



Otimização Paramétrica de Vigas de Concreto Armado em Sistema Estrutural de Edificação Residencial Unifamiliar

Renan Gustavo Pacheco Soares¹, Gustavo Gutierrez de Oliveira Rodrigues², Wagner Dmitry Gueiros Cavalcante³, Romilde Almeida de Oliveira⁴, Arnaldo Manoel Pereira Carneiro⁵

¹Universidade Federal de Pernambuco / CTG / E-mail: renangpsoares@hotmail.com

²Universidade Regional de Blumenau / CCT / E-mail: gustavogutierrez01@hotmail.com

³Autarquia do Ensino Superior de Garanhuns / AESGA / E-mail: wagnerdmitry22@gmail.com

⁴Universidade Católica de Pernambuco / UNICAP / E-mail: romildealmeida@gmail.com

⁵Universidade Federal de Pernambuco / CTG / E-mail: arnaldo2164@hotmail.com

Resumo

Um dos objetivos primordiais de um projeto estrutural é cumprir todos os requisitos de desempenho e durabilidade. Um projeto mal dimensionado pode causar prejuízos financeiros e/ou de vida. A otimização dos processos de produção, com foco na melhor relação custo benefício, tem se mostrado uma constante nos escritórios de projeto e entre os pesquisadores. Isso por buscar constantemente a melhor solução estrutural, pela modificação de parâmetros de projeto, dentro de um universo limitado. As vigas têm um papel fundamental dentro de um sistema estrutural, tendo um custo significativo dentro da obra. Desse modo, este artigo teve como objetivo estabelecer a melhor relação entre fck /altura com vistas no custo e desempenho. A edificação analisada foi um pavimento térreo com estrutura de concreto armado. Diferentes resistências de concreto foram utilizadas para cada amostra, estas variando de 25 a 50 MPa, com alturas de vigas entre 25 e 50 cm. A composição do custo das vigas com as variáveis concreto, aço e fôrma, foram baseadas através do uso da tabela SINAPI. Como resultados, foi estabelecida a relação fck /altura que melhor se enquadrou para as vigas do baldrame para a edificação analisada, com 25 cm de altura e concreto de 30 MPa. Já para as vigas do pavimento da laje, a melhor opção, considerando principalmente o alto custo de fôrmas para elaboração das mesmas, foram as determinadas com 25 cm de altura, e fck de 45 MPa, tornando-se assim um sistema otimizado em termos de aplicação de vigas.

Palavras-chave

Análise estrutural; otimização paramétrica; vigas; concreto armado.

Introdução

Na Engenharia, um conceito que tem recebido grande atenção nas últimas décadas é com relação a otimização estrutural. O desenvolvimento de técnicas capazes de propiciar soluções mais rápidas e econômicas, sem deixar de lado a qualidade e segurança estrutural é objeto de estudo de diversos pesquisadores, tendo em vista a necessidade de adequações e reformulações de entendimento de concepção estrutural quanto as necessidades atuais.

Com base no aumento da competitividade de mercado, os conceitos e técnicas de otimização deixam de ser uma opção para se tornar uma obrigação em que todo engenheiro projetista deve ter conhecimento, pois as empresas visam sempre reduzir a quantidade de materiais utilizados, com foco no menor custo. Em alguns casos fazem essa redução até sem a realização de uma otimização efetiva, visando apenas o aumento de lucro sem se preocupar com a segurança estrutural necessária.

Diante da evolução do conceito de arquitetura contemporânea, os projetos em concreto armado têm ganhado cada vez mais tons de extrema complexidade, aumentando, assim, valores de esbeltez, que tendem a interferir de forma direta na segurança e custo de execução. Para tanto, iminente a necessidade de realização

destes cálculos, diversos *softwares* específicos para o dimensionamento estrutural, têm adotado soluções para facilitar os processos quanto a possibilidade de efetivação da otimização do sistema. No entanto, vale salientar que essas ferramentas computacionais nada mais são do que um auxílio ao projetista quanto à tomada de decisões, de forma que a otimização seja realizada de forma efetiva.

O sistema estrutural em concreto armado é um conjunto um tanto complexo, quando analisado o todo sem separar as partes. Com isso, o objeto principal deste estudo foram as vigas, pois as mesmas são de vital importância para a estabilidade do sistema estrutural, contribuindo de forma direta para o custo dentro da obra e, também, tem a possibilidade dentro do respeito aos limites normativos e de segurança, de terem dimensões reduzidas, desde que o desempenho mecânico não seja prejudicado.

Para tanto, o objetivo deste artigo foi estabelecer a melhor relação entre *fck*/altura com vistas no custo e desempenho. Foram utilizados os *softwares* Cypecad, em versão educacional disponível e o Microsoft Excel, versão teste, para modelagem e realização de cálculo estrutural, bem como a elaboração de planilha específica baseado nos valores estabelecidos pela Tabela SINAPI, para computação dos valores quando realizadas as respectivas variações estipuladas.

