

# Modelo paramétrico de pórticos em concreto armado com dimensionamento otimizado: uma proposta de ferramenta de projeto para as fases iniciais de concepção estrutural

*Parametric model of reinforced concrete frames with optimized sizing: a proposal of a design tool for the early stages of the structural design*

---

Felipe Tavares da Silva

## Resumo

**C**omumente, a concepção de sistema estrutural e seu projeto preliminar deveriam estar nos estágios iniciais do desenvolvimento do projeto da forma arquitetônica. Tradicionalmente, estudos sugerem regras de pré-dimensionamento dadas por relações entre a dimensão transversal e o comprimento de vãos. Para ajudar nesse processo, este artigo propõe um protótipo de ferramenta de projeto paramétrico estrutural para uma estrutura tridimensional de pórticos rígidos em concreto armado com vigas, colunas e lajes maciças. Os dados de entrada manipuláveis pelo usuário dessa ferramenta são as dimensões globais da estrutura, a resistência característica do concreto, a taxa de armadura dos pilares, o limite admissível do deslocamento do sistema de piso, o valor de cargas sobre lajes e vigas e as dimensões das seções transversais das peças. A obtenção das soluções desse sistema foi realizada utilizando um algoritmo genético acoplado ao algoritmo proposto. Como produto, obtém-se um modelo geométrico da estrutura com as espessuras visualizadas em tempo real na janela do sistema CAD, atualizado de acordo com as mudanças nos dados de entrada. Foram realizadas comparações do desempenho dessa ferramenta em relação a outras propostas anteriores e análises críticas sobre sua possibilidade de uso corrente para o auxílio do trabalho transdisciplinar em projeto de edificações.

**Palavras-chave:** Projeto paramétrico de estruturas. Projeto integrado. Transdisciplinaridade.

## Abstract

*Commonly, the conception of the structural system and its preliminary design should take place in the early design stages of a building's architectural form. Traditionally, studies suggest pre-sizing rules given by the relation between the cross-section dimensions and span lengths. In order to assist in this process, this paper proposes the prototype of a structural parametric design tool for a three-dimensional reinforced concrete rigid frame structure, composed by beams, columns and flat slabs. The input data that can be manipulated by the user of this tool are the overall dimensions of the structure, the characteristic strength of the concrete, the columns' reinforcement ratio, the floor system displacement limit, the load values on slabs and beams and the cross-section dimensions of the members. The solutions of this system were obtained using a Genetic Algorithm coupled to the proposed one. The product obtained is a geometric model if the structure with its sizes viewed on the CAD viewport in real time, updated as the changes in the input data occur. The performance of this tool was compared with previous proposals and we conducted a critical analysis of the possibility of its use to assist trans-disciplinary work in building design.*

**Keywords:** Structural parametric design. Integrative design. Transdisciplinarity.

Felipe Tavares da Silva  
Universidade Federal da Bahia  
Salvador - BA - Brasil

Recebido em 20/05/17  
Aceito em 12/09/17

## Introdução

Apesar de várias ferramentas digitais para o auxílio ao projeto de edifícios estarem disponíveis, ainda é muito comum a utilização de métodos manuais ou pouco informatizados de ineficiência conhecida tanto na academia quanto na prática profissional. Especificamente na concepção estrutural para a arquitetura, isso é bastante evidente, uma vez que ainda são utilizados os métodos manuais ineficazes (CORKILL, 1969), imprecisos e que demonstram claro distanciamento de um trabalho colaborativo ou do conceito de transdisciplinaridade.

Kolarevic (2009) advoga que arquitetos, engenheiros, incorporadores e construtores deveriam participar colaborativamente desde as primeiras fases do projeto para que fluidamente ultrapassem os limites convencionais de suas profissões e assim seja possível realizar um projeto integrado e com inovações. O mesmo autor também ressalta que a mensagem do BIM é que a integração da informação na indústria requer um processo inteligente e integrativo sobre as várias disciplinas e profissões que estão sob o guarda-chuva da indústria da construção.

