

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ANDRESSA DE ÁVILA FERRAZ

**COMPARAÇÃO DE CUSTOS DE PILARES COM USO DE CONCRETO DE ALTO
DESEMPENHO EM RELAÇÃO AO USO DE CONCRETO CONVENCIONAL EM
UM EDIFÍCIO RESIDENCIAL DE 4 PAVIMENTOS**

CAMPO MOURÃO

2022

ANDRESSA DE ÁVILA FERRAZ

COMPARAÇÃO DE CUSTOS DE PILARES COM USO DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO EM RELAÇÃO AO USO DE CONCRETO CONVENCIONAL EM UM EDIFÍCIO RESIDENCIAL DE 4 PAVIMENTOS

Comparison of columns costs using high performance concrete versus conventional concrete in a 4-story residential building

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Profa. Dra. Jucélia Kuchla Vieira.

Coorientadora: Profa. Dra. Fabiana Goia Rosa de Oliveira.

CAMPO MOURÃO

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ANDRESSA DE ÁVILA FERRAZ

**COMPARAÇÃO DE CUSTOS DE PILARES COM USO DE CONCRETO DE ALTO
DESEMPENHO EM RELAÇÃO AO USO DE CONCRETO CONVENCIONAL EM
UM EDIFÍCIO RESIDENCIAL DE 4 PAVIMENTOS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 28 de novembro de 2022

Jucélia Kuchla Vieira (Orientadora)
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Fabiana Goia Rosa de Oliveira (Coorientadora)
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcelo Rodrigo Carreira
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Valdomiro Lubachevski Kurta
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CAMPO MOURÃO

2022

Dedico este trabalho à minha família, por terem me dado todo o suporte em minha trajetória acadêmica. Em especial, aos meus pais, Edson (*in memoriam*) e Zeli, realizamos um sonho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela oportunidade e privilégio de construir minha jornada acadêmica.

Aos meus pais, Edson, cujas lembranças estarão sempre em minha memória, e Zeli, que de longe se fez sempre presente. Obrigada por depositarem confiança em minha capacidade, serem exemplo e meus maiores incentivadores nessa trajetória.

À toda minha família, por todo suporte material e mental durante os anos de graduação, mesmo em momentos de dificuldade. Todos os esforços e sacrifícios que fizeram foram essenciais para a conclusão dessa etapa tão importante em minha vida.

Aos meus amigos que estiveram presentes durante esses anos, com certeza contribuíram para amenizar momentos de tensão e tornar a jornada mais divertida.

Agradeço aos professores da UTFPR que contribuíram para minha formação, em especial à professora Dra. Jucélia Kuchla Vieira e à professora Dra. Fabiana Goia Rosa de Oliveira, pela disposição e empenho dedicados na orientação deste trabalho. Muito obrigada pela atenção, paciência e conhecimento concedidos.

RESUMO

O concreto armado é o material construtivo mais utilizado na atualidade, sendo constantemente estudadas diversas melhorias, como o desenvolvimento do Concreto de Alto Desempenho. Este tipo de concreto costuma proporcionar menor permeabilidade, maior durabilidade, maiores resistências, diminuição de seções e consumo de materiais, e, conseqüentemente, economia para edificações. No entanto, o elevado custo inicial tem limitado o uso do Concreto de Alto Desempenho a construções especiais e de grande porte. A presente pesquisa buscou analisar se é viável a utilização do Concreto de Alto Desempenho, em substituição ao Concreto Convencional, nos pilares de edifícios de pequeno porte, mais especificamente, de 4 pavimentos. Com o uso de um projeto arquitetônico, foi realizada a modelagem, análise e dimensionamento dos pilares de dois Modelos através do software Scia Engineer, considerando a ABNT NBR 6118. O Modelo I com toda a estrutura em Concreto Convencional 25 MPa e o Modelo II com os pilares em Concreto de Alto Desempenho 50 MPa, mantendo os demais elementos com 25 MPa. Com auxílio da Tabela SINAPI e valores de mercado da região, foi possível comparar os custos dos pilares de cada Modelo, verificando diminuição na quantidade de materiais, o que resultou em uma economia de 15,70% nos pilares com a utilização de Concreto de Alto Desempenho.

Palavras-chave: concreto de alto desempenho; concreto convencional; pilares; comparação de custos.

ABSTRACT

Reinforced concrete is the most used construction material nowadays, and several improvements are constantly being studied, such as the development of High Performance Concrete. This type of concrete usually provides lower permeability, greater durability, higher strengths, reduced sections and consumption of materials, and, consequently, savings for buildings. Nevertheless, the high initial cost has limited the use of High Performance Concrete to special and large buildings. This research aimed to analyze if there is financial viability in the use of High Performance Concrete, replacing Conventional Concrete, in columns of small buildings, more specifically, of 4 floors. Using an architectural project, the columns were modeled, analyzed and designed in two models using the Scia Engineer software, considering the ABNT NBR 6118. The Model I with the whole structure in Conventional Concrete 25 MPa and the Model II with the columns in High Performance Concrete 50 MPa, keeping the other elements with 25 MPa. With the help of the SINAPI table and market values in the region, it was possible to compare the costs of the columns of each model, verifying a decrease in the amount of materials, which resulted in a savings of 15.70% in the columns with the use of High Performance Concrete.

Keywords: high performance concrete; convencional concrete; columns; cost comparison.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Resistências do concreto empregadas nos pilares dos Modelos I e II	32
Figura 2 – Resistência de 25MPa constante e a seção dos pilares é reduzida ao longo da altura – Modelo I; Seção dos pilares constante e a resistência a compressão é reduzida ao longo da altura - Modelo II	33
Figura 3 – Planta Baixa Pavimento Térreo	35
Figura 4 – Planta Baixa Pavimento Tipo	36
Figura 5 – Planta Baixa Pavimento Cobertura	37
Figura 6 – Fachada Lateral Esquerda	38
Figura 7 – Planta de Fôrmas Pavimento Térreo	40
Figura 8 – Planta de Fôrmas Pavimento Tipo	41
Figura 9 – Planta de Fôrmas Pavimento Cobertura	42
Figura 10 – Seção Transversal dos Pilares no Modelo I (dimensões em mm) ..	46
Figura 11 – Seção Transversal dos Pilares no Modelo II (dimensões em mm) .	47
Figura 12 – Modelagem da estrutura no Scia Engineer	47
Figura 13 – Esforços de compressão nos pilares do Térreo do Modelo I.....	48
Figura 14 – Esforços de compressão nos pilares do Térreo do Modelo II.....	49
Figura 15 – Solicitação axial no pilar nº 11 ao longo dos pavimentos (a) Modelo I (b) Modelo II	51
Figura 16 – Área de armadura nos pilares do Térreo de acordo com o Scia Engineer – Modelo I	53
Figura 17 – Seção transversal dos pilares do Pavimento Térreo com armadura – Modelo I.....	56
Figura 18 – Seção transversal do Pilar 11 (a) e do Pilar 17 (b) com armadura – Modelo I.....	57
Figura 19 – Verificação ELU dos pilares do Pavimento Térreo – Modelo I	58
Figura 20 – Área de armadura necessária nos pilares do Térreo – Modelo II....	59
Figura 21 – Seção transversal da maioria dos pilares (a) e pilares 06, 07, 10, 12 e 16 do Pavimento Térreo com armadura (b) - Modelo II	61
Figura 22 – Seção transversal do Pilar 11 (a) e Pilar 17 (b) com armadura - Modelo II.....	61
Figura 23 – Verificação ELU dos pilares do Pavimento Térreo - Modelo II	62

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Edifício do MASP	25
Fotografia 2 – Centro Empresarial Nações Unidas	26
Fotografia 3 – Centro Empresarial PREVINOR	27
Fotografia 4 – Edifício Suarez Trade Center	27
Fotografia 5 – Edifício Banco de Tóquio	28
Fotografia 6 - Edifício E-Tower em São Paulo	29
Fotografia 7 – Edifício E-Tower em São Paulo	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resistência à compressão do CAD em função da relação água/aglomerante.....	21
Tabela 2 – Diferenças entre os pilares das estruturas A e B.....	31
Tabela 3 – Cargas permanentes.....	43
Tabela 4 – Cargas acidentais	43
Tabela 5 – Carga acidental variável: Vento	44
Tabela 6 – Esforços nos pilares do Pavimento Térreo	50
Tabela 7 – Resistências de cálculo.....	54
Tabela 8 – Armaduras dos pilares do Pavimento Térreo – Modelo I	55
Tabela 9 – Armaduras dos pilares do Pavimento Térreo – Modelo II	60
Tabela 10 – Quantificação de material dos pilares – Modelo I	63
Tabela 11 – Quantificação de material – Modelo II	63
Tabela 12 – Taxa de redução dos materiais.....	63
Tabela 13 – Comparação de custos dos pilares entre os Modelos I e II	64
Tabela 14 – Diferença de custo total dos pilares entre os Modelos I e II	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CAR	Concreto de Alta Resistência
CC	Concreto Convencional
f_{cd}	Resistência de cálculo do concreto à compressão
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
f_{yd}	Resistência de cálculo do aço à tração
f_{yk}	Resistência característica do aço à tração
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo Geral	14
2.2	Objetivos Específicos	14
3	JUSTIFICATIVA.....	15
4	REFERENCIAL TEÓRICO	17
4.1	Concreto de Alto Desempenho (CAD)	17
4.1.1	Concreto de Alta Resistência x Concreto de Alto Desempenho.....	18
4.1.2	Dosagem e Controle.....	20
4.1.3	Vantagens e desvantagens do CAD.....	22
4.1.4	A utilização do CAD.....	24
4.2	Estudos de caso	30
5	METODOLOGIA	34
6	RESULTADOS	46
7	CONCLUSÃO	66
	REFERÊNCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

Kaefer (1998, p. 3) retrata em seu trabalho o concreto, em sua natureza básica, como um “material plástico, que é moldado de maneira a adquirir a forma desejada antes que desenvolva um processo de endurecimento, adquirindo resistência suficiente para resistir sozinho aos esforços que o solicitam”. Segundo Pedroso (2009) o concreto possui duas características que o destacam na construção: resistência à água, pois quando comparado a outros materiais de construção, é o que menor apresenta deterioração e plasticidade, o que possibilita maior variedade de tamanho e formas na modelagem. Porém, o concreto simples possui uma limitação devido ao fato de apresentar baixa resistência à tração, fazendo-se necessário associá-lo a outro material que possua esta propriedade elevada, o aço, formando então o concreto armado ou protendido (PORTO; FERNANDES, 2015).

O concreto armado é de suma importância na construção civil, considerando-se que é o material construtivo mais utilizado na atualidade, pois é de fácil execução, com ótimo desempenho, além de ser econômico (PORTO; FERNANDES, 2015).

Além do crescimento populacional e a concentração de pessoas em grandes centros, o aumento das cargas com a realização de edifícios cada vez mais altos acarreta na necessidade de adotar medidas para que pilares de concreto armado possuam dimensões não exorbitantes, e ainda assim atendam aos critérios de resistência necessários para a realização do projeto (TRINDADE, 2017). A partir disso, foram realizados diversos estudos de traço e elaboração de concreto para atingir maiores resistências, adicionando outros tipos de materiais, de modo que se obtenha o Concreto de Alta Resistência (CAR), o Concreto de Alto Desempenho (CAD) ou o Concreto de Ultra Alto Desempenho (CUAD) (TUTIKIAN *et al.*, 2011).

No entanto, os materiais que precisam ser acrescentados ao concreto para atingir melhores propriedades encareceram a mistura. De acordo com Lima (1997), o CAD possui um custo inicial maior que o Concreto Convencional (CC), quando analisado apenas por unidade de volume. Entretanto, estudos mostram que o uso do concreto de alto desempenho ou de alta resistência em grandes obras apresenta uma economia a longo prazo e durante a construção da obra, pois com altas resistências há a diminuição da seção transversal, reduzindo a quantidade de concreto, armadura e, conseqüentemente, de madeiramento para fôrmas.

Para o CAD, a relação água/aglomerante deve ser inferior a 0,40, o que afeta diretamente a trabalhabilidade da mistura, sendo necessário o uso de plastificantes ou superplastificantes (TUTIKIAN *et al.*, 2011). O concreto de alto desempenho se diferencia do concreto convencional devido ao acréscimo de aditivos no traço, segundo Aïtcin (2000, apud BARBOSA, 2021), proporcionando melhores propriedades químicas e mecânicas. As vantagens da aplicação do CAD são econômicas e estruturais, além da elevada resistência à compressão, inclui: redução na seção dos elementos, baixa permeabilidade, baixa porosidade, elevada resistência ao desgaste e possui menor custo com manutenção durante a utilização (AGUIAR, 2000). Além da seleção criteriosa nas matérias primas que constituem um CAD, a dosagem, execução e controle de qualidade são fatores primordiais para alcançar o desempenho almejado (LIMA, 1997).

A presente pesquisa irá analisar se em pequenos edifícios de residência unifamiliar, mais especificamente de 4 pavimentos, será viável financeiramente a utilização de concreto de alto desempenho em substituição ao concreto convencional. O critério adotado neste trabalho para analisar a diferença de desempenho somente dos pilares se deu por estes elementos funcionarem a compressão, diferentemente de vigas, que apesar de apresentarem algumas melhorias com a aplicação do CAD, são elementos sujeitos a esforços de flexão, resultando em tensões de tração, de compressão e cisalhamento. O objetivo da utilização do CAD, além das melhorias que proporciona, é a diminuição do aço para uma estrutura mais econômica, o que praticamente não acontece com lajes e vigas, pois é o aço quem suporta os esforços de tração (ARAÚJO, 2009 apud CIFUENTES, 2017).

O projeto arquitetônico que será utilizado foi desenvolvido e apresentado no Trabalho de Conclusão de Curso de graduação do Engenheiro André V. Schaf (SCHAF, 2018), com a autorização de uso por parte do autor. No presente trabalho, será desenvolvido o dimensionamento estrutural pelo Software Scia Engineer em duas situações: utilizando concreto convencional em todos os elementos, com resistência de 25 MPa, e com uso de concreto de alto desempenho apenas nos pilares, com resistência de 50 MPa, comparando os custos de concreto, armaduras e fôrmas de madeira nos pilares de cada modelo.

2 OBJETIVOS

A seguir serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos que irão direcionar a pesquisa.

2.1 Objetivo Geral

Comparar os custos dos materiais de pilares com uso de Concreto de Alto Desempenho em relação ao uso do Concreto Convencional em um edifício residencial com 4 pavimentos.

2.2 Objetivos Específicos

- Comparar os custos diretos de materiais de pilares usando Concreto de Alto Desempenho com os custos de Concreto Convencional em um edifício de 4 pavimentos;
- Analisar se o uso de Concreto de Alto Desempenho em um edifício de pequeno porte é viável;
- Identificar as vantagens de substituir o Concreto Convencional pelo Concreto de Alto Desempenho em pilares de edificações de 4 pavimentos.

3 JUSTIFICATIVA

Apesar do uso do Concreto de Alto Desempenho ainda não ser disseminado no Brasil, edifícios que tiveram a utilização do CAD obtiveram grandes reduções na seção transversal do pilar, como no caso do edifício Suarez Trade Center (30 andares) em Salvador, com dimensões de 1,20 m x 1,20 m. Caso a resistência característica fosse de 30 MPa (Concreto Convencional), a seção seria em torno de 2,00m x 2,00m (LIMA, 1997). O estudo realizado por Cifuentes (2017) aponta que há uma redução de custo de 8,46% nos pilares com a utilização de um concreto de alto desempenho com resistência de 60 MPa de um edifício unifamiliar de 8 pavimentos e pavimento térreo, quando comparado ao uso de concreto convencional de 25 MPa nos pilares do mesmo projeto. Além disso, indica que o CAD apresenta melhorias em durabilidade, proporcionando então diminuição de gastos com reparos e manutenções a longo prazo.

Almeida (1990 apud LIMA, 1997) afirma que a aplicação deste material em edifícios médios e baixos também resulta em economia na execução dos pilares, de modo que o seu emprego não se restringe a edifícios altos.

Analisar o projeto e técnicas são imprescindíveis em todo tipo de obra, de maneira a verificar a viabilidade de execução. Logo, deve-se considerar se há custo-benefício em determinadas escolhas. De acordo com Barbosa (2021), inicialmente o concreto convencional seria mais viável, porém é necessário avaliar todos os fatores que estão envolvidos, não somente o custo direto inicial. As estruturas possuem um custo considerável de 15 a 20% do valor total da obra, uma economia de 10% nas estruturas resulta numa diminuição de até 2% no custo total da construção (ALBUQUERQUE, 1999). Dessa forma, a escolha do concreto deve ser feita observando todos os benefícios que irá proporcionar à obra, indo além de custo direto e resistência característica.

Deve-se ressaltar que desempenho inclui, além da resistência mecânica, a trabalhabilidade do concreto, a estética e o acabamento que apresenta, a integridade e, um dos fatores de maior relevância atualmente, a durabilidade (TUTIKIAN *et al.*, 2011).

Considerando-se que o concreto armado tem sido um dos materiais mais utilizados na construção civil e a busca por métodos construtivos, que proporcionem economia, resistência suficiente e boa durabilidade, possui uma demanda muito alta,

faz-se necessário o desenvolvimento e a utilização de traços de concreto que apresentem essas melhorias em suas características e propriedades (KAEFER, 1998).

Devido ao alto número de problemas com estruturas danificadas, houve a necessidade da criação de um ramo da engenharia destinado a patologias e recuperação (ARANHA, 1994). Segundo a ABNT NBR 15575-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021), os elementos estruturais devem ser realizados para terem uma vida útil de no mínimo 50 anos atendendo aos critérios de desempenho, com as devidas manutenções periódicas e cuidados por parte do usuário durante sua utilização. Porém, segundo Aranha (1994), tem sido crescente a quantidade de obras novas, com idades em torno de 8 a 10 anos, necessitando de intervenção pois não mais atendem ao desempenho necessário. Helene e Terzian (1992) relatam que as edificações no Brasil possuem desempenho insatisfatório e parte do problema está relacionado com ausência de controle de qualidade no processo de produção. Diante disso, Barata (1998) afirma que o CAD, técnica que exige um maior controle na produção e execução, contribui para que os controles adequados sejam efetivamente realizados pelos trabalhadores envolvidos.

