partir do corpo de prova do concreto leve. Em seguida, realizou-se o cálculo dos esforços para a estrutura simplificada escolhida e o dimensionamento dos elementos estruturais (lajes, vigas, pilares e fundação) e o volume de concreto para cada tipo de simulação. Adicionalmente, foi calculada qual a quantidade de aço necessária para cada elemento.

A estrutura escolhida para realizar a análise, foi retirada do livro Projeto Estrutural de Edifícios de Concreto Armado de ARAÚJO (2014). Cuja estrutura é composta por um pavimento térreo e oito pavimentos tipo. Onde, em cada pavimento tipo, há dois apartamentos idênticos, compostos por 33 vigas. A cobertura foi dimensionada utilizando as cargas do pavimento tipo. Os detalhes da edificação (plantas, cortes e vista 3D) são mostrados nas Figuras 7 a 13.

O pré-dimensionamento foi baseado no livro no qual foi retirado o modelo de edificação, que leva em conta que todas as lajes tem espessura de 10 cm, além disso a largura das vigas foi

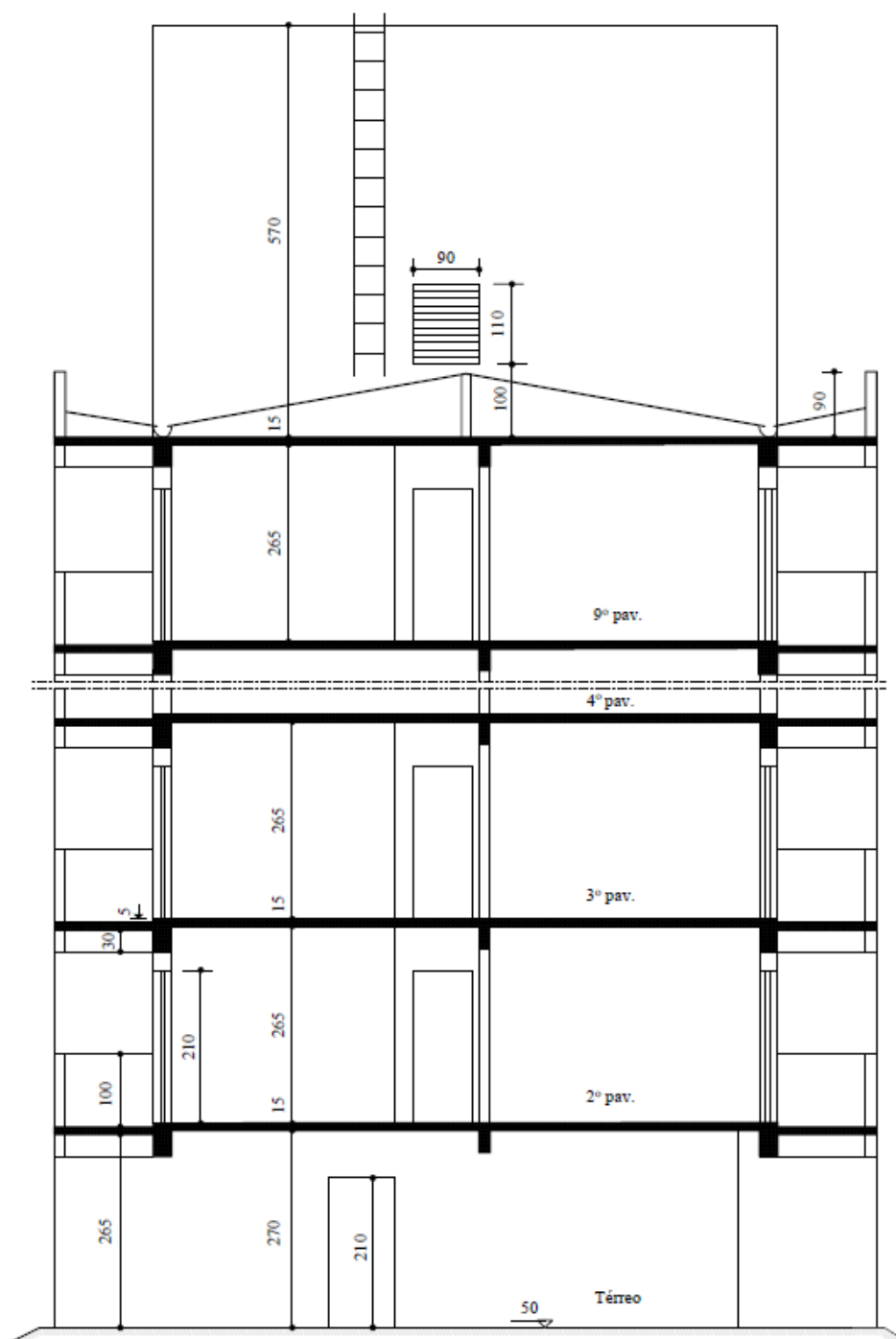
determinada considerando que as mesmas estariam escondidas nas paredes, quando possível, de forma que quando haviam paredes de 15 cm, adotou-se largura de 12cm, e para vigas situadas em paredes de 25 cm, a largura adotada foi 20 cm. Para a altura das vigas foi estudado para cada caso, a sua participação na estrutura, se são responsáveis pela indeslocabilidade horizontal do edifício, se pertencem à subestrutura de contraventamento ou se são vigas de amarração dos pilares. Por fim, a seção dos pilares foi determinada de modo a não interferir no projeto arquitetônico.

Figura 7 – Planta baixa do pavimento térreo.



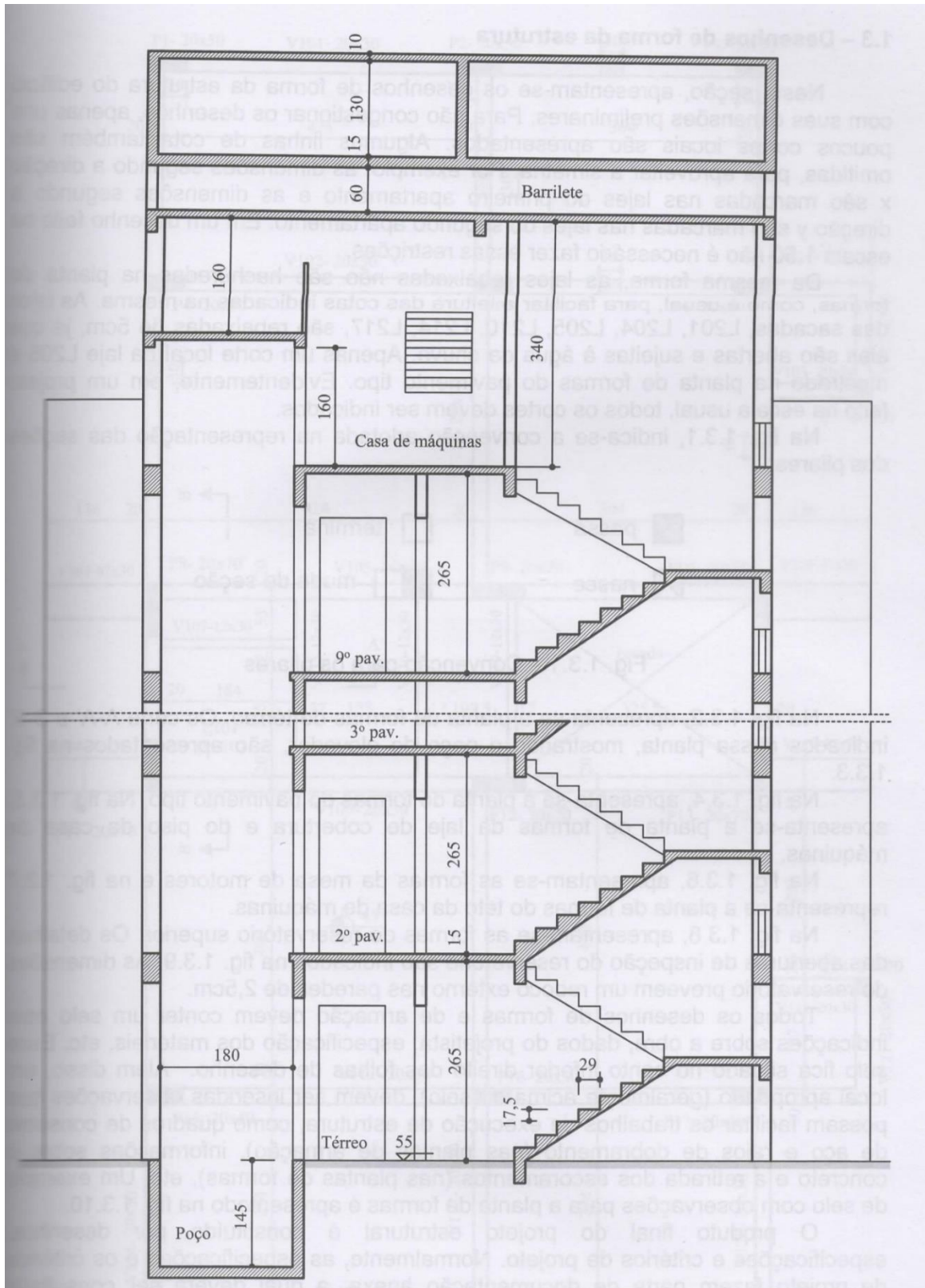
Fonte: Araújo (2014, p.3)

Figura 9 – Corte A-A.