Outro conceito interessante que pode vir a auxiliar o trabalho transdisciplinar da concepção de estruturas arquitetônicas seria o *optioneering*. Segundo Holzer (2010), *optioneering* assiste projetistas a resolverem problemas de projeto por meio de análises integradas de várias disciplinas nas fases iniciais do projeto. Em trabalho desenvolvido conjuntamente com a ARUP, Holzer propôs uma ferramenta de projeto chamada *DesignLink*. O objetivo dessa ferramenta seria o de reunir os dados de desempenho da edificação ainda em fase de projeto, dentre suas diversas disciplinas, apresentando-os graficamente para que a equipe possa ter visualização ampla dos diversos sistemas simultaneamente. Essa sistemática utilizada nas fases iniciais de concepção do edifício possibilitaria ter uma trajetória do processo de projeto com maior probabilidade de sucesso. O *optioneering* viria a preencher um espaço que, segundo Holzer, o sistema BIM atualmente não preenche: ajudar uma equipe de projetistas a chegar a uma solução geral satisfatória do projeto em sua fase inicial.

Acredita-se que esses conceitos defendidos por esses dois autores podem indicar novos caminhos para métodos e processos de projeto de maneira efetivamente integrada, sobretudo relacionado à concepção estrutural para a arquitetura.

Recentemente, foram feitas algumas propostas de equações analíticas para o pré-dimensionamento

estrutural de pórticos em concreto armado (BRITO; SILVA, 2015), que podem ser implementados em planilhas eletrônicas ou em um algoritmo generativo (SILVA, 2017a). Contudo, apesar da leveza computacional que as expressões analíticas proporcionam, provendo uma interatividade em tempo real, elas são de difícil obtenção e tratam de casos particulares apenas, sendo assim bastante rígidas em se adaptar a variações desejáveis da forma.

Uma possibilidade promissora é a utilização de algoritmos generativos com capacidade de fazer variar a geometria e serem acoplados a uma estrutura modelada pelo método dos elementos finitos (MEF), realizando os cálculos e as verificações estruturais de acordo com a geometria gerada. Essa possibilidade está disponível ao se utilizar a combinação das ferramentas digitais Rhinoceros-Grasshopper-Karamba (TEDESCHI, 2014).

O ciclo fechado de determinação das dimensões da seção transversal do membro estrutural tradicionalmente é feito por um processo de busca durante o projeto desempenhado pelo engenheiro de estruturas, iniciado a partir de valores iniciais definidos pelo pré-dimensionamento desempenhado pelo arquiteto. Sabe-se que há grande trabalho manual nesse processo, envolvido por métodos manuais com difícil visualização ou domínio do espaço de soluções. Muitas vezes nem a experiência resolve o problema adequadamente quando se define a forma arquitetônica desacoplada do funcionamento e das características intrínsecas do sistema estrutural adotado.

Silva (2017b) propôs um protótipo de ferramenta de projeto com dimensionamento automático das seções transversais de um pórtico em concreto armado. Essa proposta conecta um algoritmo generativo da geometria de um modelo estrutural ao motor de cálculo do Karamba, fechando-se o ciclo da busca pela seção transversal da peça estrutural adequada ao vão por meio do *add-on* Octopus Loop. Para um determinado vão definido pelo algoritmo generativo, o algoritmo de dimensionamento automático da estrutura fornece uma seção transversal para peça de acordo com os requisitos da norma de projeto estrutural.

Propõe-se neste artigo um algoritmo de verificação automática da aceitabilidade estrutural de pórticos rígidos em concreto armado segundo a norma NBR 6118 (ABNT, 2014), ambientado em sistema CAD (*computer aided design*) paramétrico, que é equipado com um buscador de soluções ótimas que

utiliza o motor do algoritmo genético e imerso nos conceitos do *optioneering*. Essa proposta fará um contraponto com a sua versão anterior (SILVA, 2017b), considerando-se as mesmas formulações de verificação da norma brasileira de projeto de estruturas de concreto, comparando-se os desempenhos de seus funcionamentos e respostas geradas, listando vantagens e desvantagens.

Algumas pesquisas já foram realizadas com proposições de modelos paramétricos da geometria da arquitetura e da estrutura acoplados (HOLZER; HOUGH; BURRY, 2007; ROLVINK; STRAAT; COENDERS, 2010), inclusive turbinados com motores de solução baseados em algoritmos genéticos (BUELOW, 2002; MUELLER; OCHSENDORF, 2015). Observa-se também que nesses estudos há participações nessas pesquisas de escritórios de projeto estrutural, como o ARUP, conhecido internacionalmente. No entanto, em nenhuma dessas publicações se encontram em detalhes as formulações e implementações das verificações estruturais automáticas baseadas em normas de projeto de estruturas, com o objetivo de serem utilizadas nas fases iniciais de projeto. Esse seria o grande diferencial desta publicação em relação às anteriores, sobretudo no que diz respeito às características de soluções ótimas com utilização do motor de soluções do algoritmo genético (AG) (GOLDBERG, 1989).

