



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

EDMILSON ROQUE DA SILVA JUNIOR

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A UTILIZAÇÃO DE CONCRETO LEVE E
CONCRETO CONVENCIONAL EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE UM
EDIFÍCIO MULTIPAVIMENTOS**

POMBAL – PB

2020

EDMILSON ROQUE DA SILVA JUNIOR

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A UTILIZAÇÃO DE CONCRETO LEVE E
CONCRETO CONVENCIONAL EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE UM EDIFÍCIO
MULTIPAVIMENTOS

Monografia apresentada à Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador (a): Prof. Me. Valter Ferreira de Sousa Neto.

POMBAL – PB

2020

S586e Silva Junior, Edmilson Roque da.
Estudo comparativo entre a utilização de concreto leve e concreto convencional em elementos estruturais de um edifício multipavimentos / Edmilson Roque da Silva Junior. – Pombal, 2020.
97 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil)
– Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2020.

“Orientação: Prof. Valter Ferreira de Sousa Neto”.

Referências.

1. Concreto leve. 2. Concreto convencional. 3. Estruturas de edifícios.
I. Sousa Neto, Valter Ferreira de. II. Título.

CDU 691.32(043)

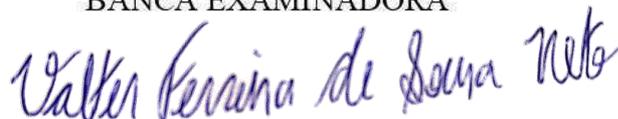
EDMILSON ROQUE DA SILVA JUNIOR

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A UTILIZAÇÃO DE CONCRETO LEVE E
CONCRETO CONVENCIONAL EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE UM
EDIFÍCIO MULTIPAVIMENTOS

Monografia apresentada à Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Aprovada em: 30/11/2020.

BANCA EXAMINADORA



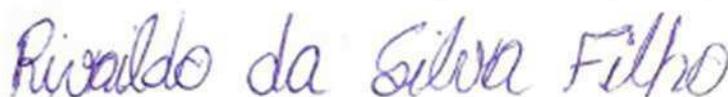
Prof. Me. Valter Ferreira de Sousa Neto

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)



Prof. Me. Eric Mateus Fernandes Bezerra

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)



Prof. Me. Rivaildo da Silva Filho

Centro Universitário de Patos (UNIFIP)

Aos meus pais, Ivanilda e Edmilson, que sempre estiveram ao meu lado, com total apoio e confiança. Vocês são a razão de tudo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me agraciado com saúde para que eu pudesse correr atrás dos meus sonhos e a coragem de enfrentar dos desafios que se colocaram, sobretudo a paciência para esperar e entender os planos que o Senhor tem para mim.

Aos meus pais, Edmilson Roque e Ivanilda Almeida, que sempre estiveram juntos a mim nessa jornada, por todas as vezes que eles não pouparam esforços para ser minha base, cuidando de mim e dando tranquilidade para que eu alcançasse meus objetivos. Obrigado pelo amor e todos os ensinamentos que contribuíram para o ser humano que sou hoje.

As minhas irmãs, Iara Roque e Maria Eduarda, que são verdadeiras amigas, por estarem sempre comigo e entendido todas as vezes em que eu precisava de espaço.

Ao meu orientador, Prof.º Valter Ferreira de Souza Neto, por ter aceito a tarefa de realizar esse trabalho comigo e estar sempre aberto as minhas ideias. Obrigado por me incentivar e me ajudar através de ensinamento e conselhos, acreditar no trabalho que estava sendo realizado e minha capacidade, contribuindo para meu desenvolvimento pessoal e acadêmico.

A Instituição, UFCG Campus Pombal, por ter disponibilizado os recursos necessários para minha graduação e àqueles professores que contribuíram diretamente para minha capacitação como Engenheiro Civil, e que em meios as dificuldades do dia a dia buscavam sempre transmitir seus conhecimentos. Para essas profissionais deixo aqui meus agradecimentos e admiração.

A todos os meus amigos da turma 2015.2 que estiveram comigo até o final do curso, compartilhando conhecimento, momentos de alegria e tristeza, e que se mantiveram sempre unidos. Vocês como ninguém entendem o que significou essa jornada.

Aos meus amigos Marcelo Laédson, Cícero Jefferson, Danylo de Andrade e Gilanildo Freires que muitas vezes foram minha base em Pombal e que tive a oportunidade de estreitar mais ainda a amizade. Para vocês desejo todo sucesso do mundo.

A todos os meus familiares, presentes e ausentes, que contribuíram em diferentes fases da minha vida para meu desenvolvimento pessoal e nunca deixaram de me incentivar, vocês são meu verdadeiro orgulho.

A todos os meus amigos que contribuíram para a realização do meu sonho que sempre estiveram me incentivado e entendido todos os momentos que estive ausente.

E a todas as pessoas que contribuíram de alguma forma para que eu pudesse chegar até aqui.

“Deveríamos ser lembrados pelas coisas que fazemos. Elas importam mais do que tudo. Mais do que aquilo que dizemos ou do que nossa aparência. As coisas que fazemos sobrevivem a nós” (R.J. Palacio).

RESUMO

A utilização de concreto em obras cresce com o surgimento de novos materiais juntamente com os avanços tecnológicos que aumentam a sua gama de utilizações. Entre os tipos desse material, o concreto leve possui a vantagem de menor massa específica, apresentando-se como opção nas estruturas de concreto armado. O estudo da aplicação do concreto leve é necessário, pois, apesar do surgimento no século passado, é modesto seu emprego em edificações no Brasil e a sua utilização pode possibilitar a redução dos carregamentos nos elementos estruturais devido ao seu menor peso específico, contribuindo para uma redução da seção dos elementos resistentes e custos. Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo fazer um estudo comparativo da utilização de concreto leve na estrutura de um edifício a fim de levantar indicadores que viabilizem a sua utilização para esse fim. O estudo comparativo foi realizado através do processamento da estrutura no *software* AltoQi Eberick V10. Foram analisadas três estruturas, uma estrutura composta por concreto convencional (CC), uma com a utilização de concreto leve nas vigas e lajes (CCL), e a última com concreto leve nas vigas, lajes e pilares (CL). Para a estimativa das propriedades dos materiais, foram utilizadas as especificações da NBR 6118 (ABNT, 2014), EUROCODE 2 (2004) e ACI-318 (2008). Para o dimensionamento no ELU e ELS, o *software* foi configurado levando em consideração os critérios da NBR 6118 (ABNT, 2014). Após o processamento das estruturas, os resultados mostraram que a utilização de concreto leve nos pilares contribuiu para o aumento dos deslocamentos horizontais e instabilidade da estrutura. Entretanto, os deslocamentos estiveram dentro do limite imposta pela norma e o coeficiente gama z esteve dentro do limite de 1,10. Desse modo as estruturas foram classificadas como nós fixos. Os deslocamentos em lajes e vigas foram sempre maiores ou iguais nas estruturas contendo concreto leve, sendo que a estrutura com concreto leve também nos pilares obteve os maiores deslocamentos. Contudo, os valores estiveram dentro dos limites impostos pela norma. Os esforços nas vigas foram menores para a utilização de concreto leve apenas nas vigas e lajes, havendo um ligeiro aumento com a utilização de concreto leve também nos pilares. Por fim, a utilização de concreto leve nos elementos estruturais contribuiu para a redução das cargas nas fundações e do consumo de aço na estrutura. A redução de insumo contribui para uma redução de custos na obra e pode tornar o seu uso interessante.

Palavras-chave: Concreto Leve, Concreto Convencional, Estruturas de Edifícios.

ABSTRACT

The use of concrete in constructions grows with the emergence of new materials along with technological advances that increase its range of uses. Among the types of this material, lightweight concrete has the advantage of having lower specific mass, presenting itself as an option in reinforced concrete structures. The study of the application of lightweight concrete is necessary, because despite its appearance in the last century, its use in buildings in Brazil is modest and its use may enable the reduction of loads on structural elements due to its lower specific weight, contributing to a reduction of the resistant elements and costs' section. In this sense, the present work aims to make a comparative study of the use of lightweight concrete in the structure of a building in order to raise indicators that enable its use for this purpose. The comparative study was carried out through the processing of the structures in the AltoQi Eberick V10 software. Three structures were analyzed, one structure composed of conventional concrete (CC), one using lightweight concrete in the beams and slabs (CCL), and the last with lightweight concrete in the beams, slabs and pillars (CL). For the estimation of material properties, were used the specifications of NBR 6118 (ABNT, 2014) and EUROCODE 2 (2004). For dimensioning in ELU and ELS, the software was configured considering the criteria of NBR 6118 (ABNT, 2014). After the processing of the structures, the results showed that the use of lightweight concrete in the pillars contributed to the increase in horizontal displacements and instability of the structure. However, the displacements were within the limit imposed by the standard and the z range coefficient was within the limit of 1,10. So, the structures were classified as fixed nodes. The displacements in slabs and beams were always greater or equal in the structures containing lightweight concrete, and the structure with lightweight concrete also in the pillars obtained the largest displacements. However, the values are within the limits imposed by the standard. The effort in the beams were less for the use of lightweight concrete only in the beams and slabs, with a slight increase with the use of lightweight concrete also in the pillars. Finally, the use of lightweight concrete in the structural elements contributed to the reduction of the loads on the foundations and the consumption of steel in the structure. The reduction of input contributes to a reduction of the costs in the construction and and can make its use interesting.

Palavras-chave: Lightweight Concrete, Conventional Concrete, Building Structures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de Concreto Leve: (a) concreto com agregado leve, (b) concreto celular e (c) concreto sem finos.....	19
Figura 2 – Argila expandida CINEXPAN 0500 (a), 1506 (b) e 2215 (c).....	23
Figura 3 – Tipo de ruptura nos concretos leve (esq.) e convencional (dir.)	27
Figura 4 - Diagrama tensão-deformação do concreto leve estrutural: (a) concreto leve estrutural (b); concreto convencional	29
Figura 5 – Organograma das atividades realizadas	46
Figura 6 – Planta baixa do pavimento térreo	50
Figura 7 – Planta baixa do pavimento-tipo.....	51
Figura 8 – Planta da Cobertura	52
Figura 9 – Corte DD	53
Figura 10 – Planta de fôrmas do pavimento térreo.....	55
Figura 11 – Planta de fôrmas do pavimento-tipo	56
Figura 12 – Planta de fôrmas da cobertura	57
Figura 13 – Planta de fôrmas da base do reservatório	58
Figura 14 – Planta de fôrmas do topo do reservatório.....	58
Figura 15 – Isopletas de velocidade básica do vento no Brasil.....	60
Figura 16 – Entrada de dados dos pavimentos e suas respectivas alturas no Eberick v.10.....	61
Figura 17 – Interface do <i>software</i> com a planta baixa inserida	61
Figura 18 – Janela “Configurações” do AltoQi Eberick V10	62
Figura 19 – Identificação e entrada das características do concreto leve no <i>software</i>	63
Figura 20 – Identificação e entrada das características do concreto convencional no <i>software</i>	64
Figura 21 – Janela de “Materiais e durabilidade” com os materiais utilizados na estrutura CC	65
Figura 22 – Valores utilizados para o cálculo da força devido a ação do vento na edificação	66
Figura 23 – Lançamento da estrutura e cargas lineares no térreo	67
Figura 24 – Janela de “Análise da estrutura” para o processamento	68
Figura 25 – Pórtico 3D da estrutura CC	69
Figura 26 – Deslocamento horizontais nas estruturas devido a ação do vento em X.....	70
Figura 27 – Deslocamento horizontais nas estruturas devido a ação do vento em Y.....	71
Figura 28 – Valores do coeficiente γ_Z	74

Figura 29 – Flechas totais máximas nas lajes do pavimento 3.....	76
Figura 30 – Flechas totais máximas nas vigas do pavimento 3.....	77
Figura 31 – Cargas totais nas estruturas	82
Figura 32 – Comparativo de consumo de aço nos elementos estruturais.....	84
Figura 33 – Comparativo de consumo de aço	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos concretos leves quanto à sua massa específica aproximada	19
Tabela 2 – Exigências para o concreto estrutural leve	23
Tabela 3 – Valores do coeficiente adicional γ_n	38
Tabela 4 – Coeficientes e fatores utilizados nas combinações	43
Tabela 5 – Classificação da agressividade ambiental.....	44
Tabela 6 – Especificações do concreto armado em função da classe de agressividade	44
Tabela 7 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para estruturas de concreto armado	45
Tabela 8 – Classe de densidade e correspondente densidade do concreto com agregados leves de acordo com EN 206-1	48
Tabela 9 – Características dos concretos empregados no estudo	49
Tabela 10 – Cargas variáveis uniformemente distribuídas.....	59
Tabela 11 – Deslocamento horizontal e deslocamento horizontal relativo da estrutura CC	72
Tabela 12 – Deslocamento horizontal e deslocamento horizontal relativo da estrutura CCL .	73
Tabela 13 – Deslocamento horizontal e deslocamento horizontal relativo da estrutura CL	73
Tabela 14 – Momentos utilizados no cálculo do parâmetro de estabilidade global (tf.m).....	75
Tabela 15 – Momentos máximos nas vigas das estruturas	78
Tabela 16 – Esforço cortante máximo nas vigas das estruturas	79
Tabela 17 – Carga nas fundações das estruturas por pilar.....	80
Tabela 18 – Quantitativo de materiais utilizados nas estruturas	83

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – *American Institute Concrete*

CA – Concreto Armado

CINASA – Construção Industrializada Nacional

ELU – Estados limites últimos

ELS – Estados limites de serviço

EN – Norma Europeia

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1.	Objetivo Geral	16
1.2.	Objetivos Específicos	16
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1.	Concreto	17
2.2.	Concreto Leve	18
2.2.1.	<i>Classificação</i>	18
2.2.2.	<i>Agregado leve</i>	20
2.2.3.	<i>Propriedades físicas do concreto estrutural com agregados leves</i>	23
2.2.3.1.	<i>Massa específica</i>	23
2.2.3.2.	<i>Fluência</i>	24
2.2.3.3.	<i>Retração</i>	24
2.2.3.4.	<i>Durabilidade</i>	25
2.2.4.	<i>Propriedades mecânicas do concreto estrutural com agregados leves</i>	26
2.2.4.1.	<i>Resistência à compressão</i>	26
2.2.4.2.	<i>Resistência à tração</i>	27
2.2.4.3.	<i>Módulo de elasticidade</i>	28
2.3.	Estruturas de Concreto Armado	30
2.3.1.	<i>Sistemas estruturais</i>	34
2.3.2.	<i>Pré-dimensionamento</i>	35
2.3.2.1.	<i>Lajes</i>	35
2.3.2.2.	<i>Vigas</i>	36
2.3.2.3.	<i>Pilares</i>	37
2.3.3.	<i>Modelo estrutural</i>	38
2.3.4.	<i>Estabilidade global</i>	38
2.3.5.	<i>Estados Limites</i>	40
2.3.5.1.	<i>Estados limites últimos (ELU)</i>	40
2.3.5.2.	<i>Estados limites de serviço (ELS)</i>	40
2.3.6.	<i>Ações</i>	41
2.3.6.1.	<i>Classificação</i>	41
2.3.6.2.	<i>Combinação de ações</i>	41
2.3.7.	<i>Durabilidade</i>	43

3.	METODOLOGIA	46
3.1.	MATERIAIS	47
3.2.	PROJETO ARQUITETÔNICO	49
3.3.	ESTRUTURAS ESTUDADAS	53
3.4.	AÇÕES	58
3.4.1.	<i>Carregamento vertical</i>	58
3.4.2.	<i>Carregamento horizontal</i>	59
3.5.	MODELAGEM ESTRUTURAL NO ALTOQI EBERICK V.10	60
3.5.1.	<i>Configurações do programa</i>	62
3.5.1.1.	<i>Análise</i>	62
3.5.1.2.	<i>Materiais e durabilidade</i>	63
3.5.1.3.	<i>Vento</i>	65
3.5.2.	<i>Lançamento da estrutura</i>	66
3.5.3.	<i>Processamento da estrutura</i>	68
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
4.1.	Deslocamentos horizontais	70
4.2.	Estabilidade Global	74
4.3.	Deslocamento nas lajes	75
4.4.	Deslocamento nas vigas	77
4.5.	Momentos e esforços cortantes nas vigas	78
4.6.	Cargas nas fundações	80
4.7.	Quantitativo de materiais	83
5.	CONCLUSÕES	86
6.	SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	88
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material construtivo mais utilizado pelo homem. Ele é amplamente utilizado nas mais diversas obras da construção civil e seu emprego é visto tanto em simples casas de alvenarias e rodovias, até em obras mais complexas, como os edifícios mais altos do mundo, usinas hidrelétricas e nucleares, e plataformas de extração petrolíferas móveis.

A durabilidade frente exposição à água, apresentando uma deterioração inferior a compostos como madeira e ao aço, a plasticidade, que permite a modelagem de elementos construtivos em diferentes formas e tamanhos, o baixo custo e a disponibilidade dos materiais constituintes são vantagens que se apresentam como o seu diferencial e justificam a grande utilização do concreto pelo homem (LIMA *et al.*, 2014).

O concreto tradicional é resultado da mistura de aglomerante (cimento), agregados (areia e brita) e água, em suas devidas proporções. Em um primeiro momento, o material apresenta plasticidade adequada para as operações de manuseio, transporte e lançamento em fôrmas e com o passar do tempo vai ganhando resistência e coesão.

A baixa resistência à tração e a elevada massa específica são características que limitam a utilização do concreto convencional, impulsionando nas últimas décadas pesquisas com intuito de aprimorar essa tecnologia e melhorar seu desempenho frente as diferentes situações, propiciando o surgimento dos chamados concretos especiais (WEIRICH, 2017).

O uso de elementos no concreto como aditivos, adições minerais e fibras, além do emprego de técnicas de execução especiais, como cura a altas temperaturas e pressões, permitem a obtenção de concretos de última geração que, teoricamente, atendem aos requisitos específicos de projeto (TUTIKIAN *et al.*, 2011).

Mediante a preocupação em reduzir as elevadas cargas provenientes dos elementos construtivos de concreto e, conseqüentemente, melhorar o desempenho técnico-econômico das estruturas, estudos buscam o desenvolvimento de concretos leves que possuem redução da massa específica sem que haja perda da resistência e durabilidade.

Concreto leve é um termo utilizado para concretos que possuem uma massa específica inferior a 2000 kg/m³ e que possui como principal aglomerante o Cimento Portland. Sua baixa densidade pode ser obtida através da utilização de agregados leves e/ou incorporação de ar e ainda podem ser utilizados aditivos de base polimérica, agentes espumíferos e/ou aditivos minerais (OZÓRIO, 2016).

O concreto leve pode ser empregado tanto em um sistema de vedação como em elementos estruturais. Conforme Scobar (2016), quando utilizado como elemento de vedação,

se dá maior atenção à condutividade térmica. Enquanto isso, Andrade *et al.* (2015) explica que quando utilizado como concreto estrutural, a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e a massa específica são as principais propriedades analisadas.

Entre outras vantagens da aplicação desse material, destacam-se a redução dos custos em fôrmas e cimbramentos para suporte e contenção dos elementos da superestrutura e dimensões das sapatas, e o aumento da produtividade das operações de transporte, devido ao baixo peso específico do material, e ainda, melhoramento do conforto térmico e acústico no resultado final (SCOBAR, 2016).

A produção desse tipo de concreto está relacionada com o tipo de agregado leve disponível em cada região. Os agregados oriundos de processos industriais são os únicos utilizados para a obtenção de concreto estrutural de qualidade constante, destacando-se no Brasil a argila expandida (NEVILLE & BROOKS, 2013).

No Brasil, é singela a aplicação de concreto leve na construção civil, tendo uma maior aplicabilidade em elementos pré-fabricados voltados para os sistemas de vedação (ANGELIN, 2014). Entretanto, diversos autores (MENDES, *et al.*, 2016; VARGAS, 2018; MORAVIA, *et al.*, 2006; FRANÇA, ROCHA & FERES, 2018) estudaram o comportamento mecânico de concretos leves produzidos com argila expandida nacional e os resultados mostraram-se positivos para o uso estrutural.

Contudo, para melhor compreender o desempenho do concreto leve estrutural deve-se analisar sua aplicação em estruturas de concreto armado e obter dados sobre o comportamento estrutural dos elementos e a economia obtida.

Silva (2003) e LEMOS (2017) compararam estruturas dimensionadas utilizando concreto leve com argila expandida em vigas e lajes com o concreto convencional em edifícios de múltiplos pavimentos. Apesar dos elementos apresentarem maiores deslocamento e menor estabilidade, a estrutura atendeu todas as exigências da NBR 6118 (2014, ABNT) para elementos com mesmas dimensões e um menor consumo de aço. Silva (2003) comprova que a utilização de concreto leve gera economias para edificação. O autor realizou o levantamento de custos da estrutura de concreto com argila expandida e concluiu que a redução da área de aço nos elementos estruturais diminuiu o custo final da estrutura quando comparado com o concreto convencional.

Logo, percebe-se a importância de analisar o comportamento de elementos estruturais produzidos com concreto leve, a fim de se obter resultados mais contundentes e contribuir com a disseminação e o emprego do concreto leve estrutural de maneira mais segura e precisa.

1.1. Objetivo Geral

Avaliar o emprego de concreto leve estrutural na estrutura de concreto armado de uma edificação multipavimentos através de uma análise comparativa com a mesma estrutura em concreto convencional.

1.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar as propriedades mecânicas do concreto estrutural leve com argila expandida a partir do estado da arte;
- Realizar o dimensionamento estrutural de uma edificação utilizando concreto leve nas lajes, vigas e pilares;
- Verificar os esforços atuantes nas vigas e as cargas totais que chegam nas fundações;
- Analisar o comportamento em serviço das vigas e lajes através das flechas totais;
- Analisar o comportamento estrutural do edifício dimensionado com concreto leve estrutural, verificando a estabilidade global e o deslocamento horizontal;
- Mensurar a economia no consumo de aço devido a utilização de concreto leve nos elementos estruturais.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Concreto

Conforme Mehta & Monteiro (2008), o concreto é definido basicamente como um material compósito formado por um meio aglomerante e os materiais granulares associados a ele, cujo os insumos empregados na sua fabricação são basicamente cimento, água, agregado miúdo e agregado graúdo.

Inicialmente, os agregados dispersos na pasta tinham como única função ocupar o espaço no concreto e diminuir o consumo de cimento, reduzindo custos. Porém, cada vez mais é conhecido as vantagens técnicas que o agregado pode atribuir ao concreto e a sua influência no desempenho mecânico e durabilidade do concreto (NEVILLE, 2011).

De acordo com Mehta & Monteiro (2008), os agregados podem ser classificados em agregados miúdos, quando possuem partículas menores que 4,75mm, e agregados graúdos, quando possuem partículas superiores a 4,75mm. Conforme o autor, os agregados mais utilizados no concreto são os agregados minerais naturais, que compreendem a areia, pedregulho e pedra britada, e são provenientes das jazidas naturais.

A pasta formada pela mistura do Cimento Portland e água envolve as partículas dos agregados para produzir um material com fluidez capaz de preencher fôrmas e tomar o seu formato. Após um tempo, chamado de tempo de cura, a pasta começa a endurecer com a reação entre o cimento e água, ganhando uma resistência mecânica que contribuiu para um excelente desempenho estrutural (HELENE & ANDRADE, 2010).

De acordo com Helene e Andrade (2010), a relação água/cimento e o grau de hidratação da pasta são os principais parâmetros que regem as propriedades do concreto e definem sua qualidade potencial. Portanto, em obras, deve-se manter um controle nos procedimentos de mistura, transporte, lançamento, adensamento, cura e desmoldagem, a fim de que o concreto apresente o desempenho desejado.

Conforme Bauer (2008), as propriedades do concreto podem ser divididas em propriedades do concreto fresco e propriedades do concreto endurecido, sendo as propriedades do concreto fresco as que permitem que a mistura possa ser transportada, lançada e adensada, e que quando endurecida, seja homogênea e com um mínimo de vazios. Segundo o autor, as propriedades do concreto endurecido qualificam o concreto e condicionam a escolha do material para determinada utilização. De modo geral, as características e propriedades do concreto endurecido estão relacionados a sua permeabilidade e durabilidade.

Entre as características do concreto pode-se destacar a resistência à compressão relativamente alta, a capacidade de assumir diferentes formas, a excelente resistência ao fogo e um baixo custo de produção, tornado vantajosa sua utilização em muitos tipos de estrutura. Entretanto, a baixa resistência à tração e o elevado peso específico apresentam-se como desvantagens para o uso desse material (HASSOUN & AL-MANASEER, 2012).

A utilização de diferentes materiais pode favorecer propriedades específicas do concreto que são desejáveis em determinadas situações, esses tipos de concreto são conhecidos como concretos especiais. A utilização de aditivos, matrizes cimentícias, como escória de alto forno, cinza volante e sílica ativa, bem como outros tipos de agregados, e técnicas construtivas específicas permitem a obtenção de concretos com propriedades especiais (NEVILLE, 2011).

2.2. Concreto Leve

2.2.1. Classificação

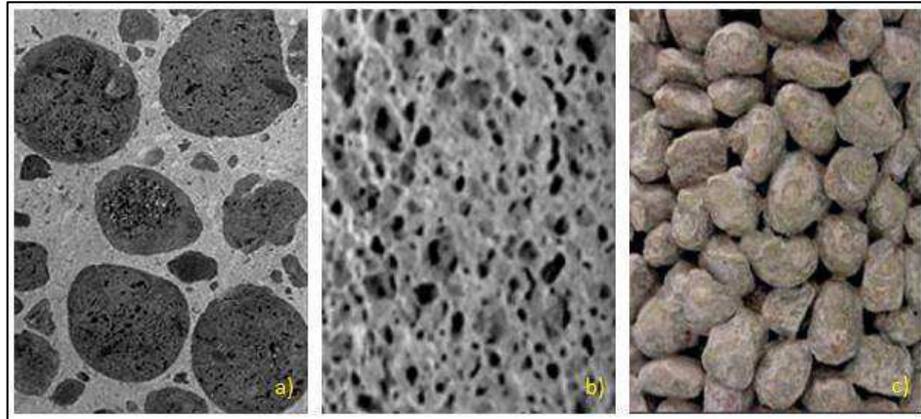
A Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 12655 (ABNT, 2015) define concreto leve como um concreto que apresente uma massa específica seca inferior a 2000 kg/m³. De acordo com Rossignole & Agnesini (2011), o concreto leve é caracterizado pela baixa massa específica em relação ao concreto convencional. Isso acontece devido à substituição de uma parcela dos materiais sólidos do concreto pelo ar.

