

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA DO CONCRETO NO
DESEMPENHO ESTRUTURAL E ECONÔMICO DE EDIFICAÇÕES

João Kaian dos Santos Perlingeiro

Trabalho apresentado à Coordenação do
Curso de Engenharia Civil, da Universidade
Federal de Uberlândia, para a obtenção do
Grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Uberlândia - MG
Dezembro – 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA DO CONCRETO NO
DESEMPENHO ESTRUTURAL E ECONÔMICO DE EDIFICAÇÕES

João Kaian dos Santos Perlingeiro

Profª Drª Maria Cristina Vidigal de Lima
Faculdade de Engenharia Civil

Coordenadora do Curso de Engenharia Civil
Vanessa Cristina de Castilho

Uberlândia - MG
Dezembro – 2017

Aos meus pais e irmãos, a quem amo,
que me incentivam e me apoiam ao longo
da minha trajetória acadêmica e pessoal.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Jane e Fabiano, minha avó Mercedes e aos meus irmãos Arícia e Davi por serem peças fundamentais em minha vida e pelo suporte emocional e financeiro dado nesses anos de faculdade. Eu não conseguiria sem vocês.

Aos professores que me inspiraram ao longo da vida, do ensino primário ao superior. Em especial à professora Maria Cristina Vidigal de Lima pela orientação do meu trabalho de conclusão de curso, pelo estilo de lidar com os alunos - ao qual me adaptei muito bem - e pela paciência com meus atrasos e à engenheira Maria Regina Ayres de Lima pela oportunidade de aprendizado no CAD/TQS e pela confiança depositada em mim.

Aos meus amigos Patrick, Pedro Aurélio e Karina pela amizade, apoio mútuo e por serem presentes constantemente em minha vida.

E por último, porém não menos importante, quero agradecer à minha namorada Karen pelo amor e companheirismo que temos um pelo outro, pela confiança mútua e pelo apoio às decisões heterodoxas que tomei na minha vida acadêmica.

RESUMO

Ao elaborar-se um projeto estrutural de uma edificação de concreto armado, fazem-se várias escolhas, dentre as quais a principal é a escolha da resistência característica do concreto. Com a utilização de programas computacionais aumenta-se a capacidade de realizar estudos qualitativos sobre o projeto e compreender melhor como a resistência característica do concreto exerce influência sobre vários aspectos estruturais e econômicos de uma edificação. Este trabalho avaliou 4 edifícios modelados a partir de uma mesma planta arquitetônica e mesmo lançamento estrutural, dimensionados e detalhados com o programa computacional CAD/TQS, que diferenciam-se em número de pavimentos (6 ou 8) e resistência característica do concreto (30 MPa ou 50 MPa). Os resultados encontrados indicam que utilizar uma resistência característica do concreto de 50 MPa é mais econômico e é o mais adequado para um edifício residencial, independentemente do número de pavimentos.

Palavras-chave: resistência característica do concreto, estabilidade global, projeto de edificações, economia.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. OBJETIVOS.....	10
2.1. Objetivo geral.....	10
2.2. Objetivos específicos.....	10
3. METODOLOGIA.....	11
3.1. Programa computacional CAD/TQS.....	11
3.2. Concepção estrutural.....	12
3.2.1. Dados Gerais.....	13
3.2.2. Modelo.....	13
3.2.3. Definição dos pavimentos.....	14
3.2.4. Materiais.....	15
3.2.5. Cobrimentos.....	15
3.2.6. Cargas.....	16
3.2.7. Lançamento estrutural e decisões de projeto.....	17
4. RESULTADOS.....	19
4.1. Dimensões dos elementos estruturais.....	19
4.1.1. Pilares.....	19
4.1.2. Vigas.....	22
4.1.3. Lajes.....	23
4.2. Estabilidade global.....	24
4.3. Flechas.....	25
4.4. Cargas.....	25

4.5. Quantitativos.....	26
4.5.1. Concreto	27
4.5.2. Aço	27
5. INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA DO CONCRETO NO DESEMPENHO ESTRUTURAL	28
5.1. Estabilidade global	28
5.2. Carga da edificação	28
5.3. Consumo de concreto	30
5.4. Consumo de aço	30
6. INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA DO CONCRETO NO DESEMPENHO ECONÔMICO.....	31
6.1. Com baixa variação de preços	31
6.2. Com alta variação de preços.....	33
6.2.1. Variação de +50% no preço do concreto	33
6.2.2. Variação de -50% no preço do concreto	34
6.2.3. Variação de +50% no preço do aço	36
6.2.4. Variação de -50% no preço do aço	37
7. CONCLUSÃO.....	39
REFERÊNCIAS	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Planta baixa do pavimento-tipo	12
Figura 2 - Dados gerais	13
Figura 3 - Definição do modelo de cálculo	14
Figura 4 - Definição dos pavimentos	14
Figura 5 - Características dos materiais dos edifícios A e C.....	15
Figura 6 - Características dos edifícios B e D	15
Figura 7 - Cobrimentos utilizados.....	16
Figura 8 - Coeficiente ponderadores de carga.....	16
Figura 9 - Parâmetros para determinação da ação do vento.....	17
Figura 10 - Coeficiente majorador de esforços em pilares.....	18
Figura 11 - Planta baixa do pavimento-tipo	19
Figura 12 - Valores de Gama Z em cada edifício	28
Figura 13 - Carga média (tf/m ²) de cada edifício	29
Figura 14 - Reações totais descarregadas (tf) em cada edifício	29
Figura 15 - Volume de concreto (m ³) para cada edificação	30
Figura 16 - Peso total de aço (ton) para cada edificação.....	30
Figura 17 - Comparativo do custo final entre as edificações	32
Figura 18 - Custo relativo dos insumos no custo final	32
Figura 19 - Custo final dos edifícios, com variação de +50% no preço do concreto.....	33
Figura 20 - Custo relativo dos insumos, com variação de +50% no preço do concreto	34
Figura 21 - Custo final dos edifícios, com variação de -50% no preço do concreto.....	35
Figura 22 - Custo relativo dos insumos, com variação de -50% no preço do concreto	35
Figura 23 - Custo final dos edifícios, com variação de +50% no preço do aço.....	36
Figura 24 - Custo relativo dos insumos, com variação de +50% no preço do aço	37
Figura 25 - Custo final dos edifícios, com variação de -50% no preço do aço.....	38
Figura 26 - Custo relativo dos insumos, com variação de -50% no preço do aço	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características das edificações.....	11
Tabela 2 - Dimensões iniciais dos elementos estruturais.....	18
Tabela 3 - Dimensões finais dos pilares dos edifícios A e B.....	20
Tabela 4 - Dimensões finais dos pilares dos edifícios C e D.....	21
Tabela 5 - Dimensões finais das vigas nos edifícios A e B.....	22
Tabela 6 - Dimensões finais das vigas dos edifícios C e D.....	23
Tabela 7 - Espessura das lajes por pavimento em cada edifício.....	24
Tabela 8 - Parâmetros de estabilidade global, por edifício.....	24
Tabela 9 - Flecha máxima por pavimento em cada edifício.....	25
Tabela 10 - Cargas das edificações.....	26
Tabela 11 - Volume de concreto (m ³) por edificação.....	27
Tabela 12 - Peso de aço (kg) para cada edificação.....	27
Tabela 13 - Preço médio dos insumos.....	31
Tabela 14 - Custo final das edificações.....	31
Tabela 15 - Custo final dos edifícios, com variação de +50% no preço do concreto.....	33
Tabela 16 - Custo final dos edifícios, com variação de -50% no preço do concreto.....	34
Tabela 17 - Custo final dos edifícios, com variação de +50% no preço do aço.....	36
Tabela 18 - Custo final dos edifícios, com variação de -50% no preço do aço.....	37

1. INTRODUÇÃO

É de suma importância para um profissional de engenharia estrutural conhecer bem como os parâmetros de projeto interagem uns com os outros e como influenciam na economia da estrutura, de modo a tomar sempre as melhores decisões de projeto possíveis. O uso de programas computacionais para a engenharia civil cresceu nas últimas décadas, e isso foi fundamental para o desenvolvimento da área, pois facilitou a utilização de novos métodos e aumentou-se a capacidade de realizar estudos qualitativos sobre o projeto. Dessa forma, atualmente pode-se constatar que praticamente todos os projetos fazem uso de programas computacionais.

Dentre as decisões a serem tomadas para um projeto estrutural em concreto armado, a principal é a escolha das resistências dos materiais que compõem o sistema estrutural, em especial a resistência característica à compressão do concreto, e tal escolha reverbera sobre as demais. O concreto estrutural possui uma variedade de opções comerciais muito maior do que o aço estrutural, portanto, necessita-se saber o máximo possível sobre a atuação da resistência característica do concreto sobre os demais parâmetros estruturais e econômicos de uma edificação.

Este trabalho analisa a influência que a escolha de diferentes resistências características do concreto refletem no projeto estrutural e, para isso, são analisados 4 edifícios modelados a partir de uma mesma planta arquitetônica e mesmo lançamento estrutural, dimensionados e detalhados com o auxílio do programa computacional CAD/TQS, que diferenciam-se em número de pavimentos - 6 ou 8 - e resistência característica do concreto - 30 MPa ou 50 MPa. Após o dimensionamento, analisa-se nestas edificações o resultado da carga total, de estabilidade global, das dimensões dos elementos estruturais, bem como dos quantitativos e custos de aço e concreto.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é compreender melhor a influência que a resistência característica do concreto exerce sobre parâmetros estruturais e econômicos de uma edificação.

2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos podem ser agrupados como:

- Analisar a influência da resistência característica do concreto no custo de uma edificação residencial;
- Analisar a influência da resistência característica do concreto no atendimento aos requisitos da estabilidade global de uma edificação residencial;
- Analisar a influência da resistência característica do concreto nas cargas totais de uma edificação residencial.

3. METODOLOGIA

Este trabalho consiste no desenvolvimento de quatro projetos estruturais de uma edificação residencial, realizados a partir de mesma planta arquitetônica e lançamento estrutural, utilizando-se, para isto, o programa computacional CAD/TQS. As quatro edificações diferenciam-se quanto ao número de pavimentos e resistência característica do concreto, sendo denominadas A, B, C e D, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Características das edificações

Edifício	Número de pavimentos	Resistência característica do concreto
A	6	30 MPa
B	6	50 MPa
C	8	30 MPa
D	8	50 MPa

Fonte: Autor (2017)

Abordam-se o funcionamento do programa e as etapas necessárias para conceber a estrutura, bem como as principais características das edificações: definição dos pavimentos, materiais, cargas, cobrimentos e critérios de cálculo. O lançamento estrutural inicial é comum às edificações, baseando-se em decisões de projeto tomadas e explicadas neste trabalho.

Após, fez-se o dimensionamento para o Estado Limite Último (ELU) e Estado Limite de Serviço (ELS) das estruturas com o programa computacional CAD/TQS, a partir do qual inferem-se alguns resultados como: parâmetros de estabilidade global, dimensões finais dos elementos estruturais, flechas, carga da estrutura, quantitativos de aço e de concreto.

Por fim, realiza-se um estudo comparativo direcionado aos custos dos insumos aço e concreto e desempenho estrutural das edificações, com foco em carga total da edificação e estabilidade global.

3.1. Programa computacional CAD/TQS

O programa computacional brasileiro CAD/TQS é dotado de ferramentas de lançamento gráfico dos elementos estruturais e ações sobre a edificação, verificação de consistência de dados, combinação de ações de peso próprio, vento, temperatura, retração, entre outros e leitura de seus efeitos, análises linear-elástica, linear com redistribuição, não-linear física e geométrica e análise dinâmica, visualização dos diagramas de esforços, deslocamentos e 3D da estrutura, cálculo refinado de parâmetros de estabilidade e de flechas, dentre outros recursos. Assim, o CAD/TQS possibilita de forma bastante visual perceber as modificações estruturais na estabilidade do edifício.

O cálculo, o dimensionamento, o detalhamento e o desenho de estruturas de concreto armado, protendido e pré-moldado, assim como, em alvenaria estrutural é feito por meio da integração de diversos subsistemas, que trabalham de forma contínua respondendo a entrada de dados feita pelo profissional. Diferentemente de outros programas computacionais de cálculo estrutural, o CAD/TQS tem a vantagem de edição do desenho em sua própria

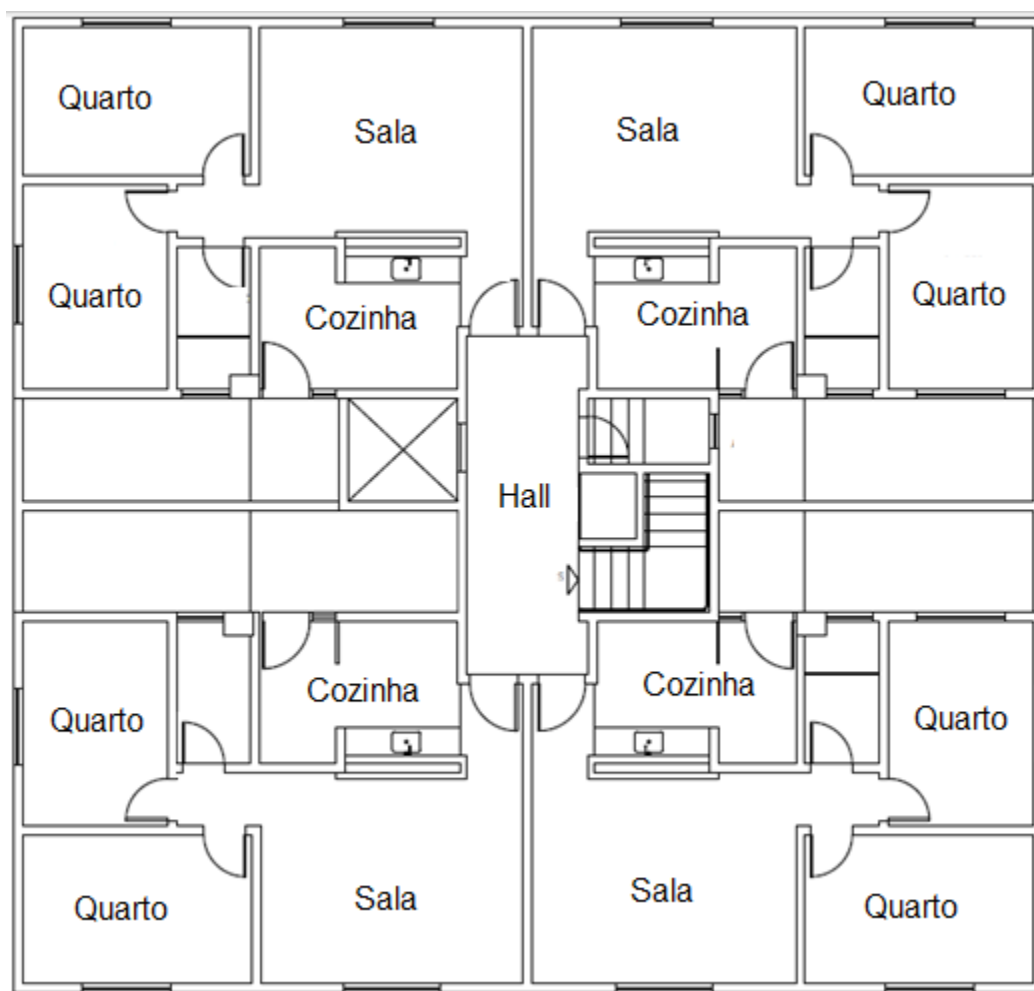
plataforma, não dependendo de editores externos, mesmo que mantenha arquivos compatíveis com eles.

Para análise, dimensionamento e detalhamento dos elementos estruturais do edifício, o programa CAD/TQS trabalha dentro das prescrições normativas brasileiras. Utilizaram-se as seguintes normas para execução do projeto: ABNT NBR 6118:2014 (Projeto de estruturas de concreto – Procedimentos), ABNT NBR 6120:1980 (Cargas para o cálculo de estruturas de edificações – Procedimentos) e ABNT NBR 6123:1988 (Forças devidas ao vento em edificações – Procedimentos)

3.2. Concepção estrutural

Esta seção aborda a concepção dos projetos, que se inicia com o projeto arquitetônico fornecido para a execução do projeto estrutural. Os edifícios estudados neste trabalho contam com 4 apartamentos em cada pavimento-tipo, cobertura e ático, e a planta baixa do pavimento-tipo, cujas dimensões são 16,5 m x 17,5 m, pode ser vista na Figura 1.

Figura 1 - Planta baixa do pavimento-tipo



Fonte: Autor (2017)

Já no programa CAD/TQS, a primeira etapa para criação de um modelo é a entrada de dados. Inserem-se dados de identificação do edifício, faz-se a seleção do tipo de estrutura a ser utilizada no projeto, escolhe-se o modelo de análise, criam-se os pavimentos e determinam-se suas características como: a classe de agressividade do ambiente, a resistência característica do concreto, os cobrimentos, os ponderadores de carga, os critérios de cálculo e cargas adicionais e de vento. Em seguida, faz-se o lançamento estrutural, baseados em premissas e decisões de projeto.

3.2.1. Dados Gerais

Nesta etapa definem-se os dados de identificação do imóvel, bem como selecionam-se o tipo de estrutura e a norma que regerá os critérios de dimensionamento. Neste caso, trata-se de uma obra em concreto armado atual e, portanto, selecionou-se a ABNT NBR 6118:2014 (Figura 2).

Figura 2 - Dados gerais

A imagem mostra a interface de usuário do software CAD/TQS, especificamente a aba 'Dados Gerais'. No topo, há uma barra de navegação com as seguintes abas: 'Gerais', 'Modelo', 'Pavimentos', 'Materiais', 'Cobrimentos', 'Cargas', 'Critérios' e 'Gerenciamento'. A aba 'Gerais' está selecionada. O formulário é dividido em seções: 'Identificação' com campos para 'Título do edifício' (contendo 'TCC'), 'Título do cliente' (contendo 'Universidade Federal de Uberlândia'), 'Endereço da obra' (contendo 'Av. João Naves de Ávila, 2121') e 'Número do projeto' (contendo '1'). Há também um campo para 'Prefixo de plantas'. Abaixo, a seção 'Norma em uso' possui uma lista suspensa com 'NBR-6118:2014' selecionada. A seção 'Tipo de estrutura' contém três opções com botões de rádio: 'Concreto Armado/Protendido' (selecionado), 'Alvenaria Estrutural' e 'Projeto de formas de madeira'. Uma seção 'Descrição do projeto' possui uma área de texto vazia com barras de rolagem. No canto inferior direito, há um botão 'Avançado...'. O fundo da interface é cinza claro, e os campos de entrada são brancos com bordas cinzas.

Fonte: CAD/TQS (2017)

3.2.2. Modelo

Em todas as edificações utilizou-se o Modelo IV do TQS, no qual a análise estrutural do edifício é feita por dois modelos de cálculo: modelo de grelha para os pavimentos e modelo de pórtico espacial para a análise global (Figura 3).

O pórtico espacial é único e composto apenas por barras que simulam as vigas e pilares da estrutura, com o efeito de diafragma rígido das lajes devidamente incorporado. Os efeitos oriundos das ações verticais e horizontais nas vigas e pilares são calculados com o pórtico espacial. Nas lajes, somente os efeitos gerados pelas ações verticais são calculados, de acordo com o modelo de vigas contínuas (grelhas), que transfere os efeitos para o pórtico espacial.

Figura 3 - Definição do modelo de cálculo

The screenshot shows the 'Modelo' tab in the CAD/TQS software. It contains two main sections: 'Modelo estrutural do edifício' and 'Modelos independentes'. The 'Modelo estrutural do edifício' section has six radio button options, each with a help icon (?):

- I ☐ Modo manual
- II ☐ Esforços verticais por vigas contínuas ou grelhas, sem vento
- III ☐ Esforços verticais por vigas ou grelha, vento por pórtico espacial
- IV ☒ Modelo de vigas e pilares, flexibilizado conforme critérios.
- V ☐ Modelo conjunto de Pórtico/Grelhas/Vigas (versão 10 e anteriores)
- VI ☐ Modelo de vigas, pilares e lajes, flexibilizado conforme critérios.

The 'Modelos independentes' section has two radio button options:

- ☒ A estrutura se comporta como um corpo único, sem juntas ou torres separadas
- ☐ Comportamento de corpos separados por espaços ou juntas, sob ação de vento

Fonte: CAD/TQS (2017)

3.2.3. Definição dos pavimentos

O programa computacional define um edifício virtual a partir das características dos pavimentos inseridos nesta etapa. Entre essas características tem-se: pés-direitos, função (térreo, fundação, duplex, triplex etc), rebaixos e patamares de escada. A importância da diferenciação entre os tipos de pavimento dá-se pelo fato de que no pavimento subsolo, por exemplo, não há ação do vento e, neste caso, o programa computacional automaticamente exclui tal ação sobre este pavimento. Na Figura 4 está exibida a janela de definição dos pavimentos no CAD/TQS.

Figura 4 - Definição dos pavimentos

The screenshot shows the 'Pavimentos' tab in the CAD/TQS software. It contains a form for defining floor properties and a vertical diagram on the right. The form fields are:

- Título:
- Número do projeto:
- Número de pisos:
- Pé-direito (m):
- Classe: (dropdown menu)
- Título opcional:
- Prefixo de plantas:
- Modelo estrutural: (dropdown menu)
- Avançado... (button)
- ☐ Elementos inclinados/pisos auxiliares
- Pisos auxiliares... (button)

The vertical diagram on the right shows a building section with a blue arrow pointing upwards. The diagram is labeled with the following text:

- Atico
- Banilete
- Cobertura
- Tipo 2
- Tipo
- Fundacao

Fonte: CAD/TQS (2017)

3.2.4. Materiais

Nesta seção tem-se a determinação da classe de agressividade ambiental (CAA II), a classe de resistência característica do concreto (f_{ck}) para cada tipo de elemento estrutural - 30 MPa (edificações A e C) ou 50 MPa (edificações B e D) - e o sistema estrutural (concreto armado ou protendido). Essas determinações encontram-se nas Figuras 5 e 6.

Figura 5 - Características dos materiais dos edifícios A e C

Gerais | Modelo | Pavimentos | **Materiais** | Cobrimentos | Cargas | Critérios | Gerenciamento

Modo de fornecimento de Fck

☐ Definir valores em kgf/cm²

☒ Usar somente valores tabelados

Concreto para elementos estruturais em:

☒ Concreto armado

☐ Concreto protendido

Classe de agressividade ambiental

II - Moderada - Urbana

Alterar

Fcks gerais

Classe

Vigas/Lajes: C30

Pilares: C30

Fundações: C30

☐ Desativar a verificação de Fck mínimo

Fcks diferenciados por piso/planta

Vigas/Lajes

Pilares

Fonte: CAD/TQS (2017)

Figura 6 - Características dos edifícios B e D

Gerais | Modelo | Pavimentos | **Materiais** | Cobrimentos | Cargas | Critérios | Gerenciamento

Modo de fornecimento de Fck

☐ Definir valores em kgf/cm²

☒ Usar somente valores tabelados

Concreto para elementos estruturais em:

☒ Concreto armado

☐ Concreto protendido

Classe de agressividade ambiental

II - Moderada - Urbana

Alterar

Fcks gerais

Classe

Vigas/Lajes: C50

Pilares: C50

Fundações: C50

☐ Desativar a verificação de Fck mínimo

Fcks diferenciados por piso/planta

Vigas/Lajes

Pilares

Fonte: CAD/TQS (2017)

3.2.5. Cobrimentos

Estão contidas nesta seção apenas as prescrições normativas para cobrimentos nominais, que são em função da classe de agressividade ambiental definida na seção anterior. Como trata-se da classe de agressividade ambiental CAA II, adotaram-se cobrimentos nominais conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Cobrimentos utilizados

Fonte: CAD/TQS (2017)

3.2.6. Cargas

Para as cargas verticais, adotaram-se os valores de ponderação descritos em norma e que já se encontram configurado no programa. Tais coeficientes de ponderação são mostrados na Figura 8.

Figura 8 - Coeficiente ponderadores de carga

Fonte: CAD/TQS (2017)

Já para a carga de vento, seguiu-se as prescrições da ABNT NBR 6123:1988 e, com a entrada de alguns parâmetros no próprio programa computacional, chegou-se à consideração adequada de ventos sobre a edificação para seu uso nas combinações de ações.

O valor da velocidade característica do vento (V_K) é o resultado da multiplicação dos fatores S1, S2 e S3 e de sua velocidade básica. A velocidade básica do vento (V_0) é específica para a cidade de Uberlândia e foi determinada pelo mapa de isopletas da ABNT NBR 6123:1988 disponível no próprio CAD/TQS, valendo 34 m/s. Já para os fatores, S1 (fator topográfico) considerou-se correspondente a terreno plano ou fracamente acidentado, S3 (fator estatístico) trata-se de uma edificação residencial e S2 se encaixa na Classe IV (Obstáculos numerosos em subúrbios densamente construídos) e Categoria A (maior dimensão menor que 20 m). Também é calculado pelo programa computacional o coeficiente de arrasto da edificação. Os parâmetros utilizados no cálculo da ação do vento são mostrados na Figura 9.

Figura 9 - Parâmetros para determinação da ação do vento

Detalhes da interface do software CAD/TQS:

- Abas:** Gerais | Modelo | Pavimentos | Materiais | Cobrimentos | Cargas | Critérios | Gerenciamento
- Sub-abas:** Verticais | Vento | Adicionais | Combinações
- Campos de entrada:**
 - V0 - Velocidade básica: 34
 - S1 - Fator do terreno: 1.00
 - S2 - Categoria de rugosidade: IV
 - S2 - Classe da edificação: A
 - S3 - Fator estatístico: 1.00
- Checkboxes:**
 - ☐ Casos de vento nas plantas de formas
 - ☐ Forças impostas no sistema global
 - ☐ Inverter o sinal das forças impostas
- Tabela de dados:**

	Ângulo	C.A.	Def Cot	Cot ini
1	90	1.16	Não	0
2	270	1.16	Não	0
3	0	1.13	Não	0
4	180	1.13	Não	0
- Diagrama:** Um diagrama circular mostra os ângulos de incidência de vento: 0°, 90°, 180° e 270°.
- Botões:** Inserir, Apagar, Calcular CAs, Avançado...

Fonte: CAD/TQS (2017)

3.2.7. Lançamento estrutural e decisões de projeto

No lançamento estrutural, a sequência é inversa ao caminhamento das cargas pela estrutura, ou seja, primeiro fez-se a locação dos pilares, depois vigas e lajes. No lançamento inicial visou-se respeitar algumas premissas arquitetônicas e construtivas, como:

- Seções de todos os pilares e vigas 14 cm x 30 cm embutidas na alvenaria, de modo a não interferir na funcionalidade, economia, conforto e estética dos ambientes internos;
- Locar os pilares primeiro pelos cantos, em busca de evitar trechos de viga em balanço;
- Distância entre os eixos de pilares de no mínimo 4 metros e de no máximo 8 metros;
- Não interferir na instalação de esquadrias;
- Não apoiar o mesmo cômodo em lajes distintas.

Os critérios adotados para o primeiro lançamento trazem alguns desafios, pois a grande dimensão das vigas acarretam em valores altos para os deslocamentos verticais das mesmas e, por conseguinte, nas lajes. Outro desafio encontrado foi a dimensão de 14 cm dos pilares, pois com isso há majoração do esforço solicitante nos pilares por um coeficiente adicional, que pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 - Coeficiente majorador de esforços em pilares

<i>b</i> cm	≥ 19	18	17	16	15	14
γ_n	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25
onde $\gamma_n = 1,95 - 0,05 b;$ <i>b</i> é a menor dimensão da seção transversal, expressa em centímetros (cm). NOTA O coeficiente γ_n deve majorar os esforços solicitantes finais de cálculo quando de seu dimensionamento.						

Fonte: ABNT:NBR 6118 (2014)

Um aspecto importante do primeiro lançamento realizado foi a opção de não pré-dimensionar os elementos estruturais e sim adotar as menores dimensões construtivas para todos os elementos estruturais. Os pilares necessitam ter uma área de seção transversal mínima de 360 cm² e dimensão mínima de 14 cm, então as menores dimensões construtivas para respeitar essas imposições é de 30 cm x 14 cm, as quais também foram utilizadas para as vigas num primeiro momento. Para maior conforto acústico, utilizou-se 10 cm de espessura mínima para lajes, conforme ABNT NBR 15575:2013. Tais dimensões iniciais estão na Tabela 2.

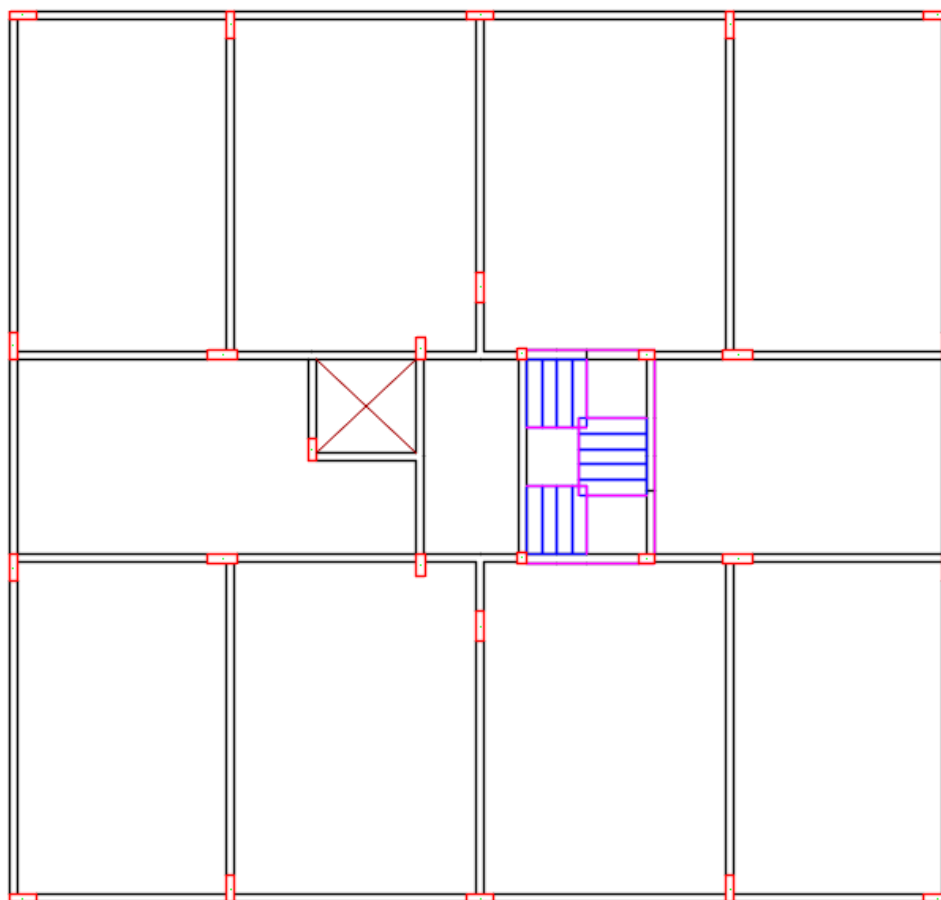
Tabela 2 - Dimensões iniciais dos elementos estruturais

Elemento Estrutural	Dimensões (cm)
Pilar	14 x 30
Viga	14 x 30
Laje	10

Fonte: Autor (2017)

Esta escolha é interessante ao se utilizar programas computacionais, pois a otimização do dimensionamento de elementos estruturais é um processo iterativo. Desta forma, em caso de uma edificação com um bom posicionamento de pilares, onde o processamento não apresentou erros, o dimensionamento dos elementos está feito em sua condição ótima, uma vez que não seria viável diminuir suas dimensões. Já caso o processamento retorne erros, basta aumentar-se sucessivamente os elementos estruturais mais solicitados até a condição ótima, o que seria mais vantajoso do que com o pré-dimensionamento que, em geral, fornece elementos superdimensionados. A planta de fôrmas do pavimento-tipo, com o lançamento inicial das edificações estudadas, pode ser vista na Figura 11.

Figura 11 - Planta de formas do pavimento-tipo



Fonte: Autor (2017)

4. RESULTADOS

Após lançar os dados, é preciso que o programa processe a estrutura e, assim, faça a análise estrutural, dimensionamento dos elementos e detalhamento dos mesmos. Além disto, o programa fornece um memorial de cálculo completo, relatórios estruturais e quantitativos, dos quais pode-se apreender uma enorme quantidade de informação sobre a estrutura. Nesta seção apresentam-se os resultados mais relevantes para as análises a serem feitas: parâmetros de estabilidade global, dimensões finais dos elementos estruturais, flechas máximas, cargas distribuídas sobre as estruturas, quantitativos de aço e de concreto, além de comentários sobre tais resultados.

4.1. Dimensões dos elementos estruturais

4.1.1. Pilares

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentadas as dimensões finais das seções transversais dos pilares nos dois pavimentos-tipo, suas respectivas áreas e o aumento percentual das mesmas em relação à seção inicial de 14 cm x 30 cm.

Tabela 3 - Dimensões finais dos pilares dos edifícios A e B

Pilar	Tipo	A				B			
		b (cm)	d (cm)	Área (cm²)	Aumento	b (cm)	d (cm)	Área (cm²)	Aumento
P1	T2	14	35	490	16,67%	14	30	420	0,00%
	T1	14	50	700	66,67%	16	35	560	33,33%
P2	T2	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%
	T1	14	45	630	50,00%	16	35	560	33,33%
P3	T2	14	35	490	16,67%	14	30	420	0,00%
	T1	14	50	700	66,67%	16	35	560	33,33%
P4	T2	14	35	490	16,67%	14	30	420	0,00%
	T1	14	55	770	83,33%	16	35	560	33,33%
P5	T2	14	35	490	16,67%	14	30	420	0,00%
	T1	14	55	770	83,33%	16	35	560	33,33%
P6	T2	14	35	490	16,67%	16	30	480	14,29%
	T1	16	50	800	90,48%	16	40	640	52,38%
P7	T2	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%
	T1	14	45	630	50,00%	16	35	560	33,33%
P8	T2	14	35	490	16,67%	16	30	480	14,29%
	T1	16	50	800	90,48%	16	40	640	52,38%
P9	T2	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%
	T1	14	45	630	50,00%	16	30	480	14,29%
P10	T2	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%
	T1	14	40	560	33,33%	16	30	480	14,29%
P11	T2	14	35	490	16,67%	16	30	480	14,29%
	T1	16	50	800	90,48%	16	40	640	52,38%
P12	T2	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%
	T1	14	45	630	50,00%	16	35	560	33,33%
P13	T2	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%
	T1	14	45	630	50,00%	14	30	420	0,00%
P14	T2	14	35	490	16,67%	16	30	480	14,29%
	T1	16	50	800	90,48%	16	40	640	52,38%
P15	T2	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%
	T1	14	40	560	33,33%	16	30	480	14,29%
P16	T2	14	35	490	16,67%	16	30	480	14,29%
	T1	16	50	800	90,48%	16	40	640	52,38%
P17	T2	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%
	T1	14	45	630	50,00%	16	35	560	33,33%
P18	T2	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%
	T1	14	45	630	50,00%	16	30	480	14,29%
P19	T2	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%
	T1	14	45	630	50,00%	16	35	560	33,33%
P20	T2	14	35	490	16,67%	16	30	480	14,29%
	T1	16	50	800	90,48%	16	40	640	52,38%
P21	T2	14	35	490	16,67%	14	30	420	0,00%
	T1	14	50	700	66,67%	16	35	560	33,33%
P22	T2	14	35	490	16,67%	14	30	420	0,00%
	T1	14	55	770	83,33%	16	35	560	33,33%
P23	T2	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%
	T1	14	45	630	50,00%	16	35	560	33,33%
P24	T2	14	35	490	16,67%	14	30	420	0,00%
	T1	14	55	770	83,33%	16	35	560	33,33%
P25	T2	14	35	490	16,67%	14	30	420	0,00%
	T1	14	50	700	66,67%	16	35	560	33,33%
P26	T1/T2	18	20	360	0,00%	18	20	360	0,00%
P27	T1/T2	18	20	360	0,00%	18	20	360	0,00%
Total		Aumento acumulado			7104,76%	Aumento acumulado			3523,81%

Fonte: Autor (2017)

Tabela 4 - Dimensões finais dos pilares dos edifícios C e D

Pilar	Tipo	C				D			
		b (cm)	d (cm)	Área (cm²)	Aumento	b (cm)	d (cm)	Área (cm²)	Aumento
P1	T2	16	30	480	14,29%	14	30	420	0,00%
	T1	16	50	800	90,48%	16	40	640	52,38%
P2	T2	16	30	480	14,29%	14	30	420	0,00%
	T1	16	50	800	90,48%	16	40	640	52,38%
P3	T2	16	30	480	14,29%	14	30	420	0,00%
	T1	16	50	800	90,48%	16	40	640	52,38%
P4	T2	16	30	480	14,29%	14	30	420	0,00%
	T1	16	50	800	90,48%	16	40	640	52,38%
P5	T2	16	30	480	14,29%	14	30	420	0,00%
	T1	16	50	800	90,48%	16	40	640	52,38%
P6	T2	16	40	640	52,38%	16	30	480	14,29%
	T1	16	55	880	109,52%	16	45	720	71,43%
P7	T2	16	30	480	14,29%	14	30	420	0,00%
	T1	16	50	800	90,48%	16	35	560	33,33%
P8	T2	16	40	640	52,38%	16	30	480	14,29%
	T1	16	55	880	109,52%	16	45	720	71,43%
P9	T2	16	30	480	14,29%	14	30	420	0,00%
	T1	16	40	640	52,38%	16	35	560	33,33%
P10	T2	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%
	T1	16	30	480	14,29%	16	30	480	14,29%
P11	T2	16	40	640	52,38%	16	30	480	14,29%
	T1	16	55	880	109,52%	16	45	720	71,43%
P12	T2	16	30	480	14,29%	14	30	420	0,00%
	T1	16	50	800	90,48%	16	35	560	33,33%
P13	T2	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%
	T1	14	40	560	33,33%	14	30	420	0,00%
P14	T2	16	40	640	52,38%	16	30	480	14,29%
	T1	16	55	880	109,52%	16	45	720	71,43%
P15	T2	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%
	T1	16	30	480	14,29%	16	30	480	14,29%
P16	T2	16	40	640	52,38%	16	30	480	14,29%
	T1	16	55	880	109,52%	16	45	720	71,43%
P17	T2	16	30	480	14,29%	14	30	420	0,00%
	T1	16	50	800	90,48%	16	35	560	33,33%
P18	T2	16	30	480	14,29%	14	30	420	0,00%
	T1	16	40	640	52,38%	16	35	560	33,33%
P19	T2	16	30	480	14,29%	14	30	420	0,00%
	T1	16	50	800	90,48%	16	35	560	33,33%
P20	T2	16	40	640	52,38%	16	30	480	14,29%
	T1	16	55	880	109,52%	16	45	720	71,43%
P21	T2	16	30	480	14,29%	14	30	420	0,00%
	T1	16	50	800	90,48%	16	40	640	52,38%
P22	T2	16	30	480	14,29%	14	30	420	0,00%
	T1	16	50	800	90,48%	16	40	640	52,38%
P23	T2	16	30	480	14,29%	14	30	420	0,00%
	T1	16	50	800	90,48%	16	40	640	52,38%
P24	T2	16	30	480	14,29%	14	30	420	0,00%
	T1	16	50	800	90,48%	16	40	640	52,38%
P25	T2	16	30	480	14,29%	14	30	420	0,00%
	T1	16	50	800	90,48%	16	40	640	52,38%
P26	T1/T2	18	20	360	0,00%	18	20	360	0,00%
P27	T1/T2	18	20	360	0,00%	18	20	360	0,00%
Total		Aumento acumulado			10533,33%	Aumento acumulado			5066,67%

Fonte: Autor (2017)

Percebe-se que em todas as edificações houve aumento nas dimensões dos elementos estruturais em relação às dimensões mínimas iniciais. Nos edifícios A e B, de 6 pavimentos, a diferença nesse aumento é de 3580,95% (relativamente de 50,4%), enquanto nos edifícios de C e D, de 8 pavimentos, a diferença é de 5466,67% (relativamente de 51,9%). Dessa forma, tem-se uma diferença relativa da ordem de 50% entre os edifícios com resistência característica do concreto de 30 MPa e os de 50 MPa, ou seja, os elementos estruturais dos edifícios com resistência característica do concreto de 30 MPa estão, em geral, 50% mais distantes das dimensões mínimas do que os elementos estruturais dos edifícios com resistência característica do concreto de 50 MPa.

4.1.2. Vigas

As vigas dos pavimentos Fundação (vigas-baldrames), Ático e Barrilete mantiveram-se como no lançamento inicial, com 14 cm x 30 cm. A Tabela 5 fornece as dimensões finais das demais vigas, iguais em todos os pavimentos-tipo, diferenciando-as por edifício.

Tabela 5 - Dimensões finais das vigas nos edifícios A e B

Edifício									
Viga	A				B				
	b (cm)	d (cm)	Área (cm²)	Aumento	b (cm)	d (cm)	Área (cm²)	Aumento	
V1	14	35	490	16,67%	14	30	420	0,00%	
V2	14	35	490	16,67%	14	30	420	0,00%	
V3	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%	
V4	14	35	490	16,67%	14	30	420	0,00%	
V5	14	35	490	16,67%	14	30	420	0,00%	
V6	14	35	490	16,67%	14	35	490	16,67%	
V7	14	35	490	16,67%	14	35	490	16,67%	
V8	14	35	490	16,67%	14	35	490	16,67%	
V9	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%	
V10	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%	
V11	14	35	490	16,67%	14	35	490	16,67%	
V12	14	35	490	16,67%	14	35	490	16,67%	
V13	14	35	490	16,67%	14	30	420	0,00%	
V14	14	35	490	16,67%	14	30	420	0,00%	
V15	14	35	490	16,67%	14	35	490	16,67%	
V16	14	35	490	16,67%	14	35	490	16,67%	
V17	14	35	490	16,67%	14	35	490	16,67%	
V18	14	35	490	16,67%	14	30	420	0,00%	
V19	14	35	490	16,67%	14	30	420	0,00%	
V20	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%	
V21	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%	
V22	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%	
VR1	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%	
VR2	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%	
VR3	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%	
Aumento acumulado (%)				266,67%	Aumento acumulado (%)				133,33%

Fonte: Autor (2017)

Tabela 6 - Dimensões finais das vigas dos edifícios C e D

Viga	Edifício								
	C				D				
	b (cm)	d (cm)	Área (cm²)	Aumento	b (cm)	d (cm)	Área (cm²)	Aumento	
V1	14	35	490	16,67%	14	30	420	0,00%	
V2	14	35	490	16,67%	14	30	420	0,00%	
V3	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%	
V4	14	35	490	16,67%	14	30	420	0,00%	
V5	14	35	490	16,67%	14	30	420	0,00%	
V6	14	35	490	16,67%	14	35	490	16,67%	
V7	14	35	490	16,67%	14	35	490	16,67%	
V8	14	35	490	16,67%	14	35	490	16,67%	
V9	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%	
V10	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%	
V11	14	35	490	16,67%	14	35	490	16,67%	
V12	14	35	490	16,67%	14	35	490	16,67%	
V13	14	40	560	33,33%	14	30	420	0,00%	
V14	14	35	490	16,67%	14	30	420	0,00%	
V15	14	35	490	16,67%	14	35	490	16,67%	
V16	14	35	490	16,67%	14	35	490	16,67%	
V17	14	35	490	16,67%	14	35	490	16,67%	
V18	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%	
V19	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%	
V20	16	40	640	52,38%	14	30	420	0,00%	
V21	14	35	490	16,67%	14	30	420	0,00%	
V22	16	40	640	52,38%	14	30	420	0,00%	
VR1	16	40	640	52,38%	14	30	420	0,00%	
VR2	14	30	420	0,00%	14	30	420	0,00%	
VR3	16	40	640	52,38%	14	30	420	0,00%	
Aumento acumulado (%)				476,19%	Aumento acumulado (%)				133,33%

Fonte: Autor (2017)

Nos edifícios A e B, de 6 pavimentos, a diferença nesse aumento é de 133,3% (relativamente de 50%), enquanto nos edifícios de C e D, de 8 pavimentos, a diferença é de 342,86% (relativamente de 72%), ou seja, os elementos estruturais dos edifícios com resistência característica do concreto de 30 MPa estão, neste estudo, entre 50% e 72% mais distantes das dimensões mínimas iniciais do que os elementos estruturais dos edifícios com resistência característica do concreto de 50 MPa. Percebe-se também que nos edifícios cuja resistência característica do concreto é igual a 50 MPa as dimensões das vigas são exatamente as mesmas para edificações com diferentes números de pavimentos, enquanto nos edifícios cuja resistência característica do concreto é igual a 30 MPa as dimensões das vigas aumentam 78,57% com o aumento do número de pavimentos.

4.1.3. Lajes

Optou-se por padronizar a espessura das lajes em um mesmo pavimento. Desta forma, pode-se ver na Tabela 7 a espessura das lajes por pavimento em cada edifício.

Tabela 7 - Espessura das lajes por pavimento em cada edifício

Lajes do pavimento	Edifício			
	A	B	C	D
	h (cm)	h (cm)	h (cm)	h (cm)
Ático	10	10	10	10
Barrilete	12	10	12	10
Cobertura	10	10	10	10
7	-	-	12	10
6	-	-	12	10
5	12	10	12	10
4	12	10	12	10
3	12	10	12	10
2	12	10	12	10
1	12	10	12	10
0	12	10	12	10

Fonte: Autor (2017)

Tem-se, em geral, lajes de 12 cm de espessura nos edifícios cuja resistência característica do concreto é de 30 MPa e lajes de 10 cm de espessura nos edifícios cuja resistência característica do concreto é de 50 MPa, o que significa uma diminuição de cerca de 5 m³ de volume de material estrutural por pavimento.

4.2. Estabilidade global

A análise dos efeitos locais e globais, de primeira ou segunda ordem, é necessária à todas estruturas. A altura e a esbelteza da estrutura influenciam a deformação da mesma ao receber um carregamento horizontal, de tal maneira que as cargas verticais geram momentos adicionais significativos que não existiam na geometria originalmente concebida, ou seja, esses momentos são gerados a partir da condição deformada, caracterizando-se como efeitos de segunda ordem.

Por permitir estimar valores para efeitos de segunda ordem, o parâmetro γ_z é um dos mais utilizados para avaliação da estabilidade de uma estrutura. Existem também outros parâmetros, como o α e o FAVt. Todos esses parâmetros citados foram calculados pelo programa para os edifícios analisados e são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros de estabilidade global, por edifício

Parâmetro	Edifício			
	A	B	C	D
Gama Z	1,13	1,12	1,19	1,17
FAVt	1,18	1,18	1,25	1,21
Alfa	1,07	1,02	1,16	1,06

Fonte: Autor (2017)

Com isto, consideram-se todos os edifícios projetados como sendo estruturas de nós móveis e, portanto, os efeitos globais de 2ª ordem são considerados no dimensionamento das mesmas.

4.3. Flechas

Em alguns casos, optou-se pelo aumento da espessura das lajes para enrijecer o sistema e diminuir os deslocamentos verticais (flechas) nas lajes, em outros esse aumento se deu visando maior padronização construtiva. Houve também uma busca pela redução da taxa de armadura nas lajes.

Os valores das flechas máximas obtidas em cada pavimento são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 - Flecha máxima por pavimento em cada edifício

Edifício	A	B	C	D	-
Pavimento	Flecha máxima (cm)	Flecha máxima (cm)	Flecha máxima (cm)	Flecha máxima (cm)	Flecha limite (cm)
Ático	0,5	0,4	0,5	0,4	1,3
Barrilete	0,3	0,2	0,3	0,2	0,5
Cobertura	1,3	1,3	1,4	1,3	1,5
7	-	-	1,4	1,3	1,5
6	-	-	1,4	1,3	1,5
5	1,3	1,3	1,4	1,3	1,5
4	1,3	1,3	1,4	1,3	1,5
3	1,2	1,3	1,4	1,3	1,5
2	1,2	1,3	1,4	1,3	1,5
1	1,2	1,3	1,4	1,3	1,5
0	1,2	1,3	1,4	1,3	1,5

Fonte: Autor (2017)

Os valores de flechas máximos obtidos estão próximos dos limites permitidos por norma, porém, pelo dimensionamento de estruturas ser feito por um método semiprobabilístico, há a garantia de grande probabilidade de que não ocorram problemas da estrutura em serviço.

4.4. Cargas

As cargas distribuídas num edifício são preponderantes para o custo final da fundação, independentemente do tipo da mesma, logo, para otimização do custo da edificação, é necessário minimizar o peso próprio dos elementos estruturais. Desta forma, entende-se que a carga de uma edificação é também um fator de economia, além de ser um parâmetro estrutural.

Na Tabela 10 encontram-se as cargas distribuídas nos edifícios estudados.

Tabela 10 - Cargas das edificações

Edifício		A				B			
Pavimento	Área (m²)	Carga aplicada (tf)	Peso Pilares (tf)	Carga média (tf/m²)	Soma das reações (tf)	Carga aplicada (tf)	Peso Pilares (tf)	Carga média (tf/m²)	Soma das reações (tf)
Ático	30,80	30,00	1,00	1,01	27,60	29,90	1,00	1,00	27,60
Barrilete	30,80	32,40	1,60	1,10	28,50	31,50	2,00	1,09	27,00
Cobertura	281,70	216,10	8,80	0,80	193,50	206,20	8,30	0,76	185,30
5	279,90	242,00	8,80	0,90	222,00	228,60	8,30	0,85	211,00
4	279,90	253,70	13,20	0,95	229,90	238,70	10,70	0,89	218,90
3	279,90	253,70	13,20	0,95	229,90	238,70	10,70	0,89	218,90
2	279,90	253,70	13,20	0,95	229,90	238,70	10,70	0,89	218,90
1	279,90	253,70	13,20	0,95	229,90	238,70	10,70	0,89	218,90
0	29,20	128,70	0,00	4,41	130,00	130,70	0,00	4,48	130,70
Acumulado	1772,00	1664,00	73,00	0,98	1521,20	1581,70	62,40	0,93	1457,20

Edifício		C				D			
Pavimento	Área (m²)	Carga aplicada (tf)	Peso Pilares (tf)	Carga média (tf/m²)	Soma da reações (tf)	Carga aplicada (tf)	Peso Pilares (tf)	Carga média (tf/m²)	Soma da reações (tf)
Ático	30,80	30,20	1,20	1,02	27,60	29,90	1,00	1,00	27,60
Barrilete	30,80	32,80	1,80	1,12	28,70	32,50	1,60	1,11	28,70
Cobertura	281,70	227,50	9,70	0,84	196,70	211,80	8,30	0,78	183,80
7	279,90	248,30	9,70	0,92	228,90	234,30	8,30	0,87	217,70
6	279,90	248,30	9,70	0,92	228,90	234,30	8,30	0,87	217,70
5	279,90	248,30	9,70	0,92	228,90	234,30	8,30	0,87	217,70
4	279,90	252,10	14,40	0,95	229,40	236,90	11,60	0,89	217,50
3	279,90	252,10	14,40	0,95	229,40	236,90	11,60	0,89	217,50
2	279,90	252,10	14,40	0,95	229,40	236,90	11,60	0,89	217,50
1	279,90	252,10	14,40	0,95	229,40	236,90	11,60	0,89	217,50
0	29,20	128,70	0,00	4,41	130,70	130,10	0,00	4,46	132,10
Acumulado	2331,80	2172,50	99,40	0,97	1988,00	2054,80	82,20	0,92	1895,30

Fonte: Autor (2017)

Percebe-se, então, uma redução de 64 tf nas reações dos edifícios com 6 pavimentos ao aumentar-se a resistência característica do concreto e de 92,7 tf nas dos edifícios de 8 pavimentos.

4.5. Quantitativos

No orçamento de uma obra, é de suma importância a otimização do consumo de aço e concreto, uma vez que esses são os insumos de maior consumo e maior impacto no custo final. Tais insumos são determinados em projeto e, portanto, devem ser bem estudados ao longo da elaboração do mesmo. O programa computacional CAD/TQS fornece em seus memoriais os principais parâmetros de projeto e os quantitativos para estudo econômico dos insumos, os quais podem ser vistos nos próximos itens.

4.5.1. Concreto

Atualmente, o concreto é o mais barato dos materiais usados para estruturas de concreto armado, porém, devido à ser proporcionalmente bem mais volumoso que o aço, o volume de concreto torna-se de extrema importância para não onerar excessivamente a obra. O volume de concreto necessário, em m³, calculado para cada pavimento em cada edifício é dado na Tabela 11.

Tabela 11 - Volume de concreto (m³) por edificação

Pavimento	Edifício			
	A	B	C	D
Ático	8,4	8,4	8,5	8,4
Barrilete	5,6	5,3	5,7	5,6
Cobertura	41,6	36,6	42,2	36,5
Tipo 2	41,4	36,7	125,7	110,4
Tipo 1	172,4	143,5	174,1	150,4
Fundação	10,2	10,4	10,2	10,3
Total	279,6	240,9	366,4	321,6

Fonte: Autor (2017)

Conforme esperado, o aumento da resistência característica do concreto proporcionou menor consumo de concreto. Nos edifícios de 6 pavimentos, há economia de 38,7 toneladas de aço (13,84%), já nos de 8 pavimentos essa economia é de 44,8 toneladas (12,23%).

4.5.2. Aço

Usualmente, o aço estrutural é vendido por peso e este quantitativo já é fornecido pelo engenheiro projetista ao contratante com um acréscimo de 10% para estimar o desperdício com cortes de barra na obra. O peso de aço, em kg, calculado para cada pavimento das edificações projetadas pode ser visto na Tabela 12.

Tabela 12 - Peso de aço (kg) para cada edificação

Pavimento	Edifício			
	A	B	C	D
Ático	891,9	939,7	898,4	951,2
Barrilete	560	576,6	551,4	575,4
Cobertura	3970	3827,6	4729,6	3980,4
Tipo 2	5362	3160,5	8838,5	8252,3
Tipo 1	16472	14641,6	20571,6	14943,6
Fundação	797,5	817,8	812,6	830,1
Total	28053,4	23963,8	36402,1	29533

Fonte: Autor (2017)

Pode-se verificar que o aumento da resistência característica do concreto nos edifícios B e D também proporcionou um consumo menor de aço em relação aos edifícios A e C, respectivamente.

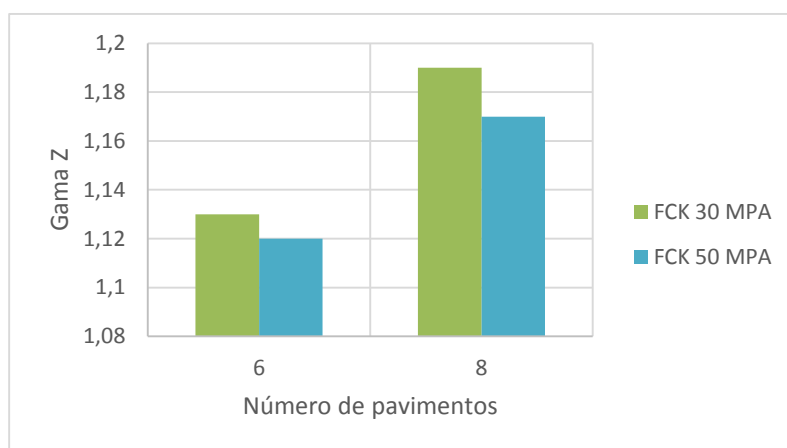
5. INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA DO CONCRETO NO DESEMPENHO ESTRUTURAL

Nesta seção analisar-se-á quantitativamente e qualitativamente o que a diferença da resistência característica do concreto entre os edifícios ocasionou no parâmetro de estabilidade global Gama Z, na carga média por pavimento, nas reações na fundação, no consumo total de aço e de concreto.

5.1. Estabilidade global

Para verificar a influência da resistência característica do concreto na estabilidade global de um edifício, fez-se a comparação da variação do parâmetro de estabilidade global Gama Z entre os edifícios, agrupados pelo número de pavimentos. Tal comparação pode ser encontrada na Figura 12.

Figura 12 - Valores de Gama Z em cada edifício



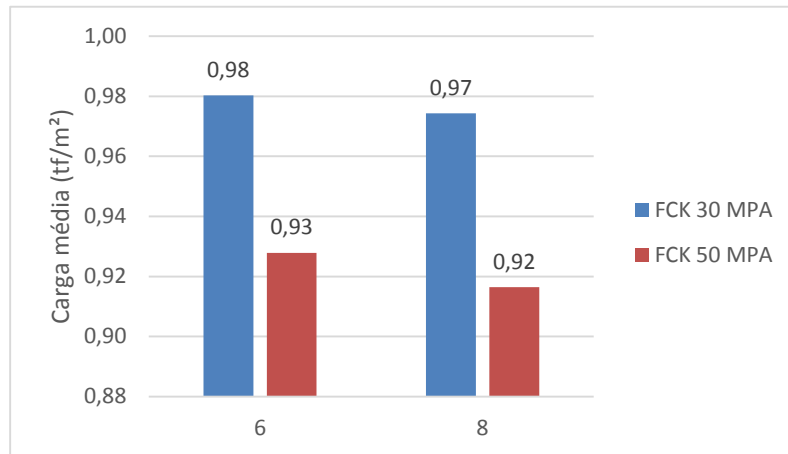
Fonte: Autor (2017)

A partir disso, percebe-se que a resistência dos elementos estruturais foi preponderante no dimensionamento e não a estabilidade global. Também percebe-se que, apesar da diminuição dos elementos estruturais devido ao aumento da resistência característica do concreto, as estruturas ficaram mais estáveis, o que pode indicar uma maior importância do módulo de elasticidade na rigidez do pórtico espacial e na estabilidade global de estruturas.

5.2. Carga da edificação

Verificou-se a influência do aumento da resistência característica do concreto na redução da carga total da edificação. Na Figura 13 pode-se ver um comparativo entre as cargas médias por m² dos edifícios estudados.

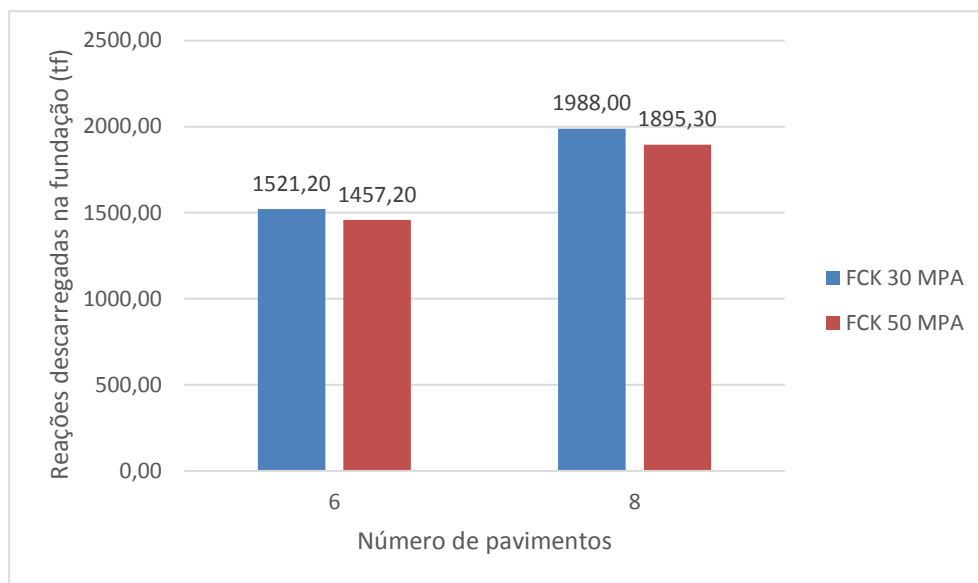
Figura 13 - Carga média (tf/m²) de cada edifício



Fonte: Autor (2017)

Como pode-se ver, a carga média da edificação diminuiu em 5,35% com o aumento da resistência característica do concreto em edifícios de 6 pavimentos e 5,94% em edifícios de 8 pavimentos. Já na Figura 14, comparou-se as reações descarregadas na fundação entre os edifícios.

Figura 14 - Reações totais descarregadas (tf) em cada edifício

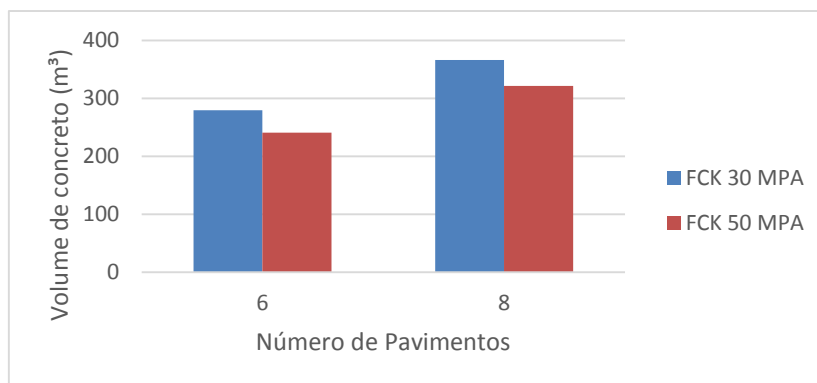


Desta maneira, percebeu-se uma diminuição de 64 tf nos edifícios com 6 pavimentos, o que representa uma redução relativa de 4,21% e 92,7 tf nos edifícios com 8 pavimentos, o que representa redução de 4,66% nas cargas. Embora neste trabalho não tenha sido definido o tipo de fundação para as edificações, tais diferenças relativas são significativas e são fatores geradores de economia no custo final de uma obra.

5.3. Consumo de concreto

Para verificar a influência da resistência característica do concreto no consumo total de concreto em um edifício, fez-se a comparação da variação do consumo de concreto entre os edifícios, em uma mesma variação no número de pavimentos, conforme a Figura 15.

Figura 15 - Volume de concreto (m³) para cada edificação



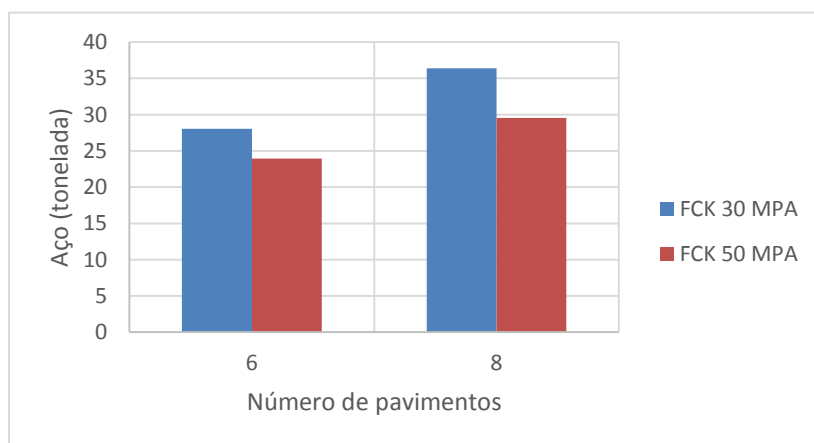
Fonte: Autor (2017)

Para os edifícios de 6 pavimentos, tem-se uma diferença de 38,7 m³ de concreto (13,84%), enquanto que para os edifícios de 8 pavimentos, tem-se uma diferença de 44,8 m³ de concreto (12,23%). Além de um menor impacto ambiental, tal redução no consumo de concreto também causa economia na quantidade de formas, por exemplo.

5.4. Consumo de aço

Por fim, verificou-se a influência da resistência característica do concreto no consumo total de aço em um edifício, conforme mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Peso total de aço (ton) para cada edificação



Fonte: Autor (2017)

Para os edifícios de 6 pavimentos, tem-se uma diferença de 4,09 toneladas de aço (14,58%), enquanto que para os edifícios de 8 pavimentos, tem-se uma diferença de 6,87 toneladas de aço (18,87%). Assim, tal redução no consumo de aço proporciona um menor impacto ambiental bem como um menor custo com armação e outros custos de execução.

6. INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA DO CONCRETO NO DESEMPENHO ECONÔMICO

Os insumos mais relevantes no custo final de uma edificação são o concreto e o aço, sendo, assim, necessário para a viabilidade econômica de uma edificação a otimização de tais insumos, analisando-se os seus quantitativos e seus valores de mercado. Para este estudo, pesquisou-se preços referentes ao mês de novembro de 2017 com fornecedores da cidade de Uberlândia - MG, utilizando-se sempre valores médios, vistos na Tabela 13.

Tabela 13 - Preço médio dos insumos

Insumo (unid.)	Preço médio (R\$/unid.)
Concreto 30 MPa (m³)	260,00
Concreto 50 MPa (m³)	320,00
Aço CA-50 (kg)	3,19

Fonte: Autor (2017)

A partir desses preços médios, calculou-se o custo de cada estrutura com os preços atuais e qual a influência de cada insumo em situações de preço com alta variação.

6.1. Com baixa variação de preços

Tem-se o custo final das edificações na Tabela 18, considerando-se preços médios para os insumos.

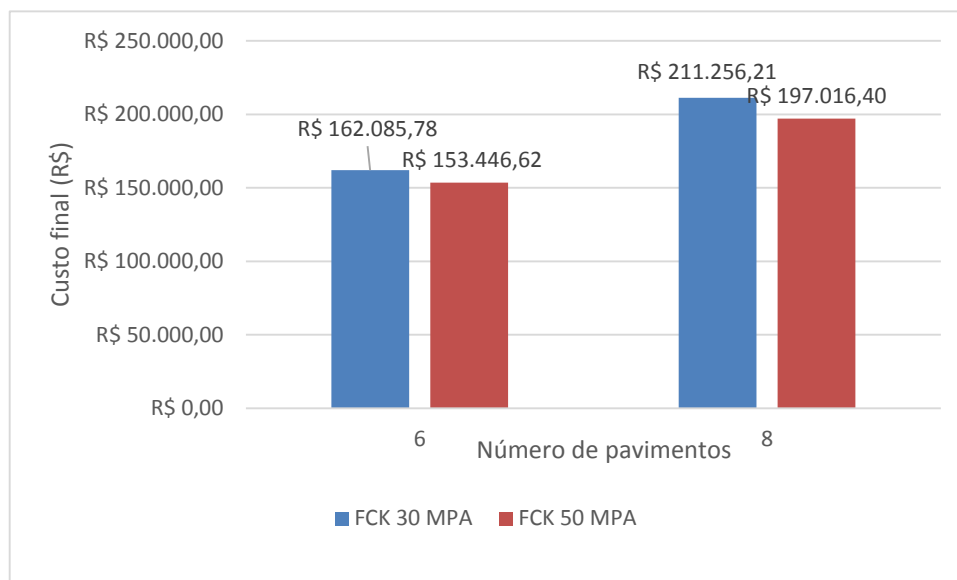
Tabela 14 - Custo final das edificações

Insumo	Quantidade (unid.)	Preço (R\$/unid.)	Custo Final (R\$)
Custo Edifício A		R\$ 162.085,78	
Concreto 30 MPa (m³)	279,6	R\$ 260,00	72696
Concreto 50 MPa (m³)	-	R\$ 320,00	-
Aço CA-50 (kg)	28053,4	R\$ 3,19	89389,78
Custo Edifício B		R\$ 153.446,62	
Concreto 30 MPa (m³)	-	R\$ 260,00	-
Concreto 50 MPa (m³)	240,9	R\$ 320,00	77088
Aço CA-50 (kg)	23963,8	R\$ 3,19	76358,62
Custo Edifício C		R\$ 211.256,21	
Concreto 30 MPa (m³)	366,4	R\$ 260,00	95264
Concreto 50 MPa (m³)	-	R\$ 320,00	-
Aço CA-50 (kg)	36402,1	R\$ 3,19	115992,21
Custo Edifício D		R\$ 197.016,40	
Concreto 30 MPa (m³)	-	R\$ 260,00	-
Concreto 50 MPa (m³)	321,6	R\$ 320,00	102912
Aço CA-50 (kg)	29533	R\$ 3,19	94104,40

Fonte: Autor (2017)

Tem-se na Figura 17 uma comparação entre os custos finais das edificações, a fim de melhor compreensão sobre a influência da resistência à compressão do concreto nos mesmos.

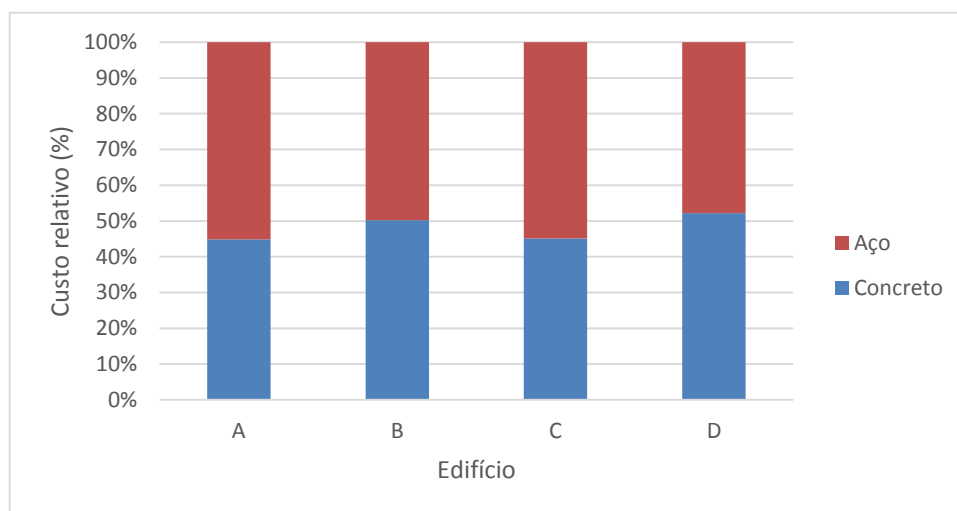
Figura 17 - Comparativo do custo final entre as edificações



Fonte: Autor (2017)

Já na Figura 18, pode-se analisar melhor a influência de cada insumo no custo final em cada edificação.

Figura 18 - Custo relativo dos insumos no custo final



Fonte: Autor (2017)

Isto nos mostra que na condição atual de mercado um edifício de 6 pavimentos é 5,63% mais barato ao usar concreto com resistência característica de 50 MPa do que usar concreto de 30 MPa. Já para edifícios de 8 pavimentos, a economia é de 7,23%.

6.2. Com alta variação de preços

Também estudou-se o quanto uma variação brusca dos preços influenciaria no custo final das edificações e na participação relativa de cada insumo no custo final.

6.2.1. Variação de +50% no preço do concreto

O custo de cada edificação é mostrado na Tabela 15, considerando um aumento de 50% no preço médio atual do concreto.

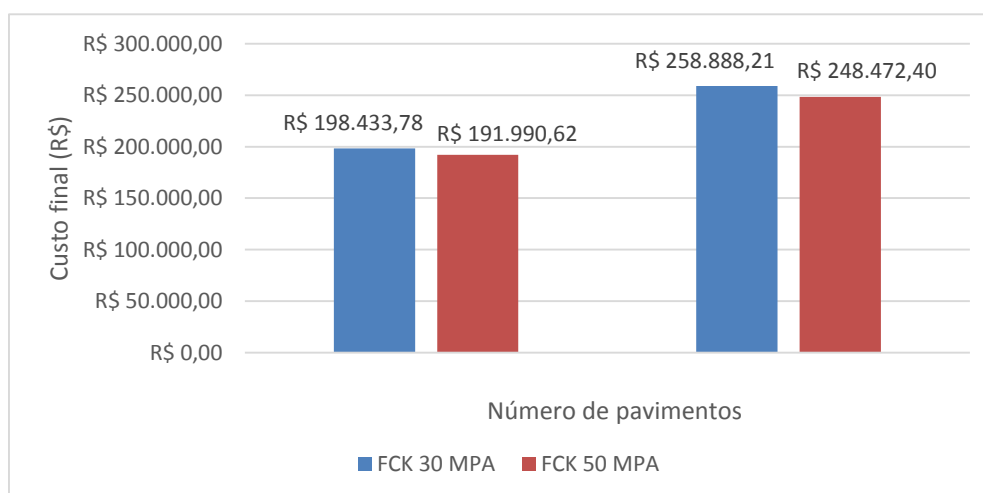
Tabela 15 - Custo final dos edifícios, com variação de +50% no preço do concreto

Insumo	Quantidade (unid.)	Preço (R\$/unid.)	Custo Final (R\$)
Custo Edifício A		R\$ 198.433,78	
Concreto 30 MPa (m³)	279,6	R\$ 390,00	109044
Concreto 50 MPa (m³)	-	R\$ 480,00	-
Aço CA-50 (kg)	28053,4	R\$ 3,19	89389,78
Custo Edifício B		R\$ 191.990,62	
Concreto 30 MPa (m³)	-	R\$ 390,00	-
Concreto 50 MPa (m³)	240,9	R\$ 480,00	115632
Aço CA-50 (kg)	23963,8	R\$ 3,19	76358,62
Custo Edifício C		R\$ 258.888,21	
Concreto 30 MPa (m³)	366,4	R\$ 390,00	142896
Concreto 50 MPa (m³)	-	R\$ 480,00	-
Aço CA-50 (kg)	36402,1	R\$ 3,19	115992,21
Custo Edifício D		R\$ 248.472,40	
Concreto 30 MPa (m³)	-	R\$ 390,00	-
Concreto 50 MPa (m³)	321,6	R\$ 480,00	154368
Aço CA-50 (kg)	29533	R\$ 3,19	94104,40

Fonte: Autor (2017)

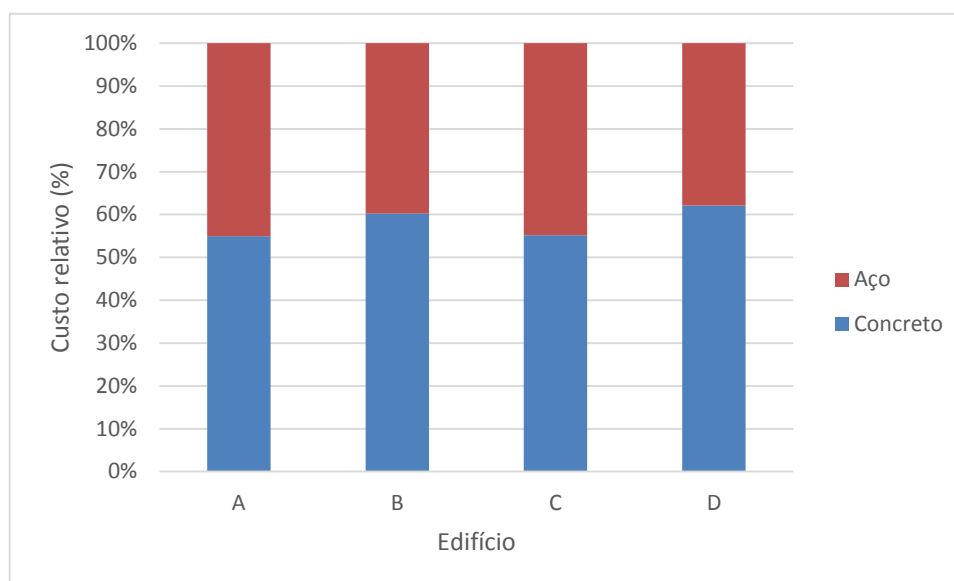
Tem-se nas Figuras 19 e 20 uma comparação entre os custos finais das edificações, e a influência de cada insumo no custo final em cada edificação.

Figura 19 - Custo final dos edifícios, com variação de +50% no preço do concreto



Fonte: Autor (2017)

Figura 20 - Custo relativo dos insumos, com variação de +50% no preço do concreto



Fonte: Autor (2017)

Para este caso, a participação do concreto no custo final aumentaria cerca de 10%, acentuando-se as diferenças no custo final entre as edificações em caso de aumento da resistência característica do concreto.

6.2.2. Variação de -50% no preço do concreto

O custo de cada edificação é mostrado na Tabela 16, considerando uma diminuição de 50% no preço médio atual do concreto.

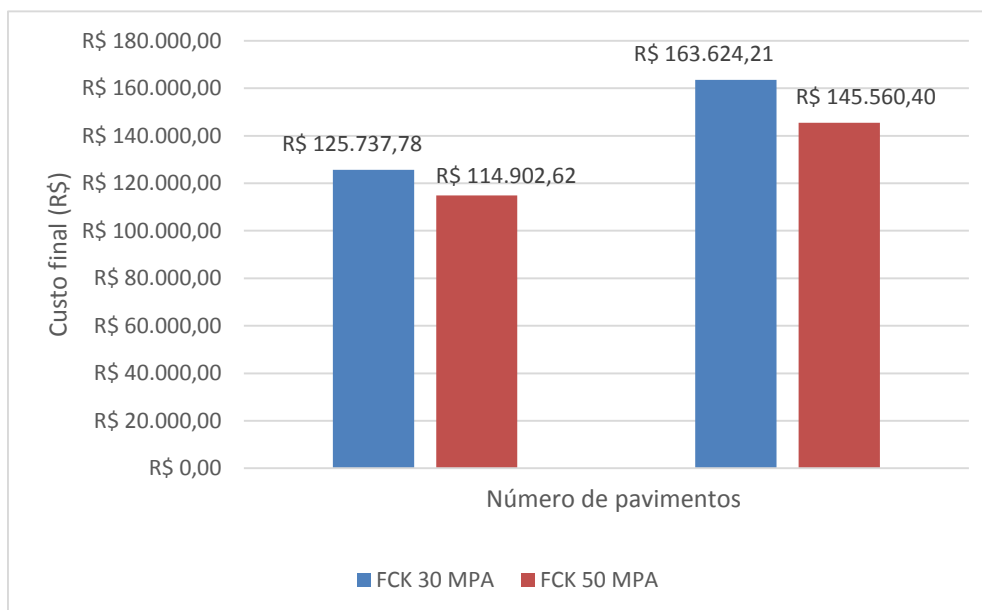
Tabela 16 - Custo final dos edifícios, com variação de -50% no preço do concreto

Insumo	Quantidade (unid.)	Preço (R\$/unid.)	Custo Final (R\$)
Custo Edifício A		R\$ 125.737,78	
Concreto 30 MPa (m³)	279,6	R\$ 130,00	36348
Concreto 50 MPa (m³)	-	R\$ 160,00	-
Aço CA-50 (kg)	28053,4	R\$ 3,19	89389,78
Custo Edifício B		R\$ 114.902,62	
Concreto 30 MPa (m³)	-	R\$ 130,00	-
Concreto 50 MPa (m³)	240,9	R\$ 160,00	38544
Aço CA-50 (kg)	23963,8	R\$ 3,19	76358,62
Custo Edifício C		R\$ 163.624,21	
Concreto 30 MPa (m³)	366,4	R\$ 130,00	47632
Concreto 50 MPa (m³)	-	R\$ 160,00	-
Aço CA-50 (kg)	36402,1	R\$ 3,19	115992,21
Custo Edifício D		R\$ 145.560,40	
Concreto 30 MPa (m³)	-	R\$ 130,00	-
Concreto 50 MPa (m³)	321,6	R\$ 160,00	51456
Aço CA-50 (kg)	29533	R\$ 3,19	94104,40

Fonte: Autor (2017)

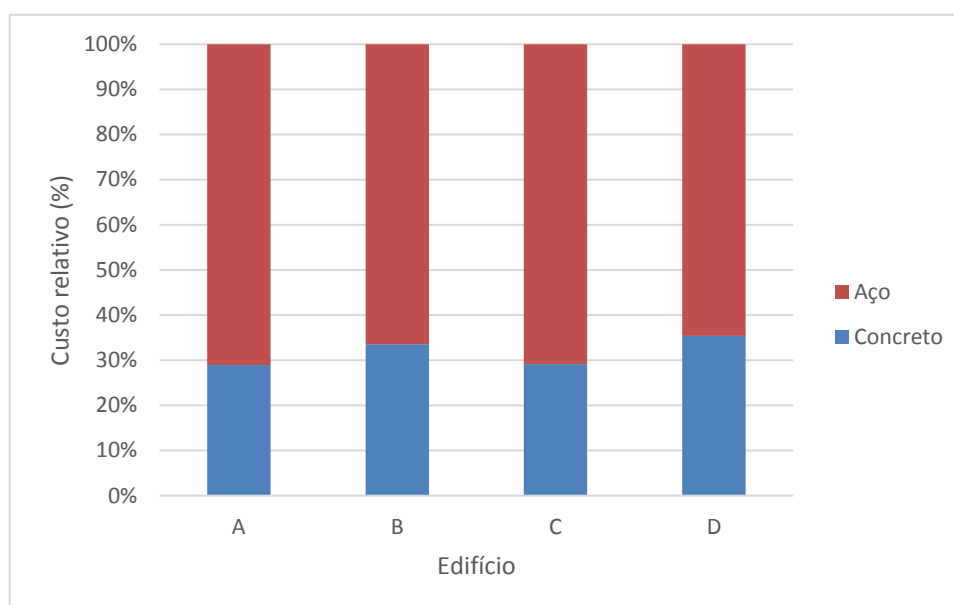
Tem-se nas Figuras 21 e 22 uma comparação entre os custos finais das edificações, e a influência de cada insumo no custo final em cada edificação.

Figura 21 - Custo final dos edifícios, com variação de -50% no preço do concreto



Fonte: Autor (2017)

Figura 22 - Custo relativo dos insumos, com variação de -50% no preço do concreto



Fonte: Autor (2017)

Para este caso, haveria um aumento da participação do aço no custo final de 65% a 70%. Contudo, o aumento da resistência característica do concreto seria a solução mais econômica e por uma margem de diferença ainda maior.

6.2.3. Variação de +50% no preço do aço

O custo de cada edificação é mostrado na Tabela 17, considerando um aumento de 50% no preço médio atual do aço.

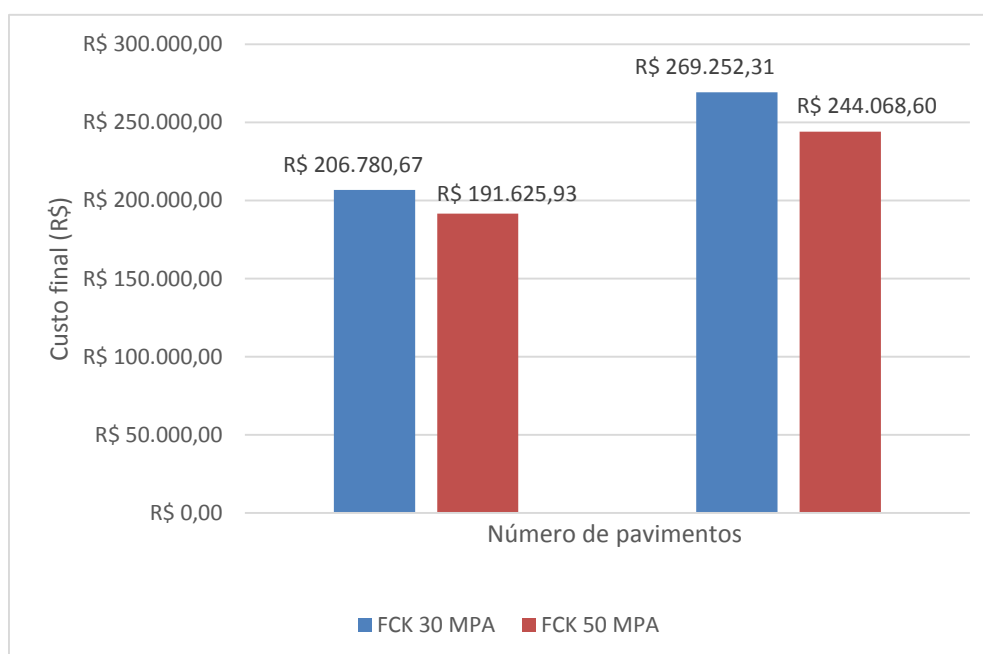
Tabela 17 - Custo final dos edifícios, com variação de +50% no preço do aço

Insumo	Quantidade (unid.)	Preço (R\$/unid.)	Custo Final (R\$)
Custo Edifício A		R\$ 206.780,67	
Concreto 30 MPa (m³)	279,6	R\$ 260,00	72696
Concreto 50 MPa (m³)	-	R\$ 320,00	-
Aço CA-50 (kg)	28053,4	R\$ 4,78	134084,6725
Custo Edifício B		R\$ 191.625,93	
Concreto 30 MPa (m³)	-	R\$ 260,00	-
Concreto 50 MPa (m³)	240,9	R\$ 320,00	77088
Aço CA-50 (kg)	23963,8	R\$ 4,78	114537,9267
Custo Edifício C		R\$ 269.252,31	
Concreto 30 MPa (m³)	366,4	R\$ 260,00	95264
Concreto 50 MPa (m³)	-	R\$ 320,00	-
Aço CA-50 (kg)	36402,1	R\$ 4,78	173988,31
Custo Edifício D		R\$ 244.068,60	
Concreto 30 MPa (m³)	-	R\$ 260,00	-
Concreto 50 MPa (m³)	321,6	R\$ 320,00	102912
Aço CA-50 (kg)	29533	R\$ 4,78	141156,6025

Fonte: Autor (2017)

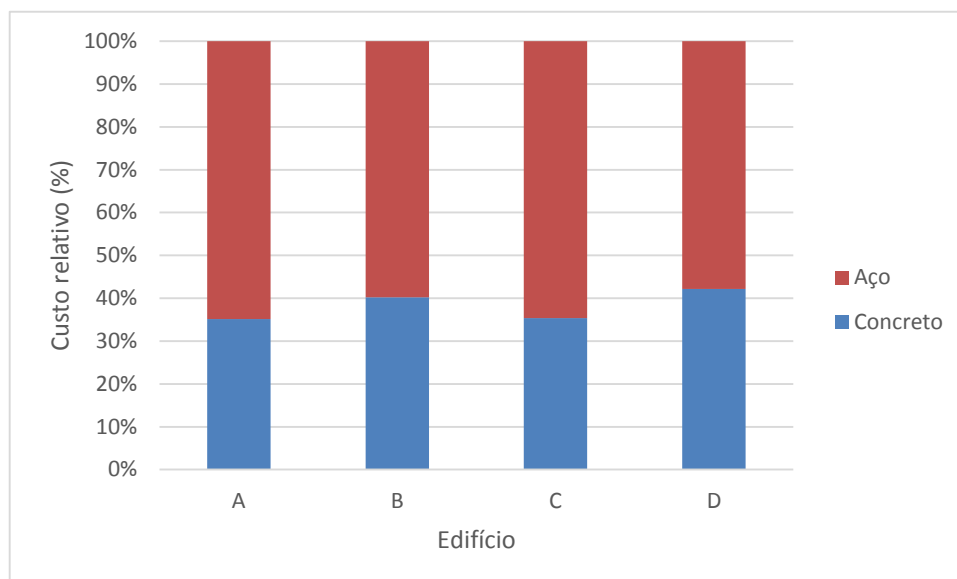
Tem-se nas Figuras 23 e 24 uma comparação entre os custos finais das edificações, e a influência de cada insumo no custo final em cada edificação.

Figura 23 - Custo final dos edifícios, com variação de +50% no preço do aço



Fonte: Autor (2017)

Figura 24 - Custo relativo dos insumos, com variação de +50% no preço do aço



Fonte: Autor (2017)

Observou-se que nessa variação de preços a relevância do aço no custo final aumentou significativamente, mas isso não seria suficiente para os custos dos edifícios de menor resistência característica do concreto serem mais viáveis economicamente.

6.2.4. Variação de -50% no preço do aço

O custo de cada edificação é mostrado na Tabela 18, considerando uma diminuição de 50% no preço médio atual do aço.

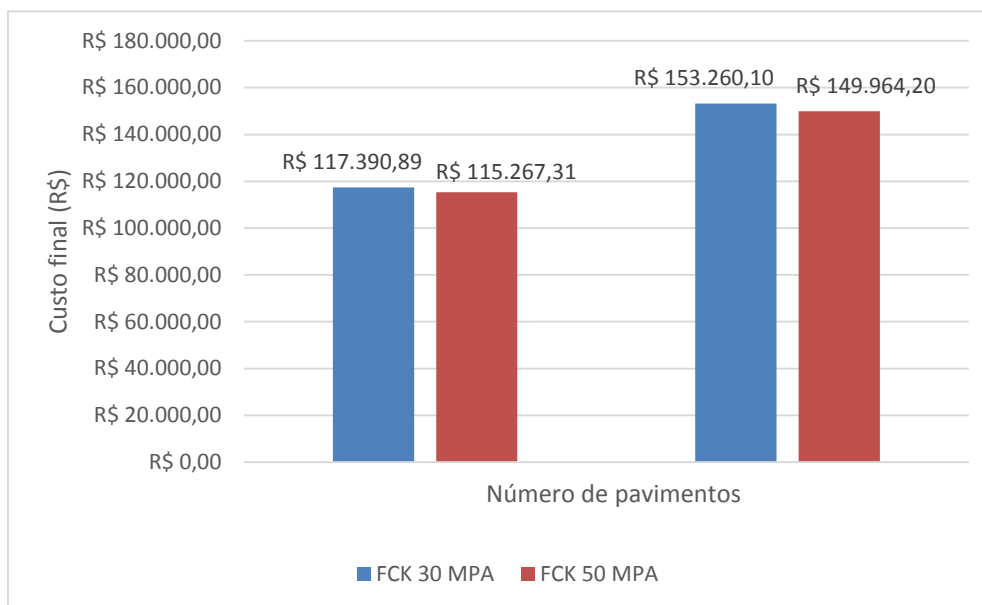
Tabela 18 - Custo final dos edifícios, com variação de -50% no preço do aço

Insumo	Quantidade (unid.)	Preço (R\$/unid.)	Custo Final (R\$)
Custo Edifício A		R\$ 117.390,89	
Concreto 30 MPa (m³)	279,6	R\$ 260,00	72696
Concreto 50 MPa (m³)	-	R\$ 320,00	-
Aço CA-50 (kg)	28053,4	R\$ 1,59	44694,89082
Custo Edifício B		R\$ 115.267,31	
Concreto 30 MPa (m³)	-	R\$ 260,00	-
Concreto 50 MPa (m³)	240,9	R\$ 320,00	77088
Aço CA-50 (kg)	23963,8	R\$ 1,59	38179,30891
Custo Edifício C		R\$ 153.260,10	
Concreto 30 MPa (m³)	366,4	R\$ 260,00	95264
Concreto 50 MPa (m³)	-	R\$ 320,00	-
Aço CA-50 (kg)	36402,1	R\$ 1,59	57996,10333
Custo Edifício D		R\$ 149.964,20	
Concreto 30 MPa (m³)	-	R\$ 260,00	-
Concreto 50 MPa (m³)	321,6	R\$ 320,00	102912
Aço CA-50 (kg)	29533	R\$ 1,59	47052,20083

Fonte: Autor (2017)

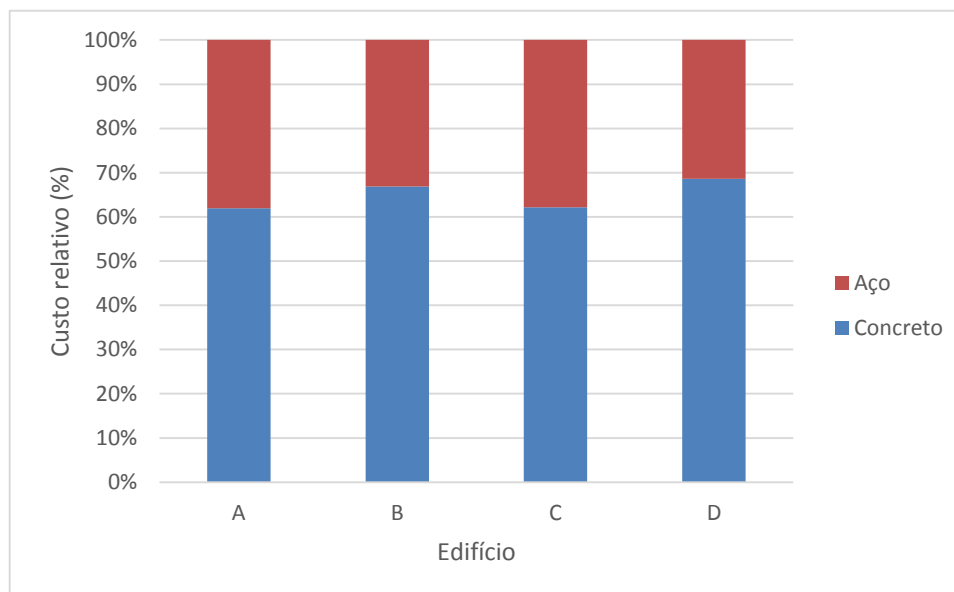
Tem-se nas Figuras 25 e 26 uma comparação entre os custos finais das edificações, e a influência de cada insumo no custo final em cada edificação.

Figura 25 - Custo final dos edifícios, com variação de -50% no preço do aço



Fonte: Autor (2017)

Figura 26 - Custo relativo dos insumos, com variação de -50% no preço do aço



Fonte: Autor (2017)

Com a menor relevância do preço do aço no custo final nesta configuração, os custos dos edifícios com maior e menor resistência característica do concreto ficariam razoavelmente equiparados, mas ainda tendendo à maior economia ao utilizar-se concreto com maior resistência característica.

7. CONCLUSÃO

Verificou-se com este estudo que há uma tendência de que, com esta variação de resistência característica do concreto e nesta configuração estrutural, um maior módulo de elasticidade tangente inicial do concreto torne a estrutura mais rígida do que uma maior inércia dos elementos estruturais, mesmo com cerca de 5 tf/m² de carga por pavimento à menos na edificação.

A diminuição na ordem de 4,5% nas reações na fundação pode ser um grande fator de economia e de menor impacto ambiental, bem como a redução de cerca de 12% a 14% no consumo de concreto e de 14% a 19% no consumo de aço. Num contexto mundial de grandes problemas ambientais e busca por consumo responsável de recursos naturais, a obtenção de uma edificação mais sustentável é algo muito positivo e deve ser considerado em um projeto estrutural.

Com elementos estruturais menores também há uma melhoria na fase de utilização da estrutura pois facilita-se a manutenção e limpeza dos ambientes. Tem-se também um maior conforto visual e a necessidade de um revestimento menos espesso das paredes, o que proporciona maior economia.

A única condição de variação de preço na qual os custos totais entre edificações das diferentes resistências características do concreto analisadas se equiparam é em caso de uma queda de 50% no preço do aço, mas ainda assim é mais econômico utilizar concreto com resistência característica igual a 50 MPa, não somente devido ao custo dos insumos mas também pelos demais fatores mostrados anteriormente, como espessura do revestimento das paredes e menor carga de fundação. Há uma tendência de que essa economia causada por uma maior resistência característica do concreto seja ainda maior no caso de edificações mais altas do que as consideradas.

Com isso, conclui-se que, em todas as condições de projeto e de preço analisadas, construir uma edificação residencial em concreto armado utilizando-se concreto com resistência característica de 50 MPa é mais indicado do que utilizando-se concreto com resistência característica de 30 MPa.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações – procedimento. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações – procedimento. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas – procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações habitacionais – desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

CAD/TQS. **Manual II – Visão Geral e Exemplo Completo**. V19 – 1º semestre. Disponível em: < <http://www.tqs.com.br>>. Acesso em: 21 nov. 2017.

TQS INFORMÁTICA LTDA. **Concepção estrutural – CAD/TQS**. Disponível em: <<http://www.tqs.com.br>>. Acesso em: 21 nov. 2017.