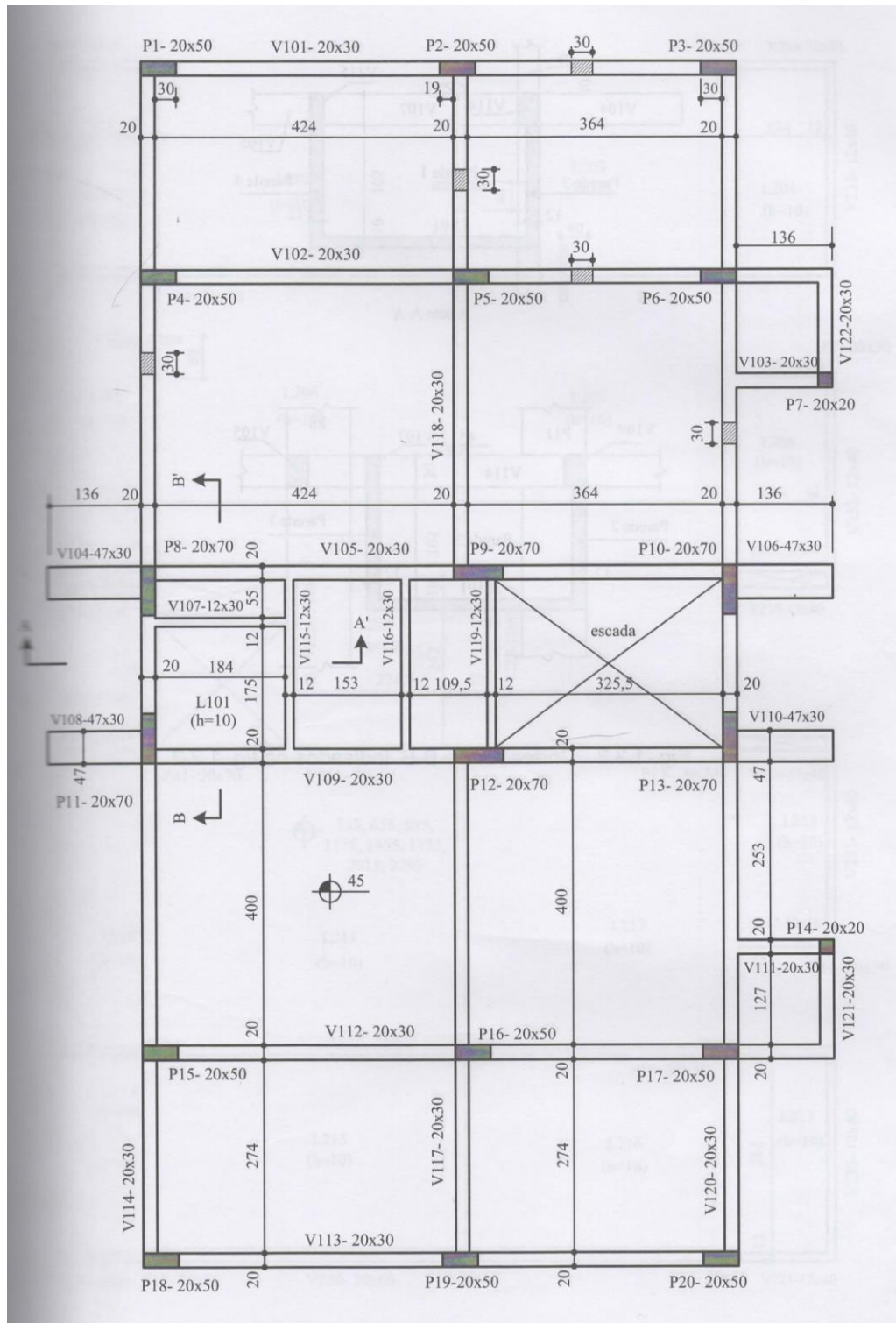
Fonte: Araújo (2014, p.6)

Figura 10 – Corte B-B.



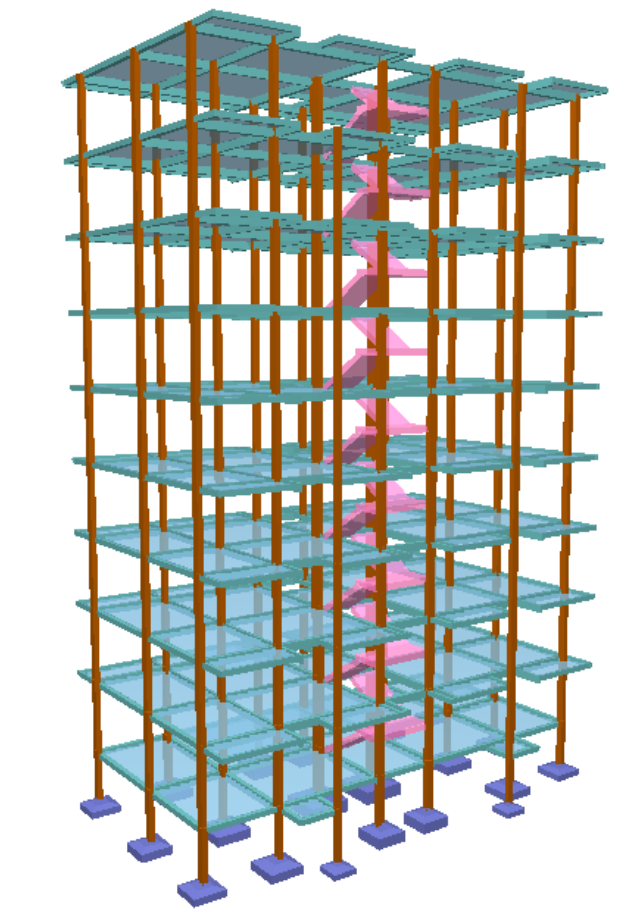
Fonte: Araújo (2014, p.7)

Figura 11 – Planta de formas do pavimento térreo.



Fonte: Araújo (2014, p.9)

Figura 13 – Edificação de 8 pavimentos tipo simplificada das análises



Fonte: Os autores.

O cálculo estrutural e o dimensionamento para as opções dadas foram encontrados com o auxílio do *software* CYPECAD utilizado em escritórios de cálculo no Brasil. Porém, essa ferramenta possui algumas limitações. Como, por exemplo, a inclusão da massa específica do concreto encontrada em laboratório, o *software* a considera como padrão de 25 kN/m^3 e não pode ser ajustada. Com isso, foi implementada uma solução para contornar essa limitação.

Inicialmente, após a introdução das plantas da estrutura em arquivo DWG e inserção dos pavimentos no *software*, a etapa seguinte é a colocação das cargas permanentes (CP) e sobrecargas (SCU) nos andares segundo a NBR 6120 (2017). Considerou-se na análise que, para todas as simulações dos pavimentos, a carga permanente (CP_{NBR}) tem o valor de $0,8 \text{ kN/m}^2$ e a sobrecarga (SCU_{NBR}) $1,5 \text{ kN/m}^2$. A fim de sanar o problema da inclusão da massa específica encontrada na dosagem, foi feita uma redução no valor da carga a ser inserida no CYPECAD $(CP + SCU)_{\text{inserido}}$ em cada pavimento, cuja grandeza é a diferença entre a densidade fornecida

pelo software ($\gamma_{CYPECAD}$) e a encontrada em cada dosagem de concreto leve (γ_{REAL}), multiplicada pela espessura da laje em metros (h_{LAJE}), segundo Equação 1.

$$(CP + SCU)_{inserido} = CP_{NBR} + SCU_{NBR} - (\gamma_{CYPECAD} - \gamma_{REAL}) * h_{LAJE} \quad (1)$$

Essa solução, no entanto, contorna o problema do peso específico apenas nas lajes. Como as vigas também estão sendo simuladas com o concreto leve, para simplificar a análise estrutural, colocou-se alvenaria de blocos cerâmicos sobre todas as vigas, de forma que a carga da alvenaria pôde assim ser diminuída em função de cada peso específico das vigas. A densidade dos blocos ($\gamma_{alvenaria}$) foi considerada igual a 13 kN/m³ segundo NBR 6120/17, a altura da alvenaria foi calculada em função da altura do pé direito ($h_{pavimento}$) no valor de 2,8m e da altura da viga (h_{viga}) segundo a Equação 2, a carga distribuída nas vigas foi inserida segundo a Equação 3, com $b_{alvenaria}$ igual ao tamanho da base da alvenaria, determinada em projeto arquitetônico.

$$h_{alvenaria} = h_{pavimento} - h_{viga} \quad (2)$$

$$q_{alvenaria} = [\gamma_{alvenaria} - (\gamma_{CYPECAD} - \gamma_{REAL})] * b_{alvenaria} * h_{alvenaria} \quad (3)$$

Outra limitação do *software* utilizado é que não há a verificação automática da limitação de flechas em lajes maciças. Dessa forma, verificou-se manualmente a flecha máxima, baseado na NBR 6118 (2014), para atender as exigências quanto ao estado limite de deformações excessivas, para isso foi considerando que o coeficiente de fluência médio representativo do edifício como um todo é 2.5.