Entre as formas de reduzir a massa específica do concreto, podemos classificar o concreto leve em três tipos principais:

- a) Concreto celular ou aerado: Usualmente não se utiliza agregado graúdo, a baixa massa específica é atingida com o acréscimo de agentes químicos na argamassa que produzem gases através de reações formando uma grande quantidade de vazios ou a utilização de aditivos incorporadores de ar (CANAHUA, 2014);
- b) Concreto sem finos ou permeável: Moldado apenas com cimento Portland, agregado graúdo e água, não utilizando agregado miúdo em sua composição, esse tipo de concreto apresenta um alto índice de vazios interligados entre si (BARBOSA & PEREIRA, 2015);
- c) Concreto com agregados leves: Obtido com a substituição total ou parcial do agregado convencional pelo agregado leve, pode ser utilizado como concreto estrutural ou não estrutural (BORJA, 2011).

As possíveis classificações do concreto são ilustradas na Figura 1, mostrando a diferença visual entre os tipos em diferentes escalas:

Figura 1 – Tipos de Concreto Leve: (a) concreto com agregado leve, (b) concreto celular e (c) concreto sem finos



Fonte: Adaptado de Rossignolo (2009).

Conforme Andrade (2015), tratando-se de concreto com agregados leves, pode-se destacar que o cimento possui maior massa específica que o agregado leve e a resistência do concreto aumenta com o aumento de sua massa específica. Desse modo, normas e especificações relacionam a resistência à compressão do concreto à sua massa específica. Existe também uma relação entre a massa específica do concreto com o tipo de agregado utilizado na composição, como podemos ver na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos concretos leves quanto à sua massa específica aproximada

Classificação	Densidade (Kg/m ³)	Agregado utilizado
Concreto de baixa massa específica	300 a 800	Vermiculita e Perlita
Concreto de moderada resistência	800 a 1350	Perlita, Pedra-pomes e lava-porosa
Concreto Estrutural	1350 a 1850	Argila, folhelho, ardósia expandida em fornos rotativos, cinza volante sinterizada em grelhas, Argila Expandida

Fonte: Adaptado de NBR 15200 (2014).

Para Osório (2016), com a redução da densidade, são diversas as vantagens que esse tipo de concreto proporciona, sejam elas ambientais, sociais ou econômicas, tornando-o interessante para diversas aplicações. Dentre elas podemos destacar:

- Redução no peso próprio das estruturas, possibilitando a diminuição da armadura e volume do concreto;
- Facilita o transporte e montagem de elementos pré-fabricados, contribuindo para o desenvolvimento da tecnologia;
- Substituição de agregados convencionais reduzindo os impactos ambientais devido a exploração do material;
- Aumento do isolamento térmico e resistência ao fogo.

Entretanto, Li *et al.* (2018) alerta para as desvantagens que limitam a utilização do concreto leve para o uso estrutural, tais como a sua alta fragilidade e propriedades mecânicas mais baixas, observadas na diminuição da resistência para um mesmo teor de cimento e redução do módulo de deformação para um mesmo nível de resistência.

O alto custo dos materiais para a sua produção e a maior absorção da água pelos agregados leves, acarretando na diminuição de sua trabalhabilidade, são outras desvantagens intrínsecas do concreto estrutural leve (HOLSCHEMACHER & KIESLICH, 2014).

2.2.2. Agregado leve

Agregados são materiais granulosos, geralmente inertes, que não possuem forma e volume definidos, e possuem dimensões e propriedades adequadas para a utilização na construção civil (FARIAS, PALMEIRA & BEJA, 2017).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), agregados com massa específica menor que 1120 kg/m^3 são chamados de agregados leves. Segundo o autor, o baixo peso do agregado é devido a uma microestrutura celular ou altamente porosa.

Conforme Pinto (2015), os agregados leves podem ser classificados segundo a sua natureza em agregados orgânicos e inorgânicos. Os agregados inorgânicos são subdivididos em agregados naturais e artificiais, enquanto os orgânicos ainda são divididos em elaborados e não-elaborados.

Os agregados leves naturais são aqueles que ocorrem naturalmente em jazidas e que após um tratamento mecânico, passando por processos de trituração e peneiração, estão prontos para a utilização. Os principais tipos encontrados são os materiais de origem vulcânica, como as pedra-pomes, a escória, cinzas vulcânicas e os tufos (KUMAR & ARUNAKANTHI, 2018).

Já os agregados leves artificiais são obtidos através de processos industriais de diferentes matérias primas. Dependendo do processo e da matéria prima utilizada pode-se formar escória espumada, escória de alto forno, xisto expandido, ardósia expandida, cinzas vulcânicas sintetizadas, argila expandida, *etc.* (KUMAR & ARUNAKANTHI, 2018).

A porosidade do agregado é determinante para a sua utilização em determinados concretos. Agregados leves mais porosos são ideais para a utilização em concreto isolantes e enchimento, como agregados naturais, a escória e cinzas vulcânicas. Já agregados relativamente menos porosos tem sua aplicabilidade também em concreto estrutural, como o folhelho, ardósia e a argila expandida (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Apesar de serem amplamente inertes, os agregados convencionalmente ocupam cerca de 75% do volume do concreto. Isso faz com que a variação na propriedade dos agregados venha a impactar no desempenho do concreto, como a resistência e propriedades do concreto no estado fresco (OBLA, 2015).

A substituição de agregados tradicionais por agregados leves na produção de concreto leve influencia não tão somente na massa específica, mas também na trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de deformação, retração, fluência, dentre outras propriedades. Por essa razão, é de grande importância conhecer os agregados leves empregados, suas características e o processo de fabricação (FERREIRA, 2015).

A NBR 7211 (2009) especifica os requisitos exigíveis para o uso de agregados naturais em concretos, aqueles resultantes da fragmentação de rochas ou encontrados fragmentados. Para os demais agregados, resultantes de processos industriais e materiais reciclados, devem ser realizados estudos experimentais que comprovem a qualidade do concreto resultante.

A NBR NM 35 (AMN, 1995) apresenta as condições que devem ser apresentadas pelos agregados leves naturais ou agregados leves artificiais produzidos por expansão, calcinação ou sinterização, para a utilização em concreto estruturais.

A argila expandida é um material utilizado como agregado leve e possui como matéria prima certos tipos de argila e o processo de sua fabricação inclui o aquecimento dessas argilas, alcançando temperaturas de cerca de 1200°C (CORINALDESI & MORICONI, 2015).

No Brasil, a argila expandida é produzida para a sua utilização em obras da construção civil, indústria têxtil, paisagismo e a jardinagem, entre outras aplicações. A utilização do material na construção civil vem aumentando cada vez mais com os avanços tecnológicos e os estudos realizados (CORREIA *et al.*, 2018).

A empresa CINEXPAN Indústria e Comércio Ltda, localizada na cidade de Várzea Paulista, é responsável pela produção da argila expandida no Brasil, cerca de 60% da sua produção é destinada a construção civil, enquanto os outros 40% são requisitados por outros setores (MORAIS, 2017).

De acordo com a CINEXPAN, o material denominado como argila expandida CINEXPAN possui características que o torna interessante frente a utilização do agregado convencional, na qual podemos destacar:

- Leveza: Possui massa específica 60% menor que a massa específica dos agregados convencionais;
- Alta resistência mecânica: Excelente comportamento frente as solicitações de tração e compressão devido sua estrutura esférica envolvida por uma camada externa vitrificada;
- Alta durabilidade: Por ser quimicamente inerte, não reage com outros materiais da construção civil, garantindo uma durabilidade de mais de 30 anos;
- Isolante acústico: A estrutura micro porosa permite um excelente desempenho como isolante acústico que pode atenuar até 25dB de ruído;
- Isolante Térmico: A grande quantidade de ar anexada em sua constituição porosa possibilita a redução da variação térmica em até 5°C;
- Resistência ao fogo: Baixa condutividade térmica evitando a propagação de chamas e permitindo uma alta resistência ao fogo.

As argilas expandidas produzidas nacionalmente destinadas para a utilização em concreto leves são denominadas comercialmente como CINEXPAN 0500, CINEXPAN 1506 e CINEXPAN 2215, como apresentado na Figura 2, e seus principais constituintes químicos são a sílica, o alumínio e o ferro (ANGELIN, 2014).

Figura 2 – Argila expandida CINEXPAN 0500 (a), 1506 (b) e 2215 (c)



Fonte: <https://www.cinexpan.com.br/default.asp> (2020)

2.2.3. *Propriedades físicas do concreto estrutural com agregados leves*

2.2.3.1. *Massa específica*

A massa específica do concreto que pode ser determinada tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, é definida assim como a relação entre a massa do concreto pelo volume por ele ocupado (WEIRICH, 2017).

No concreto leve, a massa específica é uma das principais características, pois indica a leveza do material e está diretamente ligada as demais propriedades do concreto, principalmente a resistência à compressão que varia linearmente com a massa específica e consumo de cimento para um mesmo traço (FERREIRA, 2015).

Diante dessa relação entre a massa específica e a resistência à compressão do concreto, a NBR NM 35 (ABNT, 2004) estabelece os valores máximos de massa específica que devem ser alcançados para obter uma determinada resistência, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 – Exigências para o concreto estrutural leve

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

Fonte: Adaptado de NM 35 (ABNT, 2004).

2.2.3.2. Fluência

A fluência é definida por Bastos (2019) como a deformação que ocorre no concreto ao longo do tempo, ocasionado por tensões de compressão permanentes e constantes, e que provoca o aumento das tensões de compressão no concreto.

Em média, a fluência no concreto leve estrutural é superior ao concreto convencional para uma mesma resistência. Isso se dá pelo fato do agregado leve possuir um módulo de elasticidade inferior quando comparado aos agregados convencionais (LOPEZ, 2005).

Conforme o EUROCODE 2 (2004), pode-se adotar o mesmo coeficiente de fluência de estruturas de concretos normais para as estruturas de concretos com agregados leves, desde que o peso específico do concreto normal seja multiplicado por um fator, resultando na seguinte equação:

$$\varphi = \rho \times \left(\frac{\rho}{2200} \right)^2 \quad (1)$$

Sendo:

φ a fluência do concreto com agregados leves;

ρ o peso específico do concreto convencional.

A Equação (1) é destinada para concretos leves com massa específica maior ou igual a 1800 kg/m³, para concretos com massa específica inferior deve-se multiplicar a equação 1 por coeficientes que dependem da resistência à compressão e massa específica do concreto com agregados leves (EUROCODE 2, 2004).

2.2.3.3. Retração

Retração é a deformação que ocorre nas estruturas de concreto devido a uma série de componentes, a quais englobam: sua exposição ao ambiente com umidade relativa inferior à saturação da pasta de cimento, grau de hidratação, reações químicas dos materiais, microestrutura do concreto e componentes da mistura (SOUZA, 2014).

De acordo com Ferreira (2015), a retração nas estruturas de concreto é influenciada principalmente pela quantidade e qualidade de pasta de cimento no concreto e o tipo de agregado utilizado. Segundo o autor, as características do agregado influenciam diretamente na qualidade da pasta. Agregados com características inadequadas possuem uma maior absorção de água, tendendo a aumentar a retração do concreto com o aumento do consumo de cimento.

Desse modo, a retração do concreto produzido com agregados leves dependerá do tipo de agregado leve utilizado na sua produção, concretos produzidos com xistos expandidos e ardósias expandidas mostram menor retração que estruturas de concreto com agregado convencional, apesar que geralmente o concreto com agregado leves apresente maior retração para uma mesma resistência (LOPEZ, 2005).

A NBR NM – 35 (ABNT, 2004) limita a retração por secagem de corpos de prova de concreto com agregados leves a 0,10%, em ensaio realizado segundo a norma com uma mistura de 1 de concreto para 6 de agregados leves em volume.

2.2.3.4. Durabilidade

De acordo com Tutikian & Helene (2011), as estruturas de concreto armado devem se manter duráveis frente as solicitações que serão expostas durante toda a sua vida útil. O autor explica que a durabilidade do concreto está condicionada aos mecanismos que os agentes agressivos utilizam para se locomover no concreto, tais como: a capilaridade, difusibilidade, migração iônica e permeabilidade.

As estruturas de concreto armado devem ser dimensionadas atendendo os estados de limite de serviço e o estado de limite último, pois esses requisitos são relacionados à durabilidade das estruturas. Para assegurar o desempenho em serviço do concreto, devem ser especificados corretamente as condições que as estruturas serão expostas durante sua vida útil e os procedimentos de execução (WEIRICH, 2017).

A proporção real de água-cimento do concreto estrutural leve é geralmente menor em relação ao valor utilizado no traço. A absorção de água do agregado, teor de umidade e as características reológicas da pasta de cimento são parâmetros que podem afetar o valor real de água-cimento (DOMAGALA, 2015).

A durabilidade do concreto depende de fatores extrínsecos, tais como as condições ambientais e a natureza das solicitações ao longo de toda a sua vida útil, e a fatores intrínsecos, tais como o tipo de material utilizado e o fator a/c (TUTIKIAN & HELENE, 2011).

A porosidade e a permeabilidade são características intrínsecas ao concreto e estão relacionadas à sua durabilidade. Concretos que apresentam baixos índices de porosidade e permeabilidade são mais compactos e tendem a desempenhar seu serviço adequadamente por mais tempo (SAMPAIO, MARTINELLI & GOMES, 2017).

O concreto leve estrutural, por ser constituído por agregados mais porosos, apresentam muitas vezes maior porosidade que os concretos convencionais, conseqüentemente

apresentando maior possibilidade de absorção de água e suscetibilidade aos processos de deterioração como a carbonatação (SANTIS *et al.*, 2017).

Entretanto, os agregados leves utilizados podem ser estanques, significando que apesar de apresentar maior porosidade, a permeabilidade depende também da intercontinuidade dos seus poros, que podem formar sistemas abertos ou fechados. Desse modo, o concreto leve não necessariamente apresentará menor durabilidade (SANTIS *et al.*, 2017; HUBERTOVÁ & HELA *et al.*, 2013).

2.2.4. Propriedades mecânicas do concreto estrutural com agregados leves

2.2.4.1. Resistência à compressão

Conforme Souza *et al.* (2015), o concreto é conhecido por seu excelente desempenho mecânico frente a tensões de compressão. Dessa maneira, a resistência à compressão é umas das características mais representativas do material e a partir dela é possível avaliar demais características, tais como o módulo de elasticidade, estanqueidade e permeabilidade, e resistências a intemperes

No que diz respeito as fases constituintes do concreto, a resistência à compressão do concreto depende da porosidade da pasta e do agregado, e a zona de transição agregado-pasta, e o fatores que os influencia (NUNES, 2005).

No concreto leve, a resistência do agregado leve é determinante, pois o agregado é menos resistente que a pasta e a zona de transição. Outras propriedades do agregado que influenciam na resistência são o tamanho, forma, textura superficial e granulometria (NUNES, 2005). O agregado leve por possuir uma estrutura porosa, com uma maior absorção de água, possui uma menor resistência em relação aos agregados convencionais (MUHAMMAD *et al.*, 2019).

Entretanto, a absorção de água pelo agregado durante o estado fresco do concreto pode contribuir para o aumento da adesão na zona de transição da pasta de cimento com o agregado leve, resultando na melhoria da resistência e durabilidade do concreto (DOMAGALA, 2015).

De acordo com Rossignolo (2009), a ruptura no concreto leve devido as tensões de compressão normalmente não ocorre devido a diferença de deformação entre agregado e matriz cimentícia, mas devido à ruptura na argamassa com origens de microfissura no agregado, assim como em concretos de alta resistência com agregados convencionais.

De acordo com Moncada *et al.* (2019), a relação entre a resistência à compressão e massa específica é conhecido como o fator de eficiência do concreto, e é expressa pela equação:

$$FE = \frac{f_c}{\rho} \quad (2)$$

Sendo:

FE o fator de eficiência;

f_c a resistência à compressão mecânica;

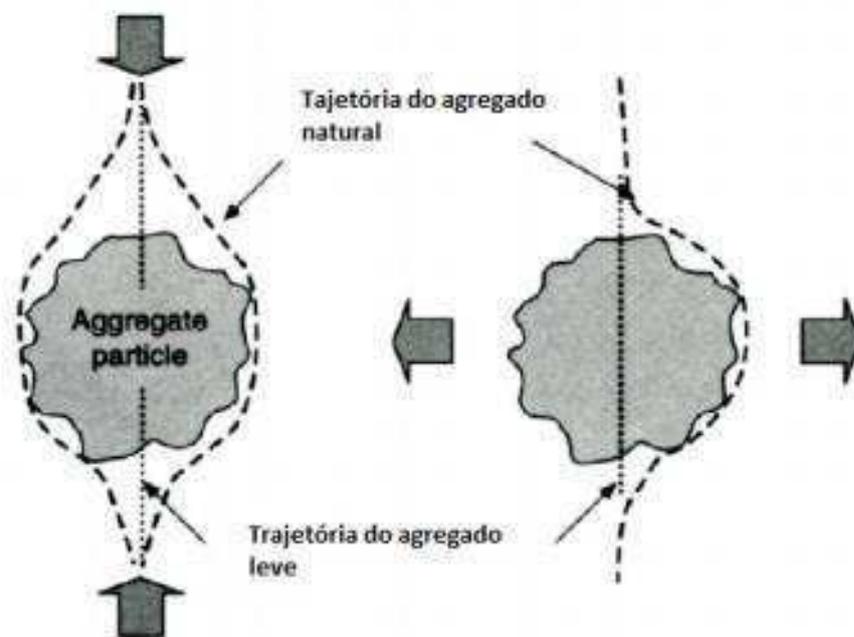
ρ a massa específica.

2.2.4.2. Resistência à tração

A resistência à tração pode ser determinada através de ensaios de tração direta, ensaio de flexão ou ensaio de compressão diametral, de acordo com as normas nacionais vigentes (GOMES, 2014).

Existem grandes diferenças entre a resistência à tração do concreto leve estrutural e do concreto convencional, sendo elas a redução significativa na resistência à tração devido o maior gradiente de umidade dos agregados leves e o tipo de fratura que nos concretos leves que ocorre nos agregados enquanto no concreto convencional ocorre na zona de transição do agregado, como ilustrado na Figura 3 (SUBHAN, 2005).

Figura 3 – Tipo de ruptura nos concretos leve (esq.) e convencional (dir.)



Fonte: <https://www.cinexpan.com.br/default.asp> (2020).

A ACI-318 (2008) relaciona a resistência à tração por compressão diametral e por flexão dos concretos leves aos resultados do ensaio de resistência à compressão diametral de corpos cilíndricos, dados pelas seguintes expressões:

$$f_{id} = 0,48 \times \sqrt{f_c} \quad (3)$$

Sendo:

f_{id} a resistência a tração por compressão diametral;

f_c a resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos.

$$f_{ctm} = 0,53 \times \sqrt{f_c} \quad (4)$$

Sendo:

f_{ctm} a resistência a tração por flexão;

f_c a resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos.

2.2.4.3. Módulo de elasticidade

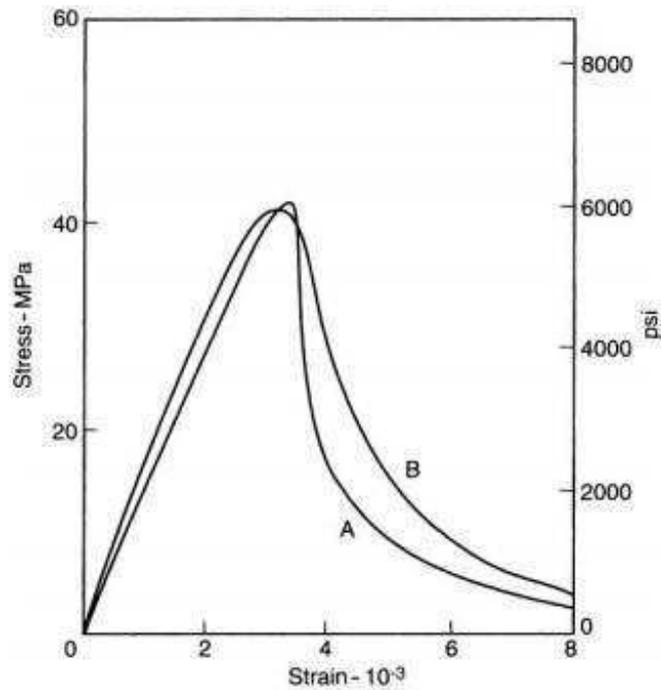
O módulo de elasticidade é definido por Pacheco *et al.* (2014) como a relação entre a tensão aplicada em um determinado corpo e a deformação imediata apresentada por ele. O autor explica que materiais idealizados por Robert Hooke mantém uma proporção entre a deformação e a carga aplicada. Entretanto, o concreto nem sempre segue essa proporcionalidade para todos os níveis de carga aplicado.

O concreto leve apresenta um comportamento em serviço frente a solicitações de compressão diferente do concreto convencional. Essa diferença se dá devido aos valores relativos de módulo de elasticidade dos materiais constituintes. Enquanto no concreto leve o agregado leve possui um módulo de elasticidade inferior à pasta de cimento, no concreto convencional o módulo de elasticidade do agregado é superior (SILVA, 2007).

O módulo de elasticidade de concreto com agregados leves é inferior ao concreto convencional. Isso acontece porque o módulo de elasticidade do agregado leve é inferior aos agregados convencionais, como a areia e o cascalho (CATÓIA, 2012).

De acordo com Borja (2011), através de ensaios com deformação controlada, a parte ascendente do diagrama de tensão-deformação de concretos com argilas expandidas se mantém linear enquanto a resistência do concreto aumenta. Enquanto isso, a parte descendente da curva, após atingir a ruptura, torna-se mais íngreme. O mesmo foi observado por Neville (2011), como apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Diagrama tensão-deformação do concreto leve estrutural: (a) concreto leve estrutural (b); concreto convencional



Fonte: Neville (2011)

Uma importante característica do concreto com agregados leves é a boa aderência entre o agregado leve e a matriz cimentícia. O efeito disso é a ausência da microfissuração inicial na ligação entre a pasta e o agregado e uma relação tensão-deformação linear até 90% da força máxima, muitas vezes (NEVILLE, 2011).

De acordo com Weirich (2017), o módulo de elasticidade é uma importante característica do concreto e utilizada durante o dimensionamento das estruturas por apresentar influência nas flechas de elementos sujeitos à flexão e na distribuição dos esforços.

A EUROCODE 2 (2004) sugere que, para concretos estruturais leves com resistência à compressão entre 12MPa e 80MPa, o módulo de elasticidade secante estático seja expresso pela Equação (5):

$$E_{lc} = \left(\frac{\rho_{cl}}{2400} \right)^2 \times 9,5 \times (f_{ck} + 8)^{0,333} \quad (5)$$

Sendo:

E_{lc} o módulo de elasticidade secante estático;

ρ_{cl} a massa específica do concreto;

f_{ck} a resistência características a compressão do concreto.

Enquanto isso, a ACI-318 (2008) adota para concretos com massa específica de 1440 kg/m³ a 2480kg/m³ e resistência a compressão de no máximo 41MPa, o módulo de elasticidade estático secante expresso pela Equação (6):

$$E_{lc} = 0,043 \times \gamma^{1,5} \times \sqrt{f_{ck} + 8} \quad (6)$$

Sendo:

E_{lc} o módulo de elasticidade secante estático;

γ a massa específica do concreto;

f_{ck} a resistência características a compressão do concreto.

2.3. Estruturas de Concreto Armado

O concreto armado é o material mais utilizado na construção civil. Desde a sua primeira aplicação na construção de barcos, em 1849, o material passou por diversas aprimorações, chegando em uma combinação que utilizamos até os dias atuais (PORTO & FERNANDES, 2015).

O concreto apesar de apresentar excelente resistência à compressão, possui uma resistência à tração na ordem de 1/10 da resistência a compressão, tornando-o limitado para a utilização em estruturas de concreto, pois os esforços de tração estão quase sempre presentes nas estruturas das construções (CARVALHO & FIGUEIREDO FILHO, 2014).

O concreto armado é a junção do concreto com o aço. O reforço do aço fornece ao concreto a maior capacidade de resistir à tração, como também é capaz de resistir aos esforços de compressão, aumentando a resistência dos elementos e viabilizando a sua utilização (MACCOMARC & BROWN, 2014).

Outros fatores que explicam o bom desempenho estrutural do concreto é a aderência efetiva entre o concreto e o aço, a proximidade entre os coeficientes de dilatação térmica, garantindo o seu comportamento como peça monolítica, e a proteção contra a corrosão e altas temperaturas conferidas ao aço pelo concreto (CLÍMACO, 2008).

Em relação a propriedades dos materiais, a NBR 6118 (ABNT, 2014) – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento define as principais propriedades do concreto e do aço, conforme segue descrito abaixo:

- Massa específica

O concreto possui massa específica normal compreendida entre 2000 Kg/m³ e 2800 Kg/m³ quando seco em estufa, quando a massa específica não for conhecida adota-se o valor de 2400 kg/m³ para o concreto e 2500 kg/m³ para o concreto armado.