Otimização estrutural

Dois conceitos que podem ser facilmente confundidos são os de redução e otimização. A redução nos custos, muitas vezes pode não levar em consideração a perda de qualidade e segurança nos produtos e serviços. Já a otimização leva em conta além do custo, a qualidade e segurança do produto ou serviço, buscando uma equação ótima de correlações (BRONDANI, 2008).

Arelado aos fatores de redução e otimização, a construção civil tem como um dos cerne principais produzir com eficiência, promovendo a otimização nos gastos, com o intuito de propiciar maior economia na construção de edificações. A construção de uma obra, independentemente de localização, recursos, prazo, cliente e tipo de projeto, é, com certeza, uma atividade econômica, como tal, o custo dela é de fundamental importância (MATTOS, 2006).

Atribuir a redução de custo à apenas uma variável, sem considerar as demais envolvidas em uma ação, é um tanto errônea quando se analisa a construção como um todo. Diversos são os fatores interligados e interdependentes para a promoção de redução de custo dentro do conceito de engenharia.

Problemas de engenharia estão, normalmente, associados a uma grande quantidade de variáveis de projeto, devendo ser especificadas para obtenção de um produto eficiente e seguro, alinhado com uma minimização no custo de fabricação. A etapa de especificação de variáveis consiste em uma tarefa complexa em função da grande quantidade de opções que o responsável tem a sua disposição, sem deixar de lado os diversos parâmetros de projeto que devem ser respeitados (PARAMO, 2020).

A otimização é definida em função do objetivo no qual se queira maximizar ou minimizar, desde que existam variáveis de projeto passíveis de alterações, e que se tenham restrições a serem respeitadas. Esses parâmetros alterados durante a otimização, geralmente nas estruturas de concreto armado são as dimensões, características mecânicas, a forma do elemento ou a distribuição do material no elemento analisado. As restrições são pré-determinadas por normas técnicas, disposições construtivas ou experiência do projetista, o qual imagina um valor aceitável, considerando todos os preceitos normativos e executáveis, possam produzir resultados significativos de mudanças (SILVA, 2010).

Por se tratar de um projeto amplo e dependente de diversos fatores, a estrutura pode ser otimizada em diversos termos, tanto em elementos específicos, a exemplo dos pilares e vigas, quanto na análise global do sistema. O foco principal da otimização consiste na determinação da segurança e viabilidade executiva, pois as alterações implicam diretamente no modelo executivo da atividade.

As soluções teóricas de um projeto podem ter infinitas soluções e, na prática, várias delas podem ter soluções aceitáveis. Com a competitividade atual no mercado, não basta apenas uma solução ser aceitável, mas também conceitos como economia e limites de aceitação devem ser considerados (SACOMAN, 1998).

Diante da disponibilidade das diversas soluções que um sistema estrutural pode ter em termos de otimização estrutural, é necessário que ao se realizar a análise quanto a tomada de decisão, seja feita com base nos modelos de otimização disponíveis e propícios para estas atividades.

Dentre os formatos previstos, destacam-se principalmente a otimização paramétrica, topológica e de forma. Para o estudo em questão, foi utilizada a otimização paramétrica, com foco na melhor solução estrutural em relação ao custo-benefício da edificação em estudo.

A otimização paramétrica é aquela que a topologia e a forma da peça são mantidas constantes, sendo assim, as variáveis giram em torno de aspectos da dimensão da peça, relação dentre as dimensões, espessuras, parâmetros de resistência, entre outros (SILVA, 2010).

Pode-se identificar que ao se realizar a otimização por análise paramétrica, o entendimento e a valoração da topologia e a forma da peça serem mantidas constantes é um dos pontos mais críticos a serem realizados. Para tanto, as alterações irão consistir principalmente nas dimensões e resistência das peças, podendo ser variada tanto em base, largura e altura, desde que atenda aos requisitos mínimos normativos.

Alguns parâmetros que definem a geometria da estrutura são colocados dentro de um intervalo com o intuito de minimizar a função objetivo. Cada combinação dos parâmetros que é gerada, dentro desses intervalos, possui características únicas (VENTURATTO JUNIOR, 2016).

Por ter a possibilidade de variações tanto nas dimensões quanto nas espessuras, diversas análises e combinações devem ser realizadas. Os arranjos e junções de otimização devem considerar as mais vastas possibilidades de utilização, não devendo se limitar a apenas uma variação de espessura e dimensão, mas sim, propor uma combinação de alterações, desde que possíveis, e realizar assim as análises com as mais variadas formas e espessuras.

