

PROJETO E ANÁLISE DE UM EDIFÍCIO DE CONCRETO ARMADO COMPARANDO QUATRO RESISTÊNCIAS CARACTERÍSTICAS À COMPRESSÃO

*DESIGN AND ANALYSIS OF A REINFORCED CONCRETE BUILDING
COMPARING FOUR CHARACTERISTIC STRENGTHS TO COMPRESSION*

Alexandre Maines¹
Celso da Silva Mafra²
Elias Riffel³
Tulio Henrique Taboni⁴

RESUMO: O artigo analisa o impacto que a alteração da resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) tem no custo final de uma obra. O estudo foi desenvolvido tendo por base o projeto estrutural de uma edificação multifamiliar vertical com área total de 6.435,00 m². Na análise, foram comparados os resultados quantitativos de aço, de concreto e de custo global para quatro projetos com quatro f_{ck} diferentes, sendo eles f_{ck} 20 MPa, 30 MPa, 40 MPa e 50 MPa. Para os cálculos e dimensionamento da estrutura, foi utilizado o software Eberick versão 17.304 e, por meio dele, chegou-se aos resultados de materiais consumidos. Por meio de cotações de preços de aço e concreto com fornecedores locais, chegou-se à conclusão de que o concreto com o f_{ck} 30 MPa é o mais viável economicamente entre os fcks estudados.

Palavras-chave: Concreto; resistência característica; projeto estrutural.

ABSTRACT: This article analyzes the impact that changes in the characteristic compressive strength of concrete (f_{ck}) have on the final cost of a project. The study is developed based on the structural design of a vertical multifamily building with a total area of 6,435.00 m². The analysis compared the quantitative results of steel, concrete, and overall cost for four projects with four different fcks, namely f_{ck} 20 MPa, 30 MPa, 40 MPa, and 50 MPa. We used Eberick software version 17.304 for calculations and dimensioning of the structure, and through this software, we obtained the results of materials consumed. The price quotations for steel and concrete from local suppliers indicated that concrete with a compressive strength (f_{ck}) of 30 MPa is the most economically viable option among the fcks studied.

Keywords: concrete; characteristic strength; structural design.

¹ Professor Dr.- UNIFEBE. Engenheiro Civil : alexandre.maines@unifebe.edu.br

² Professor MSc.- UNIFEBE. Engenheiro Civil : celso.mafra@unifebe.edu.br

³ Professor MSc.- UNIFEBE. Engenheiro Civil : eliasriffel@unifebe.edu.br

⁴ Acadêmico do curso de Engenharia Civil – UNIFEBE : tulio.taboni@unifebe.edu.br

1 INTRODUÇÃO

O concreto representa grande parte dos custos de uma edificação, exercendo uma parcela considerável no custo final de um empreendimento, e no dimensionamento de estruturas de concreto armado a resistência característica à compressão (f_{ck}) do concreto deve ser considerada conforme as necessidades de projeto.

Segundo Bernardo (2014), as condições de agressividade do ambiente no qual a obra se encontra, confiabilidade de fornecedores regionais de concreto, tempo de execução de obra, as boas práticas no canteiro de obras e o custo, devem ser verificados durante a escolha do f_{ck} adequado na fase de elaboração do projeto.

Bernardo (2014) ainda destaca que o f_{ck} do concreto é um dos parâmetros principais de referência durante o dimensionamento de estruturas de concreto armado.

A norma brasileira NBR 6118:2023 normatiza os projetos de concreto armado com concretos divididos em grupo I e grupo II. Os concretos do grupo I têm f_{ck} de 20MPa até o 50MPa e concretos do grupo II têm f_{ck} de 55MPa até o 90MPa. Nesse contexto, a dúvida pode surgir entre construtores e projetistas sobre qual opção de f_{ck} é mais economicamente viável dentre a variedade de concretos disponíveis no mercado e as mais diversas formulações de projetos possíveis ficando a seguinte questão problema a analisar-se: qual F_{ck} analisado terá a melhor viabilidade econômica?

O presente artigo teve como objetivo principal estudar quais concretos do grupo I possuem a maior viabilidade financeira para um edifício de 11 pavimentos em concreto armado. Como ferramenta para obtenção do resultado proposto neste artigo utilizou-se o software de cálculo estrutural Eberick, no qual toda a modelação do edifício, assim como os quantitativos de materiais obteve-se considerando quatro resistências características à compressão diferente (f_{ck} 20MPa, f_{ck} 30MPa, f_{ck} 40MPa e f_{ck} 50MPa). O estudo empregado no resumo de materiais considerou apenas os quantitativos de concreto e aço para lajes, vigas e pilares, desconsiderando escadas, reservatórios, blocos de fundação e as suas respectivas estacas, assim como muros e contenções, sendo puramente estudada a estrutura geral do prédio.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONCEPÇÃO E ANÁLISE ESTRUTURAL

A concepção estrutural é a fase mais importante de um projeto estrutural, pois nesta fase se define o sistema estrutural, os materiais que serão empregados e as ações a serem consideradas, tendo como objetivo pré-dimensionar os elementos estruturais e prever o seu comportamento (Pinheiro, 2007).

Nas edificações a estrutura é o conjunto de elementos estruturais sendo eles lajes, vigas, pilares etc. (Assis, 2019).

O projeto arquitetônico representa a base para a elaboração do projeto. Este deve prever o posicionamento dos elementos para respeitar a distribuição dos diferentes ambientes nos diversos pavimentos. Mas não se deve esquecer de que a estrutura deve também ser coerente com as características do solo no qual ela se apoia (Pinheiro et al., 2007).