- Resistência à compressão

A determinação da resistência à compressão é realizada através do ensaio de corpos de prova cilíndricos de dimensões padronizadas, conforme os procedimentos descritos na NBR 5738 (ABNT, 2015) e NBR 5739 (ABNT, 2018). A partir dos valores obtidos no ensaio, a resistência característica do concreto (f_{ck}) determinada deverá possuir 95% de confiança e está dentro do intervalo admitido para resistência características de 28 dias. A resistência de cálculo (f_{cd}) que deve ser utilizado no projeto é expressa pela equação:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (7)$$

Sendo:

f_{cd} a resistência à compressão de cálculo do concreto;

f_{ck} a resistência à compressão característica do concreto;

γ_c o coeficiente de ponderação da resistência do concreto.

De acordo com o NBR 6118 (ABNT, 2014), para o dimensionamento no estado-limite último utilizando as combinações normais, o coeficiente de ponderação da resistência do concreto é igual a 1,4.

- Resistência à tração

A resistência a tração pode ser determinada de duas formas: pela resistência à tração indireta conforme ensaio descrito pela NBR 7222 (ABNT, 2011) ou pela resistência à tração na flexão conforme ensaio descrito pela NBR 21142 (ABT, 2010).

Quando não é possível a realização de ensaios para a determinação da resistência à tração, De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), para fins de projeto, pode-se utilizar expressões para encontrar o valor médio ou característico, conforme apresentado abaixo:

$$f_{ct,m} = 0,3 \times f_{ck}^{2/3} \quad (8)$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 \times f_{ct,m} \quad (9)$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 \times f_{ct,m} \quad (10)$$

Sendo:

$f_{ct,m}$ a resistência média à tração do concreto;

$f_{ctk,inf}$ a resistência à tração inferior do concreto;

$f_{ctk,sup}$ a resistência à tração superior do concreto.

De acordo com Araújo (2014), a resistência à tração inferior do concreto corresponde ao quantil de 5% do valor característico da resistência à tração, ele é empregado para determinar a resistência da aderência entre o concreto e as barras da armadura. Para o cálculo da área mínima da armadura de flexão emprega-se a resistência à tração superior do concreto. Esse valor representar o quantil de 95% do valor característico da resistência à tração.

- Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade inicial é determinado através do ensaio realizado segundo a NBR 8522 (ABNT, 2017). Quando não for possível realizar o ensaio, pode-se determinar o módulo de elasticidade inicial de concretos entre 20MPa a 50MPa de resistência à compressão, usando a seguinte equação segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014):

$$E_{ci} = \alpha_E \times 5600 \times f_{ck} \quad (11)$$

Sendo:

E_{ci} o módulo de elasticidade inicial;

f_{ck} a resistência à tração inferior do concreto.

O fator α_E depende da natureza dos agregados graúdos que compõe o concreto. Conforma a NBR 6118 (ABNT, 2014), esse valores assumem os valores de:

- 1,2 para basalto e diabásio;
- 1,0 para granito e gnaisse;
- 0,9 para calcário;
- 0,7 para arenito.

O módulo de elasticidade secante é comumente utilizado para a verificação dos estados limite de serviço e determinação dos esforços solicitantes (SANTOS, 2014). O módulo de elasticidade secante para pode ser definido pela expressão:

$$E_{cs} = \alpha_i \times E_{ci} \quad (12)$$

Sendo:

E_{cs} o módulo de elasticidade secante;

E_{ci} o módulo de elasticidade inicial.

O coeficiente α_i possui valor menor ou igual a 1 e é determinado por:

$$E_{cs} = 0,8 + 0,2 \times \frac{f_{ck}}{80} \quad (13)$$

- Aço

O aço utilizado nas estruturas de concreto armado deve seguir a classificação indicada pela NBR 7480 (ABNT, 2007), categorizado de acordo com valor característico de resistência de escoamento, podendo ser CA-25, CA-50 e CA-60. Os diâmetros e seções transversais das barras de aço atendem as especificações da mesma normatização.

Os valores característicos de resistência ao escoamento, resistência à tração e deformação de ruptura devem ser obtidos através de um ensaio de tração realizado de acordo com a NBR ISO 6892-I (ABNT, 2013). Conforme a norma, a resistência ao escoamento de barras e fios de aço corresponde ao valor de tensão que o material apresenta deformação constante de 0,2%, a resistência de cálculo utilizado em projetos estruturais é definida pela expressão:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_y} \quad (14)$$

Sendo:

f_{yd} a resistência à tração de cálculo do aço;

f_{yk} a resistência à tração característica do aço;

γ_y o coeficiente de ponderação da resistência do aço.

De acordo com o NBR 6118 (ABNT, 2014), para o dimensionamento no estado-limite último utilizando as combinações normais, o coeficiente de ponderação da resistência do aço é igual a 1,1.

2.3.1. Sistemas estruturais

O sistema estrutural é o nome dado para o modo que os elementos estruturais que compõe uma estrutura são arranjados. Os elementos estruturais são conhecidos por possuir uma ou duas dimensões mais preponderantes que as demais, como as lajes, vigas, pilares e elementos de fundação (CARVALHO & FIGUEIREDO FILHO, 2014).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) classifica os elementos estruturais de acordo com a sua forma geométrica e a sua função estrutural, sendo divididos em elementos lineares, elementos de superfície e sólidos. De acordo com a norma, os elementos lineares são aqueles em que o comprimento longitudinal é até três vezes superior às dimensões da seção transversal, por exemplo pilares e vigas, enquanto que os elementos de superfície possuem uma dimensão, normalmente chamada de espessura, relativamente menor que as demais, fazem parte desse grupo as lajes.

Os elementos estruturais mais tradicionalmente aplicados são sucintamente definidos abaixo:

- a) Lajes: São elementos bidimensionais planos que possuem uma espessura uniforme e bem menor que as suas outras duas dimensões. Elas têm como função receber as cargas perpendiculares aplicadas em seu plano médio e transmiti-las para apoios. Em edifícios residenciais de vãos relativamente pequenos é predominante o sistema de lajes apoiadas em seu contorno por vigas ou alvenarias. As lajes podem ser executadas em diferentes formas, como lajes maciças, lajes nervuradas, lajes cogumelos, entre outros, e depende dos aspectos econômicos e de segurança, e da análise do projeto arquitetônico (ARAÚJO, 2014).
- b) Vigas: São classificadas como elementos lineares, são submetidos predominantemente à esforços de flexão (ALVA, 2007). As vigas tem como função vencer vãos e transmitir para elementos de apoio cargas distribuídas provenientes do seu peso próprio, paredes, lajes e cargas concentradas recebidas de outras vigas e pilares, provocando principalmente momentos fletores e cisalhamento (SANTOS, 2014; ALVA, 2007).
- c) Pilares: são peças lineares, geralmente verticais, e que normalmente predomina os esforços de compressão. Os pilares tem como função receber as cargas acumuladas dos pavimentos superiores e transmitir a elementos inferiores ou às fundações. Os pilares desempenham importante função no arranjo estrutural,

pois eles são responsáveis pela sustentação e estabilidade da construção (CASAGRANDE, 2011).

- d) Elementos de fundação: as fundações são responsáveis por transmitirem as cargas atuantes na edificação para a camada resistente do solo. Existem vários tipos de fundações, tais elementos são classificados em fundações superficiais e fundações profundas. A escolha da fundação mais adequada vai depender das cargas da edificação e da camada de assentamento do elemento, sendo necessário o ensaio de sondagem para o reconhecimento do subsolo. Aspectos econômicos e executivos também são importantes na escolha (VELLOSO & LOPES, 2012).

A escolha do sistema estrutural que melhor se enquadre em uma determinada edificação é um processo complexo, entretanto, mediante a existência de diferentes soluções já experimentadas em diferentes situações, muitos sistemas são conhecidos e sua aplicação em determinados casos tornaram-se usuais (SILVA, 2018). Segundo Barboza (2008), os sistemas formados por lajes, vigas e pilares são os mais usuais, tanto para pequenas construções quanto para construções de grande porte.

2.3.2. Pré-dimensionamento

A fim de se determinar a primeira parcela que compõe as ações atuantes na edificação, faz-se o pré-dimensionamento dos elementos estruturais para que se tenha um conhecimento inicial do peso próprio da estrutura e determinar os vãos equivalentes e a rigidez, necessário no cálculo da ligação dos elementos (PINHEIRO, MUZARDO & SANTOS, 2007).

Não existem normas ou regras para a realização do pré-dimensionamento. As recomendações práticas que existem são fruto da experiência dos calculistas estruturais ou de estudos aprofundados, configurando-se como uma boa estimativa inicial para a determinação das dimensões de vigas, pilares e lajes em estruturas convencionais de concreto armado (ALVA, 2007).

2.3.2.1. Lajes

Uma importante referência para o pré-dimensionamento das lajes é o seu vão efetivo, que é a distância entre o centro de apoios na qual a laje está apoiada. Desse modo, Rebello (2007) define que a espessura de lajes em cruz devem ser 2% do valor médio dos vãos

efetivos, para lajes armadas em uma direção devem ser 2% do vão efetivo de menor comprimento, e em lajes em balanço devem ser 4% do balanço.

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), as lajes maciças devem atender um valor mínimo de espessura que depende da sua destinação e tipo, os limites de espessura são:

- 5cm para lajes de cobertura que não estão em balanço;
- 7cm para lajes de piso ou cobertura em balanço;
- 10cm para lajes de piso que suportam veículos com peso igual ou menor a 30KN;
- 12cm para lajes de piso que suportam pesos superiores a 30KN;
- 14cm para lajes-cogumelos
- 15cm para lajes em pretensão apoiadas em vigas
- 16cm para lajes lisas;

A norma ainda prescreve que para lajes de piso bi apoiadas, a espessura mínima deve ser igual ao comprimento do vão dividido por 42 ($l/42$), e para lajes contínuas deve ser o comprimento do vão dividido por 50 ($l/50$).

2.3.2.2. Vigas

As vigas podem seguir algumas práticas construtivas que facilitam sua execução, como a escolha de uma largura que permita seu embutimento na alvenaria e deve-se adotar alturas padronizadas em múltiplos de 5, e é sempre desejável que a viga apresente as mesmas dimensões ao longo de todo o seu tramo (PELIZARO & CUNHA, 2014).

Alva (2007) explica que para fins de pré-dimensionamento o comprimento da viga pode ser tomado com a distância entre o eixo dos pilares em que a viga se apoia, desse modo, a altura da seção transversal da viga pode ser definido por:

$$h \cong \frac{L}{10} \text{ a } \frac{L}{12} \quad (15)$$

Sendo:

h a altura da seção transversal da viga;

L o comprimento da viga.

A NBR 6118 (2014) prescreve que a seção transversal de vigas deve apresentar uma largura mínima de 12 cm e em vigas paredes esse valor é de 15 cm. A norma ainda admite um valor absoluto de 10 cm para ambos os casos, desde que sejam respeitados os espaçamentos

entre as barras e cobrimento mínimo, e seja feita adequadamente o lançamento e vibração conforme as normas vigentes.

2.3.2.3. Pilares

O método das áreas de influência é um dos processos utilizados para o pré-dimensionamento de pilares. O método estima as cargas verticais que atuam nos pilares a partir da determinação da área de influência do pilar e a parcela da carga total do pavimento para o pilar (ALVA, 2007). A área de influência do pilar é dada pela expressão:

$$A = \frac{N}{0,85 \times f_{cd} + \rho \times \sigma_s} \quad (16)$$

Sendo:

A a área da seção transversal do pilar;

N o carregamento de cálculo do pilar;

f_{cd} a resistência de cálculo do concreto;

ρ a taxa de armadura;

σ_s a tensão de compressão nas barras da armadura para uma deformação de 0,2%;

L o comprimento da viga.

De acordo com Melo (2013) o carregamento de cálculo do pilar depende da área de influência e pode ser definido pela equação:

$$N = 1,4 \times A_i \times [q_t \times (n + 0,7) + q_c] \quad (17)$$

Sendo:

N o carregamento de cálculo do pilar;

A_i a área de influência do pilar do pavimento tipo;

n é o número de pavimentos;

q_t a carga do pavimento tipo por unidade de área;

q_c a carga do telhado por unidade de área.

Melo (2013) explica que para fins de pré-dimensionamento podem ser considerado os seguintes valores para cargas (q_t):

- Laje maciça ou nervurada, com paredes em blocos de concreto: 1500kgf/m²;
- Laje maciça ou nervurada, com paredes em tijolos cerâmicos: 1200kgf/m²;

De acordo com a NBR 6118 (2014) os pilares e pilares-parede maciços não devem apresentar uma dimensão menor que 19 cm, independentemente de sua forma. Em casos especiais, pode-se adotar uma dimensão entre 19 cm e 12 cm, desde que os esforços considerados no dimensionamento sejam multiplicados por um coeficiente adicional e a área da seção transversal do elemento não seja menor que 360cm², para todos os casos. Os valores do coeficiente adicional são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores do coeficiente adicional γ_n

b (cm)	≥ 19	18	17	16	15	14	13	12
γ_n	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35

Fonte: Adaptado de NBR 6118 (2014).

2.3.3. Modelo estrutural

O modelo estrutural é um protótipo que simula a estrutural real de um edifício projetado, tem como objetivo fazer uma análise do comportamento dos elementos estruturais frente as solicitações, verificando-se os Estados Limites Últimos (ELU) e os Estados Limites de Serviço (ELS) (SILVA, 2018).

De acordo com Kimura (2007), existem diferentes modelos estruturais que podem ser utilizados para análise de edifícios em concreto armado, a gama de possibilidades cresceu com os avanços tecnológicos da informática, estando disponíveis modelos mais simples até modelos mais complexos que se mostram eficientes diante de estruturas mais arrojadas. Segundo o autor, os principais modelos utilizados em edifícios de concreto armado são:

- Modelo de vigas contínuas;
- Lajes por métodos aproximados e vigas discretizadas em grelhas;
- Vigas e lajes discretizadas em grelhas;
- Pórticos planos;
- Pórtico espacial;
- Pórtico espacial com lajes discretizadas em grelhas.

2.3.4. Estabilidade global

A verificação da estabilidade global da estrutura visa garantir a segurança da edificação, pois determina a magnitude dos deslocamentos horizontais das estruturas oriunda das ações das cargas verticais e horizontais, e que podem provocar os efeitos de segunda ordem na estrutura (PAIXÃO & ALVES, 2016).

O cálculo da estabilidade global é complexo devido às condições de não linearidade geométrica e não linearidade física apresentadas pelas estruturas. A não linearidade geométrica se dá quando o equilíbrio da estrutura está associado à uma configuração deformada, e a não linearidade física é relacionado às constituições não lineares dos materiais que compõem a estrutura (DINIZ, LAGES & BARBOSA, 2019).

Desse modo, ao considerar uma configuração deformada surge na estrutura efeitos de 2ª ordem adicionais à estrutura devido à deformação existente, entretanto, quando é considerado uma configuração geométrica não deformada é levado em consideração apenas os efeitos de primeira ordem e os valores de deformação e tensão são determinados através das fórmulas clássicas de resistência dos materiais com comportamento linear físico (FEITOSA & ALVES, 2015).

As estruturas são comumente classificadas em estruturas deslocáveis (nós móveis) e estruturas indeslocáveis (nós fixos). As estruturas de nós móveis consideram a não linearidade das estruturas, requerendo que seja feita a análise dos efeitos de segunda ordem, como a análise é mais complexa, é desejável conferir rigidez suficiente às estruturas para elas serem consideradas de nós fixos (ARAÚJO, 2010).

A NBR 6118 (2014) define que são consideradas estruturas de nós fixos aquelas que quando submetidas às ações verticais e horizontais apresentarem pequenas deformações em seus nós, pois nesses casos, os efeitos de segunda ordem são desprezíveis, pois equivalem a 10% dos efeitos de primeira ordem.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) define que o coeficiente γ_z avalia a importância dos efeitos de segunda ordem de edifícios de no mínimo 4 andares, a norma considera uma estrutura de nós fixos quando o valor γ_z for menor ou igual a 1,1. Esse parâmetro pode ser obtido a partir de uma análise linear de primeira ordem, para cada caso de carregamento, através da fórmula:

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}} \quad (18)$$

Sendo:

$\Delta M_{tot,d}$ a soma do produto de todas as forças verticais atuantes na obra, considerada no carregamento, pelos deslocamento horizontais de seus respectivos pontos de aplicação;

$M_{1,tot,d}$ a soma de todos momentos de todas forças horizontais aplicadas em relação à base da estrutura.

2.3.5. Estados Limites

O dimensionamento de uma estrutura é feito de forma a impedir que a mesma ou seus elementos não venham a ruína, esse conceito engloba não tão somente a ruptura da estrutura, mas também a perda de certas características que tornam satisfatória a convivência na habitação (CARVALHO & FIGUEIREDO FILHO, 2014).

De acordo com Santos (2014), a estrutura durante o seu uso deve apresentar alguns aspectos que certifiquem a sua qualidade e segurança, como manter as características de projeto e durabilidade durante a sua vida útil e não apresentar deformações e fissuras excessivas de modo a causar uma insegurança ao usuário e desconforto. Desse modo, quando a estrutura não atende a esses aspectos pode-se dizer que ela atingiu o seu limite e encontra-se imprópria para o uso.

Dessa maneira, visando os requisitos de durabilidade, conforto e segurança da edificação são estabelecidos os estados limites últimos e os estados limites de serviços:

2.3.5.1. Estados limites últimos (ELU)

Os estados limites últimos estão relacionados ao colapso ou ruína estrutural, uma vez que a estrutura alcançou sua máxima capacidade resistente, nesse caso é necessário cessar o uso de parte específica da estrutura ou como um todo (SANTOS, 2014). Desse modo, a NBR 6118 (ABNT, 2014) presando a segurança da estrutura, indica que nos projetos estruturais deve-se verificar os seguintes estados limites últimos:

- Perda de equilíbrio como corpo rígido;
- Esgotamento da capacidade resistente da estrutura;
- Solicitações dinâmicas;
- Colapso progressivo;
- Carregamento especiais.

2.3.5.2. Estados limites de serviço (ELS)

Os estados limites de serviço estão relacionados ao aparecimento de fissuras, deformações excessivas e vibrações indesejáveis, prejudicando a utilização da estrutura e a sua durabilidade (SANTOS, 2014). Dessa maneira, visando a durabilidade, conforto e funcionalidade das estruturas de concreto armado, A NBR 6118 (ABNT, 2014) determina que devem ser verificados os seguintes estados limites:

- Formação de fissuras;

- Abertura de fissuras;
- Deformações excessivas;
- Vibrações excessivas.

2.3.6. Ações

De acordo com Araújo (2010) as ações podem ser definidas como as causas que provocam deformações ou esforços nas estruturas, desse modo, usualmente considera-se as forças e ações impostas nas edificações as próprias ações. Araújo (2010) classifica as ações em função de sua variabilidade do tempo em ações permanentes, ações variáveis ou ações excepcionais.

2.3.6.1. Classificação

A NBR 8681 (ABNT, 2003) define que as ações permanentes são aquelas em que seu valor permanece constante ou apresenta uma pequena variação durante praticamente toda vida útil da edificação, as ações permanentes podem ser divididas em ações diretas ou ações indiretas. Nas ações diretas podemos englobar o peso próprio, alvenarias e revestimentos, dentre outros, enquanto nas ações indiretas podemos citar a fluência e a retração, imperfeição geométricas dos pilares, entre outras.

As ações variáveis são aquelas que ocorrem na edificação com significativa variação durante toda a sua vida útil, fazem parte desse grupo as cargas acidentais devido a utilização, efeito do vento, temperatura, pressões hidrostática e hidrodinâmica, forças de frenação, de impacto e centrífugas. As ações variáveis ainda podem ser classificadas em normais, quando ocorre com maior frequência e devem ser consideradas obrigatoriamente no projeto de estrutura, e em especiais, como cargas de natureza especiais que devem ser consideradas somente em situações específicas (ARAÚJO, 2010).

De acordo com a NBR 8681 (ABNT, 2003), as ações excepcionais são aquelas que a probabilidade de ocorrência é muito baixa e a sua duração também, devendo ser considerado em projetos específicos.

2.3.6.2. Combinação de ações

Diferentes ações atuam simultaneamente em uma edificação durante um determinado período de tempo. Dessa maneira, para a realização do dimensionamento e verificação da segurança, é necessário realizar a combinação de ações que atua sobre a edificação durante um período de tempo pré-estabelecido. O carregamento encontrado deve

reproduzir a situação mais desfavorável na estrutura (CARVALHO & FIGUEIREDO FILHO, 2014).

As combinações de ações podem ser classificadas primordialmente em combinações últimas e combinações de serviços, as expressões e o tipo de caso para aplicação das combinações são descritas pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

Para a realização do dimensionamento dos elementos estruturais no Estado Limite Último (ELU) e verificar os Estados Limite de Serviço (ELS) pode-se adotar os carregamentos críticos obtidos com a combinação de ações que geram os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura.

Para o dimensionamento da estrutura no estado limite último pode-se adotar as combinações normais, conforme as prescrições da NBR 6118 (ABNT, 2014). Desse modo, as combinações últimas normais são dadas pela equação:

$$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_q (F_{q1k} + \sum \Psi_{oj} F_{qjk}) \quad (19)$$

Sendo:

F_d o valor de cálculo das ações para combinação última;

F_{gk} as ações permanentes diretas;

F_{qk} as ações variáveis diretas da qual a F_{q1k} é a ação principal;

γ_g, γ_q coeficiente de ponderação conforme tabela 11.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014);

Ψ_{oj} coeficiente de ponderação conforme tabela 11.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Para a verificação no estado limite de deformações excessivas da estrutura devido deslocamentos horizontais do edifício e deformações excessivas em lajes e vigas pode-se adotar as combinações frequentes de serviço, conforme as prescrições da NBR 6118 (ABNT, 2014). As combinações frequentes de serviço são dadas por:

$$F_{d, serv} = \sum F_{gi,k} + \Psi_1 F_{q1k} + \sum \Psi_{2j} F_{qjk} \quad (20)$$

Sendo:

$F_{d, serv}$ o valor de cálculo das ações para combinação de serviço;

F_{gk} as ações permanentes diretas;

F_{q1k} a ação variável principal;

F_{q2k} as demais ações variáveis;

Ψ_1 é o fator de redução de combinação frequente para ELS conforme tabela 11.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014);

Ψ_2 é o fator de redução de combinação quase permanente para ELS conforme tabela 11.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Para as ações são utilizados os coeficientes de ponderação e fatores de combinação presentes na tabela 11.1 e tabela 11.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014) para as combinações de ações. A Tabela 4 apresenta os valores utilizados para os tipos de ações mais comuns atuantes nas estruturas das edificações.

Tabela 4 – Coeficientes e fatores utilizados nas combinações

Tipos de ação	Coeficiente de Ponderação		Fatores de Combinação		
	Desfavorável	Favorável	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Peso próprio	1,40	1,00	1,00	1,00	1,00
Adicional	1,40	1,00	1,00	1,00	1,00
Acidental	1,40	0,00	0,70	0,60	0,40
Água	1,20	0,00	1,00	1,00	1,00
Vento	1,40	0,00	0,60	0,30	0,00
Desaprumo	1,20	1,00	1,00	1,00	1,00

Fonte: Autor (2020).

2.3.7. Durabilidade

Medeiros, Andrade & Helene (2011) explicam que a durabilidade das estruturas durante toda a sua vida útil é fruto da interação da estrutura com o meio ambiente, e das condições de uso, operação e de manutenção, uma vez que uma mesma estrutura pode apresentar diferentes desempenhos de durabilidade em diferentes situações.

Entretanto, os autores afirmam que a resistência da estrutura de concreto à ação do meio ambiente e ao uso depende da resistência concreto e da resistência da armadura, como também da estrutura em si, desse modo, qualquer tipo de deterioração afetará o desempenho da estrutura.

A agressividade do meio ambiente contribui para a perda da qualidade (durabilidade) da estrutura, a NBR 6118 (ABNT, 2014) classifica a agressividade ambiental de acordo os agentes físicos e químicos que atuam sobre as estruturas de concreto e possam causar menor ou maior deterioração, como pode ser visto na Tabela 5 abaixo.

Tabela 5 – Classificação da agressividade ambiental

Classe da agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha Industrial	Grande
IV	Muito Forte	Industrial Respingos de maré	Elevado

a) Pode-se admitir um microclima com agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

b) Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras de regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuvas em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

c) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas

Fonte: Adaptado de NBR 6118 (ABNT, 2014).

Devido à grande correspondência entre a relação água/cimento, a resistência à compressão e a durabilidade, a NBR 6118 estabelece requisitos mínimo nesse sentido, a fim de garantir a durabilidade da estrutura durante toda a sua vida útil frente a agressividade ambiental, como descrito na Tabela 6.

Tabela 6 – Especificações do concreto armado em função da classe de agressividade

Concreto	Classe de agressividade			
	I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	≤0,65	≤0,60	≤0,55	≤0,45

Classe do concreto	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
--------------------	------------	------------	------------	------------

Fonte: Adaptado de NBR 6118 (ABNT, 2014).