Portanto, a análise do uso de Concreto de Alto Desempenho em edifícios de pequeno porte irá propiciar um direcionamento para a escolha de profissionais da área, podendo fornecer economia aos envolvidos no empreendimento e melhorias no desempenho das estruturas, contribuindo com edificações mais duráveis.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

O concreto é o material construtivo mais consumido no mundo, a estimativa é que o consumo seja de 11 bilhões de toneladas anualmente. O emprego elevado deste material se dá ao fato de ser um composto plástico em estado fresco, facilitando a modelagem, possuir considerável resistência à água, a grande disponibilidade de seus constituintes e oferecer economia satisfatória em seu uso (PEDROSO, 2009).

De maneira a melhorar o comportamento do material, barras de aço são utilizadas para suprir a baixa resistência aos esforços de tração do concreto simples (PORTO; FERNANDES, 2015). Além das importantes características que o destacam, Arnaldo Forti Battagin, chefe dos laboratórios da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), afirma que o concreto armado apresenta menor consumo de energia e emissão de gases e partículas poluentes do que outros materiais da construção civil como aço, alumínio e vidro (PEDROSO, 2009).

Em meados dos anos 60, a maioria dos projetistas e produtores de concreto se mostravam satisfeitos com a resistência a compressão de 15 a 20 MPa, pois era econômico e seguro. Até então não se imaginava que o concreto poderia ultrapassar o aço na construção de edifícios altos, seu uso resumia-se a fundações de grandes edifícios, construções horizontais e para proteção de estruturas metálicas contra fogo (AÏTCIN, 1998). Ainda nesse período, profissionais da área decidiram arriscar em inovar na produção de concreto em Chicago, local onde iniciou o uso significativo do concreto em estruturas maiores (FREEDMAN, 1971 apud AÏTCIN, 1998).

Neste capítulo serão apresentadas informações do Concreto de Alto desempenho, apontando as vantagens e desvantagens, o uso do material no Brasil, a composição que o diferencia do concreto convencional, a comparação de desempenho de ambos, estudos de caso e demais informações necessárias a esta pesquisa.

4.1 Concreto de Alto Desempenho (CAD)

Com a evolução da tecnologia houveram progressos efetivos nas técnicas e no cálculo estrutural, principalmente por programas e softwares computacionais. A partir disso, foram possíveis as idealizações de diversos tipos e alturas de estruturas,

criando a necessidade de desenvolvimento de materiais e métodos mais resistentes para atender às especificações de projeto. O concreto, principal material utilizado nas estruturas, teve que acompanhar essa evolução (TUTIKIAN *et al.*, 2011).

O termo Concreto de Alta Resistência (CAR) é utilizado desde 1950 nos Estados Unidos, época que a resistência à compressão considerada alta era de 34 MPa (BACCIN, 1998). Até a década de 70, havia sentido usar o termo “alta resistência”, pois o traço utilizava os mesmos materiais do concreto convencional, porém com um controle mais rigoroso para atingir valores de resistência maiores que o corrente. Quando superplastificantes começaram a ser utilizados para diminuição na relação água/cimento, descobriu-se que além de elevada resistência à compressão, havia a melhoria de outras características: maior fluidez, baixa permeabilidade, melhor resistência à abrasão, aumento no módulo de elasticidade e maior durabilidade. Logo, o termo deixou de ser o mais adequado para descrever essa nova família de concreto (MALIER, 1992 apud AÏTCIN, 1998). Apesar de não ser de aceitação geral pelo fato de “desempenho” não poder ser mensurado tal qual resistência, a expressão “Concreto de Alto Desempenho” tornou-se cada vez mais empregada para se referir a este modelo de concreto (AÏTCIN, 1998).

O Concreto de Alto Desempenho possui características e propriedades que atendem aos critérios de desempenho de maneira satisfatória e superior àquelas apresentadas no concreto convencional (SHAH; AHMAD, 1994). Por outro lado, Aguiar (2000) ressalta que o devido conhecimento do comportamento do CAD em estruturas é de suma importância para que o projetista não cometa erros de economia ou de segurança.

Aïtcin (1998), em seu livro sobre o concreto de alto desempenho, utilizado como uma das principais referências do CAD até os dias atuais, afirma que não demoraria muito para que a durabilidade do CAD se tornasse mais relevante do que a alta resistência.

4.1.1 Concreto de Alta Resistência x Concreto de Alto Desempenho

Baccin (1998) menciona que não há um valor em comum acordo entre especialistas da área que represente o limite entre concretos de baixa e alta resistência. Para Mehta e Monteiro (1994, apud AGUIAR, 2000), traços que

apresentam f_{ck} (resistência característica do concreto à compressão) acima de 40 MPa são considerados de alta resistência. De acordo com Shah e Ahmad (1994) a definição de alta resistência de um concreto irá depender do período de tempo e do local em questão. Além disso, um CAR pode ser considerado como um CAD desde que atenda de maneira satisfatória outros atributos de desempenho. Em um trabalho mais recente, Paula (2007) afirma que, de maneira geral, nos Estados Unidos são considerados valores acima de 40 MPa, enquanto na Europa adotam resistências superiores a 50 MPa.

No Brasil, ainda não há normatização do CAD, no entanto, a ABNT NBR 8953:2009, destinada a classificar concretos para fins estruturais, apresenta um valor limite de resistência para definir qual é considerado convencional e qual é de alta resistência (Tutikian *et al.*, 2011). A versão mais atualizada da norma, ABNT NBR 8953 que foi publicada em 2015, mantém a seguinte classificação: com resistência característica à compressão de 20 a 50 MPa, com intervalo de 5 MPa, são considerados usuais. Acima de 55 MPa, sendo o primeiro intervalo 5 MPa e os demais de 10 MPa, até 100 MPa, considera-se como alta resistência (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015).

Segundo Baccin (1998) as análises realizadas no concreto apresentavam mudanças significativas não somente na resistência à compressão, mas também na durabilidade, deformação, porosidade, maior resistência a ataque de agentes agressivos, entre outros fatores benéficos a construção. Concluiu-se então que o termo mais correto para designar é “Concreto de Alto Desempenho”, denominado também como CAD.

É de extrema importância ressaltar que um CAD nem sempre é um CAR, pois pode-se obter um concreto com bom desempenho e auto adensável com resistência a compressão de 35 MPa. Do mesmo modo, um CAR pode não ser um CAD, porque pode ocorrer de um concreto de elevada resistência a compressão não atender às outras especificações de adensamento e trabalhabilidade, podendo afetar a concretagem e acarretar no surgimento de falhas (TUTIKIAN *et al.*, 2011).

Ainda de acordo com Tutikian *et al.* (2011, p. 3):

Pelo exposto, a definição de CAR não contempla a de CAD, porque o primeiro enfoca a resistência mecânica como elemento básico da sua constituição, enquanto o segundo abrange todas as propriedades do concreto de modo holístico, focado no resultado final: o máximo de desempenho global.

Levando em consideração as informações supracitadas e o objetivo da pesquisa, entre o CAR e o CAD, será adotado o Concreto de Alto Desempenho para comparação de custos em substituição ao concreto convencional, visando as diversas melhorias que este propicia.

4.1.2 Dosagem e Controle

Segundo Beserra (2005) devem haver cuidados redobrados na produção e utilização do Concreto de Alto Desempenho, necessitando de um controle rigoroso durante os processos. Para a dosagem do concreto de alto desempenho, a base são os mesmos materiais presentes no concreto usual, porém com a relação água/cimento igual ou menor a 0,40, sendo necessária a adição de superplastificantes de alta eficiência e maior controle na seleção desses materiais. Para resistências superiores a 80 MPa, as adições minerais são fundamentais, comumente adota-se a sílica ativa (BACCIN, 1998).

De acordo com Beserra (2005), a manipulação e lançamento do CAD são de extrema importância e necessitam de um controle mais rigoroso do que os Concretos de Resistência Convencional. Outro fator que é preciso atenção são as adições de certos materiais no traço, pois as propriedades do concreto podem ser modificadas (AÏTCIN, 2000 apud BARBOSA, 2021).

Para a elaboração do traço, de acordo com Pinheiro (2007, apud BARBOSA, 2021), além da mistura convencional, há a adição de sílica ativa, metacaulim e aditivos plastificantes. A sílica ativa pode ser substituída por cinza volante ou então resíduo de alto forno.

De acordo com Shah e Ahmad (1994), a escolha dos agregados deve levar em consideração as seguintes propriedades: forma das partículas, distribuição granulométrica, propriedades mecânicas e possíveis reações químicas entre o agregado e a pasta negativa para a ligação de ambos. Os agregados graúdos devem possuir elevada resistência e menor dimensão máxima, fato que contribuirá para maior resistência (BACCIN, 1998). O uso de materiais com menores dimensões contribui para a diminuição de vazios, acarretando em uma menor permeabilidade e, conseqüentemente, maior resistência mecânica e maior durabilidade (BARATA, 1998).

Jucá *et al.* (2001) observam que não há dificuldade para utilizar o método de dosagem desenvolvido por Mehta e Aïtcin, após desenvolver 4 traços com alguns ajustes de materiais disponíveis na região. Apesar de apenas um traço ter atingido à resistência, os demais obtiveram resultados próximos, muito provavelmente devido as alterações. Logo, pode-se estabelecer uma fácil adaptação do traço de acordo com cada região e os materiais disponíveis.

Baccin (1998) afirma que os materiais para a obtenção do CAD são os seguintes:

- Cimento Portland comum;
- Sílica ativa (8 a 10% do peso do cimento);
- Superplastificante (5 a 20 litros/m³);
- Agregado graúdo (dimensão máxima de 10 a 12 mm);
- Agregado miúdo (módulo de finura entre 2,7 e 3,2);
- Relação água/aglomerantes de 0,25 a 0,30.

Na literatura, utiliza-se a relação água/aglomerante para diferenciar o usual daquele considerado de alto desempenho. Para Aïtcin (1998), a relação água/cimento é limitada para concretos convencionais, pois o CAD utiliza de outros materiais cimentícios, sendo necessário o uso de uma relação que irá abranger todos esses materiais: água/aglomerante. O valor dessa relação para um concreto de alto desempenho deve ser abaixo de 0,40. A Tabela 1 exhibe qual a faixa de resistência à compressão do concreto de acordo com a relação água/aglomerante.

Tabela 1 – Resistência à compressão do CAD em função da relação água/aglomerante	
a/ag	Faixa de resistência à compressão (MPa)
0,40 – 0,35	50 – 75
0,35 – 0,30	75 – 100
0,30 – 0,25	100 – 125
0,25 – 0,20	> 125

Fonte: Adaptado de AÏTCIN (1998)

A cura é uma etapa de grande importância para se obter um concreto de qualidade, pois afeta diretamente na durabilidade da estrutura. Quando feita corretamente, hidrata os componentes do cimento durante o endurecimento e reduz a retração do concreto (BATTAGIN *et al.*, 2002).

Beserra (2005) realizou uma pesquisa comparando os resultados de corpos de prova de CAD com variados tipos de cura em um ambiente seco e quente. Os corpos de prova que foram expostos a cura úmida e aspersão de água obtiveram melhores resultados nas propriedades mecânicas quando comparados com aqueles que ficaram ao ar (sem cura). Para classes de resistência à compressão de 60, 80 e 100 MPa, a cura úmida foi a que mais influenciou no ganho de resistência à compressão e à tração na flexão. O módulo de deformação não obteve diferenças significativas com a variável cura. Concluiu que, em cura úmida, o CAD apresenta melhor ganho de resistência nas primeiras idades. A partir de 14 dias de cura, não há influência do contato com a água, pois o CAD já atingiu altas resistências e baixa permeabilidade.

4.1.3 Vantagens e desvantagens do CAD

Com o CAD há a possibilidade de construir edifícios com vãos maiores, além de reduzir a quantidade e a seção dos pilares, característica esta interessante para garagens e subsolos. Em consequência, proporciona estruturas mais leves e alivia os esforços nas fundações (AGUIAR, 2000). Com a diminuição da quantidade e seções de pilares, há um menor volume de concreto e menor superfície de fôrmas (BACCIN, 1998).

Atualmente, as normas de projeto de estruturas de concreto consideram a durabilidade como um dos aspectos de maior relevância, com exigências cada vez mais rígidas. Tais requisitos estão presentes tanto na fase de projeto quanto na fase de execução da obra (ARAÚJO, 2014). De acordo com Aïtcin (1998), durabilidade do concreto é uma expressão utilizada para caracterizar a resistência do material a ataques físicos ou de agentes químicos, em termos gerais, não existindo método para quantificar essa propriedade.

Barata (1998) afirma que há a tendência de acreditar que somente por elevar a resistência do concreto, este será um material com maior durabilidade, entretanto, exemplos práticos apontam uma grande quantidade de deterioração de maneira prematura nas estruturas, sendo necessária uma avaliação mais ampla nas condições de exposição e carregamento.

Aïtcin (1998) aponta que para tornar o concreto mais resistente a agentes externos, é necessário que seja o mais compacto e impermeável possível. A baixa porosidade e permeabilidade resulta em um concreto com maior durabilidade e, para alcançar este feito, deve-se obter uma baixa relação água/aglomerante, e não uma alta resistência à compressão. Essa relação é um dos principais fatores para a durabilidade do concreto, mas não o único. O engenheiro deve se atentar para as condições as quais a estrutura estará sujeita durante o uso e selecionar os materiais apropriados para a elaboração adequada do concreto, além do cuidado com a concretagem e cura.

Segundo Baccin (1998) o CAD apresenta baixas deformações causadas por retração, deformação imediata ou fluência, e elevada resistência ao desgaste ou abrasão. Há também o aumento do módulo de deformação longitudinal, o que resulta em maior rigidez, característica interessante para pilares de concreto armado. Devido a maior fluidez, favorece o lançamento e compactação, aspectos que facilitam na execução, principalmente em grandes estruturas que possuem quantidades exorbitantes de armaduras. Esta condição é possível em consequência do uso de superplastificantes. Outra vantagem do CAD é sua excelente aderência a concretos já endurecidos, podendo ser empregado em obras de reparo de maneira satisfatória.

Além do menor consumo de materiais e de possuir maior durabilidade, há o aproveitamento de resíduos industriais na dosagem, contribuições com elevado potencial ecológico na utilização do CAD. Portanto, o caráter socioambiental é um fator aliado ao uso do Concreto de Alto Desempenho, contribuindo para um modelo de construção mais sustentável (BARBOSA, 2021).

Com a aplicação do Concreto de Alto Desempenho é possível aprimorar diversas propriedades de um dos métodos construtivos que mais tem sido utilizado. Contudo, assim como qualquer outro material, possui desvantagens e limitações, apresentadas a seguir.

Apesar da crescente quantidade de estudos e pesquisas sobre o concreto de alto desempenho e suas propriedades, a ausência de procedimentos de cálculos e critérios de projeto recomendados pela Norma Brasileira é um obstáculo para projetistas, pois a norma abrange critérios baseados em resultados obtidos com experimentação em concretos de baixa resistência. Há a necessidade de reavaliação da norma em consequência da mudança de propriedades, características e

comportamentos do concreto de alto desempenho quando comparado aos concretos de baixa resistência (BACCIN, 1998).

Aguiar (2000) afirma que um comportamento do CAD que causa preocupação aos projetistas de estruturas é a falta de ductilidade, fator que é ainda mais relevante em elementos submetidos a compressão (centrada ou excêntrica), pois a ruptura da peça tende a ocorrer sem aviso prévio, tal qual materiais frágeis. Apesar de não haver precauções adicionais nos códigos de países que utilizam o CAD com elevada frequência, há a sugestão de adotar encurtamento último menor do que o relativo aos convencionais, ou então confinar o concreto com armaduras transversais e longitudinais. Ainda de acordo com o autor, o diagrama-tensão-deformação possui diferenças consideráveis, gerando dúvidas na distribuição de tensões de compressão na seção.

Portanto, cabe ao engenheiro projetista analisar quais são as condições de carregamento e exposição da estrutura, as necessidades e aspectos do projeto para a escolha do tipo de concreto e os materiais que irão compor o traço. Além disso, deve-se observar o cuidado com a dosagem, controle e cura, etapas de extrema importância para um bom resultado com o CAD, tal como apresentado acima.

4.1.4 A utilização do CAD

O concreto de alto desempenho tem sido muito estudado e utilizado nos últimos anos, devido às excelentes características que o constituem, tais como: elevada resistência, boa trabalhabilidade e grande durabilidade. Possuem vantagens econômicas e estruturais, pois proporcionam a redução da seção transversal dos elementos de concreto, característica interessante para pilares; possuem baixa porosidade, devido a utilização de materiais com menores granulometria, baixa permeabilidade, elevada resistência ao desgaste e menor tempo e custo de manutenção (AGUIAR, 2000).

Baccin (1998) afirma que o CAD é utilizado em diferentes tipos de construções devido possuir uma grande resistência e boa durabilidade, obras como edifícios, pontes, plataformas de petróleo, entre outras aplicações especiais que exigiam propriedades além do convencional.

É possível encontrar grandes construções no Brasil que utilizaram o CAD e obtiveram bons resultados, principalmente de resistência à compressão (AGUIAR, 2000). De acordo com Hartmann e Helene (2003) há profissionais bem capacitados para alcançar este feito, como empresas de concreto pré-misturado e centros de pesquisas, tanto que o concreto de alto desempenho tem se tornado realidade no país nos últimos anos.

Desde a década de sessenta tem surgido edificações em concreto armado com elevadas resistências no Brasil, como por exemplo o edifício do Museu de Arte de São Paulo Assis Chateaubriand (MASP) em São Paulo (Fotografia 1), com resistência característica à compressão aos 28 dias de 45 MPa. O Centro Empresarial Nações Unidas (Fotografia 2), também localizado em São Paulo, obteve ganhos significativos de espaços nos pisos inferiores devido à aplicação de concreto com resistência à compressão de 50 MPa nos pilares (AGUIAR, 2000).

Fotografia 1 - Edifício do MASP



Fonte: O MASP... (2018)

Fotografia 2 – Centro Empresarial Nações Unidas

Fonte: SP Corporate (c2021)

A capital da Bahia, Salvador, é outra cidade brasileira que se destaca em números de obras com utilização do CAD. Em 1992, o Centro Empresarial PREVINOR (Fotografia 3) teve seus pilares de canto e os capitéis confeccionados com concretos de $f_{ck} = 60$ MPa. O Edifício Suarez Trade Center (Fotografia 4), concluído em 1994, teve em seus pilares centrais e nos capitéis dos 11 primeiros pavimentos a mesma resistência de 60 MPa. Nos demais pavimentos, o f_{ck} foi de 30 MPa, totalizando os 30 pavimentos da construção (AGUIAR, 2000). Em 1998, Leite e Miranda (1998, apud AGUIAR, 2000) compararam os custos relativos deste edifício com 20 MPa, 30 MPa e 60 MPa, resultando em um custo relativo de 1,37, 1,22 e 1,0, respectivamente. Supondo que o edifício houvesse sido construído com $f_{ck} = 20$ MPa nos elementos estruturais já citados, teriam sido 37% mais caros.