Uma vez definida a localização dos pilares, vigas e lajes, parte-se para o pré-dimensionamento dos elementos estruturais. Nessa etapa, o engenheiro de estruturas precisa ter conhecimento do comportamento estrutural para determinar as dimensões dos elementos de maneira a obter um menor custo para a obra e respeitar prescrições feitas pela Norma. As dimensões dos elementos variam com as cargas, vãos, materiais, tipo estrutural entre outros (Soares; Debs, 1997).

2.2 SISTEMA ESTRUTURAL E MODELO ESTRUTURAL

De modo geral os sistemas estruturais de um pavimento de edifício são formados por lajes, vigas e pilares, ou somente por lajes apoiadas diretamente nos pilares. Cada um deles apresenta distintas alternativas, pois cada tipo de laje (maciça, nervurada, protendida etc.) e cada tipo de viga (armada, protendida etc.) apresentam características que devem ser analisadas ao serem combinadas (Clímaco, 2020).

Quando diferentes sistemas estruturais são possíveis sem vantagens técnicas significativas entre eles, o custo torna-se o fator principal na escolha do sistema. No custo leva-se em conta a mão de obra, os materiais, os equipamentos necessários entre outros. (Clímaco 2020).

Entende-se como estrutura convencional aquela em que as lajes se apoiam em vigas e as vigas sobre pilares (tipo laje-viga-pilar). Os sistemas estruturais formados por lajes, vigas e pilares são os mais comuns, na prática, tanto para as construções de pequeno porte como casas e sobrados, como as de grande porte, como edifícios de múltiplos pavimentos, escolas, hospitais e tantas outras. As lajes podem variar segundo vários tipos.

Nesse sistema, as paredes não têm função estrutural, servem apenas como divisórias (Clímaco 2020). Albuquerque (1999) ainda destaca que:

O lançamento da estrutura segue alguns critérios “Geralmente se inicia pela locação dos pilares no pavimento-tipo, que segue a seguinte ordem: pilares de canto, pilares nas áreas comuns a todos os pavimentos (região da escada e dos elevadores), pilares de extremidade (situados no contorno do pavimento) e finalmente pilares internos”.

O autor ainda complementa:

[...] a colocação das vigas vai depender do tipo de laje que será adotada, já que as vigas delimitam o contorno das lajes. Devem-se colocar as vigas no alinhamento das alvenarias e começar a definir as vigas externas do pavimento. Além daquelas que ligam os pilares que constituem os pórticos, outras vigas podem ser necessárias, para dividir um painel de laje com grandes dimensões. Com o posicionamento das vigas as lajes ficam praticamente definidas, faltando apenas, caso existam, as lajes em balanço".

2.3 O CONCRETO ARMADO

Segundo Clímaco (2020), pode-se definir concreto armado como "o material estrutural constituído pela associação do concreto simples com uma armadura passiva, ambos resistindo solidariamente aos esforços a que a peça estiver submetida". Esses materiais devem trabalhar em conjunto, sendo a aderência entre eles a propriedade que garante a solidariedade do conjunto.

Desse modo, o concreto armado, por meio da ação conjunta do concreto simples e o aço, torna-se um material adequado para constituir os elementos estruturais responsáveis por resistir e transmitir os esforços solicitantes (Clímaco, 2020).

Apresenta-se a seguir, algumas definições da resistência à compressão e do módulo de elasticidade do concreto que são propriedades mecânicas de fundamental importância no projeto de estruturas de concreto.

2.3.1 Resistência do concreto a compressão

A resistência do concreto a compressão é o parâmetro básico de dimensionamento de estruturas de concreto armado. Silva Filho (2011) destaca ainda que a resistência à compressão é usada como base pelo projetista para estimar, por meio de equações de correlações definidas nas normas, outros parâmetros de dimensionamento fundamentais, tais como: a resistência à tração, a resistência ao cisalhamento e ao módulo de elasticidade.

O parâmetro usado comumente para caracterizar a capacidade mecânica de um concreto acaba sendo a resistência característica à compressão, aos 28 dias de idade, denominada f_{ck} . Esse é o valor adotado como referencial pelo projetista estrutural Silva Filho (2011).

Para descobrir a resistência característica a compressão do concreto é realizado um ensaio que compreende o rompimento de um corpo de prova cilíndrico numa prensa hidráulica, nas medidas de 10x20 cm ou 15x30 cm, aos 28 dias após a sua produção.

Como definido pela NBR 6118:2014, o valor do f_{ck} do concreto é classificado em dois grupos, sendo: grupo I para concretos com f_{ck} C20, C25, C30, C35, C40, C45 e C50 e grupo II para concretos com f_{ck} C55, C60, C70, C80, C90 e C100, (Bastos, 2023).

Ainda, segundo a NBR 6118:2014, em situações normais, as resistências características para concreto deverão ser minoradas respectivamente pelos coeficientes de cálculo γ_c conforme equação 1.

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{f_{ck}}{1,4} \quad (1)$$

A resistência a compressão do concreto (f_{cd}) é o parâmetro variável de análise utilizado no presente trabalho.