Na estrutura de concreto armado, a parte mais vulnerável aos ataques do meio ambiente é o aço, por essa razão deve-se utilizar uma espessura de concreto sobre o aço protegendo-o do contato direto com o meio (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011). Desse modo, o projeto e execução adequada do cobrimento é de grande importância para a vida útil da estrutura, a NBR 6118 (ABNT, 2014) especifica os cobrimentos mínimos que devem ser utilizados diante das diferentes classes de agressividade, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para estruturas de concreto armado

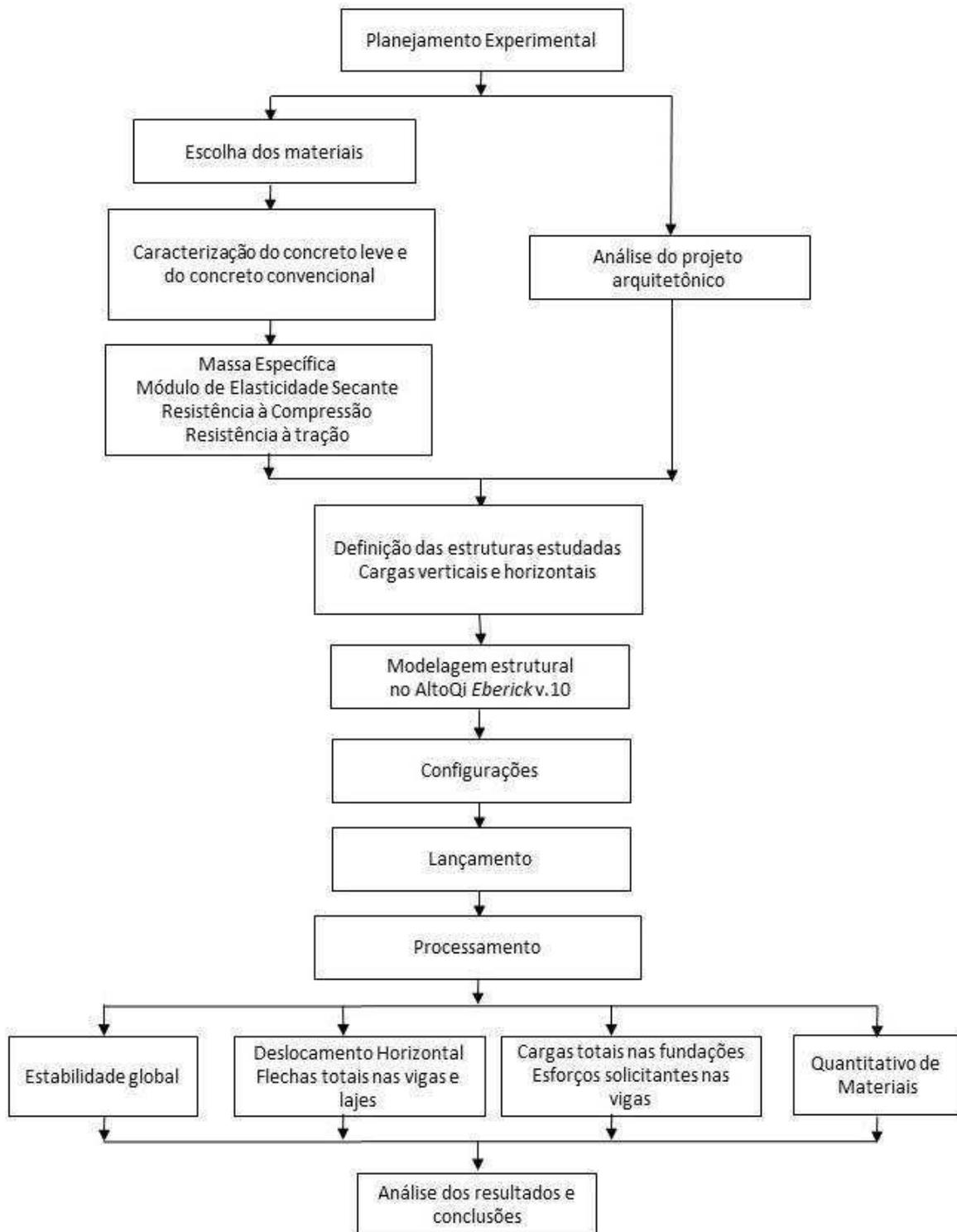
Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
	I	II	III	IV
	Cobrimento nominal (mm)			
Laje	20	25	35	45
Viga/Pilar	25	30	40	50
Elementos estruturais em contato com o solo	30		40	50

Fonte: Adaptado de NBR 6118 (ABNT, 2014).

3. METODOLOGIA

Nesse tópico é discutido o planejamento experimental elaborado para alcançar os objetivos propostos. A Figura 5 apresenta o organograma das atividades realizadas.

Figura 5 – Organograma das atividades realizadas



Fonte: Autor (2020)

3.1. MATERIAIS

Para a escolha do aço dos elementos estruturais foi preconizado fatores como disponibilidade comercial e a maior uniformização dos diâmetros. Desse modo, foi empregado o aço CA-50 nas armaduras longitudinais de vigas, pilares, escadas, e lajes, enquanto que foi adotado o aço CA-60 em lajes e estribos de vigas e pilares. O diâmetro mínimo para vigas e pilares é igual a 5mm, conforme a NBR 6118 (2014).

Para a realização do estudo, foi considerado o concreto com argila expandida desenvolvido pela CINEXPAN (2013). O concreto leve com argila expandida (CINEXPAN, 2013) é sugerido para uso estrutural e utiliza 100% de argila expandida tipo 1506 como agregado graúdo e aditivo polifuncional. O concreto apresentou resistência média de 30MPa e massa específica de 1750 kg/m³. Para o projeto foi considerado uma classe de agressividade II, logo, a resistência do concreto escolhida atende o mínimo exigido pela NBR 6118 (2014) para assegurar o desempenho dos elementos estruturais frente a agressividade ambiental. O concreto com resistência de 30MPa foi adotado para todos elementos estruturais da edificação.

O módulo de elasticidade secante do concreto leve é determinado pela Equação (16):

$$E_{lc} = 0,043 \times \gamma^{1,5} \times \sqrt{f_{ck} + 8} \quad (21)$$

Sendo:

E_{lc} o módulo de elasticidade secante estático;

γ a massa específica do concreto;

f_{ck} a resistência características a compressão do concreto.

Desse modo, o módulo de elasticidade secante do concrete leve é igual a 19405MPa.

Para a realização da comparação, foi utilizado um concreto convencional de mesma resistência e massa específica igual a 2400 kg/m³, conforme prescrições da NBR 6118 (ABNT, 2014). O módulo de elasticidade secante do concreto convencional foi determinado pela Equação (22), e possui valor igual a 26838,4MPa:

$$E_{lc} = 0,875 \times 5600 \times \sqrt{f_{ck}} \quad (22)$$

Sendo:

E_{lc} o módulo de elasticidade secante estático;

γ a massa específica do concreto;

f_{ck} a resistência características a compressão do concreto.

A resistência à tração do concreto convencional é obtida a partir da resistência à compressão do concreto, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), dado a fórmula:

$$f_{ct,m} = 0,3 \times (f_{ck})^{\frac{2}{3}} \quad (23)$$

Sendo:

$f_{ct,m}$ a resistência média à tração do concreto;

f_{ck} a resistência características a compressão do concreto.

A resistência à tração do concreto leve é determinada a partir da equação apresentada pela EUROCODE 2 (2004), multiplicando-se a resistência média a tração do concreto por um fator:

$$f_{lct,m} = \eta_1 \times f_{ct,m} \quad (24)$$

Sendo:

$f_{ct,m}$ a resistência média à tração do concreto leve;

$f_{ct,m}$ a resistência média à tração do concreto;

O coeficiente η_1 é dado por:

$$\eta_1 = 0,40 + \frac{0,60 \times \rho}{2200} \quad (25)$$

O valor de ρ é dado na Tabela 8 e corresponder ao valor superior da massa específica seca da respectiva classe de densidade.

Tabela 8 – Classe de densidade e correspondente densidade do concreto com agregados leves de acordo com EN 206-1

Classe de Densidade	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Densidade (kg/m ³)	801-1000	1001-1200	1201-1400	1401-1600	1601-1800	1801-2000

Fonte: EUROCODE 2 (2004).

Dessa maneira, utilizando-se das fórmulas mencionadas, na Tabela 9 apresenta-se os valores das propriedades dos concretos obtidas necessárias para o dimensionamento das estruturas.

Tabela 9 – Características dos concretos empregados no estudo

Tipo de Concreto	Massa Específica (kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade secante (MPa)	Resistência média à tração (MPa)
Leve	1750	30	19405	2,3
Convencional	2400	30	26838,4	2,9

Fonte: Autor (2020).

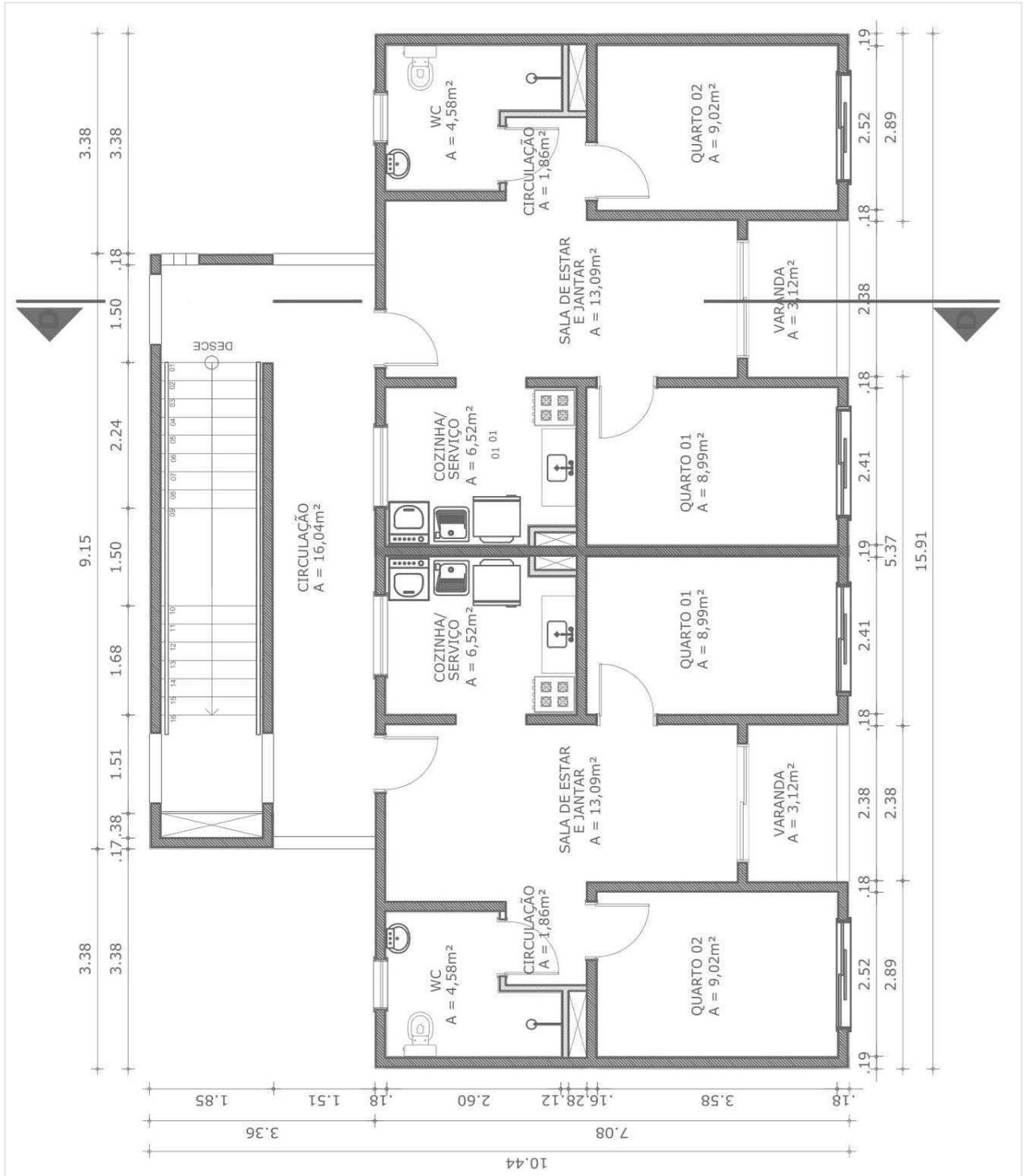
3.2.PROJETO ARQUITETÔNICO

Para a realização do estudo foi considerado um edifício residencial localizado na zona urbana da cidade de Sousa-PB composto por 4 pavimentos, sendo um térreo, três pavimentos-tipo e uma cobertura. Cada pavimento possui 2 apartamentos e uma área total de 143,386m².

O pavimento térreo possui uma área de circulação e acesso ao edifício, dois apartamentos e a escada. Os pavimentos-tipo possuem o mesmo *layout* que o pavimento térreo. Na cobertura fica localizado dois reservatórios com capacidade de 5,488m³ cada. A laje é impermeabilizada e a cobertura é feita com telha cerâmica duplana e platibanda.

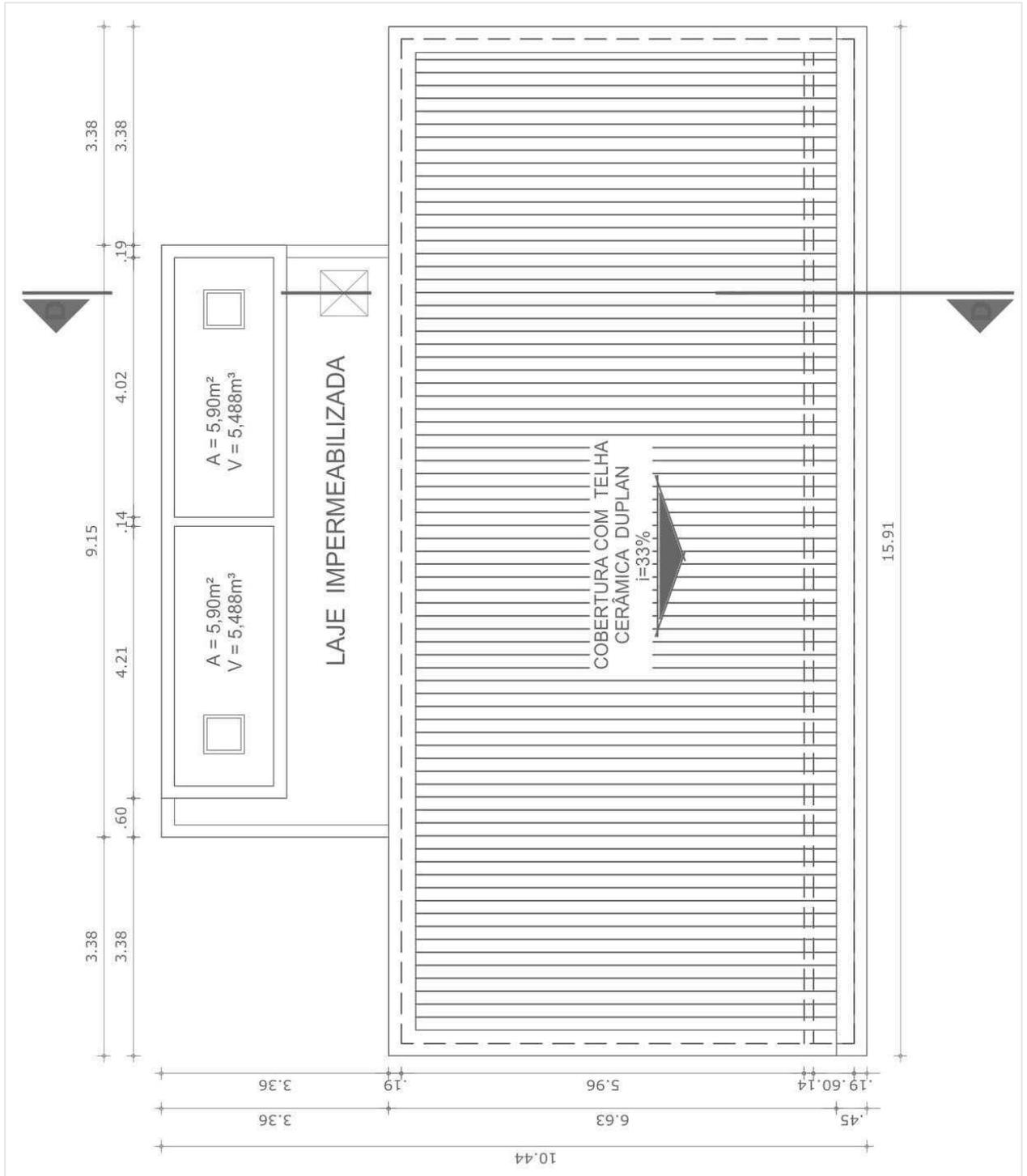
As esquadrias da edificação são de madeira e vidro, o revestimento do piso é feito de cerâmica lisa nos apartamentos, exceto nas áreas molhadas que são cerâmicas antiderrapantes. A alvenaria de vedação é em tijolo cerâmico e as espessuras, como também demais informações sobre as medidas dos cômodos da edificação, são apresentados nas Figuras 6, 7, 8 e 9:

Figura 7 – Planta baixa do pavimento-tipo



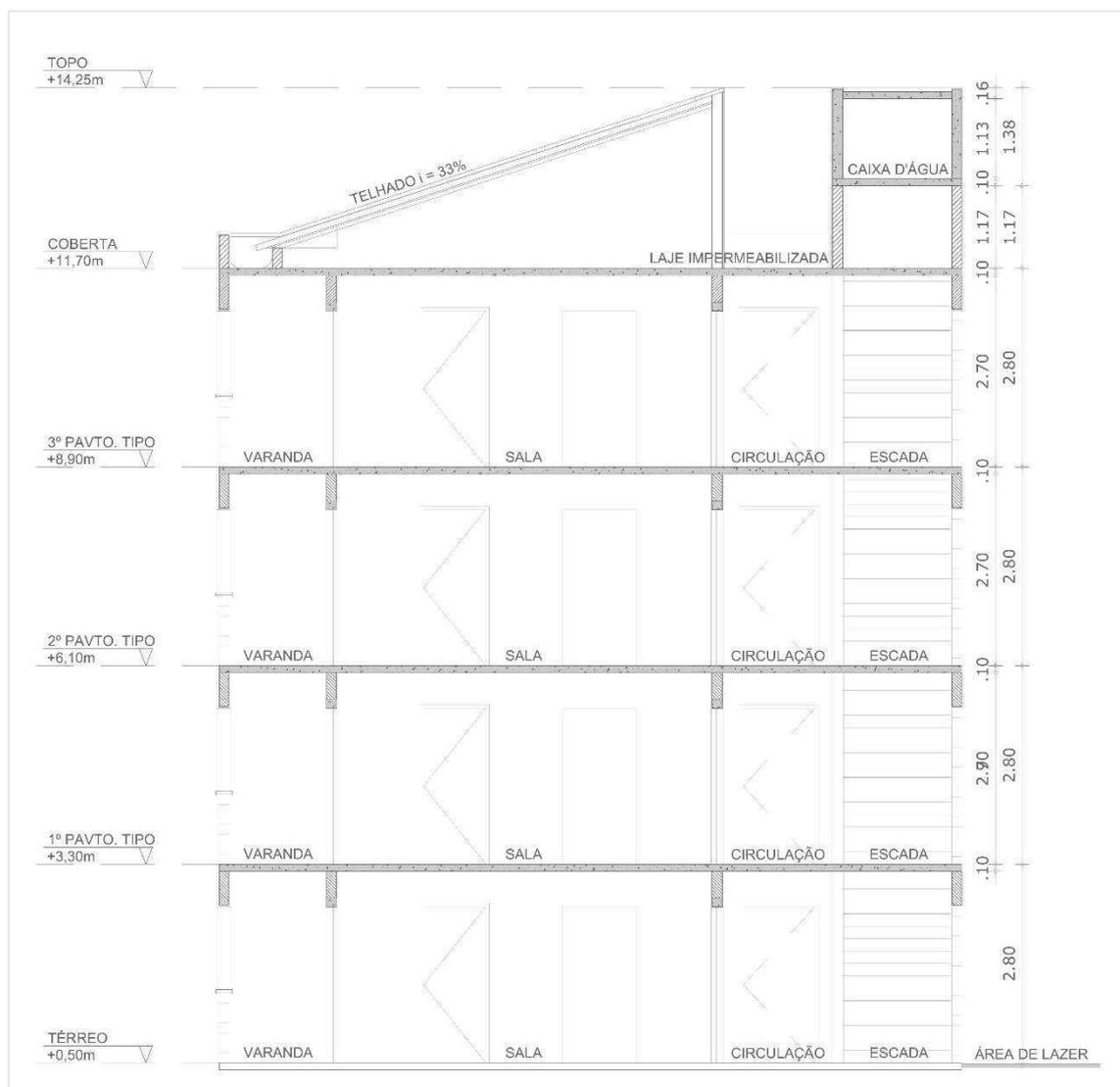
Fonte: Autor (2020)

Figura 8 – Planta da Cobertura



Fonte: Autor (2020)

Figura 9 – Corte DD



Fonte: Autor (2020)

3.3. ESTRUTURAS ESTUDADAS

Para a edificação estudada foi escolhido um sistema estrutural com pórticos em concreto armado, formado por vigas, pilares e lajes maciças, e a partir do projeto arquitetônico apresentado foi realizado o lançamento da estrutura.

As dimensões dos elementos estruturais atenderam todas as especificações da NBR 6118 (ABNT, 2014). A fim de manter a mesma fôrma em todos os pavimentos, para um melhor aproveitamento na execução e otimizar o processo de execução, procurou-se uniformizar a seção na prumada dos pilares e nos trechos das vigas, como também, adotar as mesmas dimensões em diferentes pavimentos. Também procurou-se esconder as vigas e pilares nas alvenarias de modo a atender as espessuras das alvenarias no projeto arquitetônico.

Para todas as lajes foi definido uma espessura de 10 cm. Para as vigas foi definido uma largura de 14 cm, valor igual a espessura do tijolo, e uma altura de 30 cm. Exceto as vigas que foram escolhidas para aumentar a rigidez da estrutura, para essas vigas foi definido uma altura de 40 cm.

As dimensões dos pilares foram definidas a partir da estimativa preliminar pelo método das áreas de influência, resultando em pilares com dimensões de 14 cm x 30 cm. Sobretudo, devido aos carregamentos presentes em alguns pilares e almejando aumentar a rigidez da estrutura, foram adotados pilares com dimensões de 18 cm x 40 cm e pilares com dimensões de 15 cm x 30 cm.

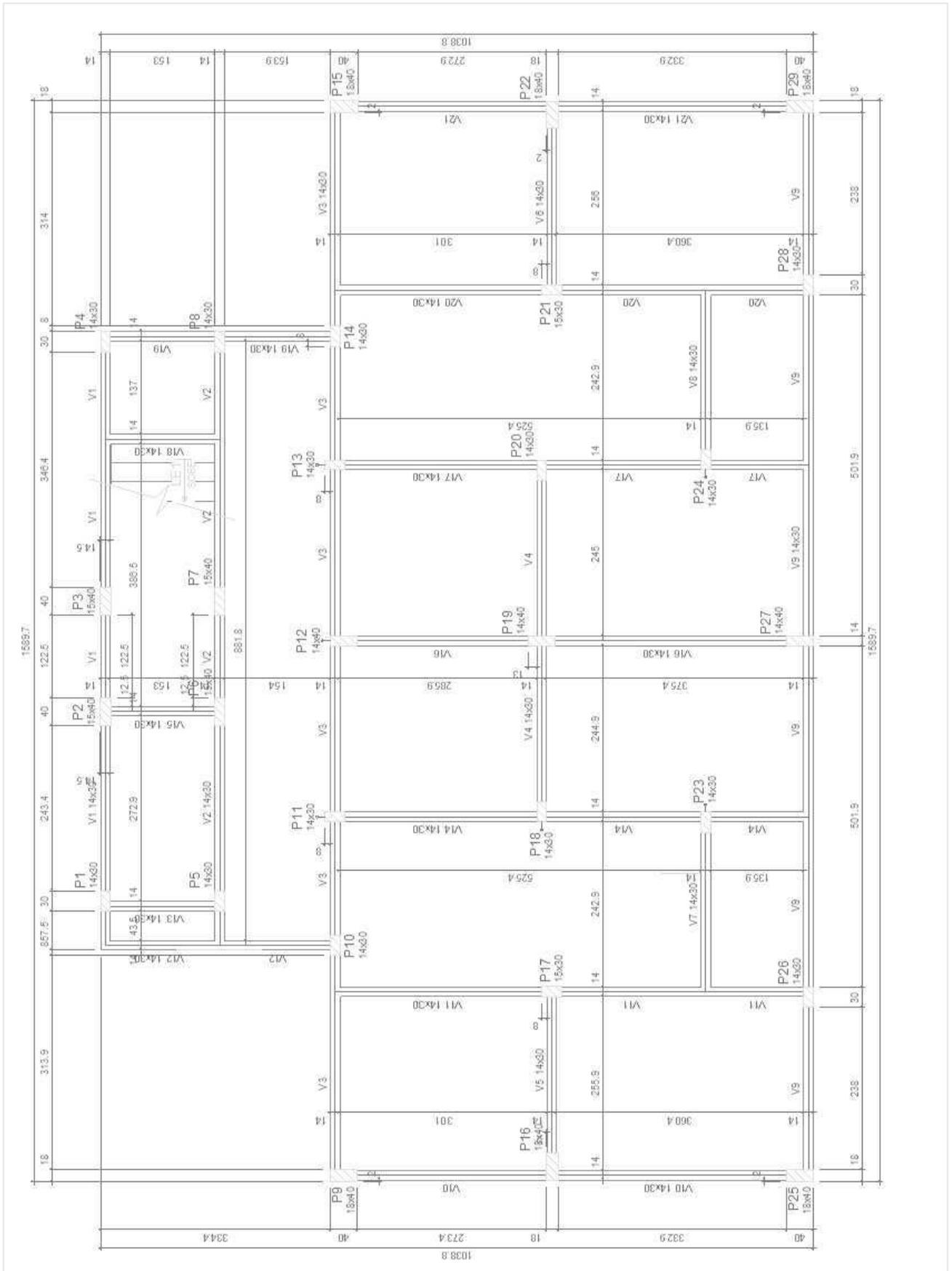
No reservatório foi utilizado vigas-parede com espessura mínima de 15 cm e altura igual a diferença do topo do reservatório para sua base.