Para todas as simulações foi considerado que o concreto dos pilares e fundações, bem como a resistência do solo foi mantida constante. Foi determinado que a classe de resistência do concreto do pilar é C25 e o das fundações é C20. Para as características do solo, os valores das tensões admissíveis do terreno foram utilizadas as combinações fundamentais de 0,5 MPa e as combinações sísmicas e acidentais de 0,6 MPa.

A partir dessas informações foram feitas 3 análises comparativas para verificar a variação do custo final da edificação.

A primeira foi realizada com base no pré-dimensionamento dos elementos da edificação propostos por ARAÚJO (2014), mantendo constante as seções das lajes, vigas e pilares para todas as simulações, de forma que pôde-se observar a variação da quantidade de aço necessária,

o volume de concreto nas fundações, os esforços nos pilares e, por fim, o custo total em cada traço ensaiado.

A segunda análise, tratou-se da mudança das seções de viga e pilares em função do peso específico e resistência à compressão dos concretos analisados. De maneira que se consegue obter os mesmos parâmetros da primeira análise com a inclusão da variação do volume de concreto nas vigas e pilares.

Por fim, na terceira análise, estudou-se a influência do aumento de 8 pavimentos nos parâmetros avaliados para verificar se os resultados obtidos anteriormente eram válidos para edificações mais altas. Por simplificação, essa análise foi realizada apenas com os concretos base (traço C6) e com o concreto com 100% de substituição de brita pelo EPS (traço C1).

3.4 ANÁLISE DE CUSTOS

Para o cálculo do custo do material para o concreto leve que seria utilizado nas lajes e vigas, foi realizada uma pesquisa de mercado. O custo adotado foi a média dos preços obtidos de lojas de materiais de construção na Região Metropolitana do Recife. A pesquisa foi realizada em abril de 2018. Com isso, foi obtido o preço de 1 m³ de concreto para cada traço analisado no experimento. Já para o custo dos concretos da fundação e pilares, bem como o custo do aço CA-50 foram utilizados os valores unitários foram retirados da tabela do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e índices da Construção Civil-SINAPI da Caixa Econômica Federal, referente ao mês de junho de 2018, não desonerado, localidade Pernambuco.

Em seguida, a partir dos volumes das peças de concreto (vigas, lajes, pilares e fundação) e da área de aço necessária obtidos após o dimensionamento, será calculado o custo total da estrutura em função da mudança do traço utilizado para a laje.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico foram analisadas as variações de massa específica e resistência à compressão dos corpos de prova ensaiados, bem como os esforços na estrutura e custo total de concreto e aço para a edificação.

4.1 CORPOS DE PROVA COM CONCRETO LEVE

Após a desmoldagem, os corpos de prova apresentaram as massas específicas médias, de cada traço, apresentadas na Tabela 5.

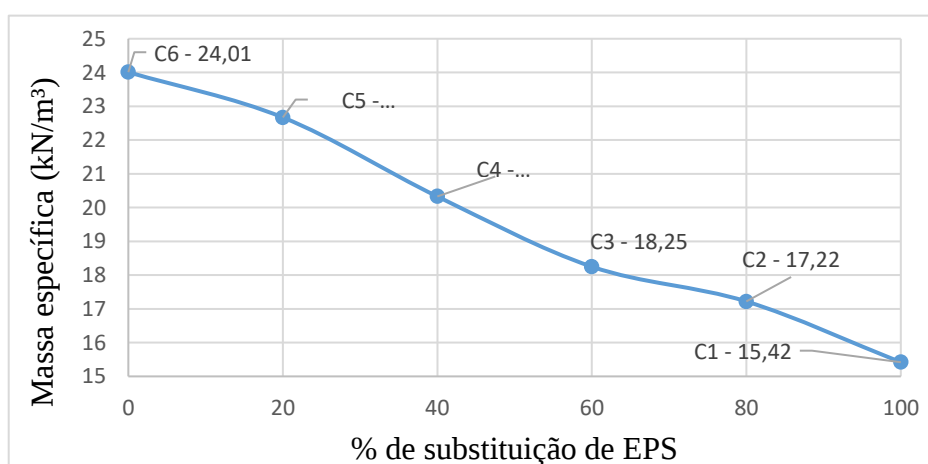
Tabela 5 – Massa específica de cada traço

Traços	Pérolas de EPS (% de substituição no agregado gráúdo)	Massa específica concreto simples (KN/m ³)
C1	100	15,42
C2	80	17,22
C3	60	18,25
C4	40	20,33
C5	20	22,67
C6	-	24,01

Fonte: Os autores.

De acordo com a Tabela 5 os resultados obtidos foram coerentes com o esperado, visto que com a substituição crescente de EPS pelo agregado gráúdo as massas específicas diminuíram, como pode ser verificado no gráfico da Figura 14.

Figura 14 – Gráfico da variação da massa específica nos traços.



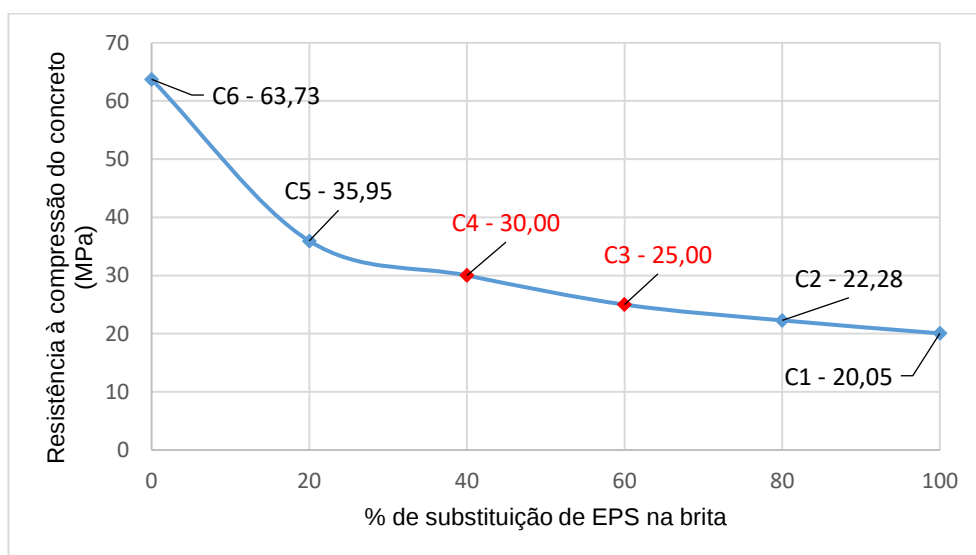
Fonte: Os autores.

De acordo com a NBR 6118 (2014), para encontrar a massa específica do concreto armado com base em um concreto com massa específica conhecida, deve-se adicionar 100 kg/m³ a 150 kg/m³, correspondente à massa do aço. Desse modo, as massas específicas encontradas foram acrescidas de 100 Kg/m³, para realizar o dimensionamento considerando a massa do concreto armado.

De posse desses resultados, pôde-se analisar que os concretos dos traços C1, C2 e C3 apresentaram densidade entre 800 e 2000 kg/m³, sendo considerados, segundo NBR12655/06, concretos leves.

Após 28 dias em cura submersa, os corpos de provas foram submetidos a ensaio de resistência à compressão axial. As amostras referentes aos traços C3 e C4 apresentaram resultados discrepantes das outras amostras, indicando que provavelmente houve um erro durante o ensaio de compressão, de maneira que foi determinado que haveria o descarte desses resultados. Para compensar a falta da resistência à compressão desses traços, foi realizado um gráfico (Figura 15) com os resultados dos traços C1, C2, C5 e C6, com isso pôde-se estimar a classe de resistências dos traços C3 e C4, por interpolação. Assim, nesse estudo será considerado esses valores interpolados para a resistência à compressão dos traços C3 e C4.

Figura 15 – Gráfico da variação da resistência à compressão nos traços.



Fonte: Os autores.

Em seguida, as resistências à compressão característica (f_{ck}) foram inseridas nas respectivas classes de resistência determinadas na NBR 6118/2014, de maneira que o dimensionamento fosse a favor da segurança, com isso a classe de resistência foi determinada

como sendo o valor inferior mais próximo ao resultado encontrado. Especificamente, como a NBR 6118 (2014) considera a maior classe de resistência sendo C50, o traço C6, que se enquadraria na classe C60, para efeito de dimensionamento foi considerado C50.

Como pode ser constatado na Tabela 6, a resistência característica à compressão característica em 28 dias foi decrescendo conforme aumentou o uso do EPS. Adicionalmente, todos os traços foram enquadrados como concretos estruturais, visto que tem classe de resistência maior ou igual a C20.

Tabela 6 – Resistência à compressão e classe de resistência dos traços.