De forma comum, e por vezes por limitação de conhecimento teórico aplicado, as otimizações são realizadas de forma equivocada. Estes aspectos giram muito em torno de realizar apenas uma alteração e se limitar a tal análise, sendo que, as possibilidades de combinações exercem atividade maior do que um arranjo abordado.

Diversos problemas são identificados como comuns e clássicos na problematização de otimização, onde é aplicada uma carga em um elemento estrutural e o objetivo é encontrar a melhor seção que atenda a todas as restrições e que demande menor quantidade de material para fabricação da peça (SILVA, 2010) (Figura 1).

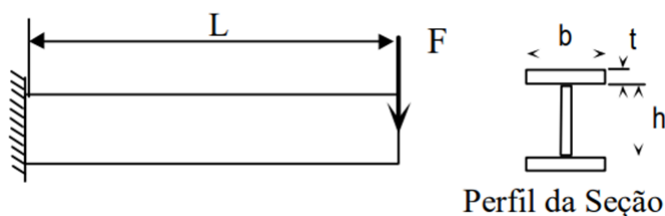


Figura 1 – Problema clássico de otimização (Silva, 2010).

Pode-se perceber que no exemplo citado (Figura 1), para resolver o problema de otimização por via paramétrica, a forma da viga seria mantida, assim como a distribuição do material na peça, variando apenas as dimensões da peça (SILVA, 2010).

Salienta-se que diversos são os seguimentos do perfil do elemento analisado, que podem ser submetidos a processos de parametrização, podendo-se citar para o caso das vigas: classe de resistência, base, altura, diâmetro das barras longitudinais inferior e superior, diâmetro dos estribos, quantidade de barras longitudinais inferiores e superiores e também o espaçamento entre estribos (LIMA, 2011).

Pode-se observar, ainda, que a otimização pode ser realizada configurando e analisando praticamente todos os pressupostos utilizados para dimensionamento de uma viga em concreto armado. Diante disto, fica evidente a necessidade de serem verificados tais variáveis a fim de melhor propor a otimização que mais possibilite a redução de dimensões, armaduras e eventualmente os custos de execução para que a estrutura se torne um tanto mais econômica, sem deixar de lado toda a segurança necessária para se realizar a habitação

Metodologia

A otimização estrutural é de fundamental importância, tendo em vista que com a sua aplicação se tem a possibilidade de promover a redução do custo executivo da estrutura, sem colocar em risco a segurança do empreendimento. Para tanto, esse trabalho propôs uma otimização do custo de vigas em concreto armado, através de técnicas computacionais. Desta forma, buscou-se nesta pesquisa, estabelecer um método de otimização de vigas utilizando planilhas eletrônicas e *software* disponíveis no mercado, com o intuito de verificar qual a melhor relação entre fck /altura que se encaixa para determinado tipo de estrutura.

O sistema estrutural lançado no *software* Cypecad. Trata-se de uma edificação residencial térrea, com vigas, pilares e lajes em concreto armado (Figura 2), considerando alvenaria de vedação em blocos cerâmicos.

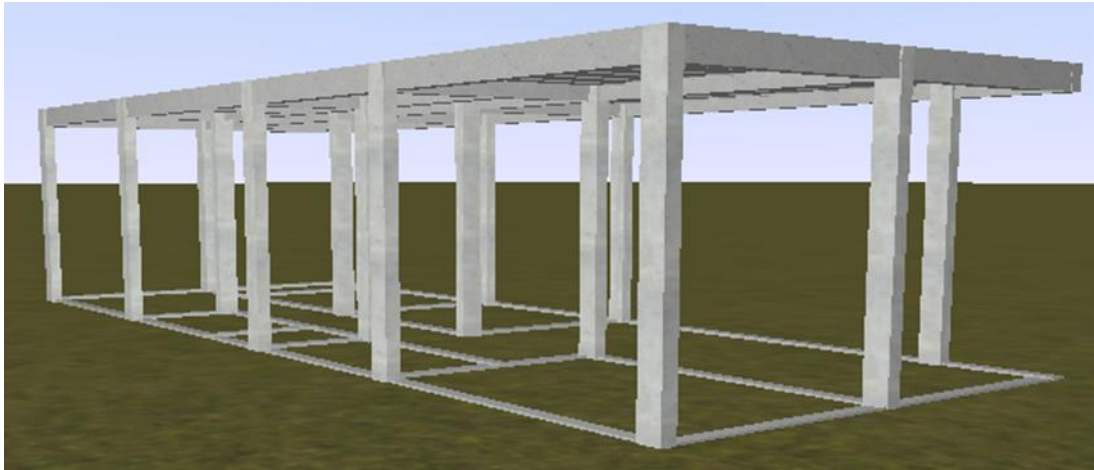


Figura 2 – Sistema estrutural térreo (Autores, 2021).

Foram pré-determinadas resistências à compressão dos concretos para cada amostra, sendo de 25, 30, 35, 40, 45 e 50 MPa, com alturas de vigas de 25, 30, 35, 40, 45 cm. Com a variação do f_{ck} e da altura das vigas, foram obtidas as respectivas áreas de aço e as disposições construtivas no programa.

Posteriormente, foram compostos os custos das vigas, considerando como fórmula para a composição dos custos para execução elementos, as variáveis concreto, aço e formas, de acordo com a tabela SINAPI. Os resultados encontrados permitiram identificar a viga que melhor se enquadra no aspecto custo em função da variação da seção, resistência do concreto e execução, para o carregamento considerado.

Elaborou-se uma planilha com o intuito de realizar a tabulação dos dados obtidos no dimensionamento e verificações da estrutura estudada. De forma inicial foram inseridos os dados obtidos no *software* Cypecad, conforme pode ser visto na Figura 3.

PREÇO DESONERADO OU ONERADO?	DESONERADO
VIGA BALDRAME?	NÃO
Viga =	V1 a V14 aérea
Altura (cm) =	50
Base (cm) =	15
Fck (Mpa) =	50
Øestribo (mm) =	5
Øagregado (mm)	19
Peso do aço estribo 5,0 mm	113,3
Peso do aço 6,3 mm	4,8
Peso do aço 8,0 mm	107,4
Peso do aço 10,0 mm	39,2
Peso do aço 12,5 mm	0
Peso do aço 16,0 mm	0
A _{aço trans} (cm ²) =	3
Quantidade de forma (m ²)	64,13
Quantidade de concreto (m ³)	5,44
Maior diâmetro de barra (mm) =	10

SALVAR DADOS

LIMPAR DADOS

RESULTADOS

Inserção de dados
Dados da viga
Dados SINAPI
Valor dos insumos
Comparativo final
+

Figura 3 – Inserção de dados (Autores, 2021).

Na primeira etapa, foi escolhido se os preços obtidos no SINAPI seriam desonerados ou onerados. Também foi necessário informar se as vigas analisadas eram baldrame ou não, pois existe diferença nos preços entre ambas. Posteriormente foram identificadas as vigas que foram analisadas. Para tanto, foram inseridos os dados de altura, fck, diâmetro de estribo e agregado graúdo utilizado. Após isso, foram inseridos os dados sobre o peso do aço utilizado no dimensionamento da estrutura, o peso foi separado por diâmetro.

Posteriormente ao se proceder a realização de processamento de dados, e analisando os resultados, pode-se direcionar ao comparativo final, onde foram apresentados todos os dados armazenados anteriormente.

Com base nos cálculos de custo, pode-se perceber que as tabulações feitas foram acerca da relação $f_{ck}/$ altura com o menor custo. Quanto aos valores específicos por insumos, os mesmos podem ser encontrados na aba de ‘valor dos insumos’ (Figura 4).

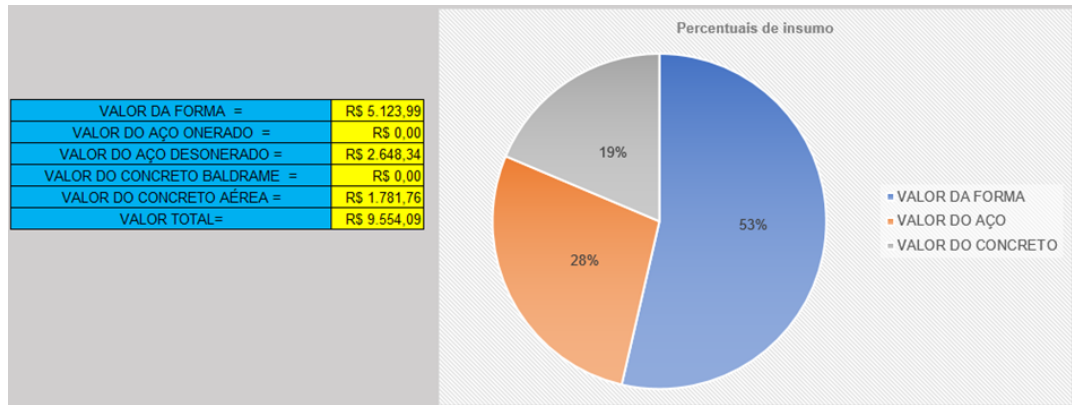


Figura 4 – Valor dos insumos (Autores, 2021).

O custo do aço foi dividido em desonerado e onerado. Já o custo do concreto dividido em vigas baldrame e aéreas de concretagem. O valor foi alterado de acordo com a inserção dos dados no início do processo.

Resultados e discussão

Com base na realização dos cálculos, foi possível encontrar que as cargas lineares nas vigas baldrame foram de 5.46 kN/m, onde foram calculadas através do peso das paredes com altura de 2.80 m e 1.95 kN/m de carga nas vigas aéreas externas paredes de 1 m, que corresponde ao platibanda do telhado. A base da viga foi considerada padrão de 15 cm e os pilares de 15x25 cm.

O *software* foi alimentado com as vigas que possuíam altura de 25 cm e o concreto com resistência à compressão de 25 MPa. Nas vigas baldrame não ocorreram erros que pudessem comprometer a seção da viga (Figura 5). Diante disso os resultados foram anotados e analisados.

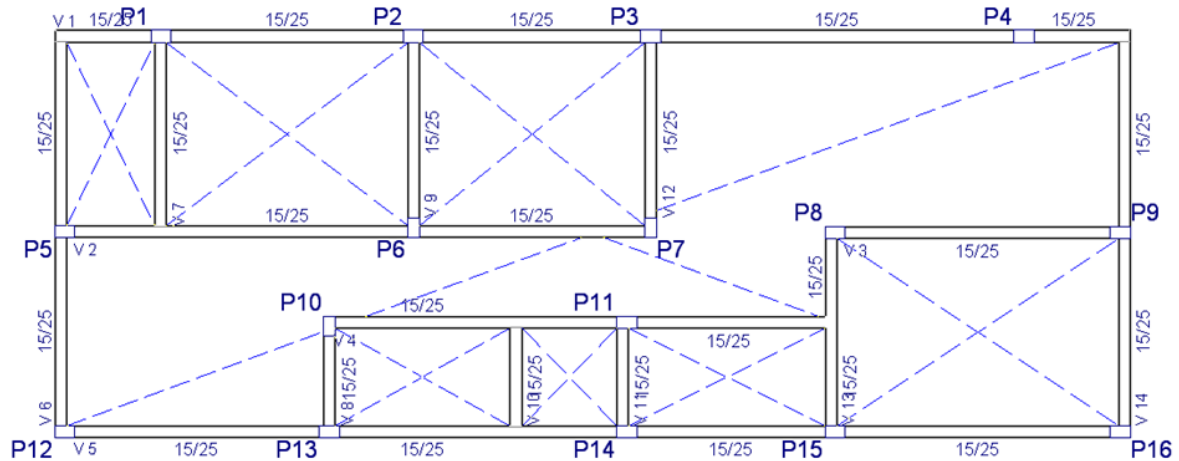


Figura 5 – Valor dos insumos (Autores, 2021).

Para as vigas aéreas que transmitem a carga da laje, a altura de 25 cm não foi suficiente, apresentando um problema quanto a flecha ativa em 3 meses (Figura 6). Com esse erro, foram descartados os seus valores e conseqüentemente não foram analisados.

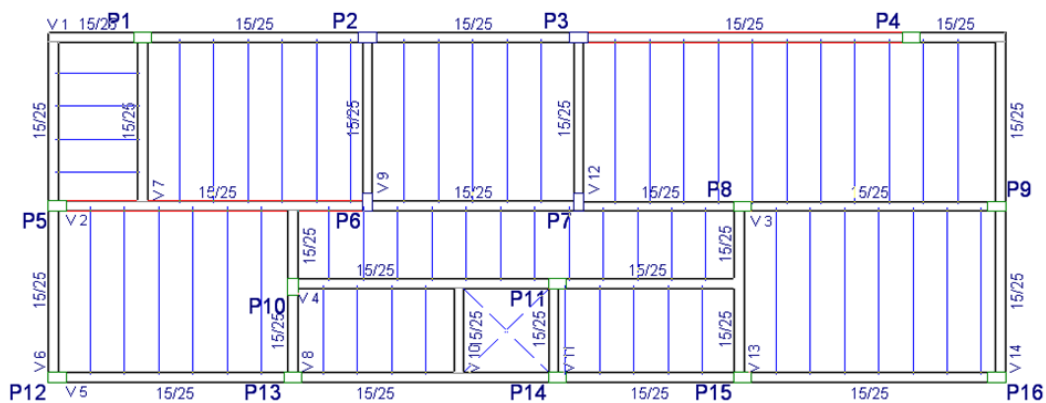


Figura 6 – Vigas aéreas 25 cm e fck 25 MPa com erro (Autores, 2021).

Quanto a análise de flecha (deformações), a viga v1 também apresentou incongruência quanto a possibilidade de passagem de cálculo para tais valores de dimensão, bem como valores de resistência à compressão do concreto (Figura 7).

Sobrecarga (Característica)	No tempo infinito (Quase permanente)	Ativa (Característica)	Estado
$f_{i,Q} \leq f_{i,Q,lim}$ $f_{i,Q,lim} = L/350$	$f_{T,max} \leq f_{T,lim}$ $f_{T,lim} = L/250$	$f_{A,max} \leq f_{A,lim}$ $f_{A,lim} = \text{Min.}(10.00, L/500)$	
$f_{i,Q}$: 3.68 mm $f_{i,Q,lim}$: 12.60 mm	$f_{T,max}$: 9.19 mm $f_{T,lim}$: 17.64 mm	$f_{A,max}$: 10.50 mm $f_{A,lim}$: 8.82 mm	NÃO PASSA

Figura 7 – Verificação de flecha viga v1 (Autores, 2021).

A viga v1 apresentou uma flecha de 10.50 mm, onde o limite aceitável era de 8.82 mm, inviabilizando assim, a sua utilização, não passando neste conceito de verificação.

Ao se realizar a análise para a viga v2, os resultados obtidos foram semelhantes aos da viga v1, conforme pode ser visto (Figura 8).

Sobrecarga (Característica)	No tempo infinito (Quase permanente)	Ativa (Característica)	Estado
$f_{i,Q} \leq f_{i,Q,lim}$ $f_{i,Q,lim} = L/350$	$f_{T,max} \leq f_{T,lim}$ $f_{T,lim} = L/250$	$f_{A,max} \leq f_{A,lim}$ $f_{A,lim} = \text{Min.}(10.00, L/500)$	
$f_{i,Q}$: 5.09 mm $f_{i,Q,lim}$: 11.86 mm	$f_{T,max}$: 11.23 mm $f_{T,lim}$: 16.60 mm	$f_{A,max}$: 13.03 mm $f_{A,lim}$: 8.30 mm	NÃO PASSA

Figura 8 – Verificação de flecha viga v2 (Autores, 2021).

A viga v2 apresentou uma flecha maior, ficando em 13.03 mm, sendo que o limite é 8.30 mm, portanto, não passando na verificação.

Com os valores de flecha das vigas v1 e v2 estando acima do limite, foi necessário alterar a rigidez da peça, para que a flecha reduzisse. Para a altura de 25 cm e fck 30 MPa, as vigas baldrame passaram em todas as verificações, sendo assim foram anotados e analisados os resultados. Já as vigas aéreas com o aumento do fck de 25 para 30 MPa a viga v1 passou na flecha ativa, mas a viga 2 apresentou um problema na verificação, como é visto na Figura 9.

Vigas	Sobrecarga (Característica)	No tempo infinito (Quase permanente)	Ativa (Característica)	Estado
	$f_{i,Q} \leq f_{i,Q,lim}$ $f_{i,Q,lim} = L/350$	$f_{T,max} \leq f_{T,lim}$ $f_{T,lim} = L/250$	$f_{A,max} \leq f_{A,lim}$ $f_{A,lim} = \text{Min.}(10.00, L/500)$	
P5 - P6	$f_{i,Q}$: 4.70 mm $f_{i,Q,lim}$: 11.86 mm	$f_{T,max}$: 9.78 mm $f_{T,lim}$: 16.60 mm	$f_{A,max}$: 11.36 mm $f_{A,lim}$: 8.30 mm	NÃO PASSA

Figura 9 – Verificação de flecha v2 aérea h=25 x fck=30 MPa (Autores, 2021).

Com o aumento do f_{ck} para 35 MPa, nas vigas baldrames não houveram alterações significativas em termos de dimensionamento, sendo assim os dados foram anotados. Quanto as vigas áreas, a flecha continuou acima do limite permitido na viga v2, como é mostrado na Figura 10, com isso os resultados foram descartados.

Sobrecarga (Característica) $f_{i,Q} \leq f_{i,Q,lim}$ $f_{i,Q,lim} = L/350$	No tempo infinito (Quase permanente) $f_{T,max} \leq f_{T,lim}$ $f_{T,lim} = L/250$	Ativa (Característica) $f_{A,max} \leq f_{A,lim}$ $f_{A,lim} = \text{Mín.}(10.00, L/500)$	Estado
$f_{i,Q}$: 4.23 mm $f_{i,Q,lim}$: 11.86 mm	$f_{T,max}$: 8.41 mm $f_{T,lim}$: 16.60 mm	$f_{A,max}$: 9.73 mm $f_{A,lim}$: 8.30 mm	NÃO PASSA

Figura 10 – Verificação de flecha V2 aérea $h=25$ x $f_{ck}=35$ MPa (Autores, 2021).

Com o aumento no f_{ck} para 35 MPa, foi observada uma redução na flecha ativa, passando de 11.36 mm para 9.73 mm, mas ficando acima do limite. Mantendo a altura de 25 cm na viga e aumentando o f_{ck} para 40 MPa, as vigas baldrames não tiveram alterações significativas em seu dimensionamento. A viga v2 continuou com problema na deformação limite.