2.3.2 Módulo de elasticidade do concreto

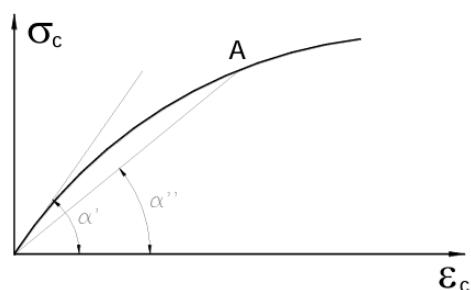
O módulo de elasticidade é um parâmetro numérico relativo à medida da deformação que o concreto sofre sob a ação de tensões, geralmente tensões de compressão, ou ainda, é uma medida da rigidez do material.

Um módulo de elasticidade alto indica um concreto mais rígido, capaz de suportar grandes cargas sem deformações excessivas, enquanto um módulo de elasticidade baixo pode resultar em estruturas mais flexíveis, que podem ser mais indicadas para aplicações que exijam maiores deformações.

Mehta & Monteiro (2014), *apud* Pacheco (2021) destacam que esta importante propriedade do concreto é afetada por diversos fatores, apresentando os seguintes fatores intervenientes: umidade do corpo de prova e condições de carregamento, módulo de elasticidade da matriz cimentícia e dos agregados, porosidade, composição da interface da zona de transição e fração volumétrica do concreto.

Para o concreto, quando submetido às tensões de compressão, a relação entre tensões e deformações ($\sigma \times \varepsilon$) não se apresenta de forma linear, como indica a Figura 1.

Figura 1 - Relação tensão x deformação do concreto



Fonte - Bastos, 2023

2.4 DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO

O dimensionamento de uma estrutura deve assegurar que ela resista sem colapso e sem altas deformações às solicitações impostas a ela durante a sua vida útil. O dimensionamento de estruturas em concreto armado é feito pelo método dos estados-limites (Carvalho & Filho, 2014).

Estado-Limite é uma condição particular na qual uma estrutura não deve ultrapassar, e caso isso ocorra, será considerada imprópria à finalidade estrutural ou ao seu uso. Segundo a NBR 6118:2023, os Estados-Limites podem ser classificados de forma geral como: Estado-Limite Último (ELU) e Estado-Limite de Serviço (ELS). Como a análise da segurança feita pelo método dos estados-limite é um processo simplificado, em que modelos idealizados são colocados no lugar da estrutura real, precisamos contornar as incertezas existentes no cálculo. Dessa maneira, minoram-se as resistências e majoram-se as ações (Schaf, 2018).

2.4.1 Estados limites

No método dos estados-limites uma estrutura é considerada segura caso as solicitações decorrentes das cargas majoradas sejam inferiores aos valores das solicitações últimas como destacado a seguir:

As resistências dos materiais que compõem o pilar – o concreto e o aço – são minoradas por coeficientes de ponderação dos materiais, sendo, em geral, 1,4 para o concreto e 1,15 para o aço [...] assim, por exemplo, se no pilar for aplicado o concreto C30 (f_{ck} de 30 MPa = 3,0 kN/cm² = 300 kgf/cm²), o dimensionamento teórico será feito como se a resistência do concreto fosse menor, de valor $30/1,4 = 21,4$ MPa. No caso do aço, se aplicado o aço CA-50, com resistência de início de escoamento (f_yk) de 500 MPa, o dimensionamento será feito como se a resistência do aço fosse menor, de valor $500/1,15 = 434,8$ MPa. As resistências de 21,4 MPa para o concreto e 434,8 MPa para o aço são chamadas resistências de cálculo (Bastos, 2023, p.43)

Este é o método utilizado na ABNT NBR 6118:2023. Os estados limites podem ser classificados em:

- **Estados limites últimos (ELU)**

No item 3.2.1 a NBR 6118 define o Estado-Limite Último como: “estado-limite relacionado ao colapso, ou a qualquer outra forma de ruína estrutural, que determine a paralisação do uso da estrutura.” Entende-se que durante a vida útil da estrutura não se pode chegar jamais no ELU, segue listagem dos ELUs que devem ser verificados segundo a NBR 6118:2023:

- a) estado-limite último da perda do equilíbrio da estrutura, admitida como corpo rígido; b) estado-limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, devido às solicitações normais e tangenciais, admitindo-se a redistribuição de esforços internos, desde que seja respeitada a capacidade de adaptação plástica definida na Seção 14, e admitindo-se, em geral, as verificações separadas das solicitações normais e tangenciais; todavia, quando a interação entre elas for importante, ela estará explicitamente indicada nesta Norma;
- c) estado-limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, considerando os efeitos de segunda ordem;
- d) estado-limite último provocado por solicitações dinâmicas (ver Seção 23);
- e) estado-limite último de colapso progressivo;
- f) estado-limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo g) estado-limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, considerando ações sísmicas, de acordo com a ABNT NBR 15421;
- h) outros estados-limites últimos que eventualmente possam ocorrer em casos especiais ou em parte, considerando exposição ao fogo, conforme a ABNT NBR 15200;
- (NBR 6118:2024, p.55).