Traços	Pérolas de EPS (% de substituição no agregado graúdo)	Resistência à compressão característica em 28 dias (Mpa)	Classe de resistência
C1	100	20,05	C20
C2	80	22,28	C20
C3	60	25,00	C25
C4	40	30,00	C30
C5	20	35,95	C35
C6	-	63,73	C60

Fonte: Os autores.

4.2 CUSTO DO M³ DO CIMENTO DOSADO

O custo do m³ do concreto dos traços foi baseado nos valores encontrados através de pesquisa de mercado. A Tabela 7 mostra o preço de cada material utilizado.

Tabela 7 – Preços dos materiais na Região Metropolitana do Recife.

Material	Preço (R\$)	Unidade
Cimento	22,00	Saco de 50Kg
Areia	45,00	m ³
Brita	75,00	m ³
EPS	8,00	Kg
Aditivo	7,00	Kg
Água	0,01	m ³

Fonte: Os autores.

Com base nesses valores, foi calculado o custo unitário dos traços dosados. Além disso, o valor do custo do concreto utilizado nos pilares e fundações, bem como o custo do aço CA-50, foi determinado segundo tabela SINAPI, como mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 – Preço unitário do aço e dos concretos utilizados.

Preço unitário	
C1	R\$ 279,71
C2	R\$284,99
C3	R\$ 290,26
C4	R\$ 295,54
C5	R\$ 300,81
C6	R\$ 306,09
Concreto pilares	R\$ 294,74
Concreto fundação	R\$ 267,40
Aço CA-50	R\$ 4,57

Fonte: Os autores.

Pode ser verificado que o custo do concreto com uso do EPS foi menos custoso que o concreto base. Apesar do resultado obtido não confirmar o que a literatura afirma quanto ao custo unitário do concreto leve ser mais caro, isto pode ser explicado pelo fato de que foi mantido constante o consumo de cimento, valor que representa cerca de 80% do valor do concreto base dosado. Na literatura, entretanto a comparação é feita entre concretos com a mesma classe de resistência, de forma que o concreto leve necessita maior consumo de cimento, encarecendo assim seu custo unitário.

Além disso, como foi realizada substituição volumétrica da brita pelo EPS e o custo do EPS em volume é menor do que o da brita, o traço mais leve (C1) se tornou mais barato.

4.3 DIMENSÕES DOS ELEMENTOS UTILIZADAS NO DIMENSIONAMENTO

Para as três análises realizadas no *software*, foi determinado que a altura da laje seria fixada para todos os pavimentos nas simulações no valor de 10 cm. As demais dimensões das vigas e pilares foram modificadas em função do estudo realizado, de forma que:

- 1ª análise: Vigas e pilares com dimensões baseadas no pré-dimensionamento, segundo Araújo (2014).
- 2ª análise: Para as vigas e pilares as larguras se mantiveram iguais a 1ª análise e a altura das vigas e comprimento dos pilares foram diminuídos, com valores

múltiplos de 10 cm, com o propósito de encontrar as menores seções dos elementos.

- 3ª análise: Com o intuito de comparar os resultados das análises anteriores com uma edificação com mais pavimentos, foi realizado o estudo utilizando as mesmas dimensões da análise 1 e, quando necessário, foi aumentado a seção dos pilares, mantendo as seções das vigas constantes. Foram utilizados apenas os traços base (sem adição de EPS) e com substituição total de EPS no agregado graúdo, a fim de simplificar a análise.

4.3.1 Análise 1 – Seções com base no pré-dimensionamento

Na Tabela 9 pode ser verificado as dimensões das seções das vigas e pilares utilizados na primeira análise para todos os traços dosados.

Tabela 9 – Dimensões das vigas e pilares da primeira análise

Viga		Largura (cm)	Altura (cm)	Pilares	Largura (cm)	Altura (cm)
Térreo	101	20	20	P1	20	50
	102	20	30	P2	20	50
	103	20	20	P3	20	50
	104	20	30	P4	20	50
	105	12	20	P5	20	50
	106	20	30	P6	20	50
	107	20	20	P7	20	20
	108	20	30	P8	20	70
	109	20	20	P9	20	70
	110	20	20	P10	20	70
	111	12	20	P11	20	70
	112	12	20	P12	20	70
	113	20	30	P13	20	70
	114	20	30	P14	20	20
	115	12	20	P15	20	50
	116	20	20	P16	20	50
	117	20	20	P17	20	50
	118	20	20	P18	20	50
Pavimento Tipo	201	12	30	P19	20	50
	202	20	50	P20	20	50
	203	12	30			
	204	12	40			

Viga	Largura (cm)	Altura (cm)
205	12	30
206	12	30
207	20	50
208	12	30
209	12	30
210	12	30
211	12	30
212	12	30
213	12	30
214	12	30
215	20	50
216	12	30
217	12	30
218	12	40
219	12	30
220	20	50
221	12	30
222	12	30
223	12	30
224	20	50
225	12	50
226	12	40
227	12	40
228	12	30
229	20	50
230	12	30
231	12	30
232	12	30
233	12	30

Fonte: Os autores.

4.3.2 Análise 2– Modificação das seções das vigas e pilares

Nas Tabelas 10 e 11 podem ser vistas as alterações nas dimensões das seções das vigas e pilares, respectivamente, utilizadas na segunda análise para cada traço dosado.

Tabela 10 – Dimensão das vigas utilizadas para cada traço na segunda análise

Viga		Largura (cm)	C1	C2	C3	C4	C5	C6
			Altura (cm)					
Térreo	101	20	20	30	20	20	20	20
	102	20	30	30	30	30	30	30
	103	20	20	20	20	20	20	20
	104	20	30	30	30	30	30	30
	105	12	20	20	20	20	20	20
	106	20	30	30	30	30	30	30
	107	20	30	20	20	20	20	20
	108	20	20	30	30	30	30	30
	109	20	20	30	20	20	20	20
	110	20	20	20	20	20	20	20
	111	12	20	20	20	20	20	20
	112	12	20	20	20	20	20	20
	113	20	30	30	30	30	30	30
	114	20	30	30	30	30	30	30
	115	12	20	20	20	20	20	20
	116	20	30	30	20	20	30	20
	117	20	20	20	20	20	20	20
	118	20	20	20	20	20	20	20
Pavimento Tipo	201	12	20	20	20	30	30	30
	202	20	20	20	20	40	40	40
	203	12	20	20	30	30	30	30
	204	12	30	30	30	30	30	30
	205	12	20	20	20	20	20	20
	206	12	30	30	30	30	30	30
	207	20	30	30	30	40	40	40
	208	12	20	20	20	20	20	20
	209	12	20	20	20	20	20	20
	210	12	20	20	20	20	20	20
	211	12	20	20	20	20	20	20
	212	12	20	20	20	20	20	20
	213	12	20	20	20	20	20	20
	214	12	30	30	30	30	30	30
	215	20	30	30	30	40	40	40
	216	12	20	20	30	20	20	20
	217	12	20	20	20	20	20	20
	218	12	30	30	30	30	30	30
	219	12	20	20	30	30	30	30
	220	20	20	20	20	40	40	40

Viga	Largura (cm)	C1	C2	C3	C4	C5	C6
		Altura (cm)					
221	12	20	20	30	30	30	30
222	12	20	20	20	20	20	20
223	12	20	20	20	20	20	20
224	20	30	30	30	40	40	40
225	12	20	20	20	30	40	40
226	12	30	30	20	30	30	30
227	12	30	30	20	30	30	30
228	12	30	30	30	30	30	20
229	20	30	30	40	40	40	40
230	12	20	20	20	20	20	20
231	12	20	20	20	20	20	20
232	12	20	20	20	20	20	20
233	12	20	20	20	20	20	20

Fonte: Os autores.

Tabela 11 – Dimensão dos pilares utilizados para cada traço na segunda análise

Pilares	Largura (cm)	C1	C2	C3	C4	C5	C6
		Altura (cm)					
P1	20	30	30	30	30	30	30
P2	20	30	30	30	30	30	30
P3	20	30	30	30	30	30	30
P4	20	30	30	30	30	40	50
P5	20	30	30	30	30	40	30
P6	20	30	30	30	30	40	30
P7	20	20	20	20	20	20	20
P8	20	30	30	40	40	50	50
P9	20	50	50	50	50	60	50
P10	20	30	30	40	40	40	40
P11	20	30	30	40	40	50	50
P12	20	50	50	50	50	50	50
P13	20	30	30	40	40	40	40
P14	20	20	20	20	20	20	20
P15	20	30	30	30	30	40	50
P16	20	30	30	30	30	40	40
P17	20	30	30	30	30	40	30
P18	20	30	30	30	30	30	30
P19	20	30	30	30	30	30	30
P20	20	30	30	30	30	30	30

Fonte: Os autores.

Para essa simulação pôde-se observar que com a diminuição do peso do concreto utilizado nas vigas e lajes, conseguiu-se diminuir a seção das vigas e pilares. Mesmo considerando a diminuição da classe de resistência dos traços.

4.3.3 Análise 3– Modificação das seções dos pilares para 16 pavimentos tipo.

Na Tabela 12 podem ser verificadas as dimensões das seções dos pilares utilizadas na terceira análise para os traços C1 (substituição total do agregado graúdo pelo EPS) e C6 (traço-base).