O funcionamento da verificação automática, em contraponto ao dimensionamento automático, consiste em colorir os membros estruturais no modelo geométrico da estrutura no ambiente CAD, informando ao usuário se as seções estruturais são aceitáveis quanto aos estados limites. Caso algum membro estrutural do modelo digital não satisfaça algum requisito dos estados limites, a função objetivo é penalizada com um valor substancialmente alto de modo a ser descartada no processo de otimização. Nesse caso, a função objetivo a ser otimizada é a taxa de consumo de concreto do modelo da estrutura, dada em  $m^3/m^2$ .

Na versão desse protótipo de ferramenta de projeto que aqui é proposta não serão consideradas as armaduras das barras devido à alta complexidade e ao alto custo computacional que seria demandado. Contudo, visualizando o processo de projeto estrutural como um todo, foi considerado que o

resultado obtido pelo algoritmo proposto pode ser utilizado como dado de entrada para o sistema TQS (KIMURA, 2010), ferramenta que dimensiona e detalha as armaduras de estruturas em concreto armado.

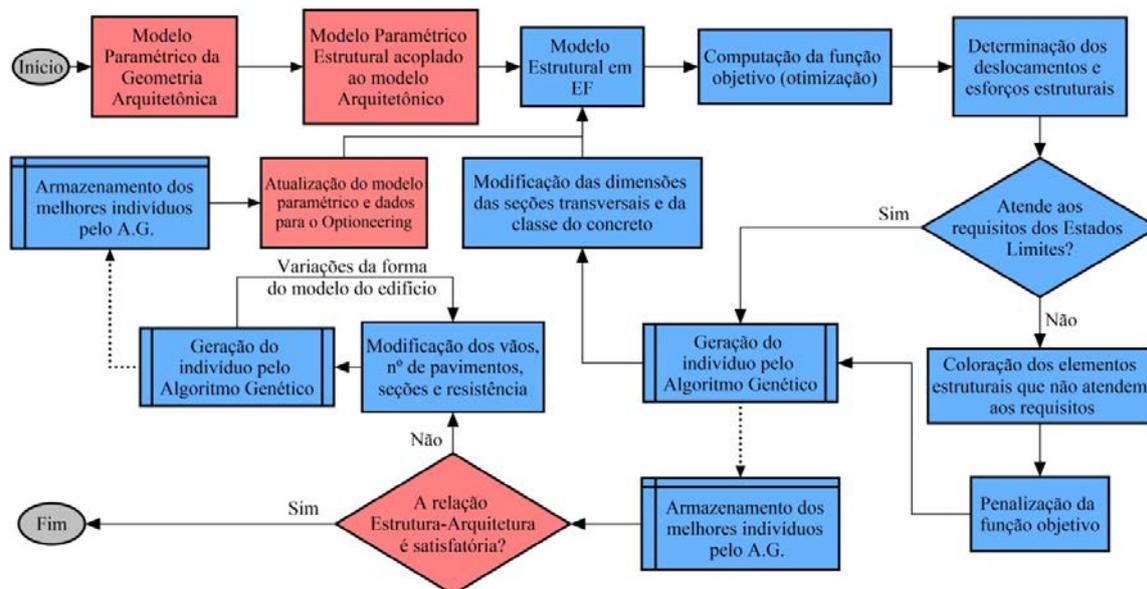
Adicionalmente, utilizando o motor do AG Galapagos, pode-se controlar os parâmetros definidores dos vãos estruturais e das dimensões da seção transversal de seus membros para gravar uma tabela de dados apenas com as soluções estruturalmente válidas. Isso possibilitaria a geração de gráficos que correlacionam os parâmetros que definem as geometrias do sistema estrutural. Esses gráficos poderiam ser utilizados como instrumentos de análise em um sistema *optioneering*. Na prática, o que se faz com isso seria inverter o uso dos ábacos de pré-dimensionamento para que esses sejam gerados parametricamente para exibir as capacidades do sistema para um dado domínio de parâmetros estruturais definidos pelo usuário. Esses parâmetros podem ser tanto dimensionais como vãos, número de pavimentos e espessuras, como também a resistência do material, taxa de consumo de concreto e eficiência do sistema.