Com o aumento do f_{ck} para 40 Mpa, a flecha diminuiu, ficando próximo do permitido por norma. Alterando o valor de resistência à compressão para 45 Mpa, foi necessária uma alteração nas vigas baldrame devido as armaduras mínimas. A viga área v2 passou no limite de flecha, sendo assim foram adotados os resultados.

Para o cálculo das vigas com altura de 30 cm e f_{ck} de 25, 30, 35, 40, 45 e 50 MPa. todas as verificações de dimensionamento atenderam as normas, em específico a NBR 6118 (ABNT, 2014). A partir de 30 MPa, foi necessário aumentar a taxa de armadura, pois estava acusando problema com relação a taxa mínima. Para os demais valores não ocorrem mudanças significativas.

Variando a altura para 35 cm, todos os resultados foram analisados e anotados. Observou-se que a partir do f_{ck} de 30 MPa foi necessário aumentar a taxa de armadura para que as verificações da norma fossem atendidas. A partir dessa resistência as demais não apresentaram mudanças significativas.

Para a altura de 40 cm, todos os resultados passaram em todos os critérios de dimensionamento de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014). Também foi observado que a partir de 45 MPa foi necessário aumentar a taxa de armadura para atender a taxa mínima exigida por norma. Também com o aumento da resistência à compressão não foi observada alterações na taxa de armadura.

Aumentando a altura para 45 cm, os resultados mantiveram o padrão dos anteriores, com isso foram analisados e anotados todos os resultados. Com a variação do f_{ck} , não houveram mudanças significativas na taxa de armadura.

Para as vigas com 50 cm, todos os resultados passaram nas verificações, sendo assim, foram anotados os resultados. Também com o aumento do f_{ck} não houveram alterações na área de aço necessária.

Em concomitância as variações geométricas, a composição dos custos de uma viga, foi necessário saber os insumos que fazem parte desta composição. Para as vigas foram o aço, a forma e o concreto. Sendo assim foi necessário observar qual insumo estava com uma maior porcentagem no custo total para assim escolher a melhor opção em relação ao custo da viga.

É possível observar na Figura 34, para um concreto de 25 MPa o maior custo de insumo foi a forma, ficando em 53% do custo total, em quanto o aço ficou com 28% e o concreto com 19% do total.

Com o f_{ck} de 50 MPa, o custo da forma manteve-se como o maior, com 49% do total, e concreto e o aço ficaram equiparados com 26% para aço e 25% para o concreto.

Em relação aos percentuais dos insumos, foi observado que o material com um valor maior na composição dos insumos foi a forma, e que com um f_{ck} mais baixo, o aço é o segundo insumo mais caro. À medida em que aumentou o f_{ck} , o aço e o concreto ficaram com custos equiparados (Tabela 1).

Tabela 1 – Comparativo de custos das vigas baldrames (Autores, 2021).

VIGA	FCK	ALTURA	VALOR (R\$)
V1 a V14 Baldrame	30	25	R\$ 5.460,34
V1 a V14 Baldrame	35	25	R\$ 5.473,16
V1 a V14 Baldrame	25	25	R\$ 5.497,67

Tabela 1 – Comparativo de custos das vigas baldrames (Autores, 2021) (Continuação)

VIGA	FCK	ALTURA	VALOR (R\$)
V1 a V14 Baldrame	40	25	R\$ 5.505,68
V1 a V14 Baldrame	45	25	R\$ 5.723,83
V1 a V14 Baldrame	50	25	R\$ 5.910,41
V1 a V14 Baldrame	25	30	R\$ 6.008,85
V1 a V14 Baldrame	30	30	R\$ 6.041,24
V1 a V14 Baldrame	35	30	R\$ 6.216,36
V1 a V14 Baldrame	40	30	R\$ 6.260,62
V1 a V14 Baldrame	45	30	R\$ 6.393,37
V1 a V14 Baldrame	50	30	R\$ 6.616,86
V1 a V14 Baldrame	25	35	R\$ 6.781,45
V1 a V14 Baldrame	30	35	R\$ 6.962,06
V1 a V14 Baldrame	35	35	R\$ 7.045,34
V1 a V14 Baldrame	40	35	R\$ 7.093,06
V1 a V14 Baldrame	45	35	R\$ 7.302,82
V1 a V14 Baldrame	50	35	R\$ 7.576,55
V1 a V14 Baldrame	25	40	R\$ 7.750,90
V1 a V14 Baldrame	30	40	R\$ 7.813,56
V1 a V14 Baldrame	35	40	R\$ 7.864,83
V1 a V14 Baldrame	40	40	R\$ 7.920,92
V1 a V14 Baldrame	45	40	R\$ 8.112,04
V1 a V14 Baldrame	50	40	R\$ 8.433,82
V1 a V14 Baldrame	25	45	R\$ 8.536,70
V1 a V14 Baldrame	30	45	R\$ 8.588,71
V1 a V14 Baldrame	35	45	R\$ 8.645,90
V1 a V14 Baldrame	40	45	R\$ 8.708,46
V1 a V14 Baldrame	45	45	R\$ 8.921,64
V1 a V14 Baldrame	25	50	R\$ 9.257,18
V1 a V14 Baldrame	50	45	R\$ 9.280,54
V1 a V14 Baldrame	30	50	R\$ 9.314,57
V1 a V14 Baldrame	35	50	R\$ 9.377,67
V1 a V14 Baldrame	40	50	R\$ 9.446,71
V1 a V14 Baldrame	45	50	R\$ 9.681,93
V1 a V14 Baldrame	50	50	R\$ 10.077,96