Tabela 12 – Dimensões dos pilares utilizados na terceira análise.

PILARES	Dimensão			
	C1 -16		C6 -16	
	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Largura (cm)	Comprimento (cm)
P1	20	50	20	70
P2	20	50	20	60
P3	20	50	20	50
P4	20	50	20	80
P5	20	50	20	70
P6	20	50	20	60
P7	20	20	20	20
P8	20	70	20	90
P9	20	80	30	70
P10	20	70	20	70
P11	20	70	20	90
P12	20	80	30	70
P13	20	70	20	70
P14	20	20	20	20
P15	20	50	20	80
P16	20	50	20	70
P17	20	50	20	60
P18	20	50	20	70
P19	20	50	20	60
P20	20	50	20	50

Fonte: Os autores.

Para o traço mais leve (C1), as dimensões utilizadas na análise 1 conseguiram atender os esforços da estrutura, enquanto que para o traço base (C6), foi necessário o aumento das seções dos pilares para suportar o aumento do peso próprio da estrutura.

4.4 QUANTIDADE DE CONCRETO E AÇO UTILIZADO EM CADA DIMENSIONAMENTO

Após o dimensionamento, nas três análises, foram extraídos os quantitativos referentes ao volume do concreto e a massa de aço para todas as vigas, pilares, lajes e fundações.

4.4.1 Análise 1– Seções com base no pré-dimensionamento

Na Tabela 13 constam os quantitativos de cada traço da análise 1.

Tabela 13 – Volume de concreto e massa de aço para os traços na 1ª análise

Traço	Volume de Concreto (m³)					Massa de aço (kg)				
	Vigas	Lajes	Pilares	Fundação	Total	Vigas	Lajes	Pilares	Fundação	Total
C1	123,17	143,73	45,7	14,23	326,83	5425	6281	6054	841	18601
C2	123,17	143,73	45,7	16,18	328,78	5692	6379	6147	971,2	19189,2
C3	123,17	143,73	45,7	16,63	329,23	6480	6427	6289	1062,39	20258,39
C4	123	143,73	45,74	19,2	331,67	7005	6620	6464	1185,22	21274,22
C5	123,17	143,73	45,7	21,76	334,36	7621	6821	6900	1397,75	22739,75
C6	123,17	146,52	45,7	23,1	338,49	10026	7254	7302	1574,49	26156,49

Fonte: Os autores.

Observou-se que para os volumes de concreto a variação dos volumes de vigas, lajes e pilares foi pequena entre os traços, visto que as seções não foram alteradas. Já em relação ao volume da fundação constatou-se o aumento em função do crescimento do peso da estrutura como um todo.

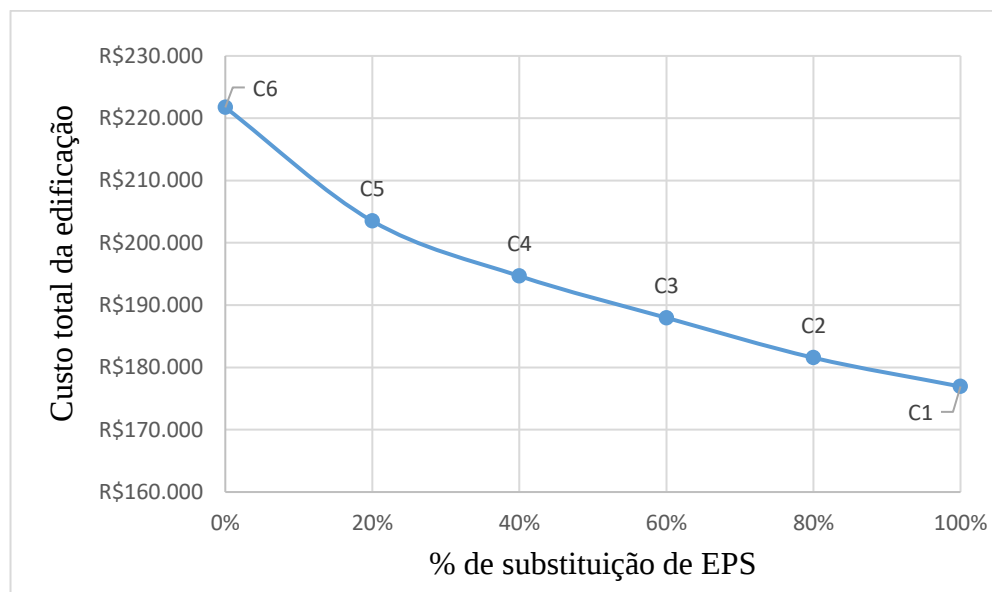
Pode-se verificar que para todos os elementos estruturais o quantitativo de massa de aço precisou aumentar em função do crescimento do peso do concreto para poder, assim, suportar as cargas da edificação. Na Tabela 14 e Figura 16 pode-se analisar a variação do custo total dos materiais para cada traço dosado.

Tabela 14 – Custo total do material para cada traço ensaiado na primeira análise.

Traço	Custo total
C1	R\$ 176.935,63
C2	R\$ 181.553,38
C3	R\$ 187.968,15
C4	R\$ 194.667,51
C5	R\$ 203.495,09
C6	R\$ 221.731,28

Fonte: Os autores.

Figura 16 – Gráfico de variação do custo em função da % de substituição de EPS.



Fonte: Os autores.

Com esses resultados, nota-se que com o aumento da porcentagem de substituição da brita pelo EPS houve a diminuição do custo total da edificação. Comparando os traços C1 e C6, essa diminuição é de cerca de 20,2%, representando economia de aproximadamente R\$45.000,00.

4.4.2 Análise 2– Modificação das seções das vigas e pilares

Na Tabela 15 constam os quantitativos de cada traço da análise 2.

Tabela 15 – Volume de concreto e massa de aço para os traços na 2ª análise.

Traço	Volume de Concreto (m³)					Massa de aço (kg)				
	Vigas	Lajes	Pilares	Fundação	Total	Vigas	Lajes	Pilares	Fundação	Total
C1	62,43	143,71	29,9	14,39	250,43	5957	6715	6160	1038,99	19870,99
C2	63,17	143,71	30,4	33,6	270,88	6619	7020	6598	1839,23	22076,23
C3	64,34	143,71	31,78	24,78	264,61	6431	7305	6538	1514,66	21788,66
C4	78,17	143,71	31,18	38,16	291,22	6508	7348	7445	2181,85	23482,85
C5	79,3	143,71	35,09	31,83	289,93	7166	7574	7655	2090,8	24485,8
C6	78,62	143,71	34,34	34,14	290,81	8057	8067	8142	2177,71	26443,71

Fonte: Os autores.

Assim como foi verificado na primeira análise os quantitativos de volumes de concretos vigas, pilares e fundações aumentaram conforme o aumento do peso específico dos traços, independentemente do aumento da resistência. Já o volume de concreto da laje manteve-se constante pois a espessura da mesma não foi alterada.

A massa de aço necessária seguiu o mesmo raciocínio da análise 1, visto que o aumento do peso provoca mais esforços na estrutura, acarretando aumento da massa de aço necessária.

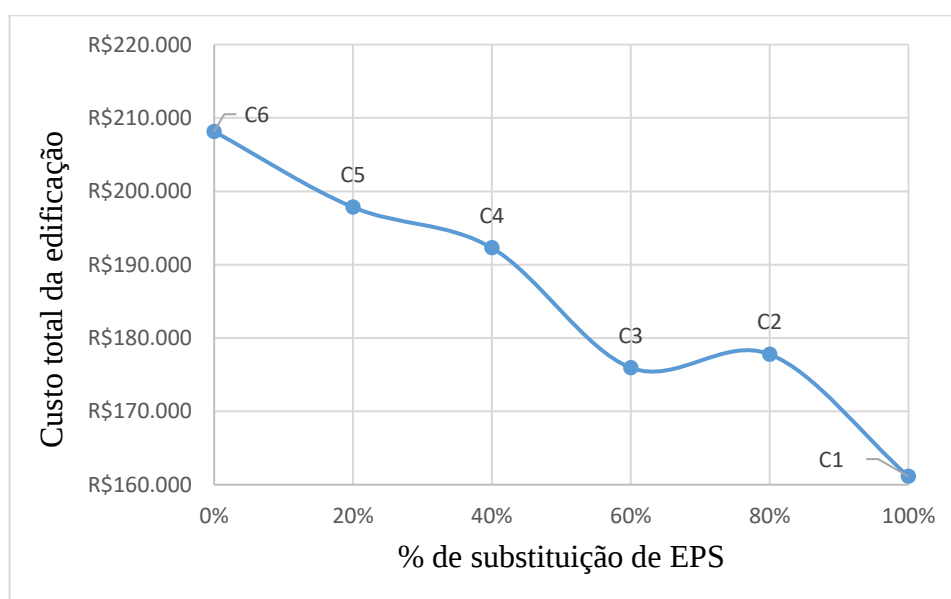
Na Tabela 16 e na Figura 17 pode-se analisar a variação do custo total dos materiais para cada traço dosado.