Para a realização do estudo comparativo entre o concreto convencional e o concreto estrutural leve, serão lançadas três estruturas que são descritas da seguinte forma:

- a) Estrutura CC: Nessa estrutura os elementos estruturais são compostos unicamente por concreto convencional. Será realizada o processamento da estrutura no Eberick levando em consideração as combinações de carregamento prescrita na NBR 6118 (ABNT, 2014), e posteriormente realizado a análise dos resultados no que diz respeito aos deslocamentos verticais em lajes e vigas, o deslocamento horizontal do pórtico, a estabilidade global da edificação, os esforços nos elementos, e o consumo de concreto, aço e fôrmas.
- b) Estrutura CCL: Nessa estrutura os pilares são de concreto convencional, enquanto os demais elementos estruturais estudados são compostos de concreto estrutural leve. Os elementos estruturais possuem as mesmas dimensões que na estrutura CC, e é realizado o mesmo processamento e estudo sobre a estrutura.
- c) Estrutura CL: Todos os elementos estruturais são compostos por concreto leve, desse modo os elementos possuem as mesmas dimensões que as estruturas anteriores e adotou-se os mesmos procedimentos para obtenção e análise dos resultados.

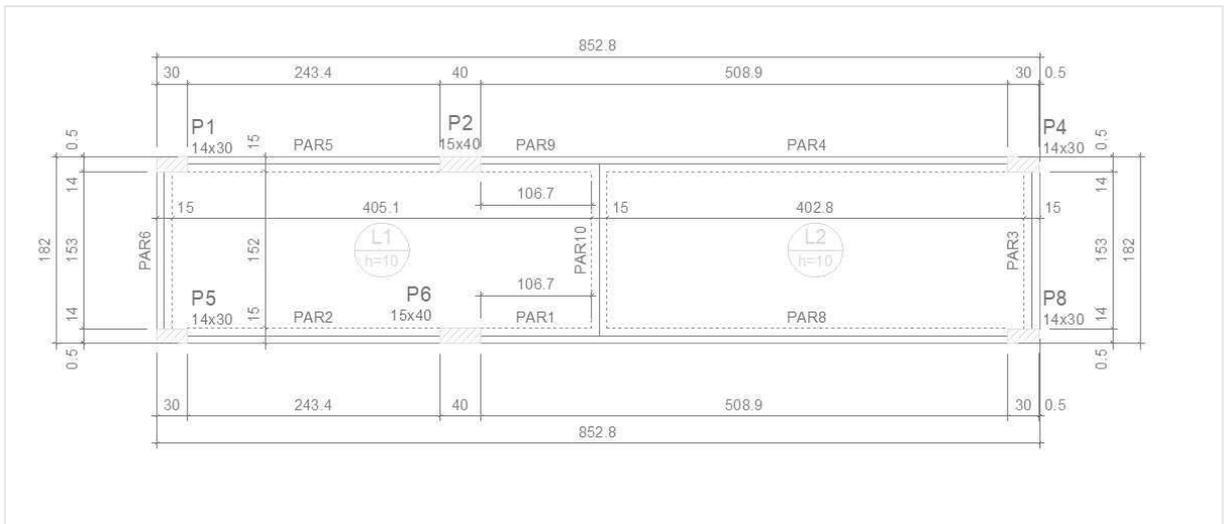
As dimensões dos elementos são apresentadas nas Figuras 10 a 14:

Figura 10 – Planta de fôrmas do pavimento térreo



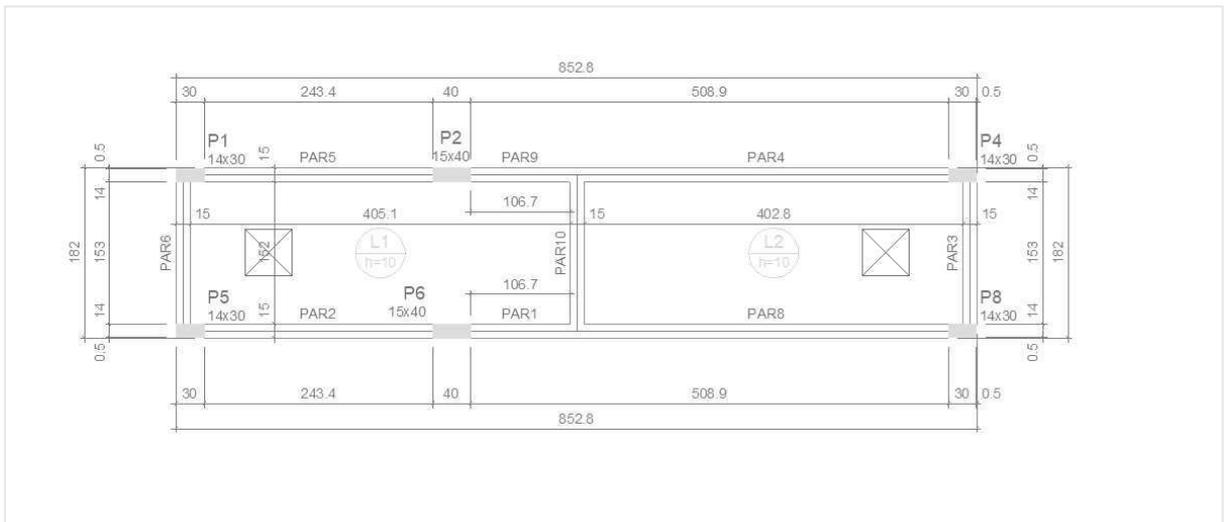
Fonte: Autor (2020)

Figura 13 – Planta de fôrmas da base do reservatório



Fonte: Autor (2020)

Figura 14 – Planta de fôrmas do topo do reservatório



Fonte: Autor (2020)

3.4.AÇÕES

3.4.1. Carregamento vertical

As cargas verticais atuantes na edificação são definidas segundo a NBR 6120 (ABNT, 2019) – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações – para o estudo, foi definido as cargas permanentes e acidentais.

Para as cargas permanentes, foi considerado um peso específico de $18,5 \text{ kg/m}^3$ para o concreto leve armado e $25,0 \text{ kg/m}^3$ para o concreto convencional armado. Esse valor é

definido de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), uma vez que não foi definido o peso do concreto armado, pode-se somar o valor de $1,0 \text{ kg/m}^3$ ao valor do concreto simples.

As alvenarias de tijolo cerâmico e revestimento de argamassa possuem diferentes espessuras. Desse modo, foi definido o peso específico em cada trecho considerando um peso específico de 13 kN/m^3 para tijolo cerâmico vazado e 19 kN/m^3 para argamassa.

Para o revestimento nas lajes foi levado em consideração os valores utilizados por Araújo (2014) para o cálculo de uma edificação residencial. Foi adotado uma carga $1,0 \text{ kN/m}^2$ de revestimento nas lajes, exceto nas escadas e cobertura, onde foi considerado um revestimento de $0,8 \text{ kN/m}^2$.

Na cobertura ainda foi considerada um peso devido ao telhado na área indicado no projeto arquitetônico igual a $0,7 \text{ kN/m}^2$ e uma carga acidental de $1,0 \text{ kN/m}^2$ para cobertura com acesso apenas para inspeção e manutenção.

Para as cargas acidentais foi levado em consideração NBR 6120 (ABNT, 2019) – Ações para o cálculo de estruturas de edificações. As cargas que dependem do local são apresentadas na Tabela 10:

Tabela 10 – Cargas variáveis uniformemente distribuídas

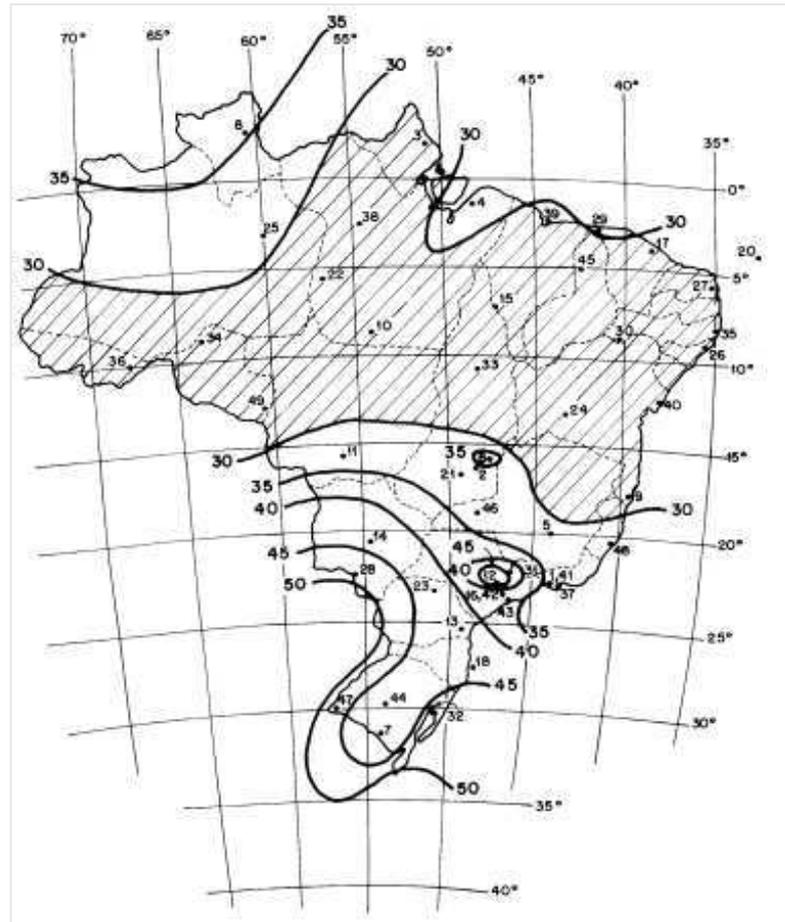
Local	Carga (kN/m^2)
Dormitório	1,5
Sala, copa e cozinha	1,5
Sanitários	1,5
Despensa, área de serviço e lavanderia	2
Corredores de uso comum	3

Fonte: Autor (2020).

3.4.2. Carregamento horizontal

A ação do vento foi determinada obedecendo os critérios da NBR 6123 (ABNT, 1988) – Forças devidas ao vento em edificações – onde para a cidade de Sousa-PB a velocidade básica do vento é de 30 m/s , de acordo com isopletas de velocidade básica apresentada na Figura 15:

Figura 15 – Isopletas de velocidade básica do vento no Brasil



Fonte: Autor (2020)

3.5. MODELAGEM ESTRUTURAL NO ALTOQI EBERICK V.10

A partir da caracterização dos materiais e levantamento das informações sobre a edificação foi possível dar entrada dos dados no *software* e iniciar a modelagem estrutural da edificação estudada a fim de obter uma maior aproximação com a realidade. O *software* escolhido para o estudo é o AltoQi Eberick V10 demonstrativo, essa versão do programa é atualizada com a última versão da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Inicialmente, foi criado um novo projeto no *software*, sendo definidos os pavimentos e suas respectivas alturas, tendo como base a planta de corte apresentado na Figura 13. A entrada dos dados no *software* pode ser vista na Figura 16.

Figura 16 – Entrada de dados dos pavimentos e suas respectivas alturas no Eberick v.10

Projeto novo

Modelo Nenhum

	Pavimento	Repetições	Altura (cm)	Nível (cm)	Lance
1	TOPO RES.	1	122.50	1369.50	7
2	BASE RES.	1	127.00	1247.00	6
3	COBERTURA	1	280.00	1120.00	5
4	PAVIMENTO 3	1	280.00	840.00	4
5	PAVIMENTO 2	1	280.00	560.00	3
6	PAVIMENTO 1	1	280.00	280.00	2
7	TÉRREO	1	280.00	0.00	1

Título

Nível inferior 0 cm

Nível solo 100 cm

Lance inicial 1

Inserir acima

Inserir abaixo

Excluir

Para cima

Para baixo

OK

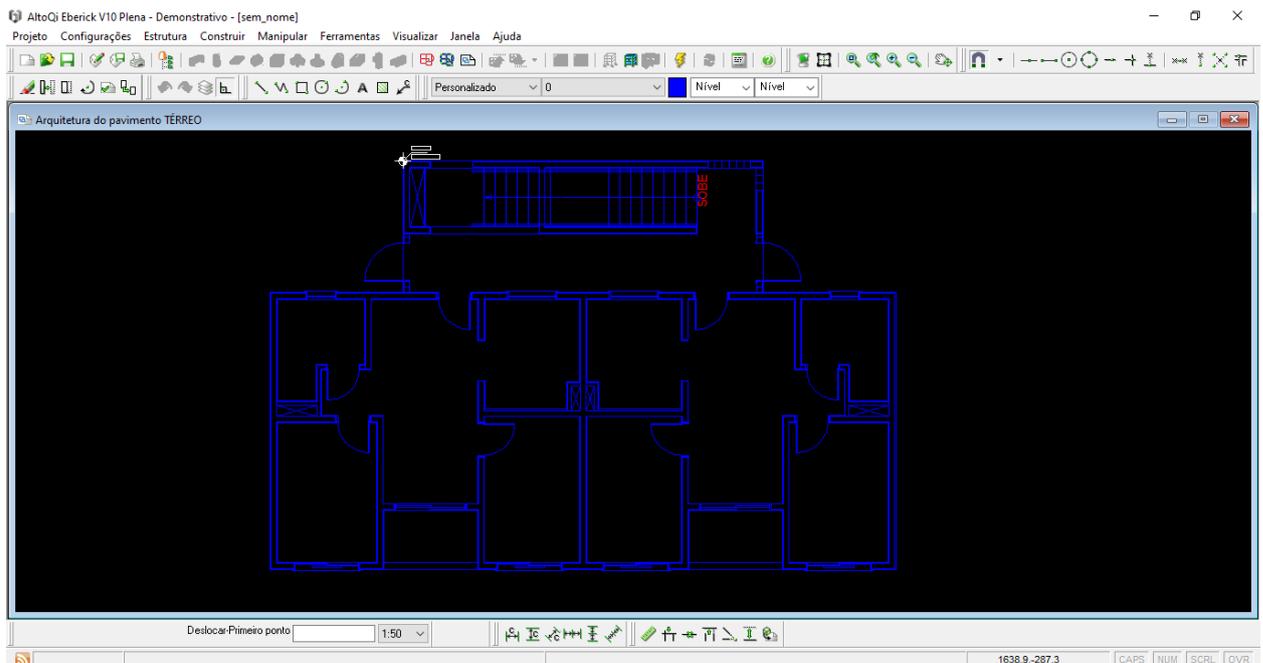
Cancelar

Ajuda

Fonte: Autor (2020)

Para nortear o posicionamento dos elementos estruturais foi inserido as plantas baixas do projeto arquitetônico em seus respectivos pavimentos, o formato dos arquivos inseridos é DWG. Eles foram devidamente posicionados em uma origem comum e possuem a mesma escala, de forma a manter a prumada dos pilares. A Figura 17 apresenta a arquitetura do pavimento térreo após a inserção do arquivo DWG. com a planta baixa:

Figura 17 – Interface do *software* com a planta baixa inserida

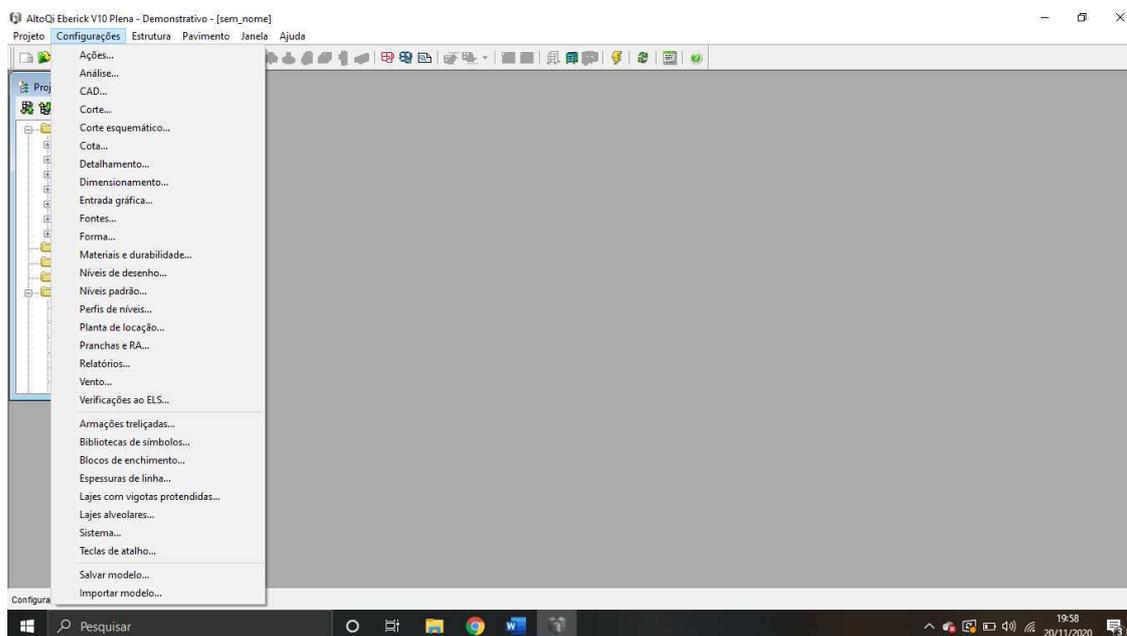


Fonte: Autor (2020)

3.5.1. Configurações do programa

Nessa etapa, analisou-se as configurações utilizados pelo AltoQi Eberick V10 para a caracterização dos materiais utilizados, realização da análise das estruturas, obtenção dos esforços e o dimensionamento dos elementos atendendo aos ELS e ELU. Desse modo, é imprescindível a configuração adequada do programa para se obter um comportamento próximo da realidade. Contudo, no tocante a análise e dimensionamento das estruturas o Eberick V10 em suas configurações padrão atende as prescrições da NBR 6118 (ABNT,2014) para a elaboração do projeto de concreto armado. A Figura 18 apresenta a janela de configurações do *software*, em seguida são apresentadas as configurações que dizem respeito ao ajuste da situação do projeto.

Figura 18 – Janela “Configurações” do AltoQi Eberick V10



Fonte: Autor (2020)

3.5.1.1. Análise

Para a análise das estruturas, o *software* utiliza o modelo grelha com pórtico espacial. Nesse modelo, os painéis de lajes são analisados como um modelo bidimensional de grelha, e as reações provenientes das lajes são adicionadas a um pórtico espacial composto por vigas e pilares, dessa forma, a estabilidade global da estrutura é verificada apenas pelo pórtico formado pelas vigas e pilares.

3.5.1.2. Materiais e durabilidade

Em Materiais e Durabilidade foram adicionadas as informações obtidas na fase de caracterização dos materiais e análise do projeto. O *software* já apresentava o concreto C-30 com as devidas características. Contudo, foi necessário criar a classe CL-30 referente ao concreto estrutural leve, as características do concreto leve (CL-30) e o concreto convencional (C-30) são apresentados nas Figuras 19 e 20, respectivamente:

Figura 19 – Identificação e entrada das características do concreto leve no *software*

The screenshot displays the 'Materiais e durabilidade' software interface. The main window is titled 'Materiais e durabilidade' and has a 'Geral' tab selected. The 'Aplicação' section shows 'Projeto inteiro' selected. The 'Classe de agressividade' is set to 'II (moderada)'. The 'Abertura máxima das fissuras' is set to '0.2 mm'. The 'Contato com o solo' is set to '0.2 mm'. The 'Classes de concreto' dialog box is open, showing a list of concrete classes on the left, with 'CL-30' selected. The 'Classes de resistência' section includes:

- Identificação: CL-30
- Resistência à compressão: 30 MPa
- Resistência característica (fck): 30 MPa
- Coefficiente de minoração (γ_c): 1.4
- Resistência de cálculo (fcd): 21.43 MPa
- Peso específico: 18.5 kN/m³
- Abatimento (slump): 5 cm
- Tipo de agregado: granito
- Tipo de cimento: CP-V-ARI

 The 'Módulo de elasticidade' section includes:

- Obter a partir do fck
- Módulo secante (Ecs): 19405 MPa
- Módulo inicial (Eci): 22177 MPa

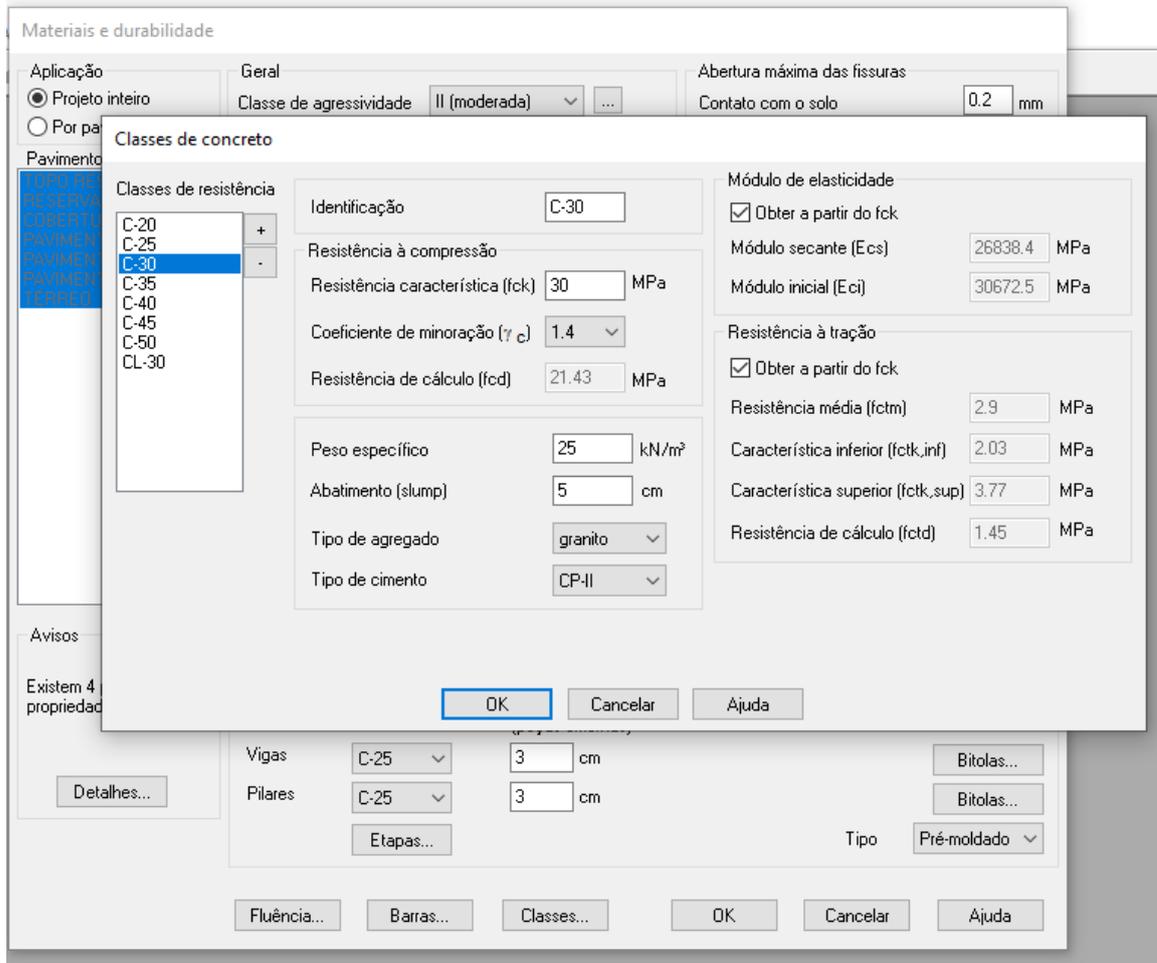
 The 'Resistência à tração' section includes:

- Obter a partir do fck
- Resistência média (fctm): 2.3 MPa
- Característica inferior (fctk.inf): 1.61 MPa
- Característica superior (fctk.sup): 2.99 MPa
- Resistência de cálculo (fctd): 1.15 MPa

 At the bottom of the dialog box are 'OK', 'Cancelar', and 'Ajuda' buttons. The background window shows 'Vigas' and 'Pilares' both set to 'C-25' with a width of '3 cm'. The 'Tipo' is set to 'Pré-moldado'. There are also buttons for 'Fluência...', 'Barras...', 'Classes...', 'OK', 'Cancelar', and 'Ajuda' at the bottom of the main window.

Fonte: Autor (2020)

Figura 20 – Identificação e entrada das características do concreto convencional no *software*



Fonte: Autor (2020)

Primeiramente foi feito o processamento da estrutura CC, então foi utilizado concreto convencional em todos os elementos estruturas como pode ser observado na Figura 21:

Figura 21 – Janela de “Materiais e durabilidade” com os materiais utilizados na estrutura CC

Materiais e durabilidade

Aplicação
 Projeto inteiro
 Por pavimento

Pavimento
 (Tubo Reservatório)
 Reservatório
 Cobertura
 Pavimento 3
 Pavimento 2
 Pavimento 1
 Térreo

Geral
 Classe de agressividade: II (moderada) ...
 Dimensão do agregado: 19 mm
 Controle rigoroso nas dimensões dos elementos
 Considerar redução no cobrimento para peças com fck acima do requerido para a classe de agressividade

Abertura máxima das fissuras
 Contato com o solo: 0.2 mm
 Contato com a água: 0.1 mm
 Demais peças: 0.3 mm
 Combinações: Freqüentes

Elementos	Concreto	Cobrimento (peças externas)	Cobrimento (peças internas)	Cobrimento (contato com o solo)	
Vigas	C-30	3 cm	3 cm	3 cm	Bitolas...
Pilares	C-30	3 cm	3 cm	3 cm	Bitolas...
Lajes	C-30	2.5 cm		2.5 cm	Bitolas...
Reservatórios	C-30	3 cm			Bitolas...
Blocos	C-25			3 cm	Bitolas...
Sapatas	C-30			3 cm	Bitolas...
Tubulões	C-20			3 cm	Bitolas...
Muros	C-25			3 cm	Bitolas...
Radier	C-25			3 cm	Bitolas...