Entende-se por eficiência estrutural a razão entre a sobrecarga atuante na estrutura pela carga total (sobrecarga mais peso próprio) em que está submetida, sendo mais eficiente então quanto menos material se utilize para que atinja a aceitabilidade estrutural (SANDAKER, 2007). À medida que o peso próprio tende para zero, a eficiência tende para 1,00. Para efeito de referência de valores e ordem de grandeza, estudos anteriores (BRITO; SILVA, 2015) relatam que as taxas de consumo de concreto em estruturas de pórtico estariam idealmente entre  $0,10 m^3/m^2$  e  $0,30 m^3/m^2$ .

## Protótipo de ferramenta de concepção estrutural

O protótipo de ferramenta de projeto proposto é ilustrado esquematicamente na Figura 1 por um fluxograma algorítmico, observando que os processos em azul são automatizados e em vermelho passariam em princípio por um processo manual de desenvolvimento ou decisão.

Figura 1 - Fluxograma proposto para a verificação automática estrutural com otimização



Nesse fluxograma algorítmico há uma construção de um modelo paramétrico com um acoplamento entre as geometrias arquitetônicas e estruturais, considerando os vãos, número de pavimentos, replicações de uma unidade modular do pórtico, seções transversais e resistência do concreto. Esse modelo paramétrico conterá todas as relações dos parâmetros devidamente acopladas e convergindo para um bloco de modelagem da estrutura pelo MEF e posteriormente para uma verificação automática das seções transversais perante a norma. Em caso de não atendimento dos requisitos de aceitabilidade estrutural, o elemento estrutural no modelo da estrutura tem sua coloração modificada pelo algoritmo, informando evento visualmente ao usuário. Conseqüentemente, se algum elemento não atende à norma estrutural, a função objetivo com a taxa de consumo de concreto é penalizada, assumindo um valor suficientemente alto ( $10^{20}$ ) para assim ser descartada pelo processo de otimização por AG.

O sentido de se colorir as peças em casos de não conformidade estrutural é que esse algoritmo também poderia ser utilizado manualmente, isto é, sem o uso de AG para obtenção de soluções. Assim, o usuário irá receber em tempo real a resposta de quais peças não se enquadram nos requisitos da norma de projeto de estruturas.

Há também a possibilidade de se considerar um motor de solução em AG, mas que controla além das seções transversais e a resistência do concreto a manipulação da forma global da estrutura: vãos, número de pavimentos e número de replicações do módulo estrutural. Essa capacidade poderia fornecer tanto uma característica de busca pela

forma nas fases iniciais do projeto do edifício quanto a geração de gráficos de desempenho do sistema estrutural, exibindo assim o seu espaço de soluções. Esses gráficos e índices poderiam ser informações a serem utilizadas em um sistema de *optioneering* a fim de ajudar no processo inicial de projeto do edifício.

## Implementação do algoritmo proposto

Na etapa experimental desse protótipo, foi implementada no ambiente CAD do Rhinoceros, utilizando o *plug-in* Grasshopper e o *add-on* Karamba, essa proposta de ferramenta de projeto. Esse algoritmo é formado por blocos que são responsáveis por tarefas específicas, listadas abaixo:

- modelo paramétrico geométrico estrutural: barras representadas por linhas e lajes por *mesh*;
- modelo da carga de vento segundo a NBR6123 (ABNT, 1988);
- MEF/Karamba: elementos de barras e casca, cargas, seções transversal e constantes do material;
- verificação da estrutura aos estados limites baseada na NBR6118 (ABNT, 2014); e
- acoplamento do motor de soluções Galapagos, baseado em algoritmo genético.

Refere-se aqui como etapa experimental dessa ferramenta de projeto proposta, uma vez que o ambiente do Grasshopper não proporciona um desempenho computacional ótimo, e essa ideia

pode ser implantada em uma programação em script mais eficiente futuramente.

## Modelagem paramétrica da geometria do pórtico em concreto armado

A Figura 2 ilustra o modelo geométrico no ambiente do CAD 3D, obtido após a geração e verificação estrutural segundo a norma brasileira para projeto de estruturas em concreto.

Esse modelo é exibido para o usuário no ambiente tridimensional do CAD Rhinoceros, que tem os eixos X e Y do sistema global de coordenadas no plano da planta e o eixo Z no plano vertical. Quando as dimensões atendem os requisitos de aceitabilidade estrutural as vigas e os pilares são exibidos na cor preta e as lajes na cor branca. O quadriculado observado no nível zero vertical ilustra a escala métrica do modelo.