Para as vigas baldrames, diante das variações feitas na estrutura estudada, a melhor altura observada foi de 25 cm, pois nos quatro melhores resultados obtidos, todos os critérios foram atendidos.

Em dados gerais, a melhor escolha em função do custo para as vigas baldrames foi a de 25 cm de altura com o concreto de 30 MPa, ficando com um custo total de R\$ R\$ 5.460,34. Para os concretos de 25, 35, e 40, 45 e 50 MPa os resultados ficaram bem próximos. Com esse dado é possível observar que com o aumento do fck, a diminuição das taxas de armadura compensou a elevação do custo do concreto.

Para as vigas aéreas da primeira laje, com a altura de 25 cm só passaram com o aumento do *fck* para 45 e 50 MPa, os outros resultados apresentaram problemas nas verificações. Para tanto, as análises quanto aos custos destas vigas são apresentadas (Tabela 2).

Tabela 2 – Comparativo de custos das vigas aéreas com altura = 25 cm (Autores, 2021)

VIGA	FCK (MPa)	ALTURA (cm)	VALOR (R\$)
V1 a V14 aérea	45	25	R\$ 5.918,58
V1 a V14 aérea	50	25	R\$ 6.097,58

Como o insumo mais caro foi a forma, o menor custo para as vigas aéreas foi a altura de 25 cm com *fck* de 45 MPa e em seguida o menor foi com o concreto de 50 MPa. Já para as alturas de 30 cm, o melhor concreto foi de 30 MPa.

Em dados gerais, o melhor resultado para as vigas aéreas foi o de 25 cm de altura com o *fck* de 45 MPa, com um custo total para as vigas de R\$ 5.918,58.

Conclusão

Com a busca constante da redução de custo na construção civil, para assim obter mais lucro, criar meios para tal se faz necessário. Através de técnicas de otimização é possível encontrar soluções ótimas para que se consiga a redução desses custos e também otimizar os processos envolvidos dentro da construção civil.

Na concepção estrutural existem diversas alternativas para que o projetista escolha de acordo com o projeto. Para a estrutura estudada, no caso das vigas, dentro da limitação de altura de até 50 cm e *fck* comercial mais encontrados, existiram 36 casos possíveis para a escolha das vigas baldrame e 32 casos para as vigas aéreas, com uma variação de custo entre a melhor escolha e a pior de 184% para as vigas baldrame e 172% para as vigas aéreas. Isso demonstra que o papel do engenheiro é de fundamental importância para que a estrutural tenha o menor custo possível e se enquadre em todas as normas disponíveis.

Também foi possível observar que para uma estrutura térrea, o *fck* de 30 MPa foi o que obteve os melhores resultados, tanto para as vigas baldrame, quanto para as vigas aéreas da laje. Quanto à altura, a de 25 cm foi o melhor para as vigas, devido ao custo das formas serem de grande influência.

Para tanto, com a edificação estudada foi para uma estrutura térrea com uma laje, as vigas foram divididas em dois tipos, os baldrame e as aéreas, com isso foram analisadas com custos diferentes

Referências

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

BRONDANI, G. Um estudo sobre otimização do custo na projeção de vigas com utilização de vários tipos de concreto em empresas de construção civil. XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de produção. Rio de Janeiro, 2008.

LIMA, M. L. R. Otimização topológica e paramétrica de vigas de concreto armado utilizando algoritmos genéticos. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MATTOS, A. D. Como preparar orçamentos de obras. 1.ed., São Paulo: Pini, 2006.

PARAMO, C. A. M. Abordagem metaheurística para otimização estrutural. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

SACOMAN, M. A. R. Otimização de projetos. (Departamento de Computação). Universidade Estadual Paulista (UNESP). São Paulo, 1998.

SILVA, M. C. B. Estrutura e arquitetura: Fundamentos. 2. ed., Goiânia: PUC Goiás, 2014.

SINAPI. Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil. Caixa Econômica Federal. 2021.

VENTURATTO JUNIOR, R. Análise de escoamento e otimização paramétrica de um pré-distribuidor de turbina hidráulica. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica). Universidade de São Paulo, 2016.