Elementos pré-moldados

Elementos	Concreto	Cobrimento (peças externas)	
Vigas	C-25	3 cm	Bitolas...
Pilares	C-25	3 cm	Bitolas...
			Tipos: Pré-moldado

Fluência... Barras... Classes... **OK** Cancelar Ajuda

Avisos
 Existem 4 problemas nas propriedades definidas
 Detalhes...

Fonte: Autor (2020)

3.5.1.3. Vento

O cálculo e aplicação da força devido a ação do vento são realizados automaticamente pelo programa, O Eberick V10 segue os procedimentos descritos pela NBR 6123 (ABNT, 1988). Dessa maneira, a Figura 22 apresenta os valores adotados:

Figura 22 – Valores utilizados para o cálculo da força devido a ação do vento na edificação

Vento

Velocidade m/s

Edificação

Maior dimensão horizontal ou vertical

Rugosidade do terreno

Aplicação do Vento

Ângulo °

Topografia

Encostas e cristas de morros em que ocorre aceleração do vento. Vales com efeito de afunilamento ($S_1 = 1.1$)

Vales profundos, protegidos de todos os ventos ($S_1 = 0.9$)

Demais casos ($S_1 = 1.0$)

Fator Estatístico S_3

Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicações, etc.): 1.10

Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação: 1.00

Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.): 0.95

Fonte: Autor (2020)

Considerando a região de implementação da edificação foi considerado uma velocidade do vento de 30m/s conforme o mapa das isopletras da velocidade básica do vento disponibilizado pela norma.

Para a obtenção da velocidade característica do vento foi considerado os fatores S_1 , S_2 , e S_3 . Para o fator topográfico (S_1) foi considerado um terreno plano ou francamente considerando-se um valor $S_1=1,00$.

Para o fator S_2 , foram considerados a altura da edificação e a rugosidade de terreno. A maior dimensão da edificação é inferior a 20 metros e a terreno possui um terreno plano com poucos obstáculos, enquadrando-se na categoria III. Por último, o fator estatístico S_3 considera o grau de segurança requerido e a vida útil da estrutura, nesse caso como trata-se de um edifício residencial foi considerado o valor de 1,00.

3.5.2. Lançamento da estrutura

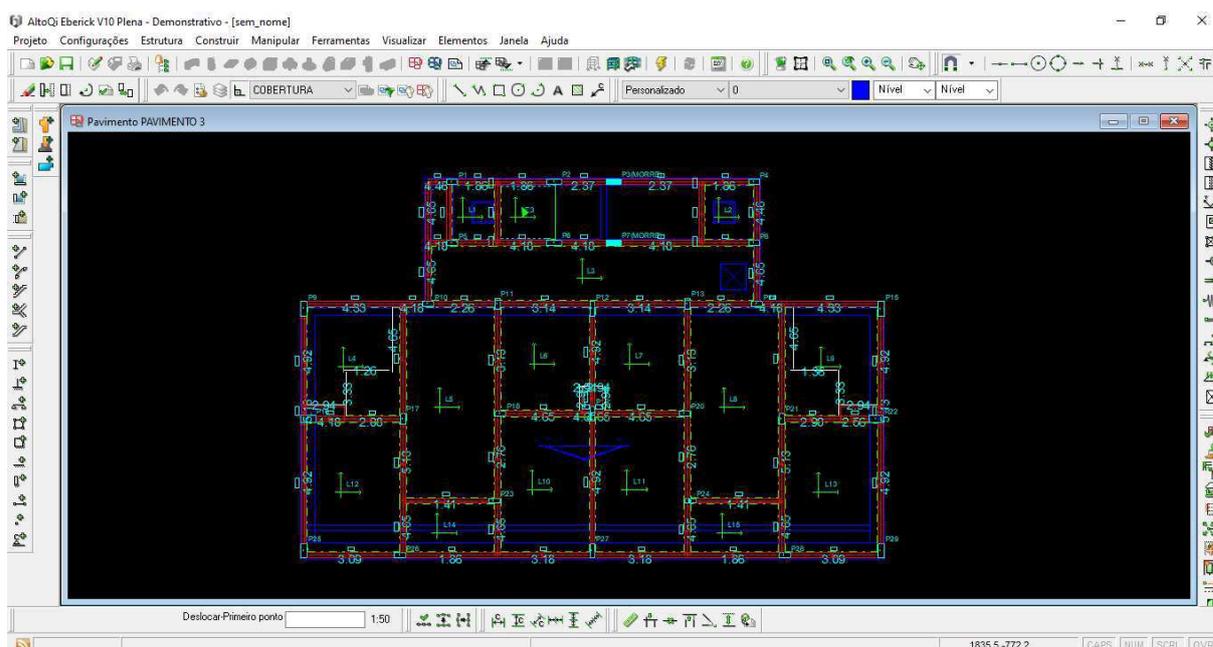
Verificado as configurações iniciais, foi realizado o lançamento dos elementos estruturais em todos os pavimentos da edificação, conforme as plantas apresentadas no tópico 3.3, seguindo a ordem de primeiro os pilares, depois as vigas, e por último as lajes e escadas.

Em seguida, foram adicionados os carregamentos de parede em vigas e lajes, levando em consideração a composição da alvenaria, a sua altura e os vãos de portas e janelas. Nas lajes foram adicionadas cargas lineares quando houve a presença de alvenaria sobre ela, também foram adicionadas as cargas acidentais e de revestimento. As aberturas nas lajes foram adicionadas conforme o projeto arquitetônico.

Foram criados pavimentos intermediários no Pavimento 1, Pavimento 2 e Pavimento 3 para o lançamento das escadas. Os pavimentos intermediários foram criados 157,5cm em relação ao pavimento inferior, para o lançamento das escadas e o lance de escada que se seguia para o pavimento inferior.

Na base do reservatório e topo do reservatório foi utilizado a ferramenta de reservatório para levar em consideração a força da água. Nas paredes do reservatório foram utilizadas vigas-paredes e adicionada cargas de empuxo devido a força da água, no fundo do reservatório além das cargas de revestimentos e acidental foram adicionadas as cargas devido a força da água. A Figura 23 apresenta um exemplo do lançamento realizado no Pavimento 3, apresentando os elementos estruturais e os valores dos carregamentos lineares.

Figura 23 – Lançamento da estrutura e cargas lineares no térreo



Fonte: Autor (2020)

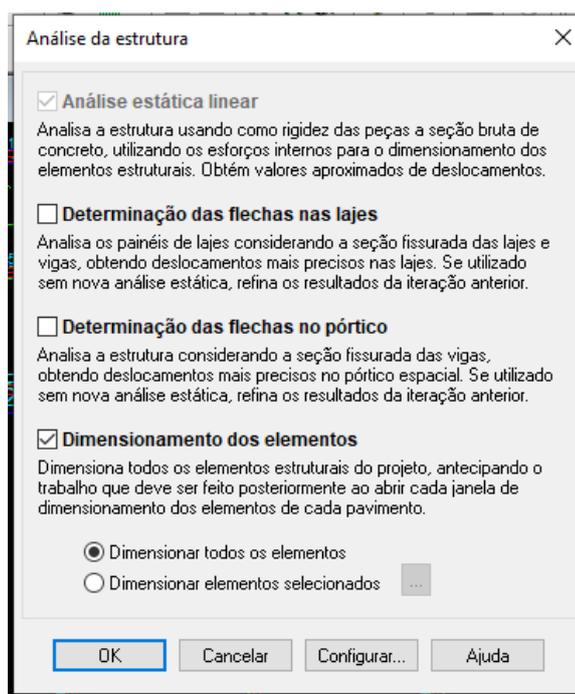
Por último foram adicionadas as sapatas a edificação convertendo os pilares em fundações. Como não houve nenhum tipo de estudo sobre as características de solo foi utilizado as configurações padrões de dimensionamento de sapata, bem como demais características do

solo padrão do programa e profundidade de assentamento das sapatas. A presença de fundações é obrigatória para o processamento da estrutura pelo *software* Eberick V10. Entretanto, para o estudo não foi considerado o quantitativo dos materiais das sapatas e pilares de arranque.

3.5.3. Processamento da estrutura

Desse modo, com a estrutura lançada foi realizada o processamento da estrutura, através da janela “Análise de estrutura”, conforme apresentado na Figura 24.

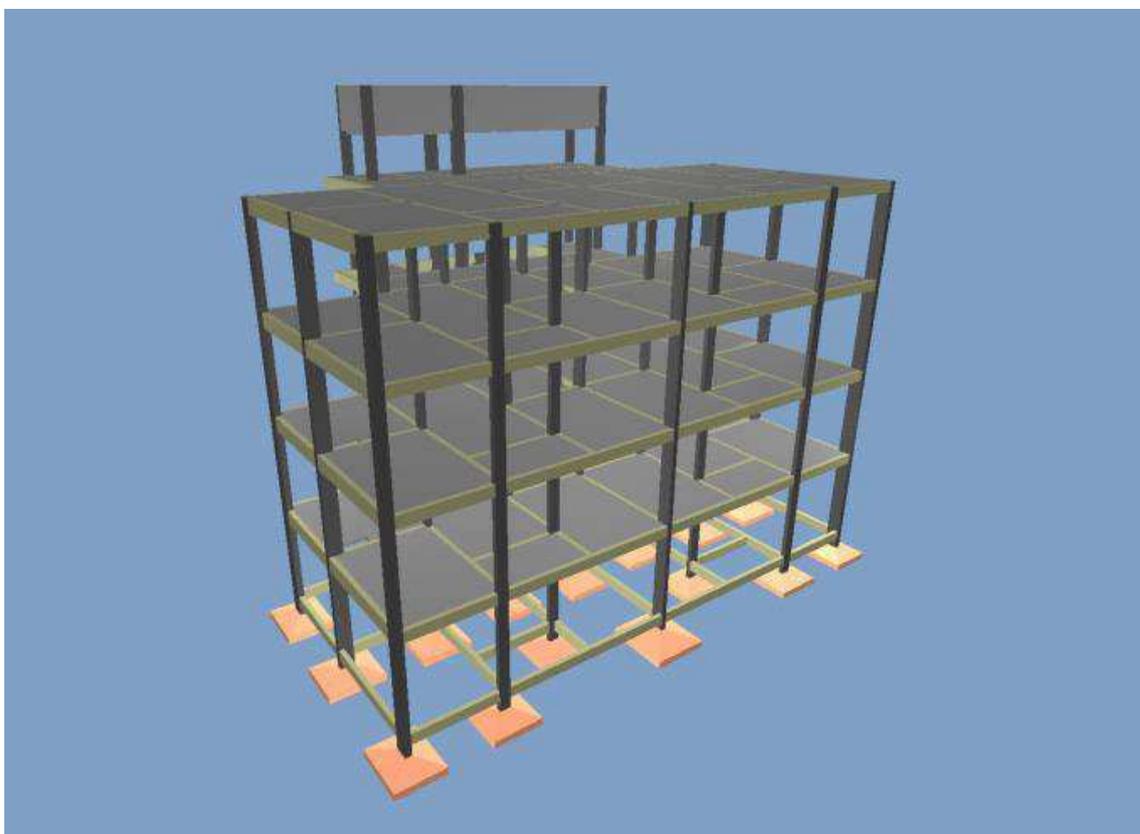
Figura 24 – Janela de “Análise da estrutura” para o processamento



Fonte: Autor (2020)

Para o primeiro processamento da estrutura é necessário fazer a análise estática linear onde é obtido todos os esforços necessários para o dimensionamento da estrutura. Com o dimensionamento dos elementos habilitados, o *software* realiza o dimensionamento de todos os elementos estruturais levando em consideração as prescrições da NBR 6118 (ABNT, 2014), desse modo o *software* define as armaduras necessárias para todos os elementos atenderem aos ELU e ELS. A Figura 25 apresenta uma visualização do pórtico 3D da estrutura.

Figura 25 – Pórtico 3D da estrutura CC



Fonte: Autor (2020)

Posteriormente, são realizados novos processamentos com as opções “Determinação das flechas nas lajes” e “Determinação das flechas no pórtico” habilitadas. A partir desse novo processamento se obtém flechas nos elementos estruturais com valores mais precisos.

Finalizando o processamento da primeira estrutura, foram modificados o concreto nas vigas, lajes e reservatórios para o processamento da estrutura CCL, e depois repetido o processo com a modificação também nos pilares para o processamento da estrutura CL. Feito isto, foi emitido relatórios a respeito da estabilidade global, deslocamentos horizontais, quantitativos de materiais, diagrama de esforço cortante e momento fletor das vigas e lajes, e as flechas totais nas vigas e lajes para cada uma das estruturas.

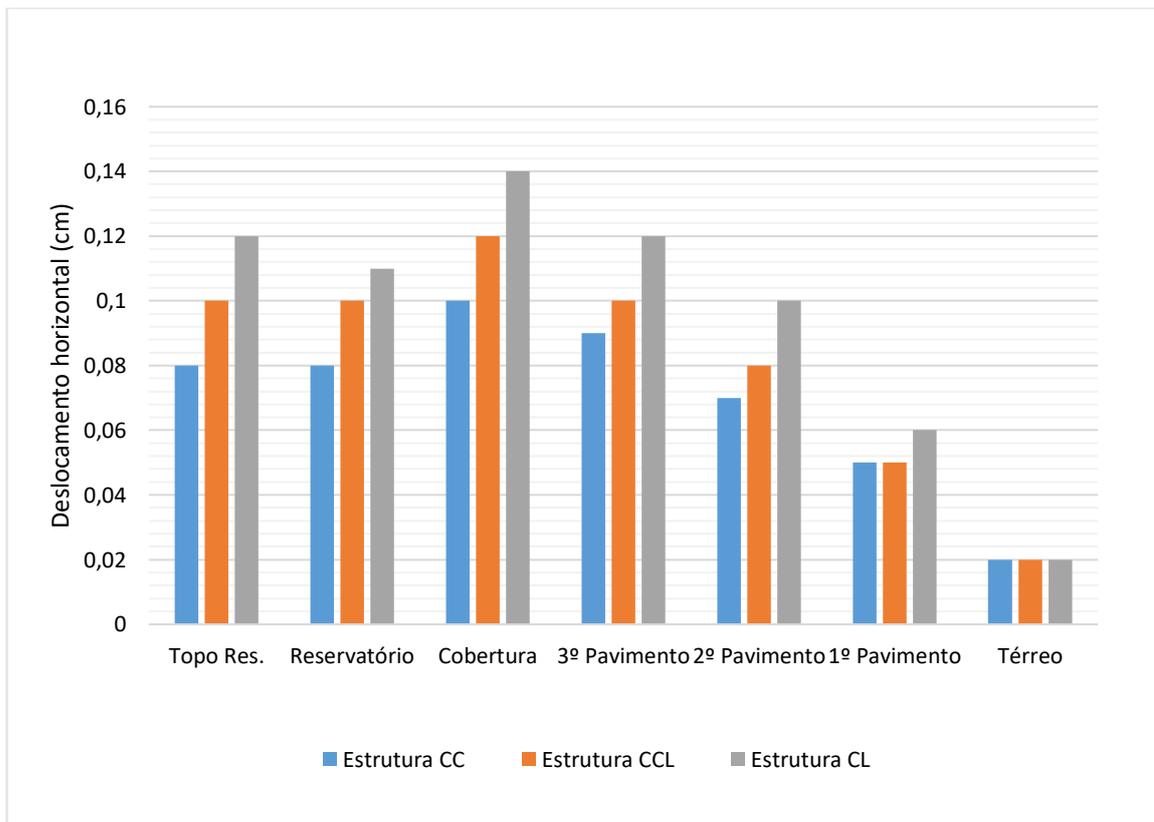
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados a partir do processamento das estruturas CC, CCL, e CL no *software* Eberick V10, como também uma análise dos mesmos. Dessa maneira, foi realizado o estudo comparativo dos deslocamentos horizontais na estrutura, estabilidade global, os deslocamentos em vigas e lajes, os esforços solicitantes e o consumo dos materiais.

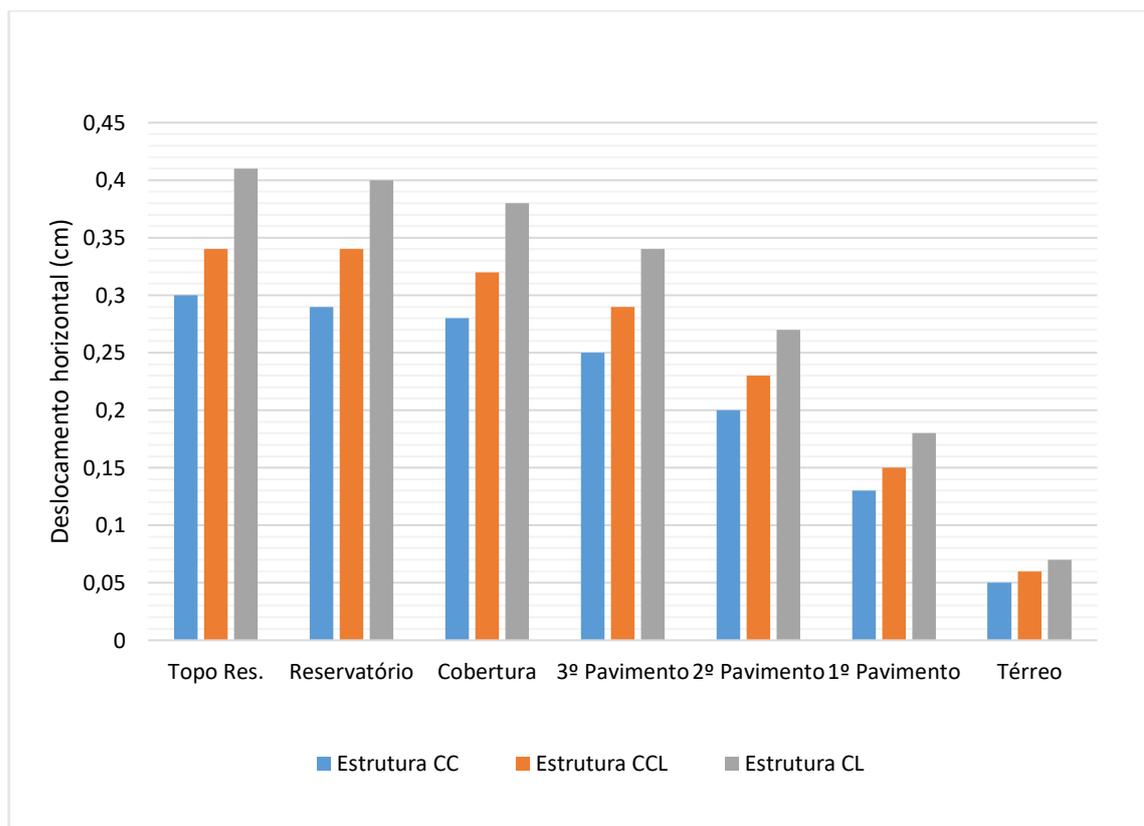
4.1. Deslocamentos horizontais

Os resultados dos deslocamentos horizontais devido os efeitos do vento nas estruturas estudadas são apresentadas abaixo. A Figura 26 apresenta os deslocamentos horizontais das estruturas obtidas quando o vento atua paralelamente à maior dimensão em planta da edificação. A Figura 27 ilustra os resultados obtidos quando o vento atuou perpendicularmente à maior dimensão em planta da edificação.

Figura 26 – Deslocamento horizontais nas estruturas devido a ação do vento em X



Fonte: Autor (2020)

Figura 27 – Deslocamento horizontais nas estruturas devido a ação do vento em Y

Fonte: Autor (2020)

Conforme os resultados obtidos, observa-se que as estruturas estudadas apresentaram deslocamentos horizontais menores que $H/1700$, valor igual a 0,97 cm para uma altura $H=1649,50$ cm, atendendo ao valor mínimo exigido pela NBR 6118 (ABNT, 2014). As estruturas contendo concreto leve apresentaram deslocamentos laterais sempre maiores ou iguais que a estrutura com concreto convencional para uma mesma altura.

Com o vento atuando na direção paralela à maior dimensão em planta do edifício, o deslocamento máximo da estrutura CC, CCL e CL foram iguais a 0,10 cm, 0,12 cm e 0,14 cm, respectivamente. Já para o vento atuando no eixo Y, foi encontrado maiores valores de deslocamento, a estrutura CC apresentou um deslocamento máximo de 0,3 cm, enquanto a estrutura CCL apresentou um deslocamento máximo de 0,34 e a estrutura CL, 0,41 cm.

A estrutura CCL apresentou aumentos nos deslocamentos máximos em relação a estrutura CC de 20% para o eixo X e 13,3% para o eixo Y. Enquanto a estrutura CL apresentou um aumento de 40 % para o eixo X e 36,7 % para o eixo Y. Analisando os resultados, percebe-se que a utilização de concreto leve também nos pilares acarretou em um aumento considerável dos deslocamentos horizontais em comparação a utilização desse material apenas em vigas e lajes, evidenciando a maior importância da rigidez dos pilares na estabilidade da estrutura.

Segundo Silva (2003), que comparou a utilização de concreto leve em elementos estruturais horizontais de um edifício de 15 pavimentos e obteve maiores deslocamentos horizontais, devido ao menor módulo de elasticidade do concreto leve em relação ao concreto convencional, a utilização de concreto leve nos pilares acarretaria no aumento ainda maior dos deslocamentos horizontais. Por essa razão, esse estudo escolheu uma edificação com um menor número de pavimentos para viabilizar a utilização de concreto leve nos pilares, almejando atender aos valores limites impostos pela norma.

As Tabelas 11, 12 e 13 apresentam os deslocamentos horizontais e o deslocamento horizontal relativo obtidos em cada uma das estruturas. Conforme descrito, o deslocamento horizontal relativo é dado pela diferença do deslocamento horizontal de um pavimento pelo deslocamento do pavimento imediatamente abaixo desse. A Tabela 11 apresenta os deslocamentos da estrutura CC considerando a atuação na direção paralela à maior dimensão em planta da edificação, enquanto que a Tabela 12 e 13 apresentam as mesmas informações para a estrutura CCL e estrutura CL, respectivamente.

Tabela 11 – Deslocamento horizontal e deslocamento horizontal relativo da estrutura CC

Pavimento	Vento X		Vento Y	
	Deslocamento Horizontal (cm)	Deslocamento Horizontal Relativo (cm)	Deslocamento Horizontal (cm)	Deslocamento Horizontal Relativo (cm)
Topo Reservatório	0,08	0	0,30	0
Reservatório	0,08	-0,02	0,29	0,01
Cobertura	0,1	0,01	0,28	0,03
Pavimento 3	0,09	0,02	0,25	0,05
Pavimento 2	0,07	0,03	0,20	0,07
Pavimento 1	0,05	0,03	0,13	0,08
Térreo	0,02	0,02	0,05	0,05

Fonte: Autor (2020)

Tabela 12 – Deslocamento horizontal e deslocamento horizontal relativo da estrutura CCL

Pavimento	Vento X		Vento Y	
	Deslocamento Horizontal (cm)	Deslocamento Horizontal Relativo (cm)	Deslocamento Horizontal (cm)	Deslocamento Horizontal Relativo (cm)
Topo Reservatório	0,1	0	0,34	0
Reservatório	0,1	-0,02	0,34	0,02
Cobertura	0,12	0,01	0,32	0,04
Pavimento 3	0,1	0,02	0,29	0,06
Pavimento 2	0,08	0,03	0,23	0,08
Pavimento 1	0,05	0,03	0,15	0,09
Térreo	0,02	0,02	0,06	0,06

Fonte: Autor (2020)

Tabela 13 – Deslocamento horizontal e deslocamento horizontal relativo da estrutura CL

Pavimento	Vento X		Vento Y	
	Deslocamento Horizontal (cm)	Deslocamento Horizontal Relativo (cm)	Deslocamento Horizontal (cm)	Deslocamento Horizontal Relativo (cm)
Topo Reservatório	0,12	0	0,41	0,01
Reservatório	0,11	-0,02	0,4	0,02
Cobertura	0,14	0,02	0,38	0,04
Pavimento 3	0,12	0,02	0,34	0,07
Pavimento 2	0,1	0,03	0,27	0,09
Pavimento 1	0,06	0,04	0,18	0,11
Térreo	0,02	0,02	0,07	0,07

Fonte: Autor (2020)

Os resultados encontrados em ambas estruturas para o deslocamento horizontal relativo apresentam valores inferiores ao mínimo estabelecido pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para cada um dos pavimentos analisados. De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) o deslocamento horizontal relativo deve ser menor que $H_i/850$, onde H_i é a diferença de nível entre dois pavimentos, dessa forma, para os pavimentos com $H_i=280$ cm, o limite foi igual a 0,33cm, no pavimento com $H_i=127$ cm, o limite é igual a 0,15 cm, já no topo de reservatório que possui $H_i=122,5$ cm o limite foi de 0,14 cm.

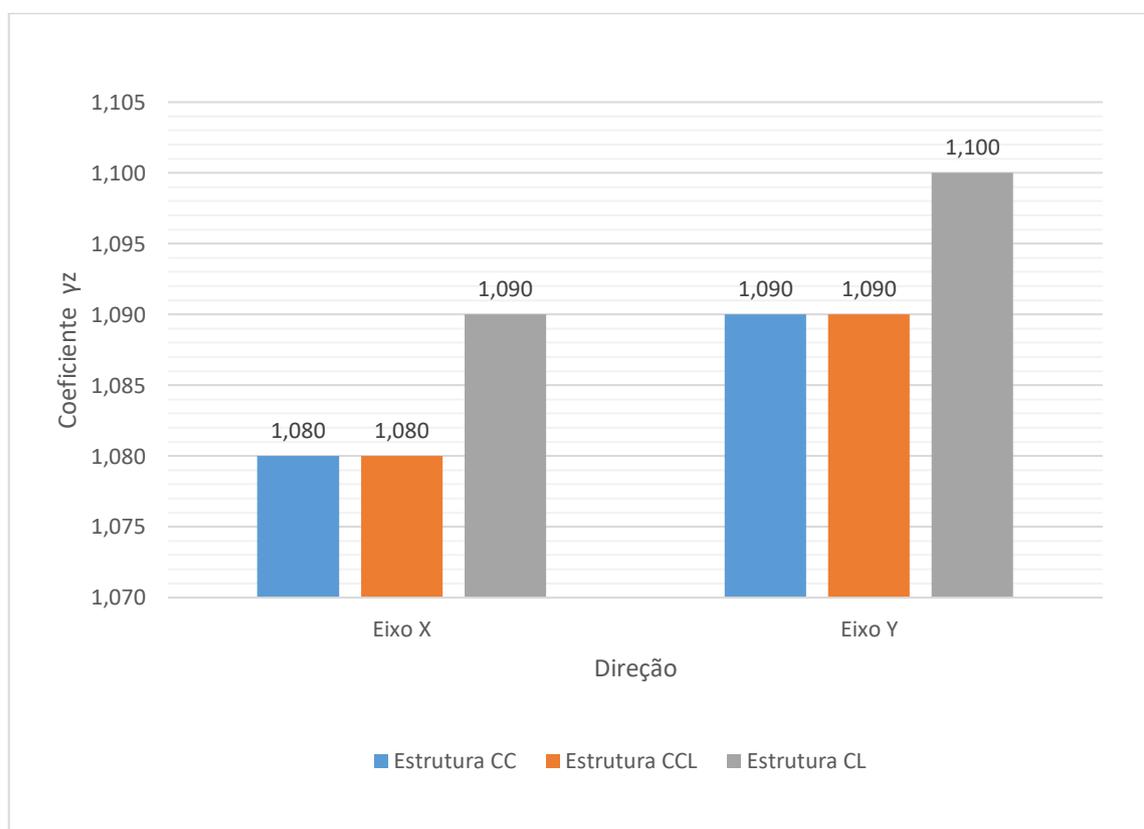
Analisando os deslocamentos relativos máximos para uma altura igual a 280 cm, temos que esse valor foi 12,5% maior na estrutura CCL em relação a estrutura CC. Já para a estrutura CL esse aumento foi de 12,5%.

Por fim, é visto que os deslocamentos horizontais relativos na estrutura CL e CCL são iguais ou maiores aos deslocamentos horizontais relativos encontrados na estrutura CC, seguindo o comportamento encontrado nos deslocamentos horizontais.

4.2. Estabilidade Global

A partir do processamento das estruturas, o programa apresentou o relatório com o parâmetro de estabilidade global. A Figura 28 ilustra os valores de coeficiente γ_z , levando em consideração a atuação do vento paralelamente à maior dimensão em planta do edifício (Eixo X) e a atuação do vento perpendicularmente à maior dimensão em planta do edifício (Eixo Y).

Figura 28 – Valores do coeficiente γ_z



Fonte: Autor (2020)

De acordo com os resultados obtidos, todas as estruturas apresentaram coeficientes γ_z dentro do limite de 1,10. Dessa forma, as estruturas estudadas atenderam as especificações da NBR 6118 (ABNT, 2014) e são classificadas como nós fixos, podendo desprezar-se os efeitos globais de segunda ordem.

Observa-se que as estruturas CC e CCL apresentaram os mesmos valores do coeficiente γ_z nas duas direções estudadas, 1,09 no eixo x e 1,08 no eixo y, entende-se com esse resultado que a utilização de concreto leve apenas nas vigas e lajes tiveram uma pouca influência na estabilidade da estrutura. Já a estrutura CL apresentou uma maior instabilidade quando comparada com as demais estruturas, apresentando valores de coeficientes iguais a 1,10 no eixo x e 1,09 no eixo y, desse modo percebe-se a maior influência do concreto leve na estabilidade global quando se utiliza esse material também nos pilares.

Os resultados do parâmetro de estabilidade global para o eixo X e eixo Y podem ser melhor debatidos com a apresentação do momento de tombamento de cálculo e momento de 2ª ordem de cálculo na Tabela 14.

Tabela 14 – Momentos utilizados no cálculo do parâmetro de estabilidade global (tf.m)

Estruturas	Eixo X		Eixo Y	
	$M_{1,tot,d}$	$\Delta M_{tot,d}$	$M_{1,tot,d}$	$\Delta M_{tot,d}$
CC	34,49	2,78	77,64	5,5
CCL	34,49	2,83	77,64	5,55
CL	34,49	3,24	77,64	6,5

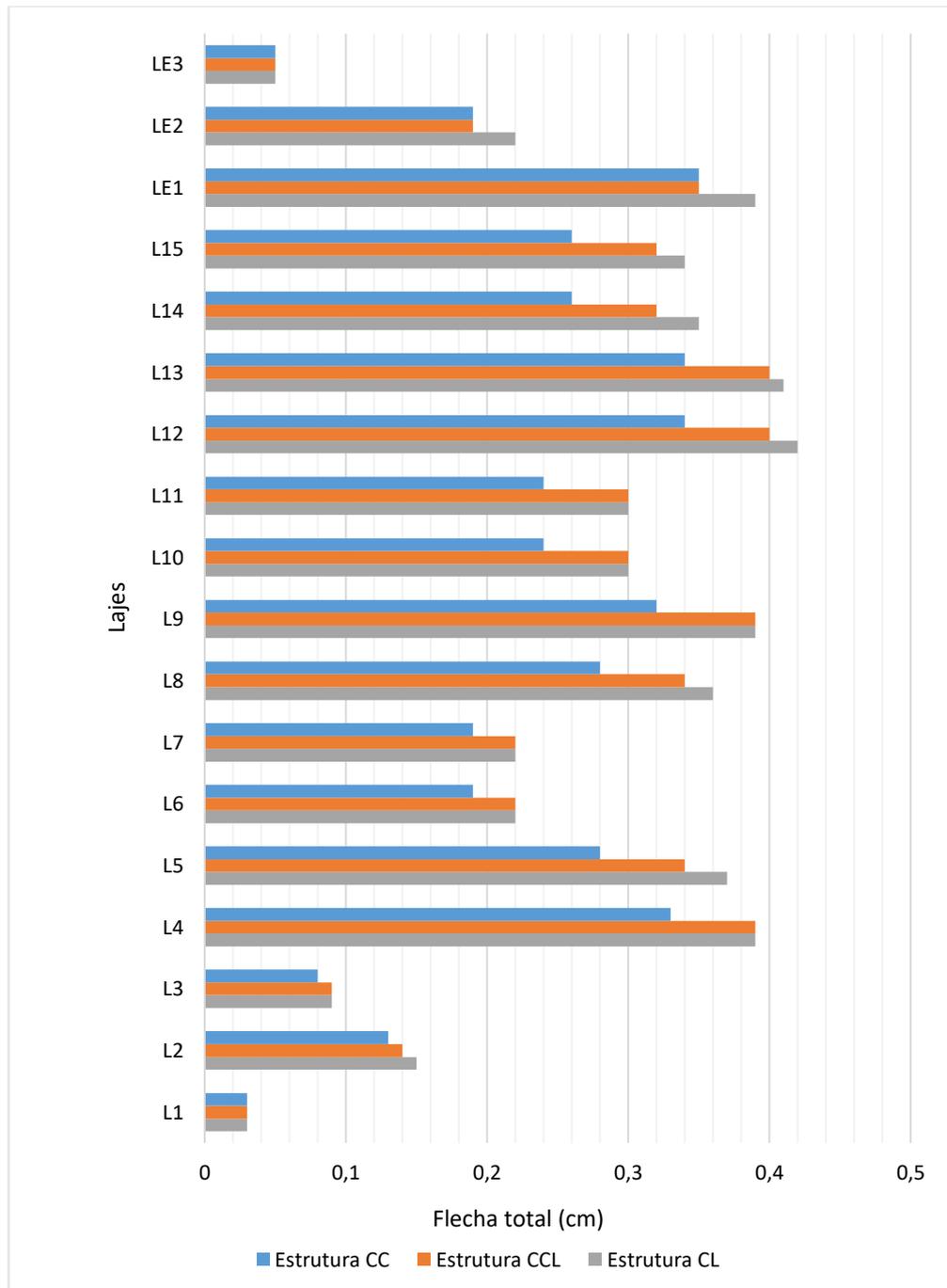
Fonte: Autor (2020)

A partir dos resultados acima é possível analisar que, o momento de tombamento devido a atuação do vento perpendicular a maior dimensão da edificação é 2,26 vezes maior que o momento de tombamento devido a atuação do vento paralelo a maior dimensão da edificação. Desse modo, a maior preocupação no enrijecimento no eixo com maior momento de tombamento de cálculo, aumentando-se as dimensões de vigas e pilares conforme apresentando no tópico das estruturas estudadas, permitiu a redução do coeficiente ($\Delta M_{tot,d}/M_{1,tot,d}$), permitindo um aumento da estabilidade do eixo Y em relação ao eixo X. Sobretudo, os maiores deslocamentos horizontais da estrutura CCL e CL permitem o aumento do momento de 2ª ordem de cálculo, isso acontece devido o menor módulo de elasticidade do concreto leve.

4.3. Deslocamento nas lajes

Para a análise das flechas totais nas lajes foi considerado os resultados do pavimento 3, onde se encontrou as maiores deformações nas estruturas. A Figura 29 apresenta as flechas totais das estruturas CC, CCL e CL.

Figura 29 – Flechas totais máximas nas lajes do pavimento 3



Fonte: Autor (2020)

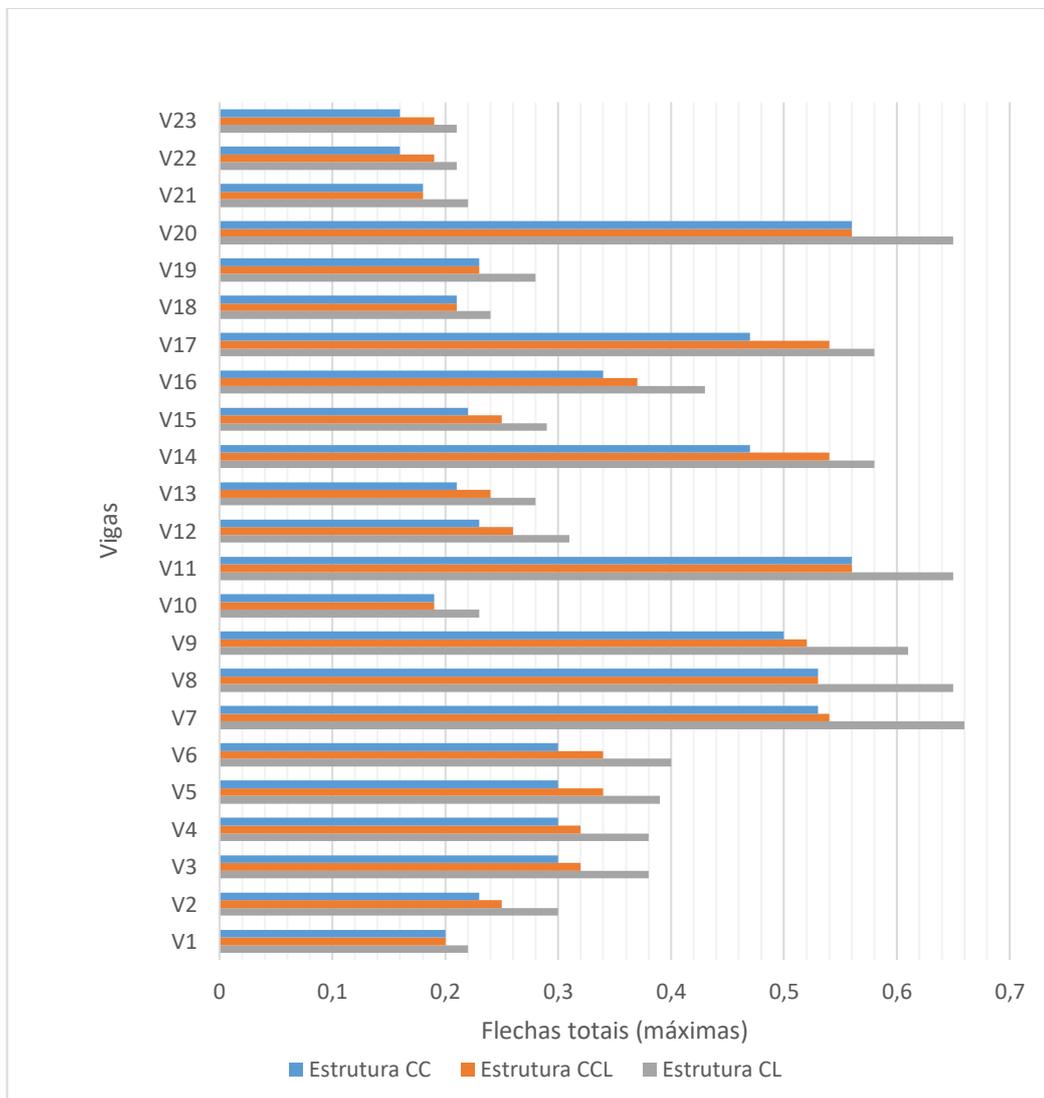
Com esses resultados, observa-se que a utilização de concreto leve nas lajes resultou no aumento das flechas totais nas lajes, apresentando valores iguais ou maiores quando comparado com a estrutura CC. Contudo, todas as lajes apresentaram deslocamentos inferiores a $L/250$, estando dentro do limite de aceitabilidade visual de deslocamentos visíveis em elementos estruturais imposta pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

As lajes com concreto leve na estrutura CL apresentaram os maiores aumentos nas flechas, entretanto com valores aproximados aos apresentados pela estrutura CCL, quando não foram iguais. O aumento nas flechas totais nas lajes da estrutura CL variou entre 0 a 34,6% quando comparando com a estrutura CC, esses valores foram de 0 a 23,1% para uma comparação com as lajes da estrutura CCL.

4.4. Deslocamento nas vigas

Para a análise das flechas totais nas vigas também foi considerado os resultados do pavimento 3, uma vez que apresentou as maiores deformações entre todos os pavimentos, e para a melhor análise dos resultados foi considerado o maior deslocamento para vigas com mais de um trecho. A Figura 30 apresenta as flechas totais das estruturas CC, CCL e CL.

Figura 30 – Flechas totais máximas nas vigas do pavimento 3



Fonte: Autor (2020)

Pode-se observar que as flechas totais das vigas com concreto leve foram sempre iguais ou maiores quando comparadas com as vigas da estrutura CC. No entanto, todas as vigas das estruturas estudadas apresentaram deslocamentos inferiores a $L/250$, estando dentro do limite de aceitabilidade visual de deslocamentos visíveis em elementos estruturais imposta pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

As vigas da estrutura CL apresentaram os maiores deslocamentos, pode-se explicar esse fato pela menor rigidez dos pilares de apoio com concreto leve, contribuindo para maiores deslocamentos. O aumento nas flechas totais nas vigas da estrutura CL variou entre 10 a 34,8 %, enquanto nas vigas da estrutura CCL foi de apenas 0 % a 18,75 %.

4.5. Momentos e esforços cortantes nas vigas

A Tabela 15 apresenta os momentos máximos positivos e negativos que foram encontrados através da análise do diagrama das vigas no pavimento 3.

Tabela 15 – Momentos máximos nas vigas das estruturas

Viga	Momento positivo (kNm)			Momento negativo (kNm)		
	CC	CCL	CL	CC	CCL	CL
V1	5,41	4,58	4,77	-11,94	-9,26	-9,9
V2	12,73	10,99	11,26	-31,24	-26,51	-27,83
V3	8,78	7,69	7,95	-17,83	-16,62	-16,19
V4	5,98	5,21	5,35	-11,48	-10,48	-10,39
V5	6,9	6,12	6,17	-18,96	-15,74	-16,82
V6	7,26	6,43	6,53	-16,83	-13,84	-14,83
V7	4,11	3,46	3,52	-16,1	-14,1	-14,06
V8	3,8	3,19	3,23	-17,1	-14,95	-15
V9	6,93	6,1	6,26	-19,72	-17,34	-17,63
V10	10,47	9,09	9,41	-28,82	-25,45	-26,5
V11	14,02	11,93	12,42	-27,76	-24,54	-24,76
V12	3,04	2,73	2,94	-5,79	-5,65	-5,41
V13	2,84	2,86	2,82	-4,27	-4,18	-4
V14	8,21	7	7,26	-17,4	-16,12	-15,56
V15	2,75	2,16	2,28	-0,24	-0,22	-0,22
V16	14,29	12,35	12,58	-34,35	-30,33	-31,03
V17	8,13	6,93	7,18	-17,49	-16,21	-15,56
V18	2,1	1,75	1,77	-0,19	-0,17	-0,18

V19	3,44	3,17	3,66	-6,57	-5,99	-6,57
V20	13,86	11,81	12,27	-28,25	-24,97	-25,21
V21	11,01	9,47	9,91	-25,75	-22,7	-23,63
V22	8,47	8,33	7,92	-9,57	-10,25	-9,1
V23	8,33	7,59	7,68	-9,88	-9,88	-9,18

Fonte: Autor (2020)

Analisando os resultados, percebe-se que as estruturas CL e CCL apresentaram momentos positivos e negativos menores que a estrutura CC para todas as vigas do pavimento 3. A redução nas cargas pode ocorrer devido a redução da massa específica do concreto leve resultando menores cargas permanentes sobre as vigas.

Contudo, para maior parte das vigas a estrutura CL apresentou um aumento nas cargas quando comparado com a estrutura CCL, isso pode acontecer devido ao acréscimo de esforços devido a ação do vento com a menor estabilidade da estrutura CL quando comparada com as demais. As vigas V11, V16 e V20 apresentaram os maiores valores de momento positivo máximo, enquanto as vigas V2, V10 e V16 apresentaram os maiores valores de momento negativo máximo. Por fim, as reduções medidas obtidos nos momentos positivos para as vigas da estrutura CCL foi de 13,1 %, já para os momentos negativos essa redução foi de 10,8 %.

A Tabela 16 apresenta os esforços cortantes máximos para as vigas analisadas:

Tabela 16 – Esforço cortante máximo nas vigas das estruturas

Viga	Esforço Cortante (kN)		
	CC	CCL	CL
V1	16	14,13	14,12
V2	39,05	34,21	34,88
V3	34,7	31,53	31,39
V4	20,97	21,43	21,2
V5	29,77	25,77	26,61
V6	27,14	23,25	24,07
V7	24,46	21,2	21,09
V8	24,89	21,57	21,49
V9	24,79	22,05	22,35
V10	33,73	30,04	30,5
V11	45,29	39,75	40,31
V12	11,6	10,89	10,73
V13	7,46	6,81	6,65

V14	30,18	26,6	26,69
V15	10,94	8,39	8,97
V16	42,39	37,8	37,82
V17	30,07	26,48	26,48
V18	4,83	3,99	4,04
V19	14,15	13,01	13,65
V20	45,46	39,92	40,47
V21	32,25	28,67	29,12
V22	29,85	26,65	25,62
V23	31,03	27,51	26,51

Fonte: Autor (2020).

Os esforços cortantes máximos nas vigas do pavimento 3 apresentaram menores valores quando utilizou concreto leve na estrutura. Os valores apresentaram o mesmo padrão que os momentos fletores, com um aumento nas vigas da estrutura CL quando comparado com a estrutura CCL. As vigas V11, V16 e V20 apresentaram os maiores esforços cortantes no pavimento 3, a maior redução obtido com emprego de concreto leve nas lajes e vigas propiciou uma redução média de 11,4%, com a redução é possível obter uma economia nas armaduras transversais nas vigas.

4.6. Cargas nas fundações

As cargas nas fundações foram calculadas fazendo-se o somatório das cargas verticais características atuantes nos pilares do topo do reservatório até o térreo, apresentadas pelo programa. Para cada um dos pilares foi considerado as cargas de vento atuante na direção mais desfavorável, a Tabela 17 apresenta as cargas verticais totais nas sapatas associados aos pilares descritos.

Tabela 17 – Carga nas fundações das estruturas por pilar

PILAR	Cargas nas fundações (kN)		
	CC	CCL	CL
P1	168,23	151,16	146,04
P2	233,23	212,23	200,25
P3	152,08	133,79	129,79
P4	181,63	163,05	157,18
P5	211,46	189,03	183,08
P6	274,87	248,5	236,06

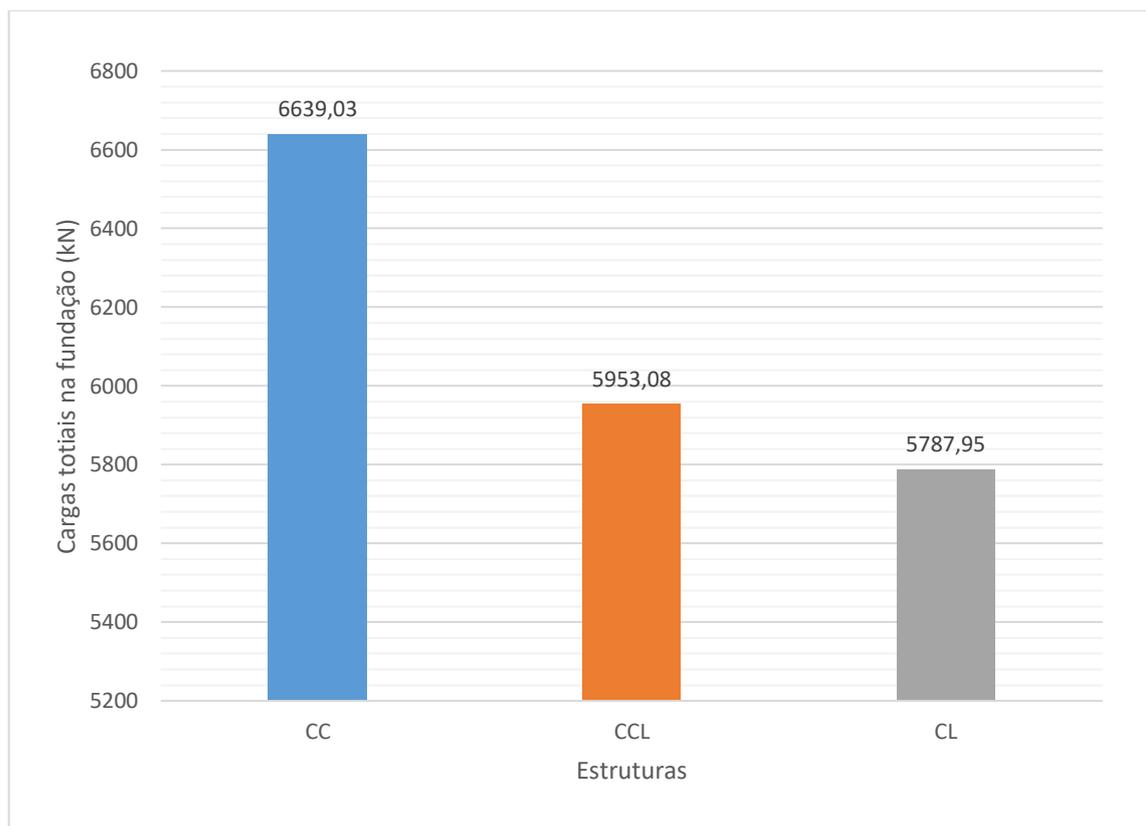
P7	228	198,52	195,54
P8	227,86	201,45	196,35
P9	193,48	178,87	172,48
P10	209	189,01	184,14
P11	203,12	183,08	177,87
P12	280,81	252,87	248,62
P13	206,68	186,56	181,14
P14	203,5	184,73	179,49
P15	192,32	177,88	171,28
P16	263,95	238,96	232,96
P17	299,46	264,13	258,82
P18	232,37	206,05	201,2
P19	340,06	304,44	299,14
P20	229,78	203,59	198,77
P21	304,47	268,88	263,58
P22	256,81	232,25	226,14
P23	237,64	210,37	205,35
P24	237,83	210,49	205,52
P25	169,75	154,17	148,25
P26	218,42	196,44	191,2
P27	299,9	267,21	263,72
P28	217,96	195,99	190,74
P29	164,36	149,38	143,25

Fonte: Autor (2020)

De acordo com os resultados, a utilização de concreto leve nas estruturas resultou na diminuição das cargas totais em todas as sapatas, quando comparado com a estrutura CC. O pilar 19, que possuía o maior carregamento, apresentou a maior redução com a utilização de concreto leve, com uma diminuição de 35,62 kN na estrutura CCL e 40,92 kN na estrutura CL.

Enquanto isso, a menor redução foi apresentada pelo P9, com uma redução de 14,61 kN na estrutura CCL e 21 kN na estrutura CL, entretanto o P29 possui o menor carregamento em todas as estruturas, concluindo-se que não há proporcionalidade entre os valores dos carregamentos e a redução devido o uso de concreto leve.

O impacto da redução das cargas apresentadas pelos pilares das estruturas com concreto leve pode ser melhor debatido através das cargas totais nas estruturas, conforme apresentado na Figura 31.

Figura 31 – Cargas totais nas estruturas

Fonte: Autor (2020)

É possível analisar que as estruturas com concreto leve apresentaram uma redução das cargas totais da edificação, o menor peso específico do concreto leve explica a diminuição das cargas totais com uma maior utilização do concreto leve. A carga total na edificação na estrutura CC foi igual a 6639,03 kN, a estrutura CCL apresentou uma carga total de 5953,08 kN e a estrutura CL uma carga total de 5787,95 kN, representando uma redução de 10,3% e 12,8%, respectivamente.

Sobretudo, pode-se observar que a utilização de concreto leve também nos pilares conferiu uma pequena redução em relação a utilização apenas nas vigas e lajes, essa fato pode ser explicado pelo menor volume de concreto dos pilares quando comparado a soma do volume de concreto das vigas e lajes, e o aumento das forças devido a ação do vento com a diminuição da rigidez da estrutura com o menor módulo de elasticidade do concreto leve.

A redução das cargas na fundação com a utilização do concreto leve pode gerar uma economia no projeto de fundações, podendo reduzir o número de estacas ou aço das sapatas ou blocos, dependendo da solução adotada.

4.7. Quantitativo de materiais

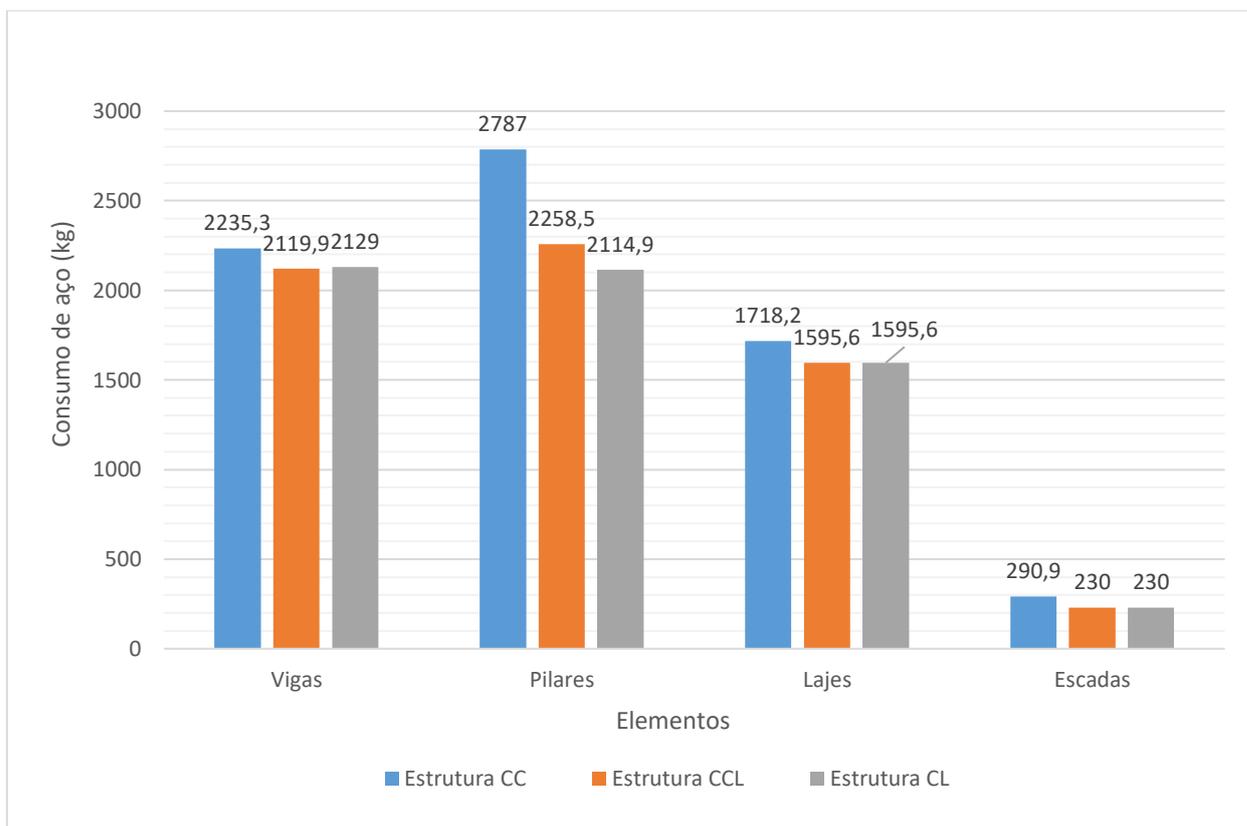
A Tabela 18 apresenta o consumo de concreto e fôrmas emitidos pelo programa, resultantes dos processamentos das estruturas que possibilitou o detalhamento das vigas, pilares, lajes, escadas de toda a edificação. Com o intuito de verificar a variação da taxa de armadura mediante a utilização do concreto leve nas vigas e lajes, os elementos estruturais possuem as mesmas dimensões e conseqüentemente o mesmo volume de concreto e área de fôrma.

Tabela 18 – Quantitativo de materiais utilizados nas estruturas

Elemento	Materiais	Estrutura CC	Estrutura CCL	Estrutura CL
Vigas	Concreto (m ³)	34	34	34
	Forma (m ²)	575,85	575,85	575,85
Pilares	Concreto (m ³)	19,5	19,5	19,5
	Forma (m ²)	365,54	365,54	365,54
Lajes	Concreto (m ³)	49,7	49,7	49,7
	Forma (m ²)	496,97	496,97	496,97
Escadas	Concreto (m ³)	4,8	4,8	4,8
	Forma (m ²)	47,29	47,29	47,29

Fonte: Autor (2020).

Para o aço foi considerado uma taxa de perda de 10%, cálculo realizado pelo próprio programa. A Figura 32 apresenta o consumo de aço obtidos no processamento das estruturas estudadas.

Figura 32 – Comparativo de consumo de aço nos elementos estruturais

Fonte: Autor (2020)

Os resultados apresentados mostram a redução do consumo do aço para as estruturas com concreto leve nas vigas, lajes, pilares e escadas, quando comparado com a estrutura CC.

As vigas da estrutura CL e CCL apresentaram um menor consumo de aço, 2119,9 kg e 2129 kg respectivamente, representando uma pequena redução em relação as vigas do concreto convencional que apresentou um consumo de aço de 2235,3. Observa-se que a estrutura CL apresentou um ligeiro aumento da quantidade de aço com o emprego do concreto leve nos pilares, esse aumento pode ser devido a manutenção do peso próprio das vigas com concreto leve e o aumento das forças devido ao vento em uma estrutura menos rígida.

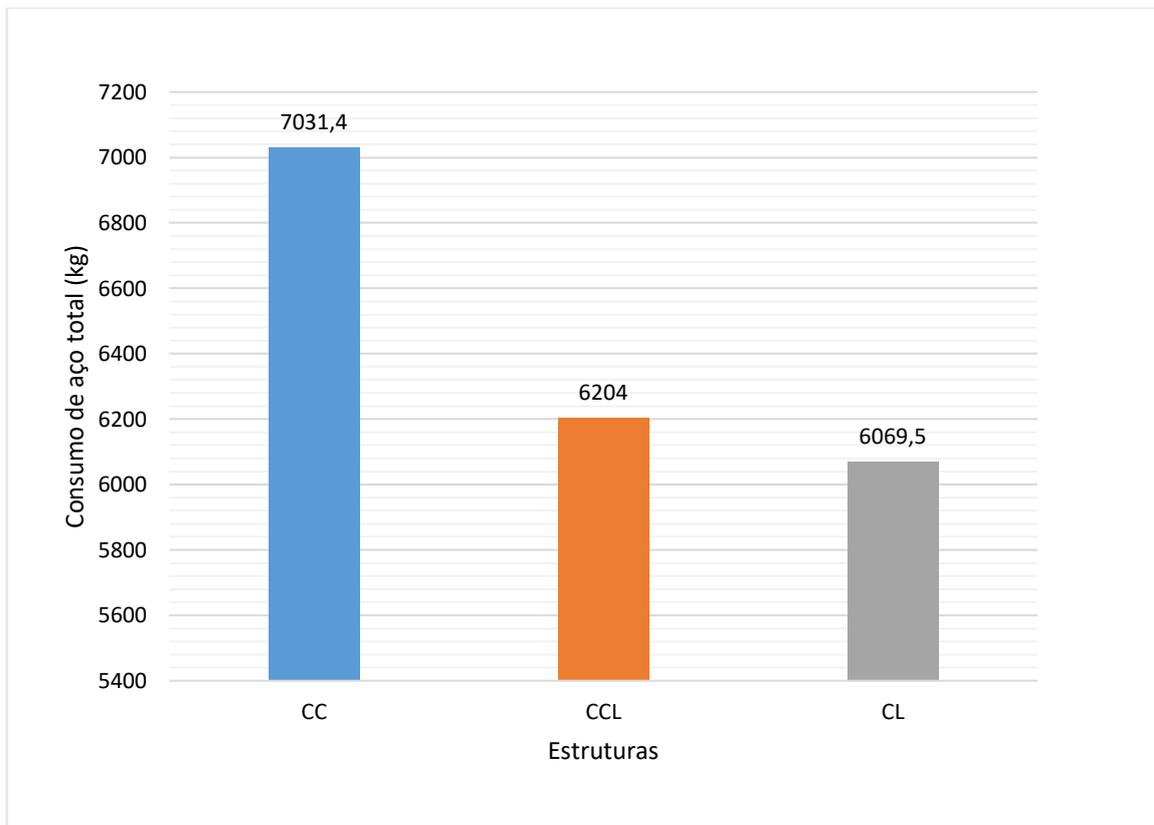
Nas lajes e escadas também houve uma pequena redução na quantidade de armadura nas estruturas com concreto leve. As estruturas CCL e CL apresentaram um consumo de 1595,6 kg nas lajes e 230 kg nas escadas, enquanto a estrutura CC, 1718,2 kg nas lajes e 290,9 kg nas escadas.

A maior redução aconteceu nos pilares, as estruturas CL e CCL apresentaram uma redução considerável quando comparado com a estrutura com concreto convencional em todos os elementos. A estrutura com concreto leve apenas nas lajes e vigas apresentou um consumo

de aço de 2258,5 nos pilares, já a estrutura com concreto leve até nos pilares apresentou um consumo 2114,9, valores menores que 2787 kg apresentados pela estrutura CC.

É possível analisar que para as estruturas estudadas, a utilização de concreto leve nas lajes e vigas possui um maior ganho com a redução da quantidade de aço do que se utilizando concreto leve também nos pilares. A Figura 33 apresentada o consumo total de aço obtido nas estruturas.

Figura 33 – Comparativo de consumo de aço



Fonte: Autor (2020)

Analisando os resultados, percebe-se que as estruturas com concreto leve apresentaram uma economia no consumo de aço quando comparado com a estrutura CC. Com a estrutura CL obteve-se a maior redução, com o consumo total 6069,5, apresentou uma economia de 13,7% em relação a estrutura CC, com um consumo de 7031,4. Já a estrutura CCL apresentou um consumo total igual a 6204 kg, significando uma economia de 11,8% na armação da estrutura. Com esses resultados, pode-se indicar que a utilização de concreto leve na estrutura estudada contribui para a diminuição dos custos deste insumo, e conseqüentemente pode baratear essa solução, a tornando mais viável.

5. CONCLUSÕES

A seguir são apresentadas as conclusões deste trabalho realizadas a partir dos resultados obtidos com a análise das estruturas de um edifício utilizando concreto leve em seus elementos estruturais, vale lembrar que os resultados aqui encontrados estão intimamente ligados com as hipóteses adotadas. Desse modo, chegou-se as seguintes conclusões:

- As flechas totais encontradas para as vigas e lajes utilizando concreto leve foram sempre iguais ou superiores aos mesmos elementos com concreto convencional. Ainda assim, todas as flechas mantiveram-se abaixo dos limites impostos pela NBR 6118 (ABNT, 2014).
- Para as estruturas com concreto leve, no geral houve uma redução nos momentos fletores e esforços cortantes nas vigas, havendo poucos elementos que apresentaram um acréscimo nos valores, quando comparado com o concreto convencional. Entretanto, percebeu-se um aumento nos esforços nas vigas quando foi utilizado concreto leve também nos pilares, desse modo, a utilização de concreto leve apenas nas vigas e lajes contribuiu para uma maior redução dos esforços nesses elementos.
- As cargas verticais nas fundações das estruturas com concreto leve foram inferiores as encontradas na estrutura com concreto convencional. A utilização de concreto leve em toda a estrutura permite uma ligeira redução nas cargas verticais em relação ao uso do concreto leve apenas nas vigas e lajes. Desse modo, a redução das cargas verticais nas fundações proporcionado pelo concreto leve pode gerar uma economia no projeto de fundações.
- As estruturas com concreto leve apresentaram valores de deslocamento horizontal máximo sempre superiores aos valores encontrados para a estrutura utilizando apenas concreto convencional. A utilização de concreto leve também nos pilares contribuiu para o aumento considerável do deslocamento horizontal da edificação, entretanto todas as estruturas estudadas apresentaram deslocamentos horizontais inferiores ao estipulado pela NBR 6118 (ABNT, 2014).
- A utilização de concreto leve contribuiu para a redução do enrijecimento da estrutura. Sobretudo, a utilização de concreto leve teve um menor impacto

na estabilidade global da edificação, enquanto isso, a utilização de concreto leve também nos pilares propiciou o aumento da instabilidade da estrutura.

- A utilização de concreto leve nos elementos contribuiu para uma economia no consumo de aço, principalmente nas armaduras dos pilares. O uso de concreto leve também nos pilares acarretou em um ligeiro aumento no consumo de aço das vigas quando utilizou-se concreto leve apenas nas vigas e lajes.
- Portanto, é tecnicamente viável a utilização de concreto leve nos elementos estruturais da edificação, uma vez que eles apresentaram deslocamentos inferiores ao limite imposto pela NBR 6118 (ABNT, 2014). A utilização de um concreto com menor massa específica propiciou as reduções nas cargas que chegam nas fundações e no consumo de aço. Sobretudo, é necessário fazer um estudo sobre a viabilidade econômica desse material, para determinar os custos.

6. SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

- Analisar o emprego de concreto estrutural leve em elementos estruturais de edifícios com outras tipologias;
- Realizar um estudo sobre a viabilidade econômica do emprego do concreto leve com argila expandida e outros tipos de agregados leves artificiais nas estruturas;
- Estudar os impactos da utilização do concreto leve nos projetos de fundações;
- Realizar um estudo da utilização do concreto leve através de outras metodologias de cálculo de dimensionamento e análise das estruturas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto: Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 12655**: Concreto de Cimento Portland: Preparo, controle, recebimento e aceitação: Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio: procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5738**: Concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa: Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 7480**: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado: especificação. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 8522**: Concreto: determinação dos módulos elásticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 5739**: Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR ISO 6892-1**: Materiais metálicos: ensaio de tração parte 1: método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR NM 35**: Agregados leves para concreto estrutural: especificações. Rio de Janeiro, 1995.

ALVA, G. M. S. **Concepção estrutural de edifícios em concreto armado**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2007. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/2211195-Concepcao-estrutural-de-edificios-em-concreto-armado.html>>. Acesso em 24 de agosto de 2020.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 318. **Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95)**. Detroit, 1995, 369p.

ANDRADE, J. F. et al. Aplicação de métodos de inteligência computacional para a previsão de propriedades mecânicas do concreto de agregado leve. In: IBERO-LATIN AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, XXXVI., 2015, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABMEC, 2015. p. 22-25.

ANGELIN, A. F. **Concreto leve estrutural: Desempenho físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais**. 2014. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Faculdade da Tecnologia da Faculdade Estadual de Campinas, Limeira, 2014.

ARAÚJO, J. M. **Curso de concreto armado**. v. 2, 3 ed. Rio Grande: Editora Dunas, 2010.

ARAÚJO, J. M. Avaliação do parâmetro de instabilidade para os edifícios altos. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n. 15, p. 41-53. 2010,

BARBOSA, M. P.; PEREIRA, K. K. Desenvolvimento de composição de concreto permeável com agregados oriundos de resíduos de construção civil da região de Campinas. In: Encontro de iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, 5., Campinas. **Anais...** Campinas: 2015.

BASTOS, P. S. C. **Fundamentos do concreto armado**. UNESP, Bauru, 2019. Disponível em: <<http://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto1/Fundamentos%20CA.pdf>>. Acesso em: 10 de ago de 2020.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 488 p.

BORJA, E. V. **Efeito da adição da argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis**. 2011. 230 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

CANAHUA, S. F. C. Los beneficios del concreto celular. **Revista Civilízate**. Lima, v.3, n. 5, p. 36-37, 2014.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: segundo a NBR6118:2007. 4 ed. EdUFSCAR, São Carlos, SP, 2014. 415 p.

CASAGRANDE, A. F.; Silva, D. S. **Análise do dimensionamento de pilares de concreto armado pelo método do pilar padrão com rigidez “k” aproximada e pelo método do pilar padrão com curvatura aproximada para efeitos de 2ª ordem**. 2011. 19 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense,

CATÓIA, T. **Concreto Ultraleve estrutural com pérolas de eps**: caracterização do material e estudo de sua aplicação em lajes. 2012. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

CLÍMACO, J. C. T. D. S. **Estruturas de concreto armado: fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação**. 2 ed. Brasília: UnB, 2008.

CORREIA, M. F.; et all., Análise do custo benefício da utilização da argila expandida em pontes de concreto armado. In: Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, X., 2018, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2018.

CORINALDESI, V. MORICONI, G. Use of synthetic fibres in self compacting light weight aggregate concretes. **Journal of building engineering**. v.4, p. 247-254, 2015.

DINIZ, C. W. S.; LAGES, E. N.; BARBOZA, A. S. R. Estabilidade global em sistemas estruturais de edifícios considerando a ligação viga-pilar parede. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**. São Paulo, v. 12, n. 4, p. 705-737, 2019.

DOMAGALA, L. The effect of lightweight aggregate water absorption on the reduction of water-cement ratio in fresh concrete. *Procedia Engineering*, v. 108, p. 206-213, 2015.

EUROCODE 2. Design of concrete structures: part. 1: general rules and rules for buildings. British Standards Institution: United Kingdom, 2004.

FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M.; BEJA, I. A. Agregados para a construção civil. In: ISAIA, G. C.; TUTIKIAN, B. F.; BATTAGIN, I. L. S (Org.). **Materiais de Construção Civil.** 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2017. cap. 16. p.495-538.

FEITOSA, L. A.; ALVES, E. C. Estudo da estabilidade global de edifícios altos com lajes protendidas. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais.** v. 8, n. 2, p. 196-224, 2015.

FERREIRA, C. N. G. **Dimensionamento de elementos estruturais em concreto leve.** 2015. 166 f. Dissertação (Pós-graduado em Estruturas e Construção) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

FRANÇA, A. A. R.; ROCHA, R. O.; FERES, C. I. M. A. Concreto leve estrutural com argila expandida: determinação do traço. **Revista humanidades,** v. 7, n. 2, p. 34-42, 2018.

GOMES, G. S. V. Influência da resistência do betão leve e da taxa de armadura no comportamento da ligação viga-pilar. 2014. 92 f. Dissertação (Mestre em Construção Urbana) – Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, 2014.

HASSOUN, M. N; AL-MANASSER, A. **Structural concrete: theory and designer.** 5 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2012. 1007 p.

HELENE, P; ANDRADE, T. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Materiais de Construção Civil.** 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2010. cap. 29. p.905-944.

HOLSCHEMACHER, K. KIESLICH, H. Upgrading timber floors by innovative lightweight concrete toppings. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL ANALYSIS

OF HISTORICAL CONSTRUCTIONS, IV., 2014, Novo México. **Anais...** Novo México, 2014.

HUBERTO VÁ, M. HELA, R. Durability of lightweight expanded clay aggregate concrete. In: Concrete and Concrete Structures 2013 Conferece. VI., 2013, Terchova. **Proceedings...** Terchova, 2013. p. 2-6.

KIMURA, A. **Informática aplicada em estruturas de concreto armado: cálculos de edifícios com uso de sistemas computacionais.** São Paulo: Editora Pini, 2007. 632 p.

KUMAR, J. D. C.; ARUNAKANTHI, E. The use of light weight aggregates for precast concrete structural members. **International Journal of Applied Engineering Research.** v.13, n.10, p.7779-7787. 2018.

LEMOS, R. M. **Estudo comparativo entre a utilização do concreto convencional e concreto leve no dimensionamento de estrutura de concreto armado.** 2017. 73 f. Dissertação (Especialização em Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

LIMA, C. I. V. et all,. Concreto e suas inovações. **Cadernos de Graduação.** Maceió. v.1, n.1, p. 31-34, 2014.

LI, P.; et all,. **Effects of Aggregate Types on the Stress-Strain Behavior of Fiber Reinforced Polymer (FRP)-Confined Lightweight Concrete.** **Sensors,** v.18, 2018.

LOPEZ, M. **Creep and shrinkage of high performace lightweight concrete:** a multi-scale investigation. Georgia: Georgia Institute of Tecnology. 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto:** Microestrutura, propriedades e materiais. 3 ed. São Paulo: Ibracon. 2008. 674 p.

MEDEIROS, M. G. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. 2011. In. ISAIA, G. C. **Concreto:** ensino, pesquisa e realizações. v.1. 1.ed. São Paulo: IBRACON. Cap.16, p.775-808.

MELO, P. R. **Pré-dimensionamento de estruturas de madeira, de aço e de concreto para auxílio à concepção de projetos arquitetônicos**. 2013. 105 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

MENDES, A. S. et al. Obtenção de concreto leve estrutural pela substituição do seixo rolada por argila expandida. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS, IX., 2016, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2016.

MONCADA, J. E. C. M.; et al. Estudo da adição de argila expandida e EPS como agregados na elaboração de concreto leve. **Revista Teccen**. Vassouras, v. 12, n. 1, p. 02-07, 2019.

MORAIS, P. N. L. **Estudo da influência do teor de argamassa no desempenho de concretos leves auto adensáveis**. 2017. 85 f. Dissertação (Mestre em Tecnologia) – Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2017.

MORAVIA, W. G. *et al.* Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve. **Cerâmica**, São Paulo, v. 52, n. 322, p. 193-199, 2006.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. 5. ed. Harlow: Pearson, 2011.

NUNES, F. W. G. **Resistência e módulo de elasticidade de concretos usados no Rio de Janeiro**. 2005. 110 f. Tese (Mestre em Ciência em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

OBLA, K. H. **Improving concrete quality**. 1 ed. New York: Taylor & Francis Group, 2015.

OSÓRIO, B. P. M. **Concreto leve com pérolas de EPS: estudo de dosagens e características mecânicas**. 2016. 154 f. Tese (Doutorado em Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

PACHECO, J. et al. Considerações sobre o módulo de elasticidade do concreto. In: Congresso Brasileiro de Concreto. LVI., 2014, Natal. **Anais...** Natal, 2014.

PAIXÃO, J. F. M.; ALVES, E. C. Análise de estabilidade global em edifícios altos. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**. Goiânia, v. 13, n. 1, p. 46-83. 2016.

PELIZARO, T. V. G.; CUNHA, J. Pré-dimensionamento de lajes, vigas e pilares de concreto. **Horizonte Científico**, Uberlândia, v. 17, n. 2, 2017.

PEREIRA, K. K.; BARBOSA, M.P.: Desenvolvimento de composição de concreto permeável com agregados oriundos de resíduos de construção civil da região de Campinas. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E INOVAÇÃO, V., 2015, Campinas. **Anais...** Campinas, 2015.

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D.; SANTOS, S. P. Pré-dimensionamento. 2007. In: PINHEIRO, L. M. (Org.). **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. 1 ed. São Paulo: USP.

PINTO, H. A. S. **Estudo do comportamento último à flexão de vigas de betão de agregados leves de argila expandida**. 2015. 184 f. Tese (Doutorando em Engenharia Civil) – Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2015.

PORTO, T. B.; FERNANDES, D. S. G. **Curso básico de Concreto Armado**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

REBELLO, Y. C. P. **Bases para projeto estrutural na arquitetura**. 1 ed. São Paulo: Ziguarte Editora, 2007. 287 p.

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. Concreto leve estrutural. 2011. In. ISAIA, G. C. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. v.2. 1.ed. São Paulo: IBRACON. Cap.42, p.1531-1568.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações**. 1 ed. São Paulo: Pini, 2009. 144 p.

SAMPAIO, Z. L. M.; MARTINELLI, A. E.; GOMEZ, T. S. Formulation and characterization of structural lightweight concrete containing residues of porcelain tile polishing, tire rubber and limestone. **Cerâmica**. v. 63, p.530-535. 2017.

SANTIS, et al. Avaliação da durabilidade de concretos estruturais com agregados leves inovadores utilizando a carbonatação acelerada. In: FABRÍCIO, M. M.; BRITO, A. C.; VITTORINO, F. (Org.). **Avaliação de desempenho de tecnologia construtivas inovadoras: Conforto ambiental, durabilidade e pós-ocupação**. 1 ed. Porto Alegre: ANTAC, 2017, v. 3, p. 349-370.

SANTOS, P. R. **Análise e cálculo de elementos estruturais em concreto armado de um edifício residencial**. 2014. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

SCOBAR, R. L. **Concreto leve estrutural: substituição do agregado graúdo convencional por argila expandida**. 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2016.

SILVA, B. M. M. **Betão leve estrutural com agregados de argila expandida**. 2007. 180 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2007.

SILVA, G. F. **Análise comparativa do projeto estrutural utilizando os softwares eberick e tqs. Estudo de Caso: edifício comercial em Pato Branco – PR**. 2018. 131 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2018.

SILVA, M. D. **Estudo comparativo entre a utilização dos concretos convencional e leve nos elementos horizontais das estruturas de edifícios**. 2003. 152 f. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

SOUZA, D. J.; et al. Obtenção da resistência à compressão do concreto de viadutos localizados na região de Curitiba por métodos de ensaios não destrutíveis: esclerometria e ultrassom. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, XVIII., 2015. Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2015.

SOUZA, M. L. M. **Estudo da fluência e retração na análise de um tabuleiro em vigas múltiplas de uma ponte rodoviária.** 2014. 67 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SUBHAN, T. F. Compressive and tensile strength of expanded polystyrene beads concrete. **Jurnal Smartek.** v. 3, n. 4, p. 227-235, 2005.

TUTIKIAN, B.; ISAIA, Geraldo C.; HELENE, Paulo . Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. In: Geraldo C. Isaia. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia.** 1 ed. São Paulo: Ibracon, 2011, v. 2, p. 1283-1325.

VARGAS, V. C. **Concreto leve:** estudo de dosagem substituindo agregado graúdo convencional pela argila expandida. 2018. 79 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Alto Vale do Rio do Peixe, Caçador, 2018.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas.** São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

WEIRICH, J. B. **Análise da perda de resistência do concreto leve, com argila expandida e fibras de polipropileno, após exposição a elevadas temperaturas.** 2017. 94 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017.