Fotografia 3 – Centro Empresarial PREVINOR



Fonte: Aguiar (2000, p. 5)

Fotografia 4 – Edifício Suarez Trade Center



Fonte: Aguiar (2000, p. 6)

Similarmente, Leite e Miranda (1998, apud AGUIAR, 2000) analisaram outro edifício em Salvador, o Banco de Tóquio (Fotografia 5) com 16 pavimentos. Os 5 pavimentos inferiores tiveram os pilares centrais e capitéis com resistência característica à compressão de 60 MPa, enquanto os outros 11 pavimentos tiveram de 30 MPa. Concluíram que essa decisão nos primeiros 5 pavimentos resultou no dobro de vagas disponíveis na garagem desta edificação, comparado a utilização de f_{ck} de 20 MPa (AGUIAR, 2000).

Fotografia 5 – Edifício Banco de Tóquio



Fonte: Aguiar (2000, p. 7)

O edifício E-Tower, localizado na cidade de São Paulo, é uma das principais construções brasileiras em que foi utilizado o CAD (Fotografias 6 e 7). O f_{ck} de projeto inicialmente era de 40 MPa, valor que era considerado alto para os padrões nacionais. No entanto, para melhor aproveitamento da arquitetura, seria necessário diminuir as

dimensões dos pilares. Após cálculos estruturais serem analisados e refeitos, o f_{ck} adotado foi de 80 MPa. O vão a ser vencido no estacionamento foi outro fator considerado para adotar o CAD no empreendimento, respeitando o Código de Obras da cidade de São Paulo e a circulação adequada dos veículos (HARTMANN; HELENE, 2003).

Fotografia 6 - Edifício E-Tower em São Paulo



Fonte: E-Tower ([s.d.])

Ensaio em corpos de prova resultaram em um f_{ck} de 115 MPa, acima do que havia sido calculado, com resistência média de 125 MPa nos pilares. Ensaio realizado após 28 dias obteve 149,5 MPa e, aos 63 dias, a resistência à compressão chegou a 155,5 MPa, valores que quebraram o recorde mundial no uso de concreto colorido de alto desempenho, dosado em central e aplicado em obra (HARTMANN; HELENE, 2003).

Fotografia 7 – Edifício E-Tower em São Paulo



Fonte: E-Tower ([s.d.])

4.2 Estudos de caso

Barbosa (2021) realizou uma pesquisa comparando os custos diretos de uma estrutura de concreto com a utilização de CC e CAD. O objeto de estudo foi um projeto de uma estrutura real de um edifício de 18 pavimentos, o qual teve uma única alteração feita: f_{ck} . Por meio de modelagem em software, pôde obter resultados comparando o modelo de 25 MPa com o modelo de 50 MPa. A autora concluiu que o custo geral dos insumos da estrutura não resultou em redução com a utilização do CAD no lugar do CC. No entanto, analisando separadamente, foi possível verificar no uso do CC um custo de 2,67% a mais de fôrmas e 12,96% a mais de aço. Apesar da estrutura de CAD ter tido um concreto 49,71% mais caro do que a estrutura de CC, obteve uma redução no volume de concreto de 19,08%. Ou seja, característica que irá reduzir tempo de execução na obra, mão de obra, alugueis de fôrmas, entre outros

ganhos de produtividade que afetam outros custos da construção. Além disso, com menor volume de concreto tem-se menor peso próprio, fato que contribui para toda a estrutura e reduz os esforços nas fundações. Outra vantagem obtida por Barbosa (2021) foi a diminuição da seção dos pilares. A maior parte destes elementos tiveram redução de 28,6%, com alguns reduzindo até 55,2%, resultando em maior área útil, uma contribuição de grande relevância para edifícios com garagens. Todavia, o objetivo da pesquisa foi do ponto de vista técnico e econômico, concluindo que o CAD, neste estudo, não apresentou vantagem financeira no valor final da estrutura em termos de custos diretos.

Em contrapartida, Cifuentes (2017) analisou um edifício de 8 pavimentos com um modelo adotando concreto 25 MPa nos pilares, denominado de estrutura A, e outro modelo com 60 MPa, estrutura B. Em ambos os modelos as lajes e vigas foram mantidas com concreto convencional de 25 MPa. Outro método adotado pelo autor foi a variação da seção transversal dos pilares, apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Diferenças entre os pilares das estruturas A e B

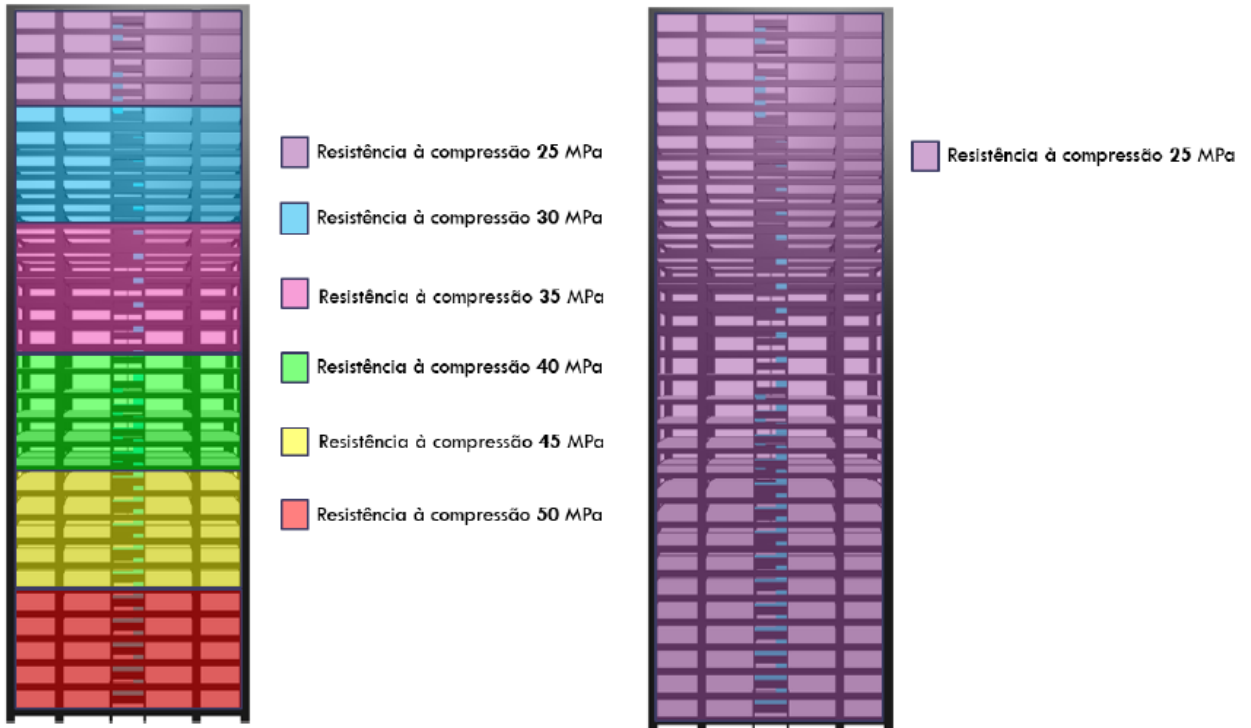
Estrutura	Estrutura A	Estrutura B
Resistência do Concreto (MPa)	25	60
Pilares que sustentam o reservatório superior (cm)	20x70	20x60
Demais pilares	20x50	20x40 (térreo até 4º pavimento) 20x30 (5º até 8º pavimento)

Fonte: Cifuentes (2017, p. 42)

Após analisar os resultados, Cifuentes (2017) verificou uma redução de 47,53% da quantidade de aço dos pilares com CAD, ocasionando uma economia de 47,69% com este material. Do mesmo modo, houve uma redução de 15,39% no uso de fôrmas, com uma economia de 15,39%. Por outro lado, apesar do concreto ter apresentado uma redução de 21,40% do volume, houve um aumento de custo de 33,10%, devido ao CAD ser mais caro que o CC. O autor concluiu então que, apesar da redução de consumos de materiais, os custos de produção dos dois modelos apresentam uma pequena diferença. Ainda assim, a estrutura de CAD ocasionou uma economia de 8,46% no custo total dos pilares. Logo, a economia de custos na estrutura, a redução da seção transversal e a durabilidade são fatos que justificam o uso do CAD em edificações de grande e médio porte.

Santos *et al.* (2015) compararam um edifício de 30 pavimentos com toda a estrutura com uso de concreto 25 MPa com um modelo variando a resistência à compressão dos pilares ao longo dos pavimentos, conforme Figura 1.

Figura 1 – Resistências do concreto empregadas nos pilares dos Modelos I e II

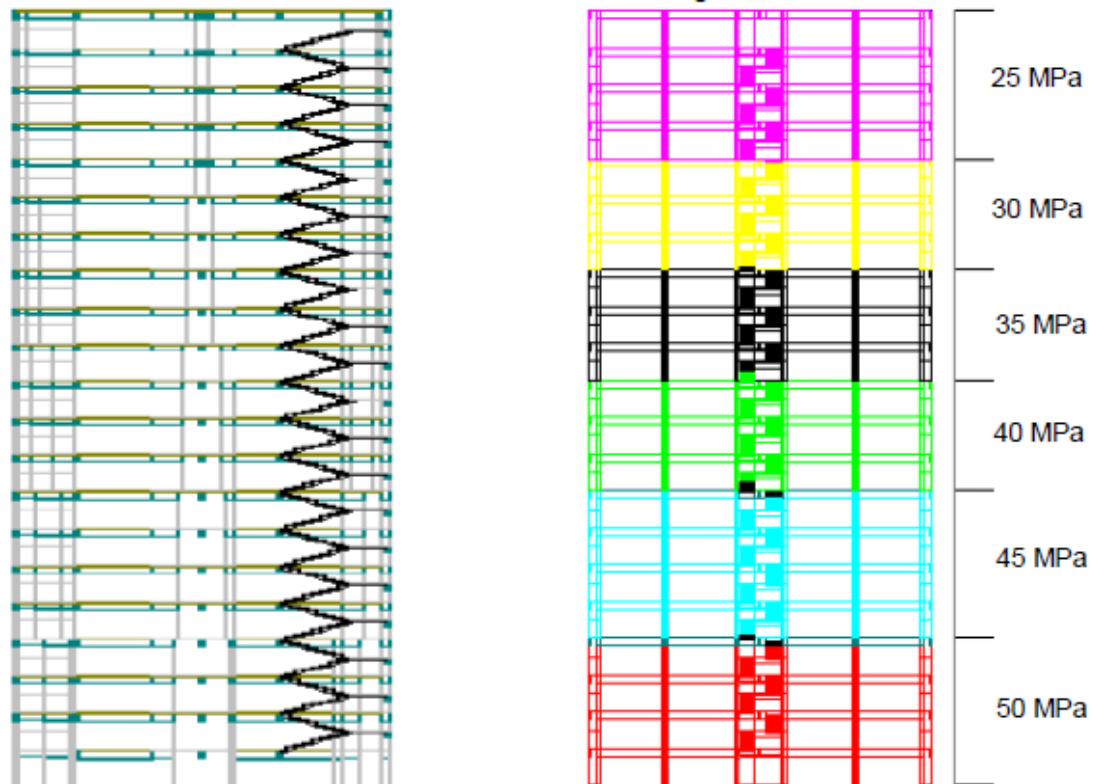


Fonte: Santos *et al.* (2015, p. 8)

Santos *et al.* (2015) verificaram uma redução de 42% de aço no Modelo I, resultando em um custo 40,77% menor que o Modelo II. De mesmo modo, notou a diminuição de custos de fôrmas de madeira e de concreto de 13,52% e 20,10%, respectivamente. Comparando os valores totais de ambos os modelos, observou uma economia nos pilares de 30,20% com f_{ck} variável ao longo da altura. Analisando a estrutura toda, essa economia foi de 10,70%, concluindo que o uso racional de CAD proporcionou ganhos significativos à estrutura. Além da diminuição do consumo de materiais e economia na estrutura, o modelo com CAD possibilitou seções transversais de pilares mais esbeltas, conseqüentemente maior área útil e o aumento da durabilidade dos elementos estruturais.

De maneira semelhante, Reinert *et al.* (2015) compararam um edifício de 21 pavimentos com utilização de CC e CAD, com f_{ck} variável ao longo dos pavimentos, conforme Figura 2. No Modelo I as seções dos pilares foram variáveis e o f_{ck} constante, enquanto no Modelo II foi adotado o contrário.

Figura 2 – Resistência de 25MPa constante e a seção dos pilares é reduzida ao longo da altura – Modelo I; Seção dos pilares constante e a resistência a compressão é reduzida ao longo da altura - Modelo II



Fonte: Reinert *et al.* (2015, p. 6)

Concluiu-se que houve a diminuição dos insumos dos pilares, com redução de custo de 26,09% para aço e 8,46% de fôrmas de madeira. No entanto, o custo do CAD foi maior, mesmo com a redução de volume. Analisando os custos de cada caso, o CAD apresentou uma economia de 14,60% dos pilares e 6,35% da estrutura total (Reinert *et al.*, 2015).

Valin *et al.* (2014) realizaram uma análise de viabilidade do CAD em substituição ao CC em Cuiabá – MT, utilizando corpos de prova com traços de concreto usual e de elevado desempenho, levando em consideração os custos locais e as características que ambos fornecem. Constatou que o CAD teve um custo maior em confecção, no entanto, apresentou elevada resistência, menor teor de absorção por capilaridade e imersão, fatores que contribuem diretamente para a durabilidade, obtendo então vantagem na relação de custo/benefício.

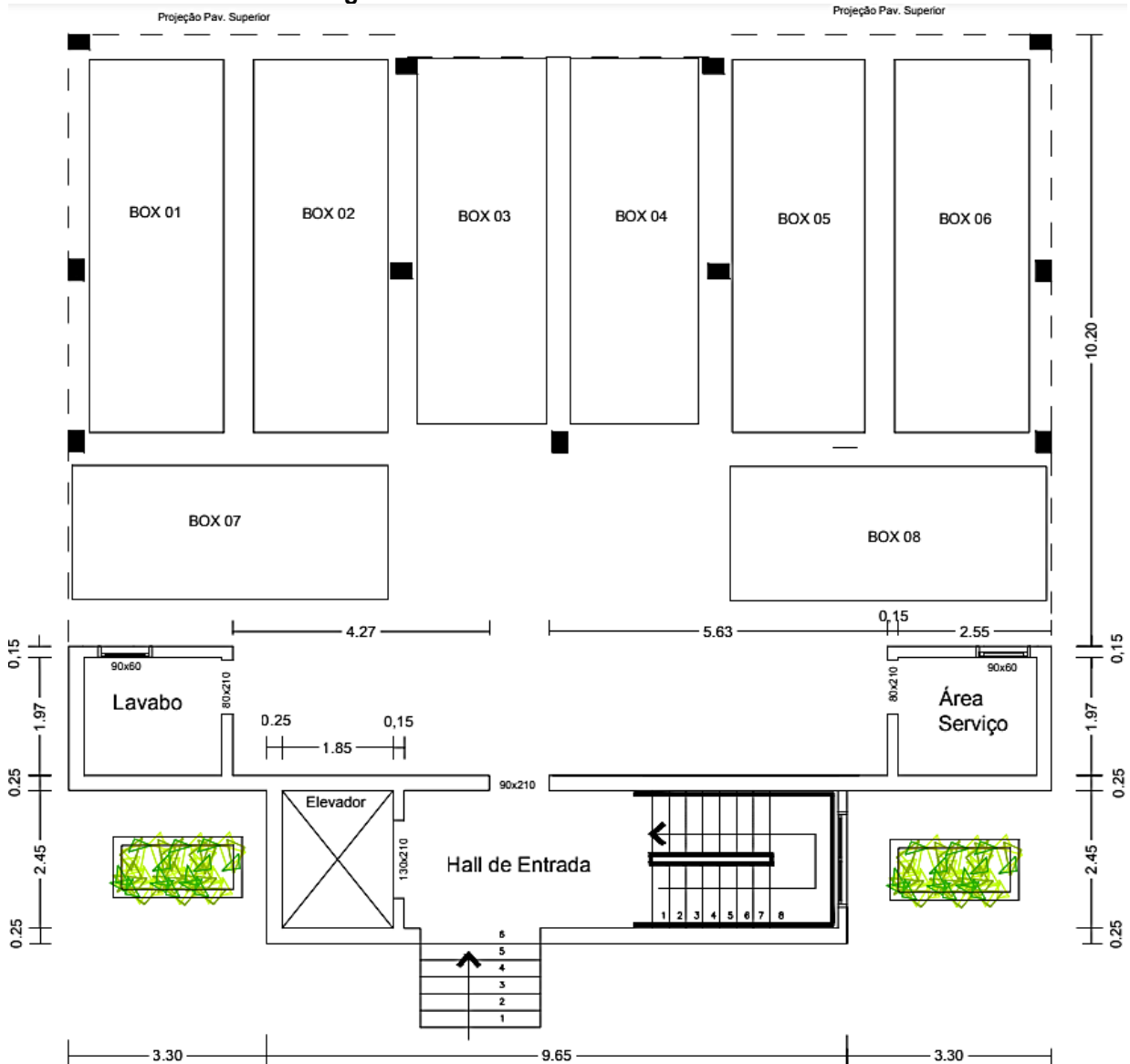
5 METODOLOGIA

Para a pesquisa ser realizada foi necessário um projeto arquitetônico de um edifício de 4 pavimentos. O engenheiro André Schaf, após contato, permitiu o uso do projeto arquitetônico elaborado e apresentado por ele no Trabalho de Conclusão de Curso da graduação do curso de Engenharia Civil, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (SCHAF, 2018). A escolha desse projeto se deve ao fato de ser um edifício residencial de 4 pavimentos, conforme o objetivo da análise do presente trabalho, além de possuir uma disposição arquitetônica usual e de fácil modelagem estrutural.

Trata-se de um edifício em concreto armado situado na zona urbana de Porto Alegre, portanto foi adotada classe de agressividade ambiental II (moderada). Para a presente pesquisa, será mantida essa classe, pois, assim como o trabalho original, foi analisada como uma construção em ambiente urbano, na cidade de Campo Mourão. O edifício é composto por um pavimento térreo, três pavimentos tipo e cobertura em laje impermeabilizada. A seguir serão apresentadas as plantas baixas de cada pavimento e a fachada lateral do projeto arquitetônico desenvolvido por Schaf (2018).

No pavimento térreo (Figura 3) há hall de entrada com escada e elevador, dando acesso aos apartamentos, um lavabo, uma área de serviço e estacionamento com disponibilidade de 8 vagas.

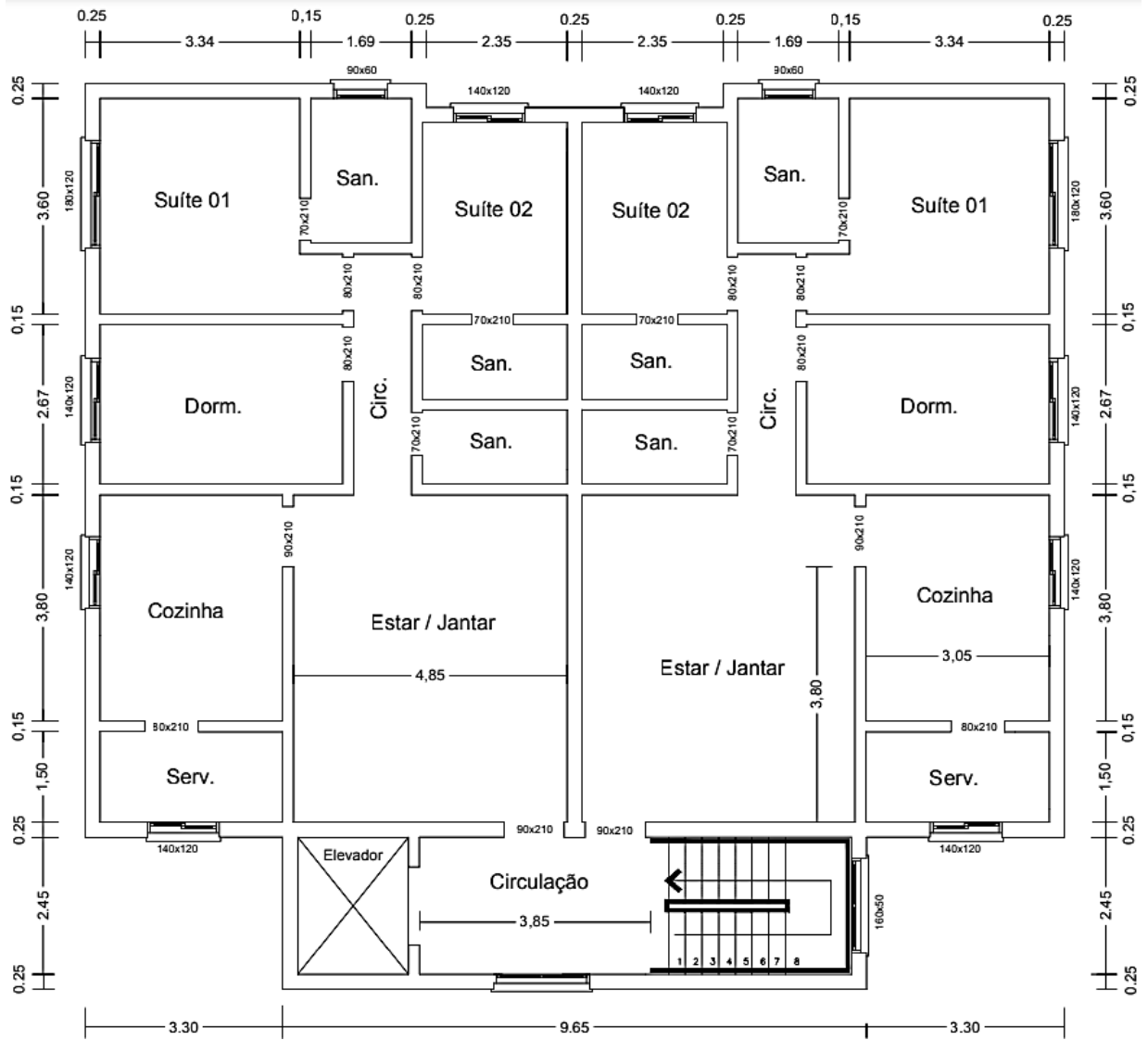
Figura 3 – Planta Baixa Pavimento Térreo



Fonte: Schaf (2018, p. 154)

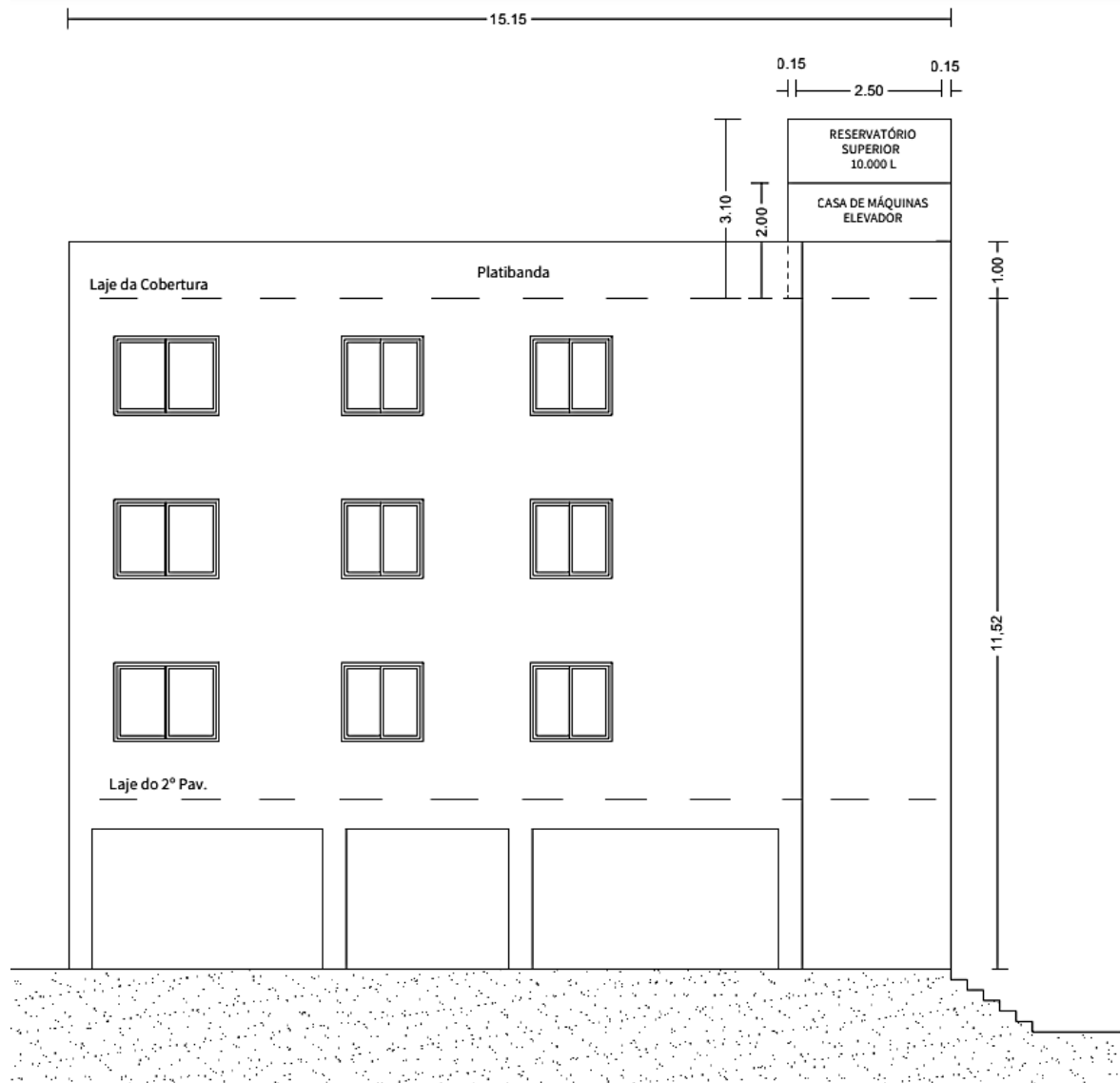
O pavimento tipo possui 2 apartamentos com planta espelhada, circulação com acesso aos apartamentos, elevador e escada. O apartamento tipo é composto por duas suítes, corredor de circulação, um quarto, um banheiro social, sala de estar e jantar, cozinha e área de serviço, conforme Figura 4. O sistema de elevador, casa de máquinas e o reservatório de água com capacidade para 10.000 litros estão situados no pavimento cobertura (Figura 5). Na Figura 6 é possível visualizar a fachada lateral esquerda do edifício, contendo cotas vertical e horizontal do edifício, altura da platibanda e cotas da casa de máquinas e reservatório. O pé direito da edificação é de 2,80m.

Figura 4 – Planta Baixa Pavimento Tipo



Fonte: Schaf (2018, p. 155)

Figura 6 – Fachada Lateral Esquerda



Fonte: Schaf (2018, p. 157)

Outros aspectos importantes do modelo (SCHAF, 2018):

- Impermeabilização da cobertura feita com manta asfáltica e cobertura de argamassa para proteção mecânica;
- Alvenaria interna com espessura de 15 cm;
- Alvenaria externa e de divisão de apartamentos com espessura de 25 cm;
- Alvenaria da caixa de escada e elevador com tijolo maciço e espessura final de 25 cm;
- Revestimento de paredes em argamassa e pintura;
- Revestimento de laje em argamassa e porcelanato.

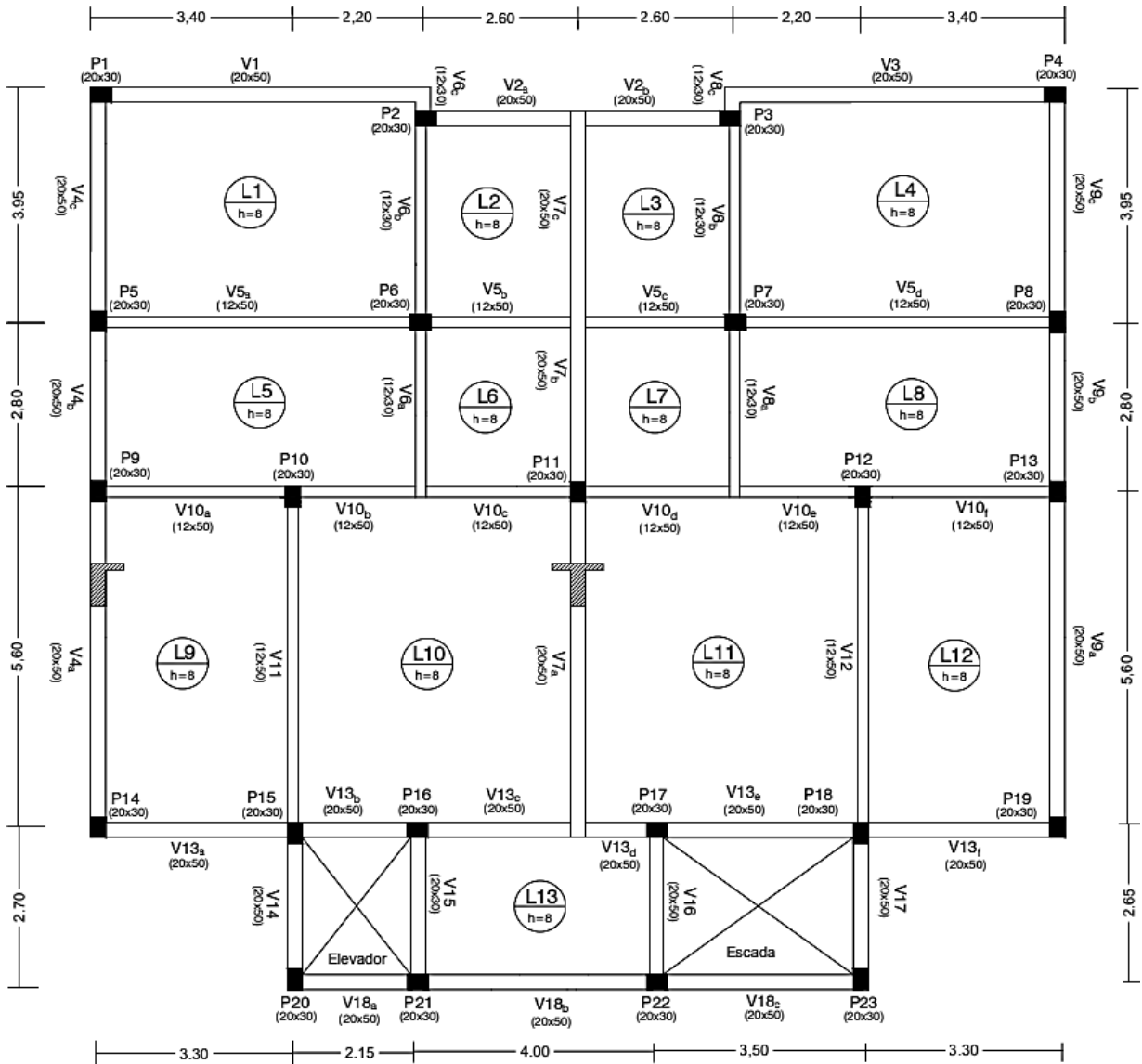
Para a realização da modelagem da estrutura do edifício, foi utilizado o software Scia Engineer 20.0. O software possui versão completa para estudantes, contendo módulos para modelagem, análise e projeto de estruturas, sem limitação de funcionalidades ou número de elementos. A restrição está apenas no formato em que o arquivo é salvo, onde a versão estudantil não poderá ser aberta na versão comercial, além de possuir a marca d'água "Versão Estudantil".

A partir deste projeto, realizou-se dois modelos estruturais no software Scia Engineer:

- Modelo I: toda a estrutura, incluindo os pilares, foram modelados com a utilização de concreto convencional de 25 MPa.
- Modelo II: as vigas e lajes mantiveram-se com o concreto de 25 MPa, modificando apenas os pilares, com uso do concreto de alto desempenho de 50 MPa.

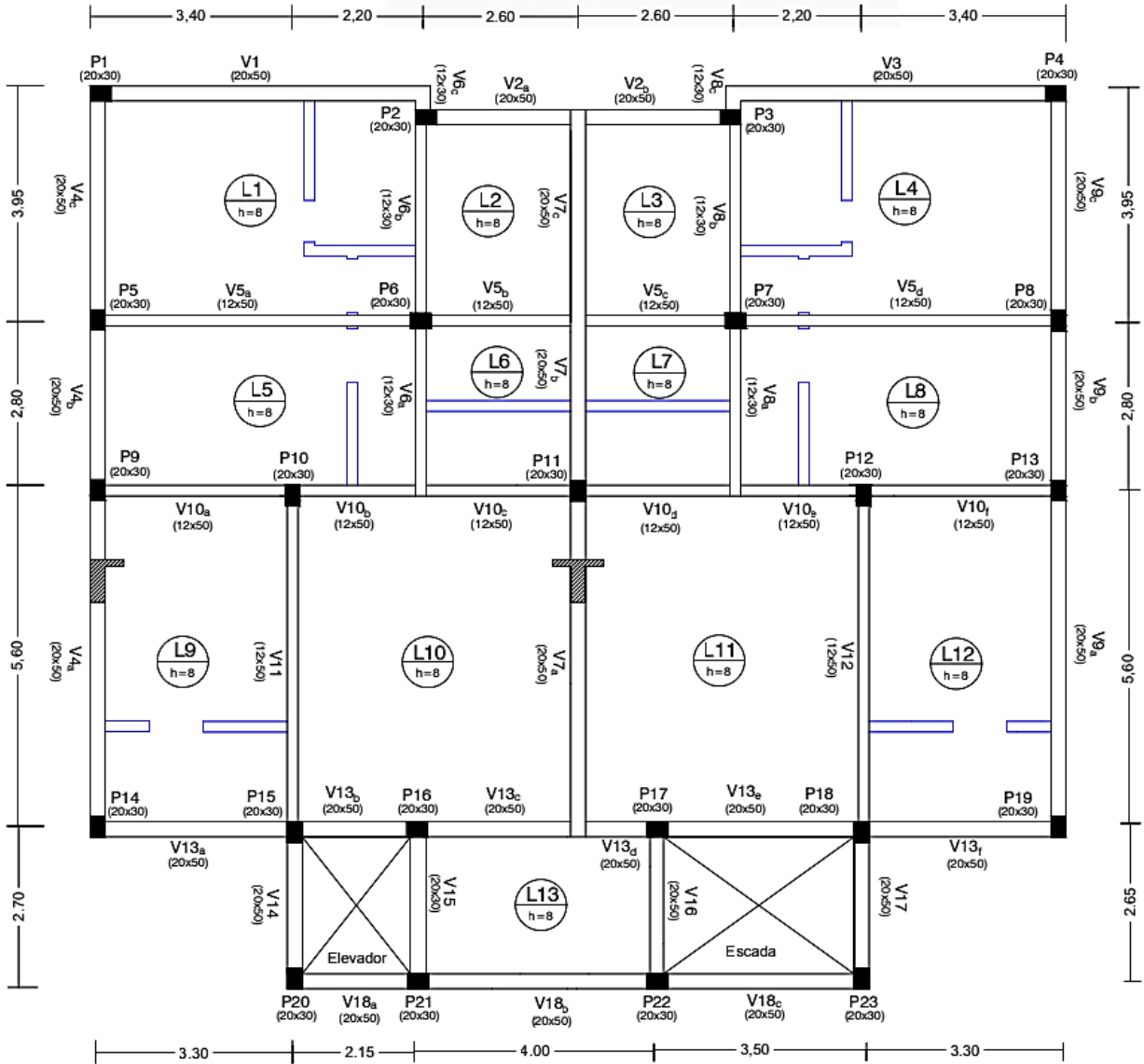
No Modelo I, com exceção dos pilares 10, 11 e 12, as dimensões adotadas para os elementos estruturais foram iguais ao projeto desenvolvido por Schaf (2018), conforme as plantas de fôrmas apresentadas nas Figuras 7 a 9.