Tabela 16– Custo total do material para cada traço ensaiado na segunda análise.

Traço	Custo total
C1	R\$ 161.130,26
C2	R\$ 177.790,87
C3	R\$ 175.956,12
C4	R\$ 192.284,56
C5	R\$ 197.837,51
C6	R\$ 208.151,27

Fonte: Os autores.

Figura 17 – Gráfico de variação do custo em função da % de substituição de EPS.



Fonte: Os autores.

Constatou-se mais uma vez que, mesmo com a diminuição das seções quando possível, o aumento da porcentagem de substituição de EPS provocou uma diminuição no custo total dos materiais. No entanto, os traços C2 e C3 não seguiram essa mesma lógica, o que pode ser explicado pelo fato de que mesmo o C2 sendo mais leve, a resistência do C3 é maior, o que pode ter ocasionado essa diferença de custo.

Dessa forma, pode-se concluir que com o aumento da porcentagem de substituição da brita pelo EPS houve a diminuição do custo total da edificação. Comparando os traços C1 e C6 dessa análise, a diminuição é de cerca de 22,6%, representando economia de aproximadamente R\$47.000,00.

Comparando os custos obtidos na primeira e segunda análise, notou-se que com a melhor escolha das seções de vigas e pilares, em função das características do concreto, pode-se realizar a economia no custo da edificação em todos os traços dosados.

4.4.3 Análise 3– Modificação das seções dos pilares para 16 pavimentos tipo.

Na tabela 17 consta os quantitativos dos traços C1 e C6 da 3ª análise.

Tabela 17 – Volume de concreto e massa de aço para os traços na 3ª análise.

Traço	Volume de Concreto					Massa de aço				
	Vigas	Lajes	Pilares	Fundação	Total	Vigas	Lajes	Pilares	Fundação	Total
C1	225,73	260,05	84,9	32,6	603,28	10254	11340	16083	2224,74	39901,74
C6	225,74	265,28	105,84	70,41	667,27	18410	13202	23950	5811,17	61373,17

Fonte: Os autores.

Com o aumento de 8 pavimentos tipo na estrutura base, pode-se concluir que mesmo com o aumento da altura da edificação o resultado obtido nas análises anteriores segue a mesma linha de raciocínio, representando a diminuição do volume de concreto e massa de aço para o traço mais leve.

Na Tabela 18 é apresentado o custo total dos materiais para os traços C1 e C6 nessa análise.

Tabela 18 – Custo total do material para cada traço ensaiado na terceira análise.

Traço	Custo total
C1	R\$ 351.968,67
C6	R\$ 480.794,88

Fonte: Os autores.

Com esses dados, foi possível apurar que, como esperado, o custo do traço mais pesado foi mais custoso do o traço mais leve. Em termos de porcentagem, o mais leve corresponde a 26,8% de economia quando comparado ao mais pesado, representando economia de cerca de R\$128.800,00.

Fazendo a análise comparativa entre as análises 1 e 3, pode-se observar que com o aumento da altura da edificação, houve um aumento na economia percentual no custo entre os traços C1 e C6 de 20,2% para 26,8%. Dessa forma, verifica-se uma tendência que com o aumento do número de pavimentos o percentual da economia tende a aumentar com o uso do concreto leve em comparativo ao base.

4.5 VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS NA BASE DOS PILARES

Foi realizada também a verificação dos esforços na base dos pilares nas três análises com a finalidade de comparar a variação dos esforços em função do peso próprio da estrutura.

4.5.1 Análise 1 – Seções com base no pré-dimensionamento

Na Tabela 19 são apresentados os esforços normais (N) e momentos (Mx e My) impostos na base dos pilares para cada traço utilizado no dimensionamento.

Tabela 19 – Variação dos esforços na base dos pilares para cada traço na 1ª análise.

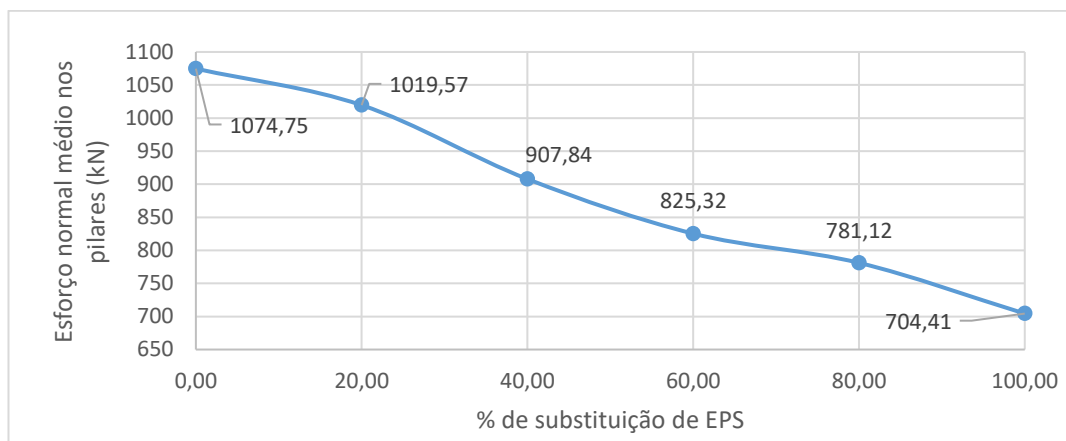
Pilares	C1			C2			C3		
	N (kN)	Mx (kN.m)	My (kN.m)	N (kN)	Mx (kN.m)	My (kN.m)	N (kN)	Mx (kN.m)	My (kN.m)
P1	540,20	-1,10	-3,80	606,50	-1,30	-4,40	647,90	-1,50	-4,60
P2	512,90	-1,80	0,30	573,40	-2,00	0,40	609,50	-2,00	0,40
P3	458,10	-1,00	2,30	515,40	-1,20	2,80	549,20	-1,30	3,00
P4	875,10	-1,40	-9,00	976,20	-1,50	-9,90	1028,90	-1,60	-10,20
P5	821,90	-2,10	3,00	899,40	-2,30	3,40	941,90	-2,20	3,60
P6	694,30	-1,60	1,20	774,90	-1,70	1,00	817,80	-1,70	0,90
P7	130,20	0,80	1,50	149,90	0,90	1,70	161,90	1,00	1,80
P8	945,30	7,20	2,30	1064,20	8,20	2,90	1138,90	8,50	3,10
P9	1314,70	3,00	3,50	1410,80	3,30	4,20	1461,90	3,40	4,70
P10	754,60	-3,30	2,00	844,40	-3,60	2,40	901,50	-3,70	2,90
P11	933,90	6,90	-3,40	1050,40	7,80	-4,00	1124,30	8,10	-4,20
P12	1327,70	-1,00	2,20	1422,50	-1,30	2,80	1473,50	-1,50	3,20
P13	751,70	-3,40	-3,50	841,70	-3,70	-4,00	898,40	-3,70	-4,30
P14	130,50	-0,80	1,50	151,50	-0,90	1,70	162,10	-1,00	1,80
P15	873,40	1,00	-8,70	974,20	1,30	-9,70	1026,50	1,30	-10,10
P16	819,80	1,70	3,30	897,50	1,90	3,60	939,50	1,90	3,80
P17	694,00	1,40	1,40	775,50	1,60	1,20	817,60	1,70	1,10
P18	537,10	1,00	-3,40	603,10	1,10	-3,90	644,10	1,20	-4,30
P19	512,10	1,70	0,30	572,60	1,80	0,30	608,60	1,90	0,30
P20	460,60	1,00	2,70	518,20	1,10	3,20	552,30	1,20	3,40

Pilares	C4			C5			C6		
	N (kN)	Mx (kN.m)	My (kN.m)	N (kN)	Mx (kN.m)	My (kN.m)	N (kN)	Mx (kN.m)	My (kN.m)
P1	726,40	-1,60	-5,30	816,30	-1,80	-5,90	881,30	-1,80	-6,20
P2	579,70	-2,10	0,50	770,30	-2,20	0,70	810,30	-2,10	0,70
P3	615,50	-1,40	3,50	691,50	-1,70	4,00	736,20	-1,70	4,20
P4	1138,60	-1,70	-11,10	1264,00	-1,90	-12,00	1338,10	-1,90	-12,30
P5	1027,80	-2,30	4,00	1127,50	-2,10	0,40	1179,30	-2,30	4,60
P6	906,30	-2,00	0,70	1127,50	-2,40	4,50	1057,80	-2,00	0,00
P7	185,10	1,10	2,00	211,30	1,20	2,20	227,30	1,10	2,20
P8	1286,30	9,50	3,70	1441,00	10,10	4,50	1558,10	10,10	4,90
P9	1569,70	3,60	5,70	1691,30	3,90	6,40	1757,10	3,90	7,00
P10	1013,00	-4,00	3,50	1130,70	-4,10	4,20	1207,90	-3,90	4,80
P11	1255,90	8,80	-4,60	1422,10	9,80	-5,40	1539,40	9,70	-5,50
P12	1575,80	-2,00	3,60	1701,00	-2,20	4,80	1777,50	-2,30	5,40
P13	999,80	-4,20	-4,60	1127,40	-4,10	-5,40	1204,60	-4,00	-5,80
P14	186,00	-1,10	2,10	211,60	-1,20	2,20	227,60	-1,20	2,20
P15	1137,30	1,50	-11,10	1260,50	1,70	-11,90	1333,80	1,60	-12,10
P16	1025,90	2,20	4,30	1124,40	2,10	4,60	1175,60	2,00	4,80
P17	906,80	1,90	0,70	1007,00	2,00	0,50	1057,20	2,00	0,10
P18	722,50	1,40	-4,80	811,70	1,70	-5,40	876,50	1,70	-5,70
P19	679,10	2,10	0,40	759,30	2,10	0,40	809,60	2,10	0,50
P20	619,20	1,40	3,90	695,00	1,60	4,40	739,80	1,70	4,60

Fonte: Os autores.