- **Estados limites de serviço (ELS)**

A NBR 6118:3023 (item 10.4, p. 55) define que Estados-Limites de Serviço “são aqueles relacionados ao conforto do usuário e à durabilidade, aparência e boa utilização das estruturas, seja em relação aos usuários, seja em relação às máquinas e aos equipamentos suportados pelas estruturas.” Podendo gerar uma interpretação que varia a aplicabilidade da estrutura, alcançado o ELS, a utilização dessa estrutura pode ficar comprometida, como o caso de uma fábrica que opera com máquinas de alta sensibilidade que necessariamente precisam trabalhar em nível. Se a laje onde ela estiver sobreposta começar a apresentar flechas de serviço, muito provavelmente inviabilizará a operação. A seguir, estão apresentadas definições de ELS segundo a NBR 6118:2023:

- A) Estado-limite de abertura das fissuras ELS-W estado em que as fissuras se apresentam com aberturas iguais aos máximos especificados em 13.4.2 (ver 17.3.3).
- B) Estado-limite de deformações excessivas ELS-DEF estado em que as deformações atingem os limites estabelecidos para a utilização normal, dados em 13.3 (ver 17.3.2).
- C) Estado-limite de descompressão ELS-D estado no qual, em um ou mais pontos da seção transversal, a tensão normal é nula, não havendo tração no restante da seção. Verificação usual no caso do concreto protendido (ver 13.4.2).
- D) Estado-limite de descompressão parcial ELS-DP estado no qual se garante a compressão na seção transversal, na região onde existem armaduras ativas. Essa região deve se estender até uma distância ap da face mais próxima da cordoalha ou da bainha de protensão (ver Figura 3.1 e Tabela 13.4).
- E) Estado-limite de compressão excessiva ELS-CE estado em que as tensões de compressão atingem o limite convencional estabelecido. Usual no caso do concreto protendido na ocasião da aplicação da protensão (ver 17.2.4.3.2.a)

F) Estado-límite de vibrações excessivas ELS-VE estado em que as vibrações atingem os limites estabelecidos para a utilização normal da construção (NBR 6118:2024, p.55).

2.4.2 Ações solicitantes

As ações são quaisquer forças externas a estrutura (permanentes, variáveis ou acidentais, excepcionais e deslocamentos ou deformações impostas) capazes de produzir estados de tensão na estrutura. As solicitações são qualquer esforço interno na estrutura ou conjunto de esforços (forças normais e cortantes, momentos fletores e de torção) decorrentes das ações na estrutura (Clímaco, 2020).

As lajes transmitem as ações para as vigas, por meio das reações de apoio e as vigas suportam os seus pesos próprios, as reações provenientes das lajes, pesos de paredes e, ainda, ações de outros elementos que nelas se apoiam, por exemplo, as reações de apoio de outras vigas. Em geral, as vigas trabalham à flexão e a força cortante e transmitem as ações para os elementos verticais - pilares e pilares-parede - por meio das respectivas reações (Clímaco, 2020).

Os pilares e os pilares parede recebem as reações das vigas que neles se apoiam, as quais, com o peso próprio desses elementos verticais, são transferidas para os andares inferiores e, finalmente, para o solo, por meio dos respectivos elementos de fundação (Pinheiro *et al.*, 2007).

- **Ações permanentes:**

As ações permanentes são classificadas como as ações que ocorrem pouca variação dos seus valores com o passar do tempo, tendo uma constância nas suas definições. Assim sendo, são utilizados valores mais desfavoráveis para a segurança, ainda dentro das ações permanentes existem duas classificações, permanentes diretas (Considerado o próprio peso da estrutura e elementos construtivos, utilizando um valor médio de 2.500 kg/m³ para o concreto armado) e permanentes indiretas (em que se analisa a retração do concreto, deformações, deslocamento de apoios e deformações geométricas (Barboza, 2008).

- **Ações variáveis**

São aquelas que possuem variação conforme as suas quantidades e locações, são divididas em diretas (Cargas acidentais previstas para uso da construção [pessoas, moveis, água dos reservatórios e ação do vento] e indiretas (variações uniformes como clima e insolação) (Barboza, 2008).

Segundo a NBR 6118 item 10.2, a segurança de estruturas de concreto deve ser verificada nos estados-limites últimos e de serviço. Sendo definido o estado-limite último (ELU) como “estado-limite” relacionado ao colapso ou a qualquer outra forma de ruína estrutural, que determine a paralisação do uso da estrutura. Já o estado-limite de serviço (ELS) são aqueles relacionados ao conforto do usuário e à durabilidade, aparência e boa utilização das estruturas, seja relacionado aos usuários, seja em relação às máquinas e aos equipamentos suportados pelas estruturas (NBR 6118: 2024).

Um dos métodos de cálculo mais utilizados e recomendados é o método dos estados-limites no qual a segurança é verificada da seguinte maneira: “[...] pela comparação das solicitações decorrentes das ações, majoradas por coeficientes de ponderação (ou segurança), os esforços resistentes internos das seções, calculados considerando a minoração das resistências dos materiais, que podem ser causados por eventos desfavoráveis. Nesse método, busca-se simular o comportamento dos materiais concreto e aço no interior da peça, por meio de modelos sofisticados e realistas de análise estrutural, que considerem também previsões sobre o futuro da edificação” (Clímaco, 2020).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

De acordo com Gil (2002), esta pesquisa tem uma abordagem quantitativa, definida como uma natureza de pesquisa onde o método de coleta dão-se por meio de perspectivas quantitativas. A quantificação visa à coleta e análise de dados numéricos, no caso deste trabalho buscou quantificar os custos dos diferentes fcks listados neste trabalho, sento eles: o fck 20, 30, 40 e 50 e como tais fcks influenciam diretamente na redução do consumo de aço da obra utilizada como base para o desenvolvimento deste estudo, para obter um fck ideal, visando o custo total da obra, para a unidade caso citada neste artigo.