Figura 7 – Planta de Fôrmas Pavimento Térreo



Fonte: Schaf (2018, p. 159)

Figura 8 – Planta de Fôrmas Pavimento Tipo



Fonte: Schaf (2018, p. 160)

foram utilizadas de acordo com a NBR 6120 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019). Os valores de carregamento permanente e variável referente ao sistema elevatório constam no trabalho de Schaf (2018), obtidos por meio do fabricante, com carga permanente de 2,56 kN/m² e carga acidental de 2,00 kN/m². Como exposto no início deste capítulo, na cobertura foi considerado manta asfáltica para impermeabilização, tendo uma carga permanente de 1,44kN/m², de acordo com a NBR 6120 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019). Na Tabela 3 é possível visualizar os carregamentos permanentes que foram calculados e considerados na modelagem.

Tabela 3 – Cargas permanentes

	Pavimento Térreo e Pavimentos Tipo	Pavimento Cobertura
Paredes internas – 15 cm (kN/m)	4,91	
Paredes externas – 25 cm (kN/m)	8,59	
Paredes Escada – 25 cm (kN/m)	10,85	5,37
Paredes Elevador – 25 cm (kN/m)	10,85	3,09
Revestimento lajes (kN/m ²)	1,63	

Fonte: Aatoria própria (2021)

As sobrecargas foram adotadas de acordo com o projeto e as especificações da NBR 6120 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019), representadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Cargas acidentais

	Pavimento Térreo e Pavimentos Tipo	Pavimento Cobertura
Carga acidental ed. residencial (kN/m ²)	1,50	1,00
Carga acidental lavanderia (kN/m ²)	2,00	
Carga acidental corredor (kN/m ²)	1,00	

Fonte: Aatoria própria (2021)

Nas lajes foram adotadas cargas acidentais de 1,5kN/m², excetuando nas lajes da lavanderia e do corredor entre os apartamentos, nas quais foram adotadas 2,00 kN/m² e 1,00 kN/m², respectivamente. Na cobertura foi adotada carga acidental de 1,00 kN/m² e no local do sistema elevatório foi considerada a carga apresentada por Schaf (2018), obtida com o fabricante, de 2,00 kN/m².

A carga acidental variável de vento foi calculada de acordo com a ABNT NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988). Para o cálculo de vento foram feitas as seguintes considerações:

- $S_1 = 1,0$ – Terreno plano;
- S_2 = Categoria de terreno IV: zona urbanizada e cidade pequena, com a maior dimensão menor que 20 metros;
- $S_3 = 1,0$ – Residência, comércio, etc.;
- $V_0 = 45$ m/s.

Sendo, V_0 a velocidade básica do vento no local, apresentada por meio de isopletras da velocidade básica no Brasil; S_1 um fator topográfico que leva em consideração as variações do relevo do terreno; o fator S_2 considera efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte da edificação em consideração; por fim, o fator S_3 , que é baseado em conceitos estatísticos, levando em consideração o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação, apresentado em tabela pela NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988). Como o fator S_2 varia de acordo com a altura da edificação, obtém-se os valores da Força do Vento sendo aplicada nas lajes da edificação na direção x e y, variando conforme a altura (Tabela 5).

Tabela 5 – Carga acidental variável: Vento

	Fx+ (kN)	Fy+ (kN)
Laje Pav. Tipo 3	25,49	23
Laje Pav. Tipo 2	47,58	42,93
Laje Pav. Tipo 1	43,17	38,95
Laje Térreo	43,63	32,98

Fonte: Autoria própria (2021)

Com a modelagem e os carregamentos inseridos, foram realizadas as combinações de Estado Limite de Serviço (ELS) e Estado Limite Último (ELU). O software realiza as combinações de ELU permanente e ELS quase permanente, frequente e rara de maneira automática, utilizando a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) presente na base de dados. No entanto, é permitido ao usuário inserir outras combinações para análise e conferência, além de explodir para envoltórias as combinações realizadas.

Após todas as informações serem incorporadas ao modelo, há a opção de verificar se existe algum erro presente na modelagem. Caso não apresente irregularidades, o cálculo da estrutura pode ser solicitado.

Para o dimensionamento de estruturas em concreto armado, o software possui os critérios da NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014). Há o suporte para outras normas brasileiras de acordo com o material da estrutura, além de possuir normas americanas e Eurocode. As armaduras utilizadas, para ambos os modelos, foram de acordo com os cálculos realizados em comparação aos resultados obtidos por meio do dimensionamento do software, ambos apresentados pela NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

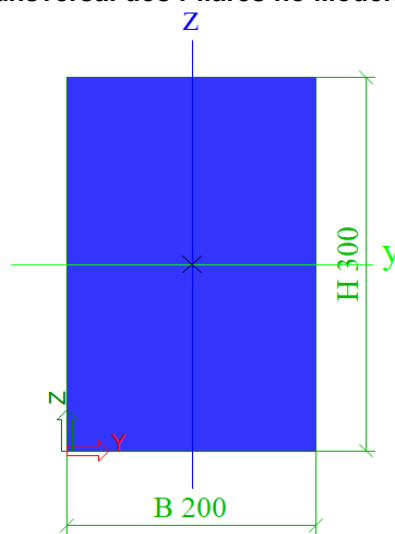
Por meio dos resultados é possível obter memória de cálculo, quantitativo de materiais, relatórios, detalhamentos, gráficos e imagens.

Com a quantificação obtida no software, foi possível realizar o comparativo de custos entre o Modelo I e o Modelo II, realizado com o uso da tabela do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), mais especificamente a tabela referente aos custos no Estado do Paraná, e valores na região de Campo Mourão.

6 RESULTADOS

Os pilares do Modelo I, peças de maior interesse neste caso, a maior parte manteve-se com seção transversal constante de 20x30cm (Figura 10) do térreo até a cobertura, inclusive na elevação da caixa d'água e casa de máquinas. Os pilares 10, 11 e 12 necessitaram seção transversal de 25x30cm no térreo, de acordo com pré-dimensionamento.

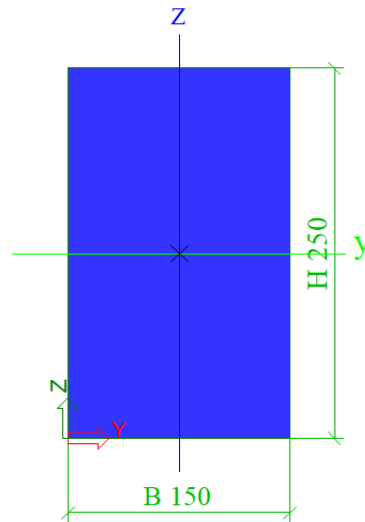
Figura 10 – Seção Transversal dos Pilares no Modelo I (dimensões em mm)



Fonte: Autoria Própria (2021)

Para o Modelo II, assim como a classe de resistência, as dimensões das lajes e vigas se mantiveram iguais ao Modelo I. As seções dos pilares foram reduzidas para 15x25 cm (Figura 11), respeitando a área mínima para seções transversais de pilares recomendada pela ABNT NBR 6118 de 360 cm² (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), e atendendo também o pré-dimensionamento que foi de 554,92 cm². Além disso, houve alteração na classe de resistência, de 25 MPa para 50 MPa.

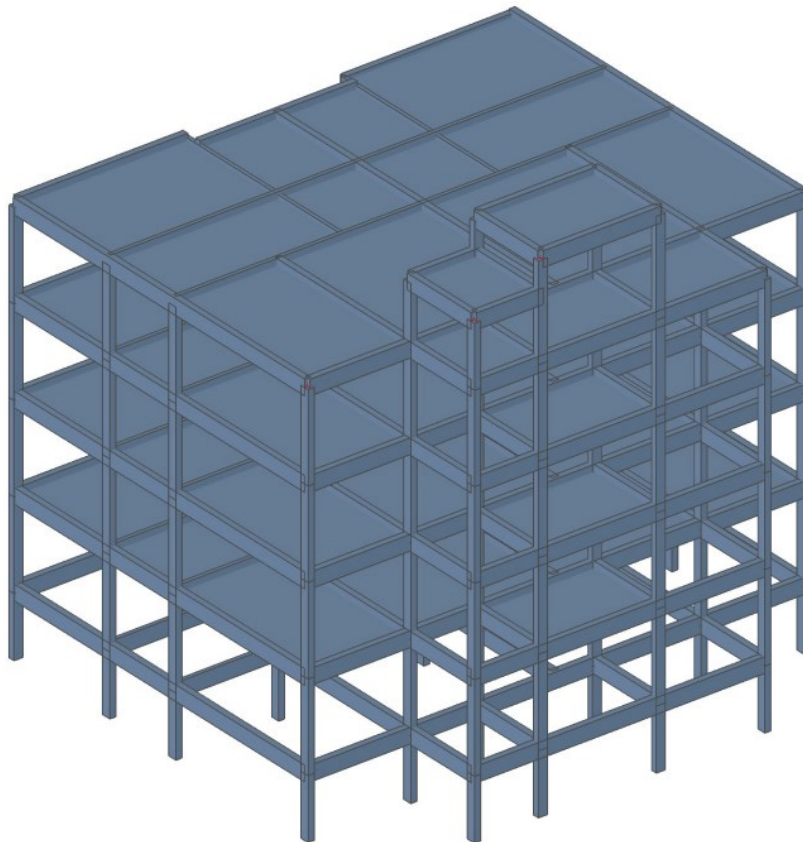
Figura 11 – Seção Transversal dos Pilares no Modelo II (dimensões em mm)



Fonte: Autoria Própria (2021)

A modelagem de ambos os modelos se apresenta de maneira semelhante no software, sendo possível a visualização na Figura 12.

Figura 12 – Modelagem da estrutura no Scia Engineer

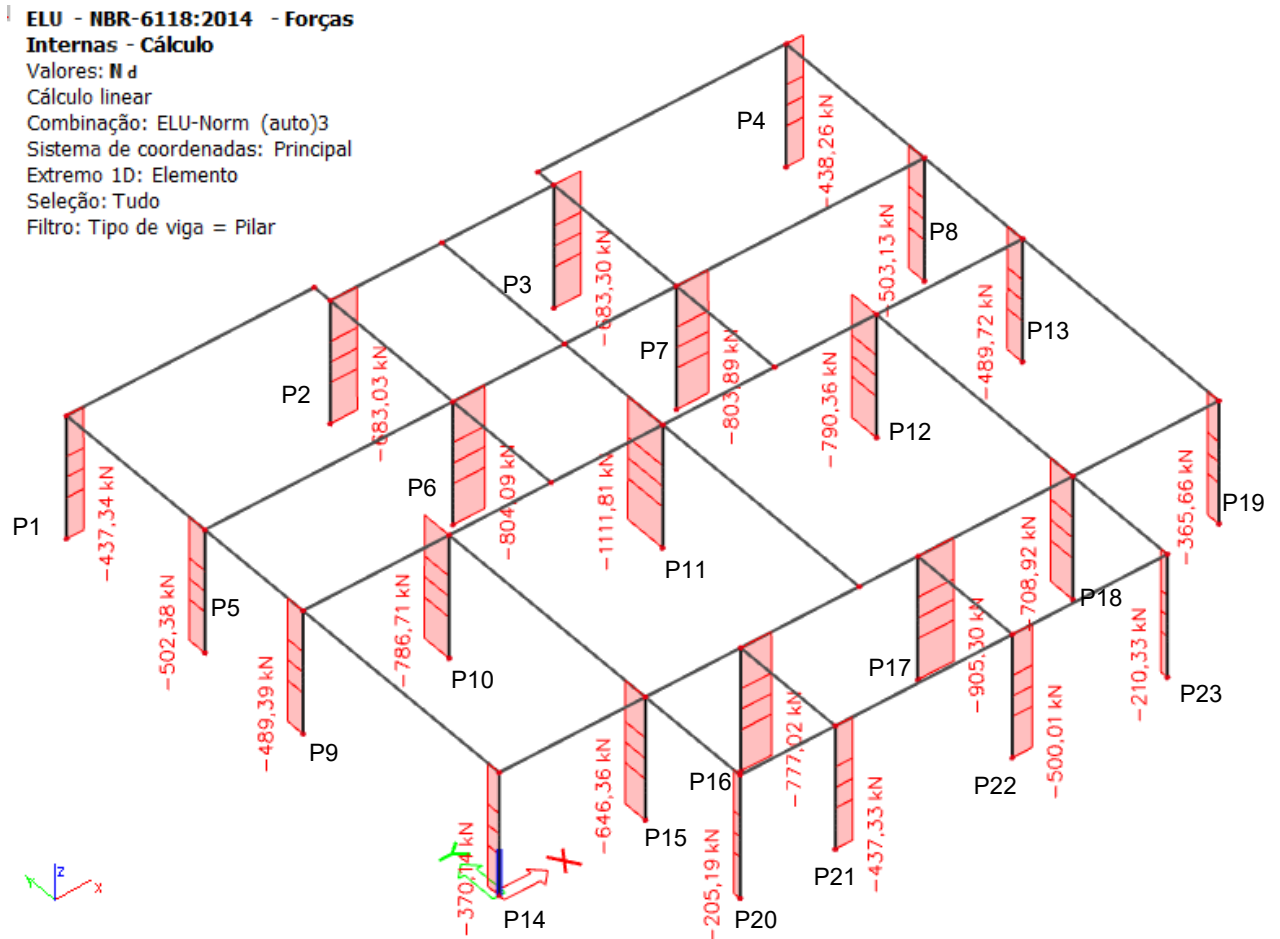


Fonte: Autoria Própria (2021)

Para a análise de esforços internos, é possível escolher a combinação a ser examinada. Neste caso, a combinação escolhida foi de ELU gerada automaticamente

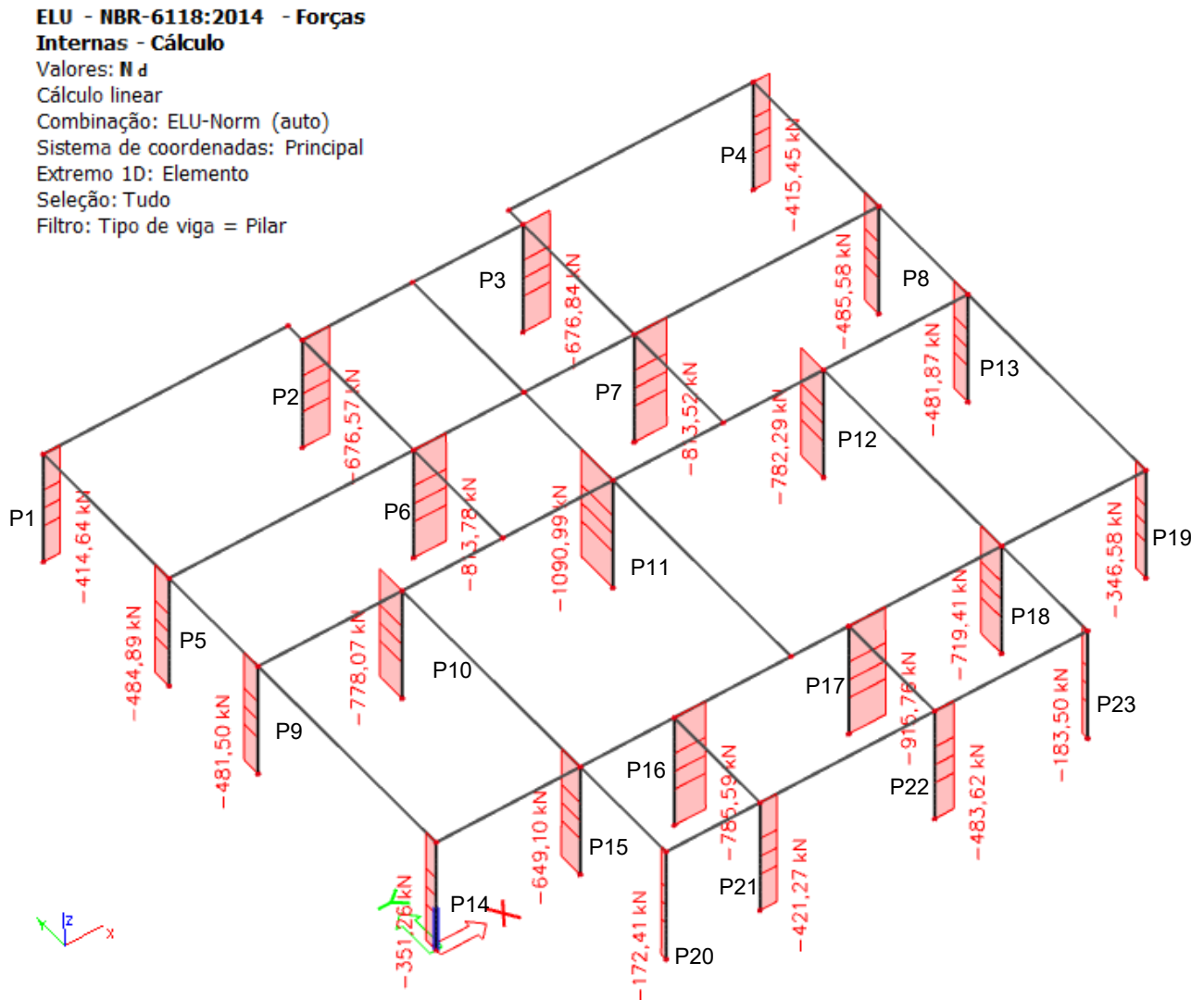
pele programa, a qual expõe a pior situação possível para a estrutura. Assim, foi possível obter os esforços solicitantes na edificação, com o enfoque nos pilares. Nas Figuras 13 e 14 estão apresentados os esforços normais em cada pilar do pavimento térreo, pois são as solicitações mais críticas para os pilares.

Figura 13 – Esforços de compressão nos pilares do Térreo do Modelo I



Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 14 – Esforços de compressão nos pilares do Térreo do Modelo II



Fonte: Autoria Própria (2022)

Na Tabela 6 estão os resultados de esforço normal e momentos fletores na seção dos pilares do pavimento térreo, tanto do Modelo I quanto do Modelo II. Os valores referentes à força normal são de compressão, sendo adotado sinal negativo pelo software. Para os momentos, foram inseridos na tabela de acordo com o valor mais crítico no elemento, tanto em torno do eixo Y como do eixo Z, devido ao fato dos pilares possuírem armadura longitudinal simétrica, recomendação da NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), a fim de evitar erros durante a execução. Os valores positivo e negativo dos momentos são referentes ao eixo global do projeto, que é possível visualizar nas figuras de projeto expostas anteriormente.

Tabela 6 – Esforços nos pilares do Pavimento Térreo

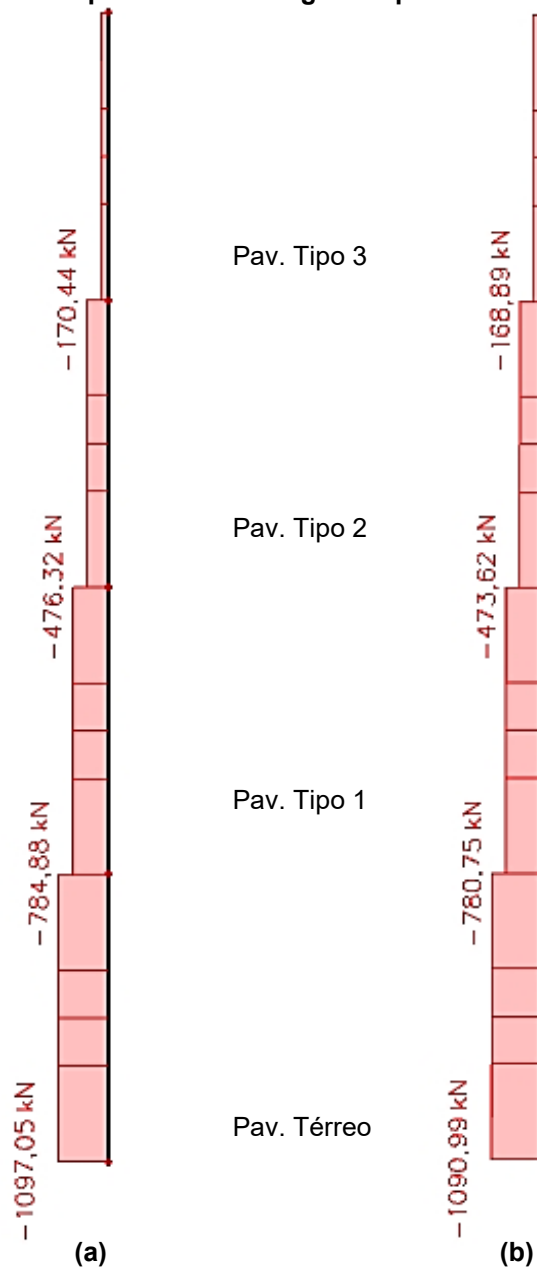
Pilar	MODELO I			MODELO II		
	Nd (kN)	My (kNm)	Mz (kNm)	Nd (kN)	My (kNm)	Mz (kNm)
01	-437,34	-23,04	-6,15	-414,64	-19,31	-4,00
02	-683,03	-10,88	-4,80	-676,57	-9,01	-3,35
03	-681,30	10,91	-4,81	-676,84	9,05	-3,36
04	-438,26	23,06	-6,324	-415,45	19,34	-4,08
05	-502,38	-4,28	-17,66	-484,89	-3,22	-12,50
06	-804,09	23,00	6,96	-813,78	2,31	0,95
07	-803,89	-12,83	1,79	-813,52	-2,22	0,93
08	-503,13	-4,09	17,70	-485,58	-3,03	12,55
09	-489,39	9,91	-5,20	-481,50	8,08	-3,73
10	-786,71	23,00	-6,96	-778,07	16,98	-2,54
11	-1111,81	12,81	0,106	-1090,99	9,09	0,05
12	-790,36	23,64	7,13	-782,29	17,56	2,63
13	-489,72	10,09	5,30	-418,87	8,27	3,83
14	-370,14	-16,62	-4,87	-351,26	-13,50	-3,13
15	-646,36	-15,03	0,51	-649,10	-11,86	0,34
16	-777,02	-8,84	2,567	-785,59	-6,63	1,67
17	-905,30	7,51	3,81	-915,76	5,72	2,36
18	-708,92	-16,27	1,24	-719,41	-12,80	0,74
19	-365,66	-16,58	5,00	-346,58	-13,43	3,32
20	-205,1940	-4,34	-2,33	-172,41	-3,22	-1,50
21	-437,33	-5,92	2,99	-421,27	-4,52	1,84
22	-500,01	3,65	3,131	-483,62	2,88	2,04
23	-210,33	-4,75	3,46	-183,50	-3,52	2,22

Nota: Nd é referente à compressão normal de cálculo, My ao momento em torno do eixo y e Mz ao momento em torno do eixo z.

Fonte: Autoria Própria (2022)

O pilar que obteve maior solicitação de compressão (Nd) foi o nº 11 no pavimento térreo, com 1097,05 kN no Modelo I e 1090,99 kN no Modelo II, devido ao fato de ser um pilar central e receber maior concentração de carregamentos. Na Figura 15 é apresentada a solicitação axial no pilar nº 11 no Modelo I (a) e no Modelo II (b) ao longo dos pavimentos.

Figura 15 – Solicitação axial no pilar nº 11 ao longo dos pavimentos (a) Modelo I (b) Modelo II



Fonte: Autoria Própria (2022)

No pilar nº 17 também foi constatada elevada solicitação axial em ambos os modelos, pois é um pilar central e recebe parte dos esforços vindos do reservatório. Analisando os esforços do pavimento térreo apresentado na tabela anterior, é possível observar também que os pilares próximos aos dois supracitados obtiveram elevada solicitação de compressão quando comparados aos demais, visto que estão em regiões centrais da edificação.

Os momentos fletores foram maiores em pilares que não possuem continuidade de vigas, ou seja, pilares de canto e de borda, como esperado, com

valores maiores para o eixo local Y do elemento, pois é o eixo que possui menor momento de inércia.

É possível verificar que os pilares do Modelo II obtiveram esforços axiais menores quando comparados com o Modelo I, em decorrência da redução da seção transversal dos pilares, pois causou diminuição de peso próprio. Analisando os momentos, houve diminuição de valores dos momentos fletores, tanto ao redor do eixo y quanto do eixo z dos pilares, quando comparado o modelo II com o modelo I.

O software Scia Engineer, após análise, sugere a quantidade de aço necessária para cada elemento estrutural (Figura 16), mas o detalhamento e disposição de armadura é por conta do usuário. Caso seja colocado uma armadura de maneira incorreta ou insuficiente, o software informa ao usuário e pergunta se tem certeza que deseja manter dessa forma. Depois que há a inserção da armadura, é possível verificar se é adequada para o Estado Limite Último, de acordo com a combinação mais crítica. Também há a possibilidade de verificar Estado Limite de Serviço para análise de Fissuras e Flechas, análises que não foram apresentadas pois são específicas para vigas.

Nos pilares, além de sugerir a área da armadura longitudinal requerida por elemento, o software apresenta também o diâmetro a ser utilizado e a quantidade de barra, a área da armadura transversal (estribos) e diâmetro destes, entre outras informações relevantes para diversas análises. Os valores sugeridos pelo Scia Engineer levam em consideração os parâmetros recomendados na NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), mas podem ser alterados pelo usuário. Por exemplo, o software sugeriu armadura longitudinal com 16 mm de diâmetro e tem essa bitola como padrão de valor mínimo para pilares, entretanto, a norma apresenta o diâmetro mínimo de armadura longitudinal sendo de 10 mm, podendo ser alterado nas configurações de concreto ou diretamente no elemento quando a armadura é inserida. Para as vigas, o software diferencia essas informações inclusive para as armaduras positiva e negativa.

Figura 16 – Área de armadura nos pilares do Térreo de acordo com o Scia Engineer – Modelo I

ELU - NBR-6118:2014

Valores: A_{s_req}

Cálculo linear

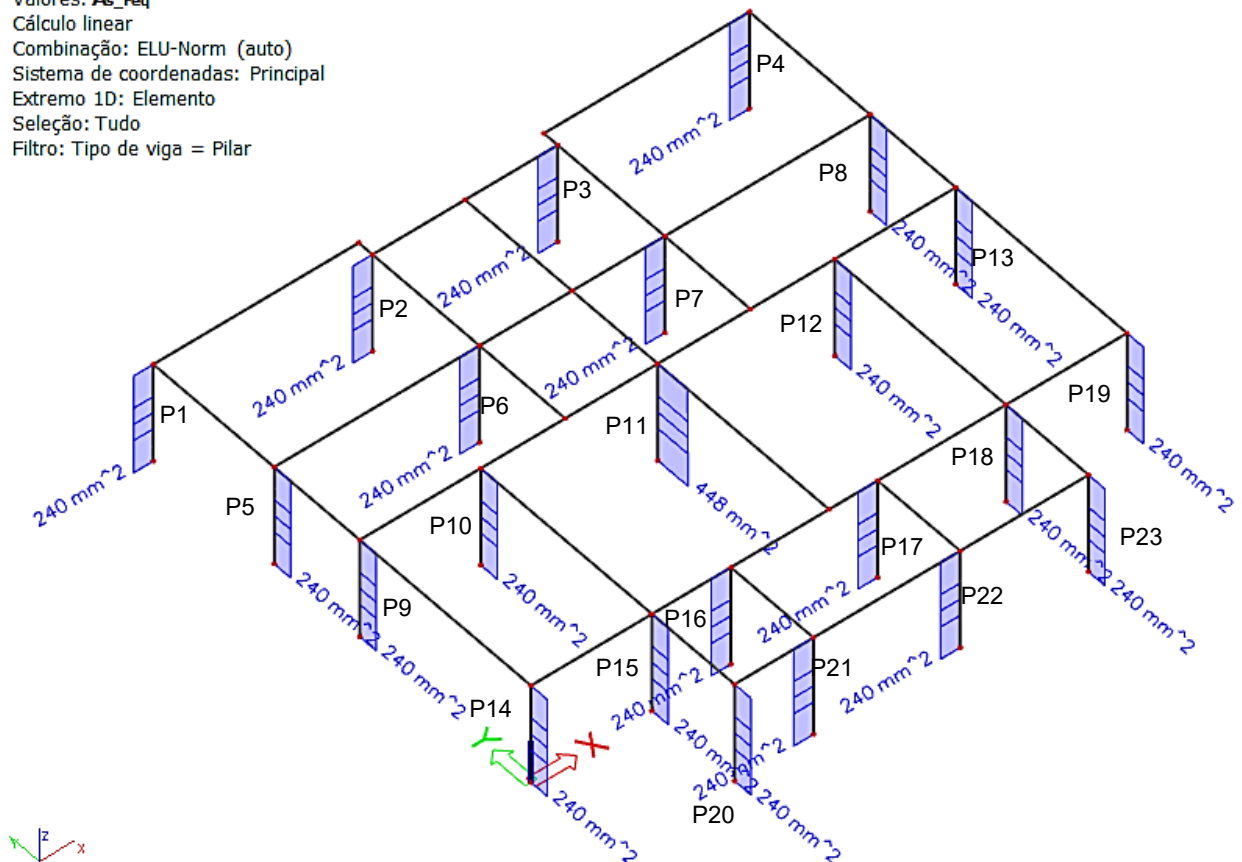
Combinação: ELU-Norm (auto)

Sistema de coordenadas: Principal

Extremo 1D: Elemento

Seleção: Tudo

Filtro: Tipo de viga = Pilar



Fonte: Autoria Própria (2022)

Utilizou-se aço CA-50 para armaduras longitudinais e aço CA-60 para armadura transversal. Conforme NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), as resistências do concreto e aço devem ser minoradas pelos coeficientes de cálculo $\gamma_c=1,4$ e $\gamma_s = 1,15$, respectivamente, de acordo com as equações a seguir.

Para o concreto:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (1)$$

Onde:

f_{ck} – Resistência característica do concreto

γ_c – Coeficiente de cálculo do concreto

f_{cd} – Resistência de cálculo do concreto

Para o aço:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (2)$$

Onde:

f_{yk} – Resistência característica do aço

γ_c – Coeficiente de cálculo do aço

f_{cd} – Resistência de cálculo do concreto

Obteve-se as resistências de cálculo apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Resistências de cálculo

Material	Resistências de cálculo (MPa)
Concreto C25	17,85
Concreto C50	35,71
Aço CA50	43,48

Fonte: Autoria própria (2022)

Para conferência, foi realizado o cálculo de dimensionamento dos pilares de acordo com a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014). Para armadura mínima, a norma dispõe a seguinte condição:

$$A_{s_{min}} = 0,15 * \frac{N_d}{f_{yd}} \geq 0,4\% * A_c \quad (3)$$

Onde:

$A_{s_{min}}$ – Área de armadura mínima

N_d – Força normal de cálculo no elemento

f_{yd} – Resistência de cálculo do aço

A_c – Área de concreto na seção

Com a força normal de cálculo em cada pilar obtida na análise estrutural do software, calculou-se a armadura mínima e armadura efetiva. Conforme apresentado na Tabela 8, tem-se a armadura mínima ($A_{s_{min}}$), que foi o maior valor calculado entre as duas considerações apresentadas na Equação (3), a armadura calculada ($A_{s_{calc}}$), que leva em consideração critérios para dimensionamento apresentados na norma, diâmetro da barra adotado (ϕ_l), quantidade de barras adotadas (n_b) e a armadura efetiva adotada ($A_{s_{adot}}$) em cada pilar. Na coluna de armadura calculada na Tabela 8 é possível verificar que alguns pilares tiveram valores nulos, devido à baixa solicitação, adotou-se então armadura mínima.

Tabela 8 – Armaduras dos pilares do Pavimento Térreo – Modelo I

Pilar	$A_{s_{min}}$ (mm^2)	$A_{s_{calc}}$ (mm^2)	ϕ_l (mm)	n_b	$A_{s_{adot}}$ (mm^2)
01	240,00	-	12,5	4	490,87
02	240,00	49,29	12,5	4	490,87
03	240,00	49,29	12,5	4	490,87
04	240,00	-	12,5	4	490,87
05	240,00	-	12,5	4	490,87
06	280,53	394,29	12,5	4	490,87
07	280,47	394,29	12,5	4	490,87
08	240,00	-	12,5	4	490,87
09	240,00	-	12,5	4	490,87
10	268,13	295,71	12,5	4	490,87
11	378,48	1182,86	16	6	1206,37
12	269,38	295,71	12,5	4	490,87
13	240,00	-	12,5	4	490,87
14	240,00	-	12,5	4	490,87
15	240,00	-	12,5	4	490,87
16	268,99	295,71	12,5	4	490,87
17	313,62	616,07	12,5	6	736,31
18	245,56	123,21	12,5	4	490,87
19	240,00	-	12,5	4	490,87
20	240,00	-	12,5	4	490,87
21	240,00	-	12,5	4	490,87
22	240,00	-	12,5	4	490,87
23	240,00	-	12,5	4	490,87

Nota: $A_{s_{min}}$ é referente à área de armadura mínima, $A_{s_{calc}}$ é a área de armadura calculada, ϕ_l é o diâmetro da barra, n_b é a quantidade de barras adotadas e $A_{s_{adot}}$ é a área efetiva adotada.

Fonte: Autoria própria (2022)

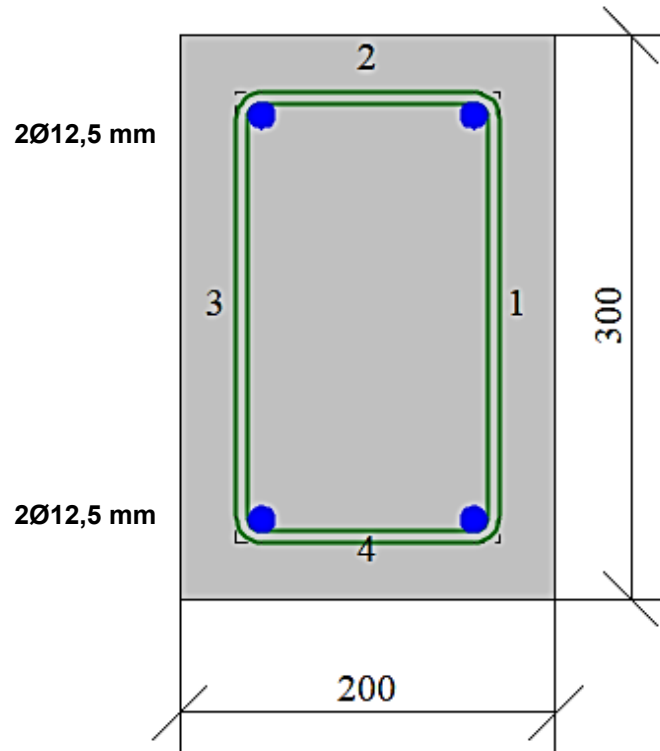
O procedimento foi realizado para o pavimento térreo e para o segundo pavimento, onde constatou-se armadura mínima na grande maioria dos pilares. Para os pavimentos acima, que possuem pilares menos solicitados, o uso de armadura mínima foi suficiente no dimensionamento.

No software, a área de armadura mínima para o Modelo I é de 240 mm². Analisando os resultados, foi possível verificar que o programa utilizou apenas a segunda consideração apresentada na Equação (3). Comparando o que foi apresentado no software e nos cálculos contidos na Tabela 8, seria necessária apenas a armadura mínima em quase todos os pilares, com exceção do Pilar 11. No entanto, alguns pilares mais solicitados tiveram diferenças significativas de armadura quando comparado o cálculo manual com o resultado do software. Como é possível visualizar na tabela apresentada, os pilares que obtiveram solicitação elevada para utilizar armadura além da mínima foram os Pilares 06, 07, 10, 11, 12, 16, 17 e 18 no Modelo I, os quais estão em regiões centrais com maiores concentrações de esforços, com valores de compressão entre 700 e 1100 kN.

No Modelo I foram inseridas 4 barras de 12,5 mm (Figura 17) de aço CA-50 para armadura longitudinal, correspondendo a uma área de 490,87 mm² para a

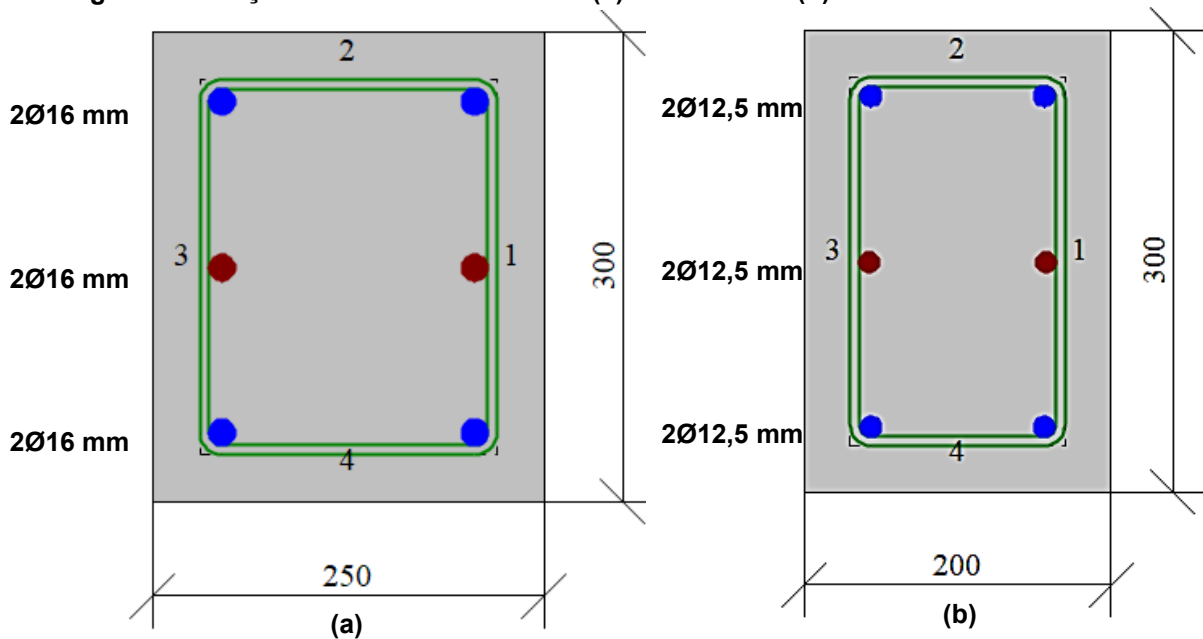
maioria dos pilares do pavimento térreo, valor acima do mínimo necessário. No Pilar 11, foram 6 barras de 16 mm (Figura 18 (a)), totalizando 1206,37 mm² e no Pilar 17, 6 barras de 12,5 mm (Figura 18 (b)), totalizando 736,31 mm², ambos atendendo a quantidade requerida para o elemento, conforme dimensionamento realizado e apresentado anteriormente.

Figura 17 – Seção transversal dos pilares do Pavimento Térreo com armadura – Modelo I



Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 18 – Seção transversal do Pilar 11 (a) e do Pilar 17 (b) com armadura – Modelo I



Fonte: Autoria Própria (2022)

Ao realizar a verificação de Estado Limite Último, o software apresenta um índice de utilização do elemento, sendo menor que 1 aceito, com cores cinza para valores próximos de 0 e verde para valores de 0,25 a 0,99, e maior que 1 significa que o uso está acima, com indicação de cor vermelha, e há a necessidade de fazer alterações de armadura na estrutura analisada.

No pavimento térreo do Modelo I, utilizando barras com 10 mm foram constatados esses valores muito próximos a 1, optando então por aumentar a armadura por questões de segurança, por esta razão adotou-se 4 barras de 12,5 mm, conforme apresentado anteriormente. No segundo pavimento, para o Pilar 11 adotou-se 4 barras de 12,5 mm, enquanto os demais pilares dos pavimentos tipo e na elevação foram adotadas 4 barras de 10 mm, atendendo à quantidade mínima de armadura e à verificação de Estado Limite Último.

Para os estribos, foi adotado aço CA-60, observando as considerações da NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), onde define que o diâmetro não deve ser menor do que 5 mm ou $\frac{1}{4}$ do diâmetro da barra isolada, e espaçamento entre estribos igual ou inferior ao menor dos seguintes valores:

- 200 mm;
- Menor dimensão da seção;

- 24 Ø para CA-25, 12 Ø para CA-50.

Como Ø da armadura longitudinal dos pilares no térreo é de 12,5 mm e a menor dimensão da seção é de 200 mm, o menor valor entre os apresentados acima é de 150 mm, logo, a distância entre os estribos adotada no pavimento térreo do Modelo I foi de 150 mm, com diâmetro de 6,3 mm. Nos demais pavimentos, a distância entre os estribos foi de 120 mm, com diâmetro de 6,3 mm.

Na Figura 19 é possível visualizar a verificação do Estado Limite Último para a armadura adotada no térreo, com todos os índices menores que 1 e com o valor máximo de 0,86 no pilar mais solicitado.

Figura 19 – Verificação ELU dos pilares do Pavimento Térreo – Modelo I

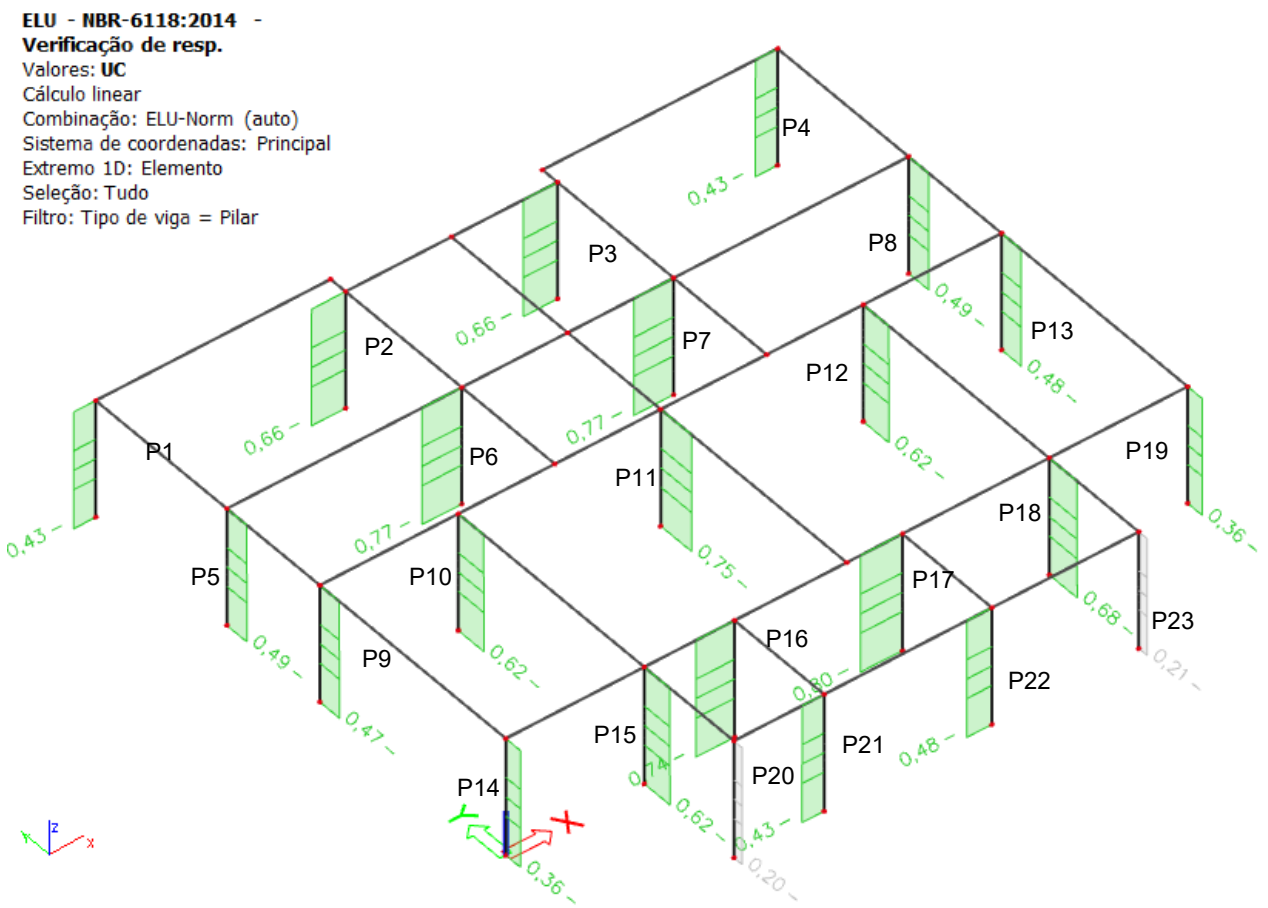


Figura 20 – Área de armadura necessária nos pilares do Térreo – Modelo II

ELU - NBR-6118:2014

Valores: A_{s_req}

Cálculo linear

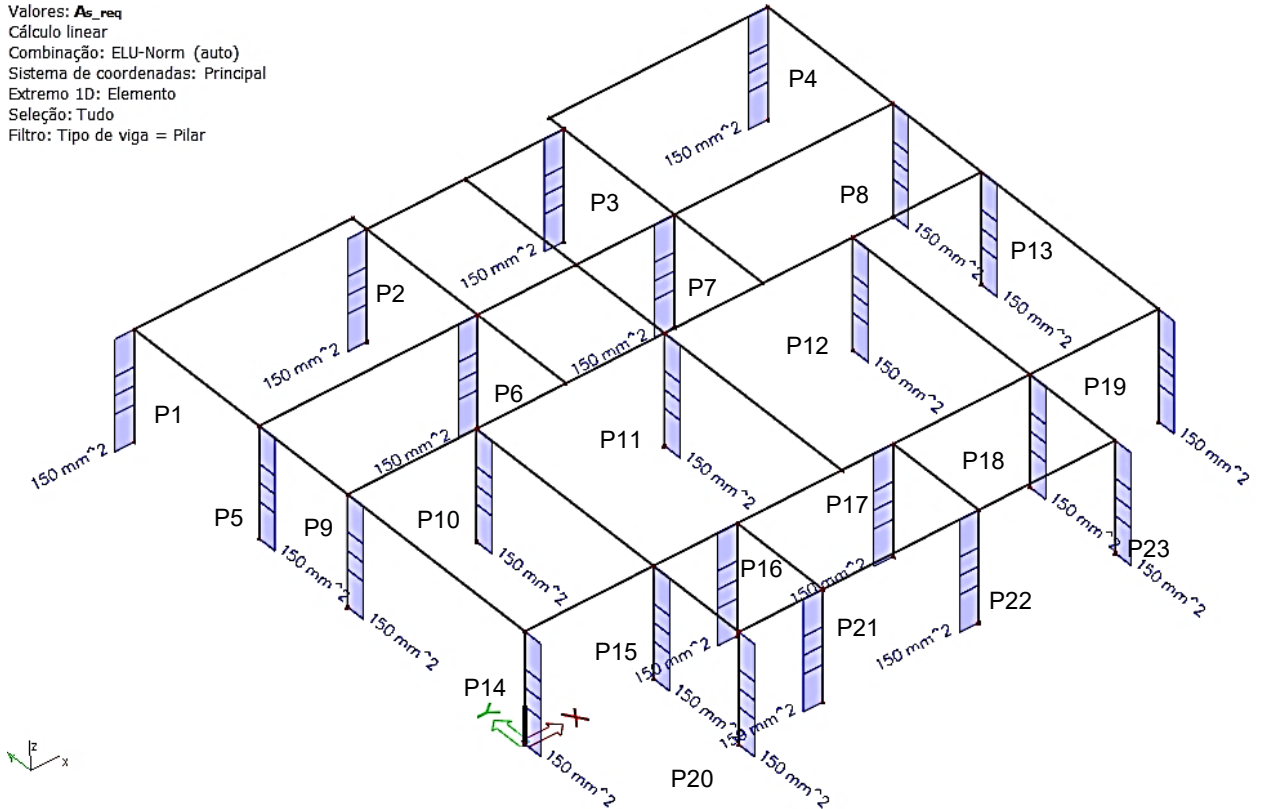
Combinação: ELU-Norm (auto)

Sistema de coordenadas: Principal

Extremo 1D: Elemento

Seleção: Tudo

Filtro: Tipo de viga = Pilar



Fonte: Autoria Própria (2022)

Na Figura 20 tem-se a armadura necessária aos pilares do térreo do Modelo II, de acordo com o software, valores equivalentes à armadura mínima calculada pelo programa, considerando apenas a segunda condição apresentada na Equação (3). Então realizou-se o cálculo de armadura mínima e efetiva para os pilares do térreo do Modelo II, de maneira semelhante ao Modelo I (Tabela 9).

Na coluna de armadura calculada na Tabela 9 é possível verificar que alguns pilares tiveram valores nulos, devido à baixa solicitação, adotou-se então armadura mínima.

Observou-se também que houveram aumentos nas armaduras calculadas em relação ao Modelo I, mesmo que os valores de solicitação tenham diminuído. Isso ocorre devido ao fato de a armadura calculada ser diretamente proporcional com a resistência de cálculo do concreto. No Modelo II o valor de f_{cd} é maior do que no Modelo I, como apresentado anteriormente na Tabela 7, e, em consequência, a armadura calculada aumentou.

Tabela 9 – Armaduras dos pilares do Pavimento Térreo – Modelo II

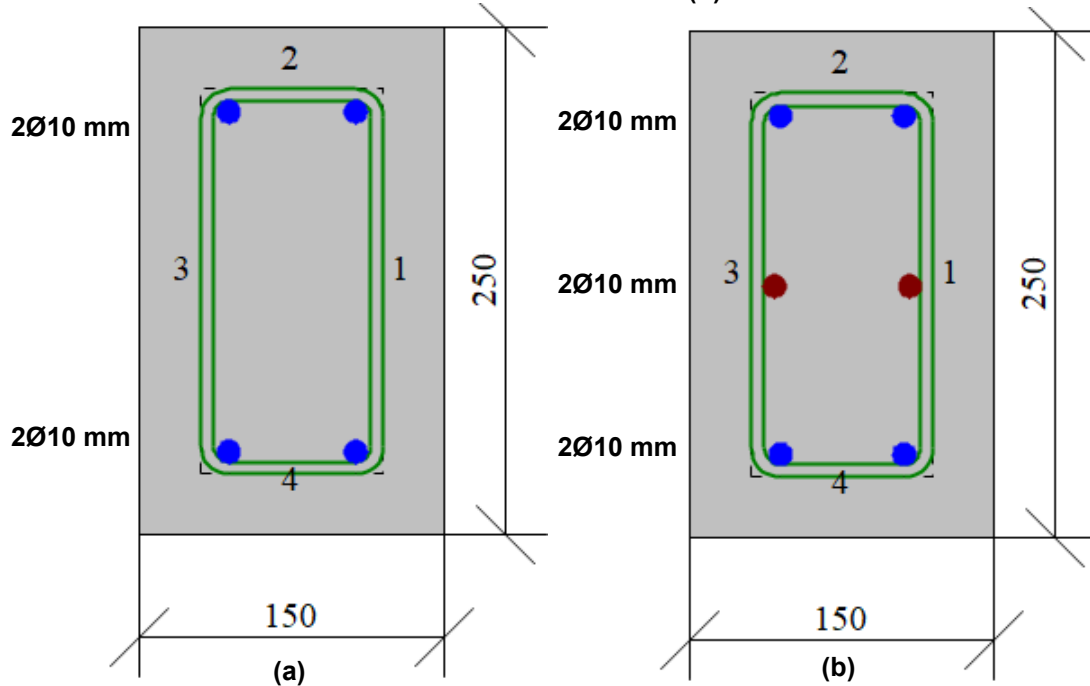
Pilar	$A_{S_{min}}$ (mm ²)	$A_{S_{calc}}$ (mm ²)	ϕ_l (mm)	n_b	$A_{S_{adot}}$ (mm ²)
01	150,00	-	10	4	314,16
02	233,42	154,02	10	4	314,16
03	233,51	154,02	10	4	314,16
04	150,00	-	10	4	314,16
05	167,29	-	10	4	314,16
06	280,75	431,25	10	6	471,24
07	280,66	431,25	10	6	471,24
08	167,53	-	10	4	314,16
09	166,12	-	10	4	314,16
10	268,43	369,64	10	6	471,24
11	376,39	1201,34	16	6	1206,37
12	269,97	369,64	10	6	471,24
13	166,25	-	10	4	314,16
14	150,00	-	10	4	314,16
15	223,94	123,21	10	4	314,16
16	271,03	369,64	10	6	471,24
17	315,94	677,68	12,5	6	471,24
18	248,20	184,82	10	4	314,16
19	150,00	-	10	4	314,16
20	150,00	-	10	4	314,16
21	150,00	-	10	4	314,16
22	166,85	-	10	4	314,16
23	150,00	-	10	4	314,16

Nota: $A_{S_{min}}$ é referente à área de armadura mínima, $A_{S_{calc}}$ é a área de armadura calculada, ϕ_l é o diâmetro da barra, n_b é a quantidade de barras adotadas e $A_{S_{adot}}$ é a área efetiva adotada.

Fonte: Autoria própria (2022)

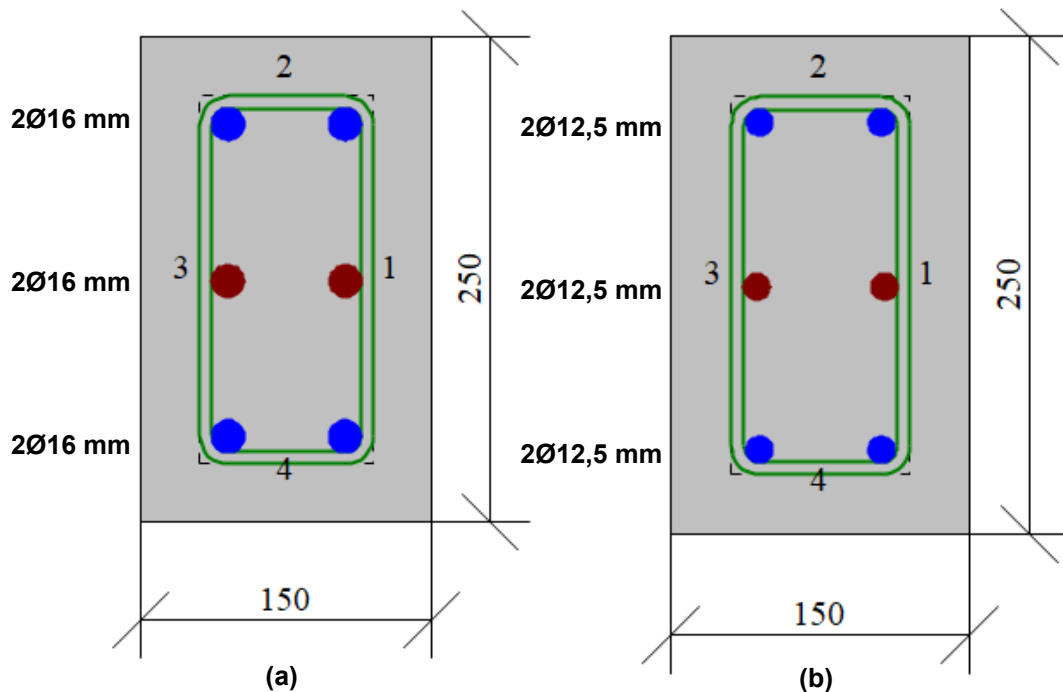
No Modelo II foram inseridas 4 barras de 10 mm (Figura 21 (a)) para armadura longitudinal na maioria dos pilares do pavimento térreo e em todos os pilares dos demais pavimentos, correspondendo a uma área de 314,16 mm² em cada elemento, valor acima do necessário. Nos pilares 06, 07, 10, 12 e 16 adotou-se 6 barras de 10 mm (Figura 21 (b)), de maneira a atender a quantidade de armadura calculada. A armadura calculada para o Pilar 11 do Modelo II necessitou de 6 barras de 16 mm (Figura 22 (a)) e para o Pilar 17, 6 barras de 12,5 mm (Figura 22 (b)).