Para uma melhor visualização da mudança dos esforços, a Figura 18 mostra o gráfico com a variação dos esforços normais médios nos pilares em função da porcentagem de EPS utilizado.

Figura 18 – Variação dos esforços na base dos pilares em função da % de EPS.



Fonte: Os autores.

Pode ser comprovado que com o aumento da porcentagem de substituição de EPS, os esforços normais diminuem, resultado este que era esperado visto a diminuição do peso próprio da estrutura. Em termos de porcentagem, comparando a média da variação dos esforços de cada pilar com os traços C1 e C6, houve diminuição de cerca de 36% do esforço normal, 28% do momento no eixo x e 41% do momento no eixo y.

4.5.2 Análise 2– Modificação das seções das vigas e pilares

Na Tabela 20 são apresentados os esforços normais (N) e momentos (Mx e My) impostos na base dos pilares para cada traço utilizado no dimensionamento.

Tabela 20 – Variação dos esforços na base dos pilares para cada traço na 2ª análise.

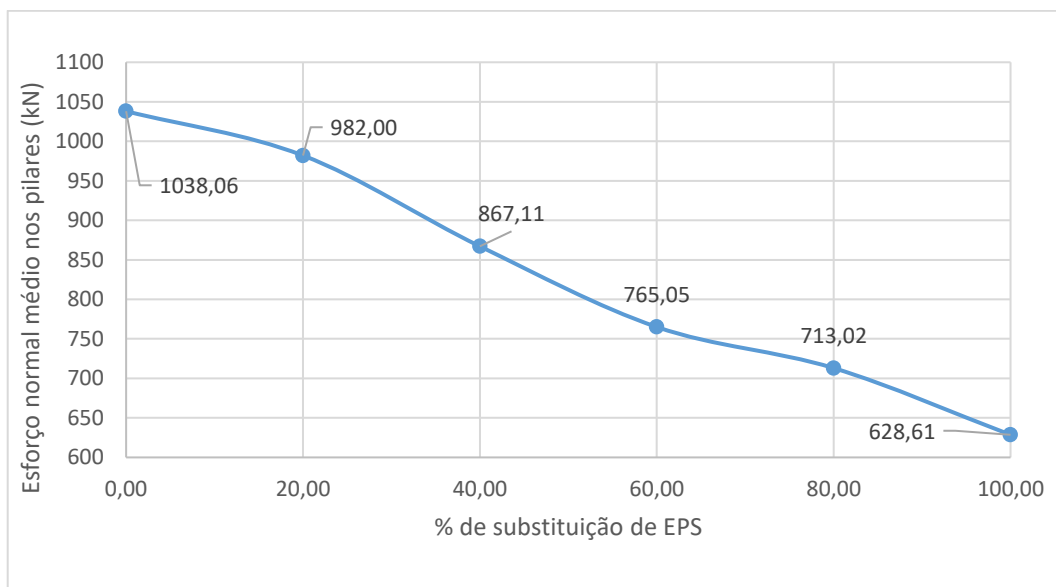
Pilares	C1			C2			C3		
	N (kN)	Mx (kN.m)	My (kN.m)	N (kN)	Mx (kN.m)	My (kN.m)	N (kN)	Mx (kN.m)	My (kN.m)
P1	415,10	-1,00	-2,70	484,22	-1,20	-3,80	518,80	-1,20	-4,00
P2	434,60	-2,00	0,40	500,30	-1,80	0,10	516,80	-2,00	0,40
P3	391,20	-1,00	3,00	454,50	-1,10	3,30	512,60	-1,30	3,00
P4	859,60	-1,40	-9,50	982,60	-1,30	-9,30	1049,70	-1,70	-9,90
P5	794,90	-2,00	2,00	883,90	-2,50	3,10	910,90	-2,50	4,10
P6	636,10	-1,50	3,40	715,40	-1,60	2,00	771,10	-1,40	1,50
P7	156,10	0,90	1,90	173,80	1,00	1,30	175,30	1,20	2,10
P8	728,60	6,10	1,90	877,70	8,10	1,20	960,40	8,40	1,30
P9	1328,30	3,10	5,20	1422,40	3,40	5,80	1452,80	3,70	5,60
P10	545,40	-3,40	1,80	644,20	-3,80	2,10	757,50	-3,80	1,80
P11	714,60	5,80	-2,30	857,30	7,80	-2,00	983,10	8,20	-2,60

Pilares	C1			C2			C3		
	N (kN)	Mx (kN.m)	My (kN.m)	N (kN)	Mx (kN.m)	My (kN.m)	N (kN)	Mx (kN.m)	My (kN.m)
P12	1338,20	-1,50	2,60	1431,40	-1,50	4,20	1461,70	-1,90	3,80
P13	544,60	-3,60	-2,30	643,10	-3,80	-2,90	774,70	-3,80	-2,50
P14	156,20	-1,10	1,90	174,00	-1,10	1,30	173,20	-1,30	2,10
P15	860,00	1,10	-9,50	982,90	1,30	-9,30	1056,80	1,20	-9,90
P16	794,60	1,50	2,10	883,80	1,90	3,20	912,30	1,90	3,70
P17	634,80	1,10	3,40	714,20	1,20	2,00	768,40	1,40	1,40
P18	419,50	0,60	-3,00	486,80	1,10	-4,10	533,70	1,10	-3,90
P19	433,90	1,80	1,10	499,90	1,70	0,70	510,20	1,80	0,50
P20	385,90	0,80	3,00	448,00	0,80	3,10	500,90	1,30	3,00
Pilares	C4			C5			C6		
	N (kN)	Mx (kN.m)	My (kN.m)	N (kN)	Mx (kN.m)	My (kN.m)	N (kN)	Mx (kN.m)	My (kN.m)
P1	615,80	-1,30	-3,80	669,90	-1,60	-4,70	709,50	-1,70	-4,90
P2	611,80	-2,10	1,20	678,80	-2,30	0,90	728,30	-2,10	0,90
P3	595,10	-1,40	3,80	645,90	-1,20	4,10	708,90	-1,80	3,80
P4	1172,60	-1,90	-11,20	1446,30	-2,20	-12,30	1514,10	-2,30	-12,80
P5	1004,70	-2,20	5,00	1129,70	-2,30	4,90	1153,50	-2,20	4,80
P6	864,30	-1,40	2,20	1060,30	-1,90	1,60	1089,00	-1,80	2,10
P7	211,60	1,40	2,70	231,20	1,60	1,80	265,80	1,50	2,70
P8	1148,00	8,70	1,70	1306,10	10,40	4,00	1397,20	10,30	4,20
P9	1565,70	3,40	7,40	1761,30	4,30	8,90	1786,40	4,30	8,30
P10	892,30	-5,30	2,30	958,30	-4,10	3,60	1040,00	-3,90	3,20
P11	1122,90	8,30	-3,20	1284,04	10,10	-5,70	1366,70	9,90	-6,20
P12	1574,80	-1,80	4,80	1686,90	-2,30	7,30	1780,90	-2,60	6,10
P13	892,70	-5,40	-3,10	966,20	-4,00	-3,70	1038,90	-3,90	-3,50
P14	211,60	-1,40	2,60	232,30	-2,20	1,70	266,60	-1,50	2,70
P15	1176,20	1,40	-11,40	1399,70	1,70	-13,10	1508,70	1,80	-13,00
P16	1002,60	1,90	4,80	1136,10	1,90	4,20	1209,40	2,10	4,90
P17	860,00	1,5	2,10	1055,20	1,80	1,80	1072,00	1,90	1,20
P18	637,00	1,3	-3,50	694,10	1,60	-4,50	732,30	1,70	-4,70
P19	604,30	2,00	1,40	670,00	2,20	0,90	709,90	1,80	1,00
P20	578,20	1,60	3,90	627,60	1,30	4,00	683,10	1,80	3,80

Fonte: Os autores.

Para uma melhor visualização da mudança dos esforços, a Figura 19 mostra o gráfico com a variação dos esforços normais médios nos pilares em função da porcentagem de EPS utilizado.

Figura 19 – Variação dos esforços na base dos pilares em função da % de EPS.



Fonte: Os autores.