Segundo os objetivos, a pesquisa se classifica como experimental, que constitui o delineamento mais prestigiado nos meios científicos. Consiste essencialmente em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis capazes de influenciá-lo e definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto. Trata-se, portanto, de uma pesquisa em que o pesquisador é um agente ativo, e não um observador passivo, como no caso deste trabalho, no qual se busca a hipótese do fck ideal para uma obra de 6.435 m² de área construída. Pesquisas experimentais têm dentre os seus objetivos testar hipóteses que estabelecem relações de causa e efeito entre as variáveis (Gil, 2002).

Em virtude das suas possibilidades de controle, as experiências oferecem garantia muito maior do que qualquer outro delineamento de que a variável independente causa efeitos na variável dependente, como neste caso a busca por um fck ideal para as características da obra utilizada e para a localização dela, tendo em vista que os preços de concreto e aço variam regionalmente.

Em relação aos procedimentos técnicos, esta pesquisa é do tipo bibliográfica e de estudo de caso. A pesquisa bibliográfica é construída na revisão de materiais já elaborados (livros, publicações periódicas e outros impressos), existindo pesquisas puramente bibliográficas; os estudos exploratórios, no geral, são descritos como bibliográficos. A parte experimental desta pesquisa se encontra no desenvolvimento de 4 projetos idênticos, isolando somente a variável fck que é o que realmente deseja-se analisar. A grande vantagem da pesquisa bibliográfica é poder estudar uma gama de informações muito maior do que um pesquisador sozinho poderia desenvolver. No caso deste artigo, a revisão bibliográfica buscou por dados sobre consumo de madeira em obras, e os detalhes e números provenientes de tais obras. O estudo de caso consiste no estudo profundo de um objeto de maneira que permita amplo e detalhado conhecimento sobre ele. Este trabalho visa formular uma hipótese referente ao fck adequado para a obra analisada, explorando uma situação da realidade denominada unidade caso (Gil, 2002).

A população utilizada como base na elaboração deste estudo de caso, com o resultado de maior viabilidade financeira, foi uma edificação predial multifamiliar vertical de 6.435 m², já que tal edificação foi projetada inteiramente em concreto armado, tendo sido elaborado com três pavimentos com laje maciça e os oito demais pavimentos feitos com laje nervurada com utilização de blocos de EPS a medida 40x40x20.

A amostra se enquadra nas 4 resistências características (fcks) diferentes utilizados, e o projeto estrutural do edifício multifamiliar vertical foi o mesmo, não tendo nenhuma alteração de geometria de uma amostra para outra, ou seja, cada amostra de fcks analisados para este estudo de caso teve o objetivo de encontrar objetivos diferentes, sendo esses resultados a alteração do consumo de aço (Gil, 2002).

A edificação adotada como unidade caso para a elaboração do projeto estrutural e obtenção dos dados quantitativos dos insumos consumidos (concreto e aço) foi um edifício residencial multifamiliar (ver Figuras 2 e 3).

A edificação tem área total de 6.435 m² construídos, tendo cada pavimento tipo com uma área 500 m², o pavimento térreo contém 700 m², já as garagens 1, 2 e pavimento diferenciado têm área 746 m², sendo 11 pavimentos constituídos por térreo (contendo duas salas comerciais, 20 vagas de garagem e uma acadêmica), garagem 1 (contendo 17 vagas de garagem), garagem 2 (contendo 17 vagas de garagem),

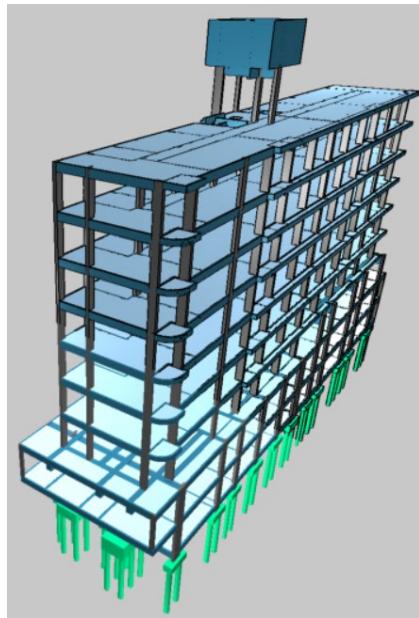
pavimento diferenciado (contendo três apartamentos, um salão de festas e 9 vagas de garagem), pavimento tipo constituído por seis repetições (ver Figura 7), laje de cobertura e caixa d'água.

Esta pesquisa foi desenvolvida por meio da elaboração de um projeto estrutural para uma edificação multifamiliar vertical no software *Eberick* versão 2024-9 [v. 17.304], e o programa seguem os critérios estabelecidos pela norma brasileira NBR 6118:2023. Na análise é atendido o estado limite último (ELU) com verificação para o estado limite de serviço (ELS).

Após o lançamento da estrutura foi gerado o quantitativo de materiais, resultando em quatro quantitativos, um para cada fck escolhido (fck 20 MPa, 30 MPa, 40 MPa e 50 MPa), e a geometria das seções de pilares, vigas e lajes foram mantidas, ou seja, o volume de concreto não sofreu alteração, sendo igual para os 4 fcks escolhidos.

Os quantitativos e os seus respectivos custos estão apresentados no item 4 - resultados, em que cada fck e o seu respectivo consumo de aço.