Figura 21 – Seção transversal da maioria dos pilares (a) e pilares 06, 07, 10, 12 e 16 do Pavimento Térreo com armadura (b) - Modelo II



Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 22 – Seção transversal do Pilar 11 (a) e Pilar 17 (b) com armadura - Modelo II



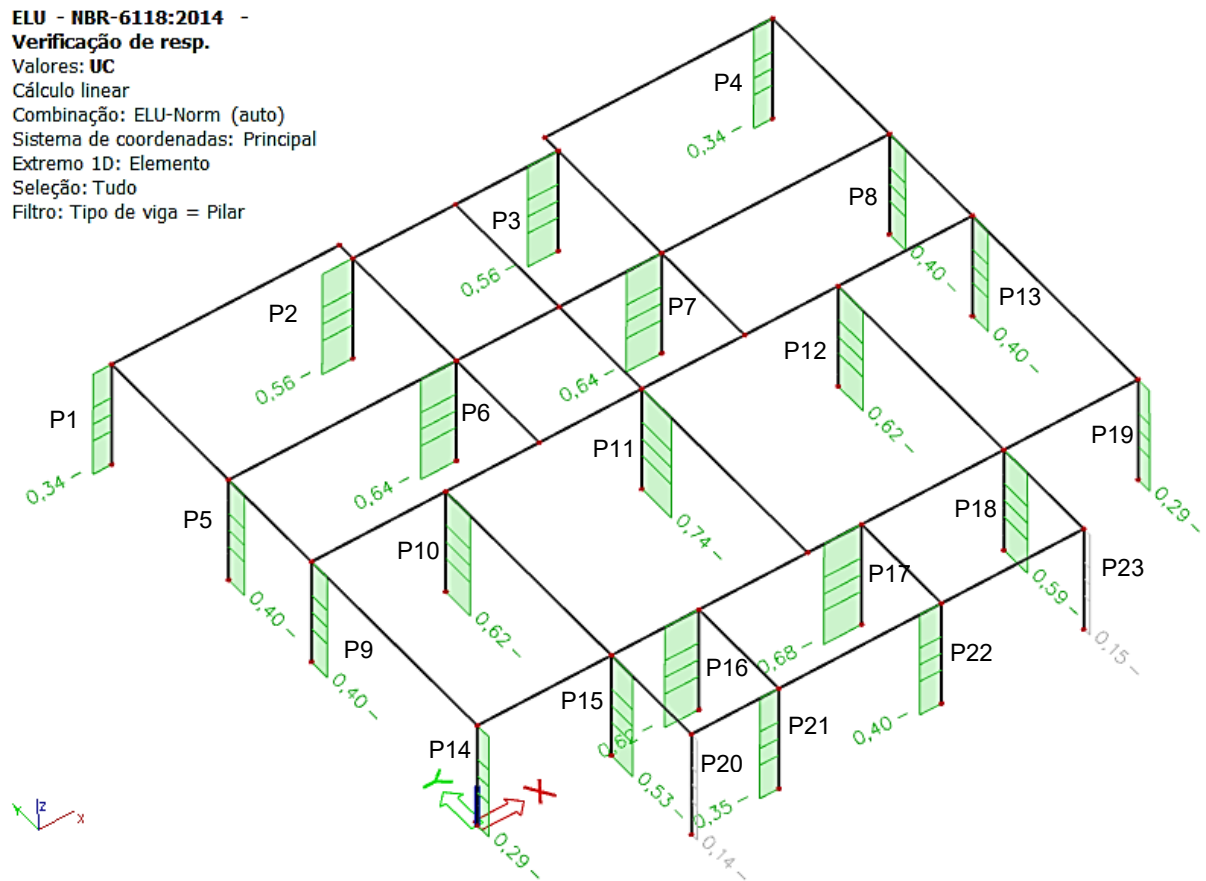
Fonte: Autoria Própria (2022)

Para os estribos, assim como no Modelo I, foi adotado aço CA-60, observando as considerações da NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014). A menor dimensão da seção é de 150 mm, logo, para os pilares

com \varnothing (diâmetro) da armadura longitudinal de 10 mm o menor valor é de 120 mm, valor este adotado para o espaçamento entre os estribos, com diâmetro de 6,3 mm. Para os pilares com \varnothing (diâmetro) da armadura longitudinal de 12,5 e 16 mm, o menor valor será a menor dimensão da seção, logo, espaçamento dos estribos dos pilares 11 e 17 será de 150 mm

Na verificação de ELU foi constatado que o dimensionamento da armadura estava de acordo, inclusive nos pilares mais solicitados do pavimento térreo (Figura 23). A armadura inserida nos pilares dos demais pavimentos também obtiveram valores abaixo de 1 na verificação.

Figura 23 – Verificação ELU dos pilares do Pavimento Térreo - Modelo II



Fonte: Autoria Própria (2022)

Com as armaduras definidas e as verificações realizadas, foi possível obter a quantificação de material de ambos os modelos, fornecida pelo Scia Engineer (Tabelas 10 e 11) para se realizar a comparação de custos entre os modelos analisados. Todos os materiais analisados obtiveram redução de quantidade com a alteração do f_{ck} dos pilares.

Tabela 10 – Quantificação de material dos pilares – Modelo I

Material	Quantidade
Concreto 25 MPa (m ³)	17,01
Fôrmas (m ²)	282,22
Aço CA-50 (kg)	876,2
Aço CA-60 (kg)	585,8

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 11 – Quantificação de material – Modelo II

Material	Quantidade
Concreto 50 MPa (m ³)	10,55
Fôrmas (m ²)	225,09
Aço CA-50 (kg)	811,3
Aço CA-60 (kg)	445,9

Fonte: Autoria própria (2022)

Examinando os valores de redução, pode-se observar que o material que obteve maior redução foi o concreto, devido à diminuição da seção transversal dos pilares e, conseqüentemente, redução do volume de concreto e também da superfície e quantidade necessária de área de fôrmas.

A armadura longitudinal, com aço CA-50, foi o material que apresentou menor redução na quantidade, isso devido ao fato de haver a quantidade mínima de barras e área de armadura, sendo adotada a mesma quantidade de armadura na maior parte dos pilares dos dois modelos. Na tabela 12 está apresentado qual foi a taxa de redução de cada um dos materiais.

Tabela 12 – Taxa de redução dos materiais

Material	Redução (%)
Concreto	37,980
Fôrmas	20,24
Aço CA-50	7,41
Aço CA-60	23,88

Fonte: Autoria própria (2022)

Os valores de custos dos insumos e composição foram obtidos na Tabela SINAPI no Estado do Paraná com desoneração, referente ao mês 08 de 2022, pois eram os valores mais recentes durante a elaboração dos resultados (CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, 2022). Vale ressaltar que as informações coletadas são na capital, Curitiba, e podem haver alterações conforme a região do Estado.

Os materiais escolhidos na Tabela para utilização neste trabalho foram:

- Aço CA-50, 10,0 mm, ou 12,5 mm, ou 16,0 mm, ou 20,0 mm, dobrado e cortado;

- Aço CA-60, 6,0 mm ou 7,0 mm, dobrado e cortado;
- Chapa/painel de madeira compensada plastificada (madeirite plastificado) para forma de concreto, de 2200 x 1100 mm, E= 12 mm;
- Concreto usinado bombeável, classe de resistência C25, com brita 0 e 1, slump= 100 +/- 20 mm, inclui serviço de bombeamento (NBR 8953);

No entanto, a Tabela do SINAPI não oferta valores para Concretos de Alto Desempenho, somente para Altas Resistências. Para obter o valor do Concreto de Alto Desempenho, foi feito orçamento na cidade de Maringá – PR, região mais próxima de Campo Mourão com disponibilidade deste tipo de concreto, com valor médio de R\$650,00/m³. Na Tabela 13 há os valores individuais de cada insumo, além dos custos de cada para os Modelos I e II. Assim como na quantificação, houve a redução dos custos do Modelo I para o Modelo II. Apesar do preço unitário do concreto de classe de resistência C50 ser mais elevado, o valor final ainda assim é menor quando comparado à utilização do Concreto C25, devido ao fato do Modelo I demandar mais volume de concreto.

Tabela 13 – Comparação de custos dos pilares entre os Modelos I e II

Material	Preço (R\$)	Modelo I (R\$)	Modelo II (R\$)
Concreto 25 MPa (m ³)	442,20	7521,82	-
Concreto 50 MPa (m ³)	650,00	-	6857,5
Madeirite plastificada 12 mm (m ²)	56,02	15809,96	12609,54
Aço CA-50 (kg)	9,04	7920,85	7334,15
Aço CA-60 (kg)	9,53	5582,67	4249,48

Fonte: Autoria própria (2022)

A diferença total entre os modelos está apresentada na Tabela 14, tanto em valores brutos, quanto em porcentagem.

Tabela 14 – Diferença de custo total dos pilares entre os Modelos I e II

Material	Preço (R\$)	(%)
Modelo I	36835,30	
Modelo II	31050,62	
Economia	5666,64	15,70

Fonte: Autoria própria (2022)

O Concreto Convencional de classe C25 foi orçado na região a fim de comparação, com valor médio de R\$450,00/m³, valor este muito próximo ao apresentado na Tabela SINAPI, de R\$442,20/m³ (CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, 2022).

Houve uma redução de custos nos pilares de 15,70% com a utilização de concreto de alto desempenho. Comparando-se ao custo total da obra, onde as estruturas compreendem em torno de 15 e 20% do valor total, a alteração de C25 para C50 nos pilares teria uma baixa economia na edificação, em torno de 2,35 a 3,14%.

7 CONCLUSÃO

Comparando a Verificação de Estado Limite Último de ambos os modelos, é possível notar que, apesar de possuírem a mesma quantidade de armadura, os pilares 11 e 17 obtiveram valor menor de utilização no Modelo II, mesmo com a área de seção transversal sendo menor. Logo, a utilização de Concreto de Alto Desempenho nos pilares do Modelo II apresentou-se mais eficiente.

Com o dimensionamento e quantificação dos Modelos através do Software Scia Engineer, foi possível verificar a diminuição na quantidade de materiais para os pilares no Modelo II e, apesar do custo inicial do CAD ser maior que o CC, houve também a redução do custo, representando uma economia de 15,70% nas estruturas dos pilares.

Analisando os custos dos pilares de forma isolada, a alteração de Concreto Convencional para Concreto de Alto Desempenho pode representar uma baixa redução de custo em relação ao valor total da obra, em torno de 2,35 a 3,14%, mas não insignificante. Outro ponto que se deve levar em consideração é a região onde será realizada a obra e se há acesso a este concreto, podendo haver alterações de valores devido ao deslocamento até a construção, tornando a economia ainda menor.

Logo, é importante levar em consideração todas as vantagens e desvantagens citadas no referencial teórico. A utilização do CAD apenas em estruturas de grande porte devido às grandes reduções que proporciona pode ser reavaliada, uma vez que para edifícios de pequeno porte pode haver reduções de materiais, consequentemente redução de tempo de obra e custos, tanto diretos quanto indiretos. Além de apresentar ser uma solução mais sustentável, com diminuição de uso de matérias primas e redução do uso de água na preparação.

Caso haja a disponibilidade do CAD na região em que se irá construir a edificação, torna-se muito interessante a análise pelo engenheiro responsável, visto que há a possibilidade da diminuição de custos na estrutura e proporcionará maior durabilidade para a edificação.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, E. A. B. **Projeto de pilares de concreto de alto desempenho**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- AÏTCIN, P. C. **High-Performance Concrete**. 1st. ed. London: E & FN Spon, 1998.
- ALBUQUERQUE, A. T. de. **Análise de alternativas estruturais para edifícios em concreto armado**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- ARANHA, P. M. da S. **Contribuição ao estudo das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado na região Amazônica**. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.
- ARAÚJO, J. M. de. **Curso de concreto armado**. V. 1, 4 ed. Rio Grande: Dunas, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-1**: Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- BACCIN, A. G. C. **Fundamentos do concreto de alto desempenho e sua aplicação no projeto de pilares**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.
- BARATA, M. S. **Concreto de alto desempenho no estado do Pará**: estudo de viabilidade técnica e econômica de produção de Concreto de Alto Desempenho com os materiais disponíveis em Belém através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

BARBOSA, L. Análise custo-benefício entre concreto convencional e concreto de alto desempenho – estudo de caso de um edifício residencial. **Revista Científica Semana Acadêmica**. Fortaleza, ano MMXXI, nº. 000205, 18 mar. 2021. Disponível em: <https://semanaacademica.com.br/artigo/analise-custo-beneficio-entre-concreto-convencional-e-concreto-de-alto-desempenho-estudo-de>. Acesso em: 05 jul. 2021.

BATTAGIN, A. F.; CURTI, R.; SILVA, C. O.; MUNHOZ, F. A. C. Influência das condições de cura em algumas propriedades dos Concretos Convencionais e de Alto Desempenho. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., 2002, Belo Horizonte. **Anais [...]** Belo Horizonte: IBRACON, 2002.

BESERRA, S. A. **Influência do tipo e do tempo de duração de cura nas propriedades mecânicas de Concretos de Alto Desempenho (CAD) produzidos em período quente ($t > 25^{\circ}\text{C}$) e de baixa umidade relativa do ar ($h < 50\%$)**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2005.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **Tabela SINAPI: Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil – Caixa Econômica Federal**. 2022. Disponível em: https://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_556. Acesso em: 15 ago 2022.

CIFUENTES, G. A. **Análise da viabilidade econômica do uso de concreto de alto desempenho em pilares de edificações com uso do Scia Engineer**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2017.

E-TOWER. Blog Aflalo Gasperini arquitetos. São Paulo, [s.d.]. Disponível em <http://aflalogasperini.com.br/en/project/e-tower/>. Acesso em: 01 set. 2021.

HARTMANN, C. T; HELENE, P. Concretos de alta resistência. *Téchne*. **Revista de Tecnologia da Construção**, v. 1, p. 15-17, 2003.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. 1 ed. São Paulo: Pini, 1992.

JUCÁ, T. P.; TEIXEIRA, F. A.; PEREIRA, C. H. de A. F.; OLIVEIRA, K. R. B. de; SENA, A. de M.; GUIMARÃES, L. E.; ANTONELLI, G. R.; GOMES, F. M.; GEYER, A. Estudo da dosagem de concreto de alto desempenho – comparativo de custos. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: IBRACON, 2001.

KAEFER, L. F. **A evolução do concreto armado**. Trabalho apresentado na disciplina PEF 5707 – Concepção, Projeto e Realização das estruturas: aspectos históricos – Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, 1998. Disponível em: <https://www.feb.unesp.br/lutt/Concreto%20Protendido/HistoriadoConcreto.pdf>. Acesso em: 7 jul 2021.

LIMA, F. B. de. **Pilares de concreto de alto desempenho: fundamentos e experimentação**. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

O MASP de Lina: 50 anos do edifício na avenida Paulista. Blog Atelier Guide. 31 out 2018. Disponível em: <https://www.atelier.guide/home/o-masp-de-lina-50-anos-do-edificio-na-avenida-paulista>. Acesso em: 15 out 2021.

PAULA, A. L. de. **Avaliação da resistência de pilares de concreto de alta resistência**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Revista Concreto & Construções**. São Paulo, ano XXXVII, n. 53, jan. 2009. Disponível em: http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/Revista_Concreto_53.pdf. Acesso em: 06 jul. 2021.

PORTO, T. B.; FERNANDES, D. S. G. **Curso básico de concreto armado**. 1 Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

REINERT, M. V.; SEELBACH, L. C.; ROHDEN, A. B.; DAL MOLIN, D. C. C. Viabilidade técnico-econômica da utilização de concreto de alto desempenho em pilares de um edifício de trinta pavimentos: Estudo comparativo entre o concreto de alto desempenho e o concreto convencional na estrutura de um edifício de 20 pavimentos com núcleo rígido. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 57., 2015, Bonito. **Anais [...]** Bonito: IBRACON, 2015.

SANTOS, J. S.; SEELBACH, L. C.; ROHDEN, A. B.; DAL MOLIN, D. C. C. Viabilidade técnico-econômica da utilização de concreto de alto desempenho em pilares de um edifício de trinta pavimentos – estudo de caso: estrutura apertada com resistência à compressão fixa x variada ao longo dos pavimentos. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 57., 2015, Bonito. **Anais [...]**, Bonito: IBRACON, 2015.

SCHAF, A. V. **Dimensionamento estrutural de um edifício em concreto armado: Metodologia sem uso de software profissional vs. sistema CAD/TQS**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

SHAH, S. P.; AHMAD, S. H. **High performance concretes and applications**. 1st ed. Great Britain: British Library Cataloguing. 1994.

SP CORPORATE. **Centro Empresarial Nações Unidas – CENU – Torre Norte**. Sobre o Centro Empresarial Nações Unidas – CENU – Torre Norte. Blog SP Corporate. São Paulo, c2021. Disponível em: <https://spcorporate.com.br/imoveis/centro-empresarial-nacoes-unidas-cenu-torre-norte>. Acesso em: 15 out 2021.

TRINDADE, M. R. D. **Utilização da sílica ativa na composição do concreto de alta resistência**: análise da viabilidade técnica e econômica. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas, 2017.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. **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.

VALIN JR, M. de O.; SILVA, P. H. de A.; BRITO, M. D. C.; FLEURY, L. G. de B.; SILVA, D. G. S. Viabilidade da utilização do concreto de alto desempenho em substituição ao concreto convencional. *In*: XV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2014, Maceió. **Anais [...]**. Maceió: Marketing Aumentado, 2014.