Analogamente à conclusão obtida na primeira análise, houve a diminuição dos esforços na base do pilar com o aumento da porcentagem de substituição de EPS. Em termo de porcentagem, comparando a média da variação dos esforços de cada pilar com os traços C1 e C6, houve diminuição de cerca de 41% do esforço normal, 31% do momento no eixo x e 38% do momento no eixo y. Além disso, relacionando os resultados da primeira e segunda análise, pode-se averiguar que com o melhoramento das seções, houve consequentemente uma diminuição nos esforços dos pilares.

4.5.3 Análise 3– Modificação das seções dos pilares para 16 pavimentos tipo.

Na Tabela 21 são apresentados os esforços normais (N) e momentos (Mx e My) impostos na base dos pilares para os traços C1 e C6, considerando o aumento de 8 pavimentos tipo na edificação base.

Tabela 21 – Variação dos esforços na base dos pilares para cada traço na 3ª análise.

Pilares	C1-16			C6-16		
	N (kN)	Mx (kN.m)	My (kN.m)	N (kN)	Mx (kN.m)	My (kN.m)
P1	1097,2	-1,1	-4	1727,8	-2	-5,1
P2	1005,6	-1,8	0,1	1526,2	-2,2	0,7
P3	889,6	-1	2,2	1311,7	-1,7	4,6
P4	1476,8	-1,4	-9,1	2517,9	-1,9	-10,1

Pilares	C1-16			C6-16		
	N (kN)	Mx (kN.m)	My (kN.m)	N (kN)	Mx (kN.m)	My (kN.m)
P5	1354,5	-2,1	2,8	2100,2	-2,2	3,9
P6	1160,8	-1,5	1	1883,1	-2,2	-0,1
P7	290,8	0,8	1,5	468,9	1,1	2,1
P8	1802,1	7,2	2,3	2775,3	11,2	3,5
P9	2330,2	4,2	2	3371,3	4,4	8,2
P10	1429,5	-3,1	2	2073,1	-4	4,7
P11	1791	6,9	-3,5	2753,4	9,8	-5,4
P12	2352,9	-1,1	0,6	3385,8	-1,7	6,6
P13	1427	-3,1	-3,5	2070,1	-4	5,9
P14	291,1	-0,8	1,5	468,5	-1,2	2,1
P15	1473,5	1	-9	2511,4	1,8	-9,5
P16	1351,6	1,7	2,9	2096	2	4,3
P17	1160,6	1,4	1,1	1882,5	2,1	0,3
P18	1091,7	1	-3,6	1720,3	1,9	-4,5
P19	1004,3	1,8	0	1523,3	2,2	0,6
P20	892,3	1	2,5	1315,2	1,5	5

Fonte: Os autores.

Por fim, como esperado observaram-se maiores esforços na base dos pilares da simulação utilizando o traço C6, visto que além do peso próprio da estrutura ser maior, houve a necessidade do aumento da seção dos pilares em relação ao traço C1.

Em termos de porcentagem, comparando a média da variação dos esforços de cada pilar com os traços C1 e C6, houve diminuição de cerca de 35% do esforço normal, 28% do momento no eixo x, no entanto, o momento no eixo y aumentou 18,5%.

Comparando as três análises pôde-se concluir que em todos os casos o concreto leve se mostrou mais eficiente, impondo menos esforços na base dos pilares, mesmo com o aumento do número de pavimentos.

5 CONCLUSÕES

Como previsto, a adição de pérolas de EPS trituradas no traço base proposto provocou a diminuição da massa específica do concreto. No entanto, como o EPS não possui boas características mecânicas, seu uso provocou a diminuição gradativa da resistência à compressão.

Mesmo o concreto base (C6) tendo características mecânicas superiores aos outros traços analisados, esse parâmetro não foi suficiente para provocar a diminuição das quantidades necessárias de material para suportar as cargas impostas pelo peso próprio da estrutura, deixando assim evidente que o critério da massa específica do material utilizado foi mais significativo do que a classe de resistência dos concretos ensaiados.

Outro ponto que pode ser observado é que a escolha adequada da seção dos elementos estruturais, sejam eles feitos de concreto leve ou convencional, provoca diferenças nos quantitativos de volumes de concreto e aço e, conseqüentemente, reduz o custo da obra. Adicionalmente, com o aumento do uso de EPS foi evidenciado que é possível haver uma diminuição maior das seções de vigas e pilares.

É encontrado na literatura que o uso de concreto leve provoca a diminuição dos esforços nos elementos estruturais, isso pôde ser comprovado nesse estudo, considerando os traços propostos e modelo de edificação escolhida. Essa diminuição é de suma importância para o dimensionamento mais econômico das fundações superficiais, acarretando um menor consumo de concreto e aço nesse elemento.

Com o intuito de poder verificar se os benefícios do uso do concreto leve conseguem ser aplicados em estruturas mais altas, foi feito o estudo com 16 pavimentos tipo, onde foi ratificado os resultados obtidos na análise inicial (8 pavimentos tipo), de forma que se obteve a diminuição nos quantitativos de concreto e aço, bem como a atenuação dos esforços.

Finalmente, pôde-se constatar que, em todas as análises simuladas, inclusive no estudo com mais pavimentos, o uso progressivo do EPS triturado no traço do concreto base provocou economia significativa no custo total dos materiais. Confirmando assim que o uso de concreto leve em elementos estruturais em uma edificação pode ser uma opção viável economicamente na construção civil. No entanto, é importante salientar que nesse estudo houveram algumas simplificações e considerações específicas, de forma que para aplicação em outros casos na construção civil, é necessário realizar ajustes e uma análise mais profunda em função dos parâmetros específicos da obra a ser analisada. Porém, apesar de cada especificidade, esse

trabalho mostrou que o concreto leve é uma solução viável, de forma que deve ser visto como uma solução e com isso ser analisada pelo engenheiro responsável pela obra e projetista.

Para uma análise mais profunda do uso de concreto leve na construção civil, sugere-se os seguintes estudos:

- Realizar a dosagem de traços fixando a classe de resistência do projeto, de forma que o preço do concreto leve seja mais alto, verificando assim se ainda há a diminuição nos esforços e no custo final dos materiais na edificação.
- Efetuar o estudo da influência da substituição do agregado graúdo por outros tipos de agregados leves como argila expandida e pedra pomes.
- Elaborar a análise da substituição de agregados graúdos e miúdos por agregados leves como argila expandida, pedra pomes, vermiculita e perlita.
- Verificar a influência do uso de concreto leve também em pilares, para assim diminuir ainda mais os esforços provocados pelo peso próprio da estrutura.
- Implementar o uso de micropérolas de EPS como substituição do agregado miúdo e verificar a variação dos esforços e custo da estrutura.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: **Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: **Cargas para cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: **Concreto de cimento Portland–Preparo, controle, recebimento e aceitação-Procedimento**. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 35: **Agregados leves para concreto estrutural: especificação**. Rio de Janeiro, 1995.
- ANDRADE, A. C.; SOUZA, U. E. **Diferentes abordagens quanto ao orçamento de obras habitacionais: aplicação ao caso do assentamento da alvenaria**. In.: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO MEIO AMBIENTE CONSTRUÍDO–FOZ DO IGUAÇU: ENTAC. Anais... do IX, 2002.
- CAIXETA, D. P. **Contribuição ao Estudo de Lajes Pré-fabricadas com Vigas Treliçadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas - SP, 1998.
- CATOIA, T. **Concreto ultraleve® estrutural com pérolas de EPS: caracterização do material e estudo de sua aplicação em lajes**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, 2012.
- DE ARAÚJO, J M. **Projeto estrutural de edifícios de concreto armado**. Editora Dunas, 2009.
- DE ALBUQUERQUE, A. T. **Análise de alternativas estruturais para edifícios em concreto armado**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, 1999.
- DE OLIVEIRA, A. **Lajes treliçadas pré-moldadas produzidas com concreto leve estrutural**. 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.
- EUROLIGHTCON, **A rational mix design method for lightweight aggregate concrete using typical UK materials**, Rel. Document BE96-3942/R5, 2000.
- KERBAUY, M. J. **Concreto estrutural ultraleve com desmoldagem rápida destinado à fabricação de placas, painéis e lajes**. BR n. PI, p. 1004268-7, 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. Ibracon, 2008.

NAPPI, S. C. B. et al. **Análise comparativa entre lajes maciças, com vigotas pré-moldados e nervuradas**. 1993.

ROSSIGNOLO, J. A.. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos-dosagem, produção, propriedades e microestrutura**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, 2003.

SEARBY, Archie A. B. **Recomendações para o Processo de Escolha de um Sistema de Formas**. Sistema de Formas. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE TECNOLOGIA DE CONSTRUÇÃO: “FORMAS PARA CONCRETO”, 1990, São Paulo. Anais. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1990, p. 13-18.

SILVA, Moema Ribas. **Materiais de Construção**. São Paulo: Pini, 1985.

TCPO 13 – **Tabela de Composição de Preços de Orçamentos**. São Paul: Pini, 2008.

WANG, Her-Yung. **Durability of self-consolidating lightweight aggregate concrete using dredged silt**. Construction and building materials, v. 23, n. 6, p. 2332-2337, 2009.