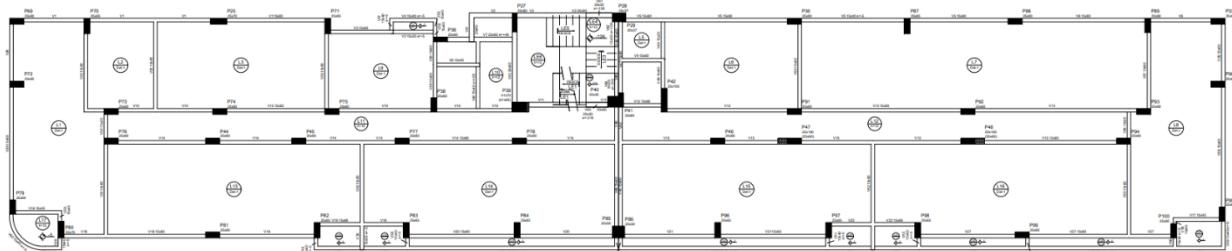
Figura 2 – Vista 3D através do software Eberick da edificação elaborada para este estudo



Fonte: autores (2024)

A Figura 3 representa o pavimento de formas do pavimento tipo 6, e cada pavimento tipo conta com laje nervurada de EPS com medidas de 40x40x20, outra característica importante dos pavimentos tipo é que cada tipo tem 9 apartamentos.

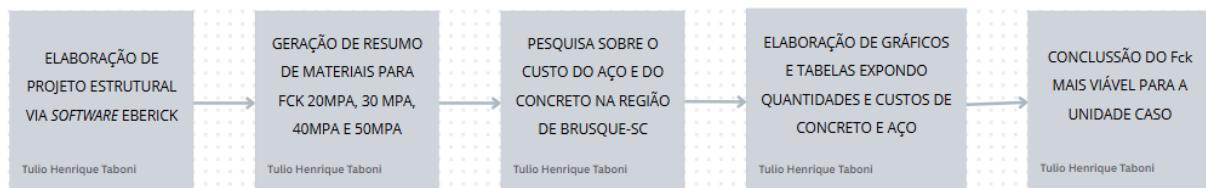
Figura 3 – Planta de formas do pavimento tipo x6



Fonte: autores (2024)

O delineamento da pesquisa pode ser exemplificado como um fluxograma demonstrado na Figura 4, na qual se pode enxergar a maneira como o método de pesquisa foi empregado.

Figura 4 – Fluxograma do método de pesquisa empregado



Fonte: autores (2024)

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após elaboração de projeto estrutural utilizando o software Eberick, comparando para o mesmo projeto 4 fcks diferentes, sendo eles 20 MPa, 30 MPa, 40 MPa e 50 MPa, apresenta-se os resultados obtidos.

4.1 ANÁLISE DE CONSUMO DE AÇO.

Nas Tabelas 1, 2, 3 e 4, estão apresentados os consumos de aço por elemento (vigas, pilares e lajes) para cada fck e o consumo global de aço para esses elementos. Como mencionado não se alterou a dimensão dos elementos e o volume de concreto fica o mesmo para toda a obra.

A Tabela 1 mostra os consumos de aço e concreto para o concreto de fck 20 Mpa, visando analisar o consumo de aço (kg/m^3) e o peso total de aço consumido (kg), assim como o volume de concreto (m^3).

Tabela 1 – Concreto fck 20 Mpa

		Vigas	Pilares	Lajes	Total
Peso total + 0% (kg)	CA50	41.997,9	15.794,5	17.226,6	75.019,0
	CA60	5.235,4	4.091,6	1.577,4	10.904,4
		Total	47.233,3	19.886,1	18.804,0
Volume concreto (m ³)	C-20	449,3	245,3	630,3	1.324,9
Consumo de aço (kg/m ³)		105,1	81,1	29,8	64,9

Fonte: autores (2024)

A Tabela 2 mostra os consumos de aço e concreto para o concreto de fck 30 Mpa, visando analisar o consumo de aço (kg/m³) e o peso total de aço consumido (kg), assim como o volume de concreto (m³).

Tabela 2 – Concreto fck 30 MPa

		Vigas	Pilares	Lajes	Total
Peso total + 0% (kg)	CA50	39.932,4	11.349,4	17.061,3	68.343,1
	CA60	5.438,7	4.372,0	1.567,1	11.377,8
	Total	45.371,1	15.721,4	18.628,4	79.720,9
Volume concreto (m ³)	C-30	450,0	246,1	630,3	1.326,4
Consumo de aço (kg/m ³)		100,8	63,9	29,6	60,1

Fonte: autores (2024)

A Tabela 3 mostra os consumos de aço e concreto para o concreto de fck 40 Mpa, visando analisar o consumo de aço (kg/m³) e o peso total de aço consumido (kg), assim como o volume de concreto (m³).

Tabela 3 – Concreto fck 40 MPa

		Vigas	Pilares	Lajes	Total
Peso total + 0% (kg)	CA50	38.515,0	10.564,4	16.889,6	65.969,0
	CA60	5.300,7	4.328,4	1.575,3	11.204,4
	Total	43.815,7	14.892,8	18.464,9	77.173,4
Volume concreto (m ³)	C-40	450,0	246,1	630,3	1.326,4
Consumo de aço (kg/m ³)		97,4	60,5	29,3	58,2

Fonte: autores (2024)