Por opção, a geometria com os eixos do modelo estrutural paramétrico em elementos finitos (EF) foi concebida a partir de um gerador de grelha em modulação quadrangular, contendo uma unidade básica (MOUSSAVI, 2009) composta por quatro pilares, quatro vigas, de seção retangular, e um painel de laje maciça. A replicação dessa unidade básica na horizontal foi realizada pelo controle do gerador de grelha, enquanto a replicação vertical, isto é, o número de pavimentos, por um *array* linear.

Disponibilizou-se o controle do nível do refinamento da malha (*mesh*) que modela a laje de

modo que o usuário estabelecesse um equilíbrio entre desempenho computacional e precisão do cálculo. No caso das vigas, essas foram subdivididas no vão entre os pilares pelo número de divisões da malha do painel de laje, de modo que o modelo estrutural em EF esteja consistente no encontro viga-laje. Na Figura 3 pode ser observado o bloco do código algorítmico no ambiente do Grasshopper, responsável pela geração da geometria dos eixos do modelo estrutural em EF.

Deve-se observar que o fluxo de dados do Grasshopper é da esquerda para a direita, contendo componentes que se conectam através de fios. Esses componentes do Grasshopper na verdade são funções de código computacional, com um ou mais processamentos em cada uma delas. Na Figura 3 observa-se que os fios que vêm dos dados de entrada alimentam a geração da grelha da planta, que é a base para a geração das geometrias dos pilares, vigas e lajes.

Os dados da geometria foram agrupados posteriormente em uma estrutura de árvore de maneira que cada vão de viga entre pilares está em um ramo da árvore de dados, contendo uma lista com todas os segmentos de sua subdivisão. As vigas foram separadas em vigas X e vigas Y, em alusão às suas orientações de acordo com os eixos do sistema global, pois podem ter dimensões diferenciadas dependendo da geometria global da estrutura do edifício. No caso dos pilares consideraram-se apenas linhas ligadas por dois pontos nos encontros de vigas entre os pavimentos.

Figura 2 - Modelo geométrico tridimensional da estrutura e suas espessuras

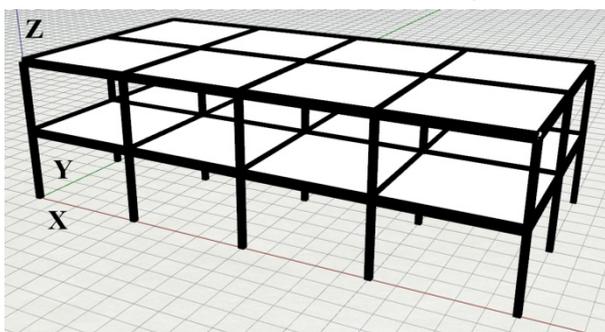
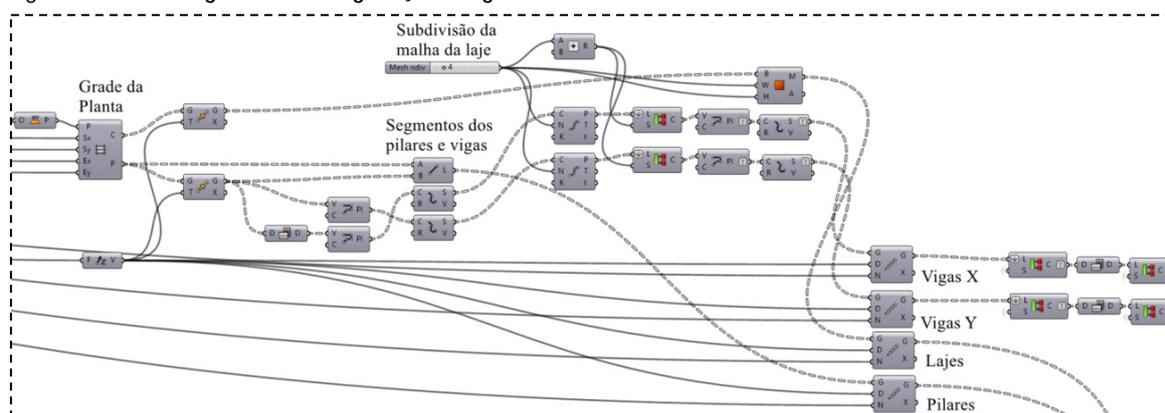


Figura 3 - Bloco algorítmico da geração da geometria dos eixos do modelo em EF



### Modelagem estrutural no Karamba

A modelagem estrutural para o cálculo de esforços e deslocamentos foi realizada utilizando os componentes do Karamba *add-on* do Grasshopper, *plug-in* do Rhinoceros. A modelagem estrutural no Karamba é baseada no MEF, e foram utilizados elementos de barras para vigas e pilares e de cascas para lajes. Após a montagem do modelo estrutural é processada a solução do sistema de equações por um motor de cálculo para a obtenção da resposta estrutural, que oferece em tempo real ao se alterar dimensões ou resistência do material no modelo estrutural. A dinamicidade na mudança da geometria do modelo estrutural em tempo real e com relativa baixa demanda de recursos computacionais é o que diferencia uma ferramenta de simulação estrutural paramétrica das demais ferramentas. Pode-se dizer que obter os dados de um modelo estrutural com essa dinamicidade em ambientes CAD é uma novidade no âmbito dos métodos do projeto de estruturas, e promete revolucionar essa área.

Na Figura 4 estão ilustradas as partes do bloco da modelagem da estrutura pelo MEF usando os componentes do Karamba com a função de conversão das entidades geométricas em elementos do modelo estrutural (Figura 4a); a configuração dos apoios na base dos pilares (Figura 4b), admitida uma restrição de todos os graus de liberdade desses casos; definição das seções transversais dos membros estruturais (Figura 4c); definição dos casos de cargas gravitacionais (Figura 4d) e dos casos de cargas de vento (Figura 4e).

Foram assumidos 8 cm, 15 cm, 30 cm e 20 cm para as dimensões mínimas de lajes, bases e alturas

de viga e dimensão das arestas dos pilares, respectivamente. O algoritmo foi programado de modo que as dimensões da laje variem com um incremento de 1 cm, enquanto vigas e pilares com incrementos de 5 cm. Essa medida é corrente para padronização das dimensões de projeto e assim obter valores inteiros na dimensão de precisão centimétrica, adequada para o concreto armado.

Os casos de carga considerados foram o peso próprio, cargas lineares permanentes sobre vigas que poderiam simular algumas divisórias, cargas variáveis sobre as lajes de acordo com a sua utilização arquitetônica e dois casos de cargas distintos para a ação do vento em cada direção ortogonal em planta.

O ambiente do Grasshopper permite tanto a escrita de script Python quanto em seus componentes próprios, em que se podem definir funções matemáticas analíticas (TEDESCHI, 2014). Para o caso da carga de arrasto do vento sobre o pórtico, foi considerado um ajuste de curva para o coeficiente de arrasto dependente das dimensões da estrutura do edifício, implicando vãos, altura e número de pavimentos (SILVA, 2017b), assim como parâmetros relacionados ao local, como a topografia e a velocidade do vento.

Na Figura 5 está ilustrado o bloco do algoritmo de definição dos valores da carga de vento nas duas direções ortogonais em planta, convertendo a carga uniforme distribuída na fachada em cargas nodais que atuam nos nós das fachadas que conectam as extremidades das vigas com os pilares que as apoiam. Na figura também pode ser observada a implementação da função ajustada do coeficiente de arrasto  $C_a$  da carga do vento (ABNT, 1988).

Figura 4 - Blocos algorítmicos do modelo estrutural com os componentes do Karamba

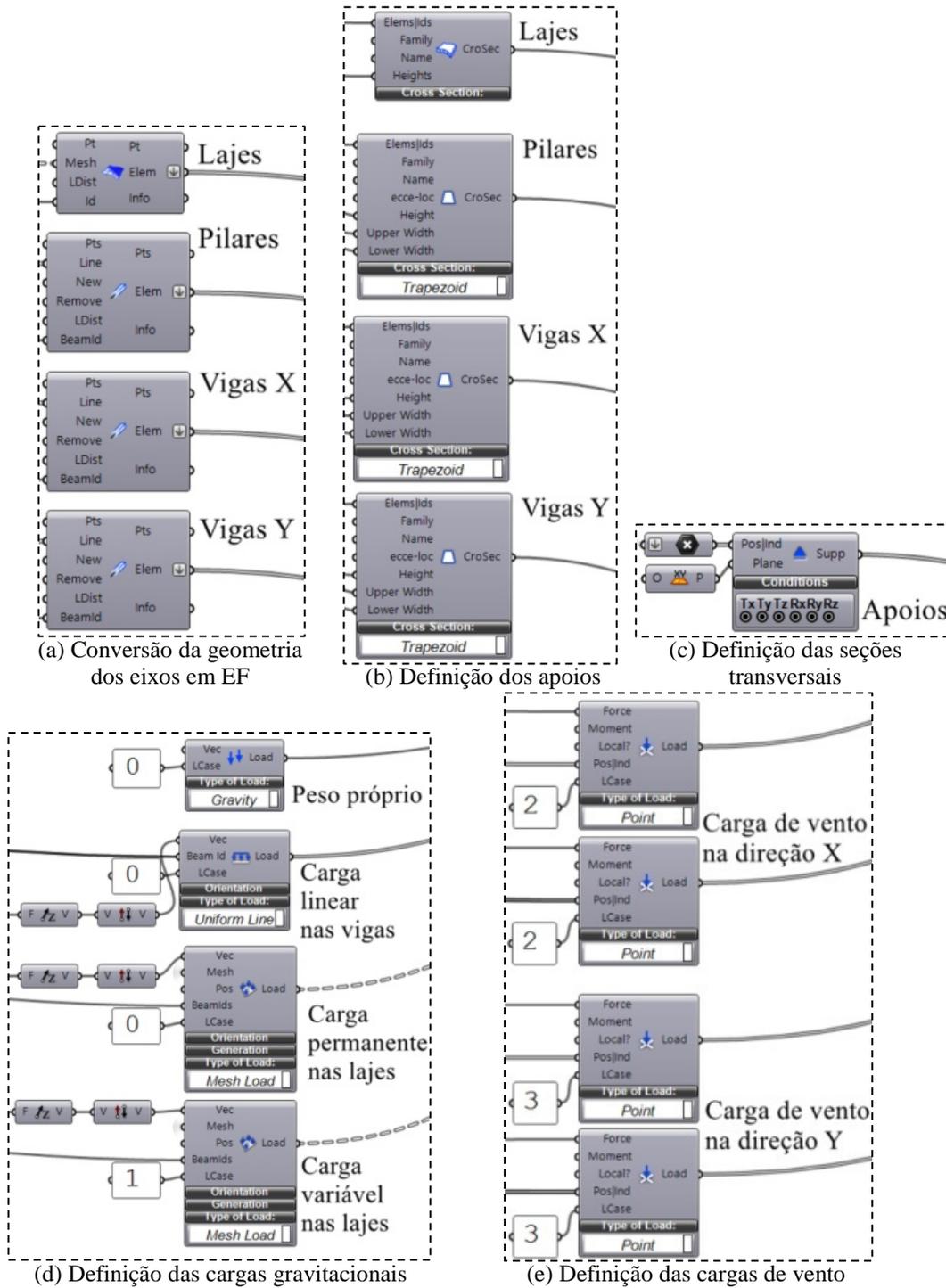
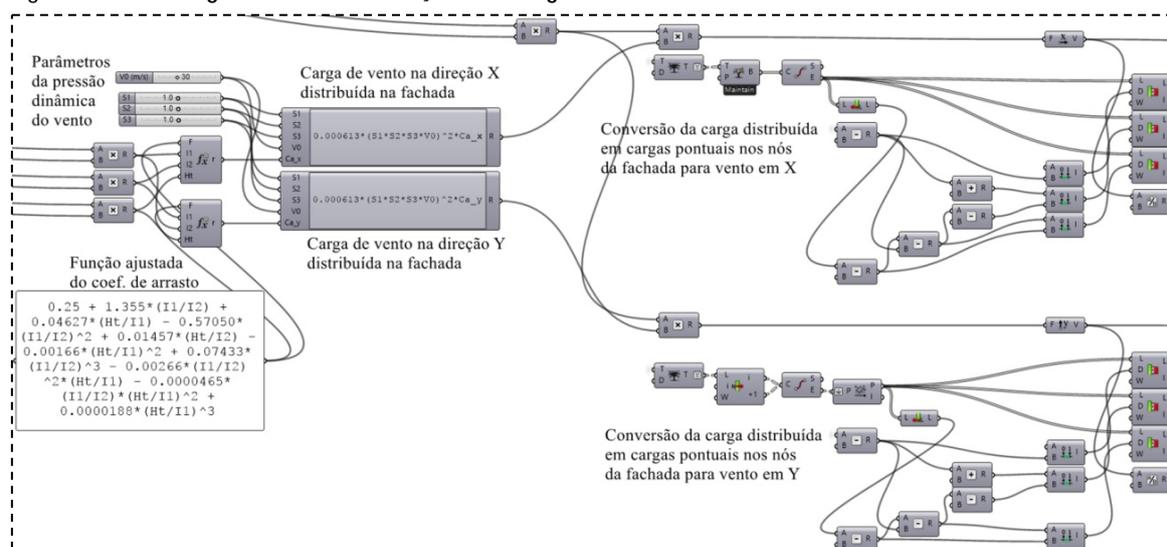


Figura 5 - Bloco algorítmico da definição das cargas de vento sobre o modelo estrutural



Na Figura 6 está ilustrado o bloco algorítmico do módulo elástico do concreto armado em função da sua resistência característica, sob a utilização do componente do Karamba, que sintetiza as constantes do material no modelo estrutural. Foram considerados nessa parametrização concretos de resistência de 20 MPa a 90 MPa (ABNT, 2014), variando em incrementos de 5 MPa. Foi considerada a possibilidade de se utilizar concretos de classes distintas para o sistema de piso e para os pilares, o que é relativamente recorrente em edifícios em concreto armado com muitos pavimentos.

Na Figura 7 está ilustrada a visualização do modelo estrutural em EF gerado pelo Karamba e visualizado na janela do ambiente CAD do Rhinoceros. Também pode ser observado na mesma figura o componente que monta todo o modelo estrutural a partir das definições anteriores. Ainda, também pode ser observado o componente do motor de cálculo da solução de 1ª ordem. Apesar de na geração geométrica as lajes serem modeladas em uma malha (*mesh*) quadrangular, o Karamba a converteu automaticamente em uma malha triangular.

Como afirmado anteriormente, no caso deste artigo, a geração paramétrica da geometria dos eixos dessa estrutura em pórtico foi considerada modular a partir de uma grelha quadrangular horizontal e sua replicação vertical. Por outro lado, o algoritmo aqui proposto funcionaria em princípio para qualquer concepção estrutural que seja formada por pórticos com vigas, pilares e lajes maciças em formatos retangulares. Isso ficará a depender de como será concebido o algoritmo generativo dos eixos da geometria do modelo estrutural. Assim, poder-se-ia utilizar o algoritmo

para, em princípio, geometrias de pórticos não modulares e com vãos não uniformes, contanto que seja concebido com esses tipos de peças estruturais.

### Verificação automática, índices de desempenho, controle do algoritmo e otimização

Todo o processo de verificação automática, incluindo as regras utilizadas da norma de projeto estrutural considerada (ABNT, 2014), foi detalhadamente descrito por Silva (2017b). As verificações da aceitabilidade estrutural são monitoradas pelos índices de projeto, que representam a razão entre a demanda e a capacidade para cada peça estrutural, variando entre 0,0 e 1,0. Os índices de projeto obtidos pelo algoritmo aqui proposto são ilustrados na Figura 8.

Os índices de projeto também poderiam ser um dado para alimentar um sistema de *optioneering*, evidenciando quais são as condições de aceitabilidade estrutural críticas e onde se encontra a saturação do sistema. Para as peças do sistema de piso, lajes e vigas, frequentemente o fator crítico é o deslocamento e a flexão em segundo lugar. Em sistemas de pisos o esforço cortante apareceria como crítico em cargas muito elevadas, como depósitos ou reservatórios. No caso dos pilares, para esse sistema os fatores mais críticos são a estabilidade global, a capacidade resistente à flexocompressão e o deslocamento de topo, em ordens em que o fator mais crítico varia de acordo com a geometria global.

Em caso em que não há um atendimento de algum membro com índice de aceitabilidade acima de 1,00, o usuário irá perceber visualmente através da

janela do CAD com coloração vermelha e uma valoração penalizada para a função objetivo, que aqui se admite ser a taxa de consumo de concreto. Na Figura 9 está ilustrada a visualização da janela do CAD com as vigas em X que não atendem a algum requisito de aceitabilidade estrutural de acordo com o estabelecido pela norma.

Os controles dos parâmetros desse modelo foram organizados em um painel de controle, como ilustrado na Figura 10a. Esses controles podem ser manipulados manualmente pelo usuário ou automaticamente pelo Galapagos, motor de cálculo de otimização baseado em algoritmos genéticos (Figura 10b) disponível no ambiente do Grasshopper (TEDESCHI, 2014). Na Figura 10b

pode ser observado o acoplamento do componente do Galapagos na função objetivo, sendo essa a taxa de consumo de concreto no modelo estrutural. Essa taxa de consumo foi obtida a partir da massa total de concreto extraída do modelo do Karamba e relacionada com a densidade do concreto e dimensões globais da estrutura. Observa-se ainda nessa figura que podem ser considerados pelo Galapagos o