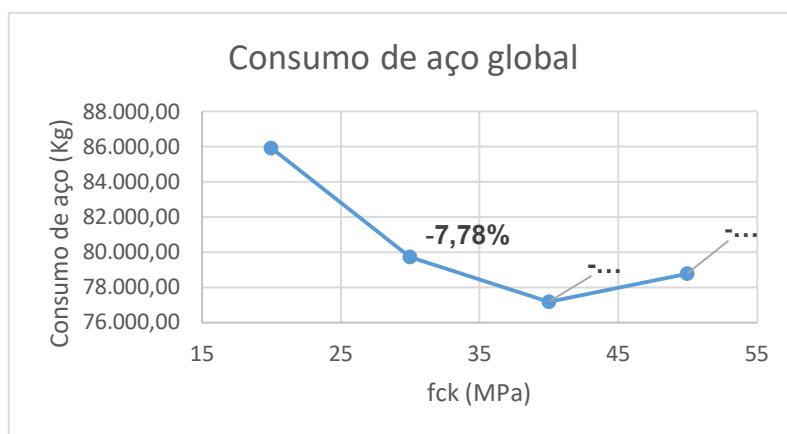
A Tabela 4 demonstra os consumos de aço e concreto para o concreto de fck 50 Mpa, visando analisar o consumo de aço (kg/m³) e o peso total de aço consumido (kg) assim como o volume de concreto (m³).

Tabela 4 – Concreto fck 50 MPa

		Vigas	Pilares	Lajes	Total
Peso total + 0% (kg)	CA50	38.856,0	11.794,6	19.319,7	69.970,3
	CA60	5.168,9	3.466,9	172,8	8.808,6
	Total	44.024,9	15.261,5	19.492,5	78.778,9
Volume concreto (m ³)	C-50	450,0	246,1	630,3	1.326,4
Consumo de aço (kg/m ³)		97,8	62,0	30,9	59,4

Fonte: autores (2024)

O Gráfico 1 ilustra o consumo global de aço da estrutura. Como mencionado não se alterou a dimensão dos elementos e o volume de concreto fica o mesmo para toda a obra.

Gráfico 1 – Consumo de aço global da estrutura em função do fck


Fonte: autores (2024)

4.2 ANÁLISE DE CUSTO GLOBAL AÇO X CONCRETO.

Apresentado os quantitativos de materiais apresenta-se a seguir a composição de custo global do concreto armado, tendo como base de preços uma pesquisa realizada com quatro concreteiras regionais da cidade de Brusque–SC, e uma pesquisa com dois grandes fornecedores de aço que atendem o mercado nacional. O levantamento foi feito em novembro de 2024.

Os resultados estão apresentados nas Tabelas 5, 6 7 e 8 para cada fck.

A Tabela 5 mostra os custos para o concreto de fck 20 Mpa, em que relaciona um valor médio dos custos de concreto, por meio de uma média aritmética. Outro número mencionado é o custo total de aço consumido, e o custo global da soma dos valores de aço e concreto consumidos no montante da obra.

Tabela 5 – Custos do fck 20 Mpa

CONCRETO				
CONCRETEIRA 1	CONCRETEIRA 2	CONCRETEIRA 3	CONCRETEIRA 4	MÉDIA
R\$ 475,00	R\$ 490,00	R\$ 480,00	R\$ 475,00	R\$ 480,00
R\$ 629.327,50	R\$ 649.201,00	R\$ 635.952,00	R\$ 629.327,50	R\$ 635.952,00
AÇO				
CA 50	R\$ 5,70	R\$ 427.608,30		
CA 60	R\$ 7,65	R\$ 83.418,66		
SOMATÓRIO		R\$ 511.026,96		
AÇO + CONCRETO =		R\$ 1.146.978,96		

Fonte: autores (2024)

A Tabela 6 mostra os custos para o concreto de fck 30 Mpa, em que relaciona um valor médio dos custos de concreto, por meio de uma média aritmética. Outro número mencionado é o custo total de aço consumido, e o custo global da soma dos valores de aço e concreto consumidos no montante da obra.

Tabela 6 – Custos do fck 30 MPa

CONCRETO				
CONCRETEIRA 1	CONCRETEIRA 2	CONCRETEIRA 3	CONCRETEIRA 4	MÉDIA
R\$ 495,00	R\$ 519,00	R\$ 495,00	R\$ 495,00	R\$ 501,00
R\$ 656.568,00	R\$ 688.401,60	R\$ 656.568,00	R\$ 656.568,00	R\$ 664.526,40
AÇO				
CA 50	R\$ 5,70	R\$ 389.555,67		
CA 60	R\$ 7,65	R\$ 87.040,17		
SOMATÓRIO		R\$ 476.595,84		
AÇO + CONCRETO =		R\$ 1.141.122,24		

Fonte: autores (2024)

A Tabela 7 mostra os custos para o concreto de fck 40 Mpa, em que relaciona um valor médio dos custos de concreto, por meio de uma média aritmética. Outro número mencionado é o custo total de aço consumido, e o custo global da soma dos valores de aço e concreto consumidos no montante da obra.

Tabela 7 – Custos do fck 40 MPa

CONCRETO				
CONCRETEIRA 1	CONCRETEIRA 2	CONCRETEIRA 3	CONCRETEIRA 4	MÉDIA
540,0	590,0	529,0	521,0	R\$ 545,00
R\$ 716.256,00	R\$ 782.576,00	R\$ 701.665,60	R\$ 691.054,40	R\$ 722.888,00
AÇO				
CA 50	R\$ 5,70	R\$ 376.023,30		
CA 60	R\$ 7,65	R\$ 85.713,66		
SOMATÓRIO		R\$ 461.736,96		
AÇO + CONCRETO =		R\$ 1.184.624,96		

Fonte: autores (2024)

A Tabela 8 mostra os custos para o concreto de fck 50 Mpa, em que relaciona um valor médio dos custos de concreto, por meio de uma média aritmética. Outro número mencionado é o custo total de aço consumido, e o custo global da soma dos valores de aço e concreto consumidos no montante da obra.

Tabela 8 – Custos do fck 50 MPa

CONCRETO				
CONCRETEIRA 1	CONCRETEIRA 2	CONCRETEIRA 3	CONCRETEIRA 4	MÉDIA
560,0	665,0	574,0	600,0	R\$ 599,75
R\$ 742.784,00	R\$ 882.056,00	R\$ 761.353,60	R\$ 795.840,00	R\$ 795.508,40
AÇO				
CA 50	R\$ 5,70	R\$ 398.830,71		
CA 60	R\$ 7,65	R\$ 67.385,79		
SOMATÓRIO		R\$ 466.216,50		
AÇO + CONCRETO =		R\$ 1.261.724,90		

Fonte: autores (2024)

4.3 ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTO GLOBAL AÇO X CONCRETO.

Este item, no Gráfico 2, apresenta um comparativo global de preços entre os projetos dimensionados com os fcks relativos. Os preços apresentados são os preços de quantidades de aço e de concreto para cada fck.

Gráfico 2 – Custo global por fck



Fonte: autores (2024)

4.4 CLASSE DE AGRESSIVIDADE

Vale ressaltar que este projeto foi elaborado, visando a classe de agressividade I conforme NBR 6118:2023, e conforme ela ressalta quanto maior o valor do fck adotado, a obra tem possibilidade de se localizar em áreas com maior classe de agressividade, por exemplo, classe II ou III, onde áreas litorâneas com proximidade da maresia podem ser extremamente agressivas com a estrutura.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analizando as tabelas e gráficos, constatamos que a resistência característica para o concreto C30 apresenta maior viabilidade econômica em todos os casos citados: fck 20 MPa, 30 MPa, 40 MPa e 50 Mpa, o fck 30 MPa.

Adotando os resultados do concreto com fck 20 como referência, têm-se que os seguintes resultados financeiros comparativos: fck 30 MPa com redução de 0,51%, ou seja, R\$ 5.856,72; fck 40 com acréscimo de 3,17%, ou seja, R\$ 37.646,00; fck 50 com acréscimo de 9,09%, ou seja, R\$ 114.745,94.

Como demonstrado no Gráfico 3, que mostra a reta do custo total (aço + concreto), é possível visualizar que o concreto com fck 30 MPa apresentou um posicionamento abaixo dos demais.

Um ponto importante a se ressaltar é que na interpretação das Tabelas 1, 2, 3 e 4, nas quais os resultados para consumo de aço estão apresentados. Nota-se que ocorrem reduções do fck 20 (85.923,4 kg) para o 30 (79.720,9Kg), assim como para o 40 (77.173,4 kg). Porém, para o fck 50 (78.778,9 kg), ocorre um pequeno aumento no consumo do aço no valor de 1.644,5 kg. Tal aumento se justifica pela exigência de adoção de taxas mínimas de armadura, como determina a norma de concreto.

Com relação à questão problema proposta, que buscou responder qual dos fcks analisados tem a melhor viabilidade econômica, demonstrou-se que o concreto com fck 30Mpa apresenta menor custo comparativo e tem maior viabilidade econômica para a obra estudada.

Destaque-se que a pesquisa alterou apenas a resistência característica do concreto (fck) para cada análise feita. Não foram ajustadas as dimensões dos elementos estruturais para cada fck estudado, o que pode ser apontado como uma limitação do estudo. Fica, dessa forma, apontada esta análise para trabalhos futuros.

A pesquisa desenvolvida representa uma importante contribuição para o setor de construção civil por destacar a influência da resistência do concreto no custo global de uma edificação, além de realizar comparativo entre distintos concretos com resistências variadas e apontar aquele que mostrou melhor desempenho.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2024.

ASSIS, Natália de Oliveira. **Processo de dimensionamento de estruturas em concreto armado utilizando o programa TQS.** 2019.

BARBOZA, Marcos Robati; BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. Concepção e análise de estruturas de edifícios em concreto armado. **Relatório Final de Iniciação Científica–Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru,** 2008.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Fundamentos do concreto armado.** Bauru: Unesp, 2023.

BERNARDO, J. N. D. **Análise da influência da resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) no dimensionamento estrutural de um edifício residencial em concreto armado.** Artigo submetido ao Curso de Engenharia Civil da UNESC - como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Civil, 2014.

CLÍMACO, J. C. T. S. **Estruturas de concreto armado: fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação.** Brasília, Editora Universidade de Brasília, Finatec, 2020.

MATIAS, Fernanda. **Avaliação da influência da resistência à compressão**

do concreto no custo do sistema estrutural de um edifício de cinco pavimentos. 2019. UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense– 2011/01

MATIAS, F. **Avaliação da influência da resistência à compressão do concreto no custo do sistema estrutural de um edifício de cinco pavimentos.** Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.

PINHEIRO, Libânio M. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios.** UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS Departamento de Engenharia de Estruturas São Carlos–SP, maio de 2007.

PACHECO, J.; BILESKY, P.; MORAIS, T.; GRANDO, F.; HELENE, P. **Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto.** CBC012, IBRACON, 2014.

SILVA FILHO, L.C.P., HELENE, P. **Análise de Estruturas de Concreto com Problemas de Resistência e Fissuração.** IBRACON, 2011.

SOARES, Rodrigo de Carvalho; EL DEBS, A. L. H. C. **Otimização de seções transversais de concreto armado sujeitas à flexão: aplicação a pavimentos.** 1997. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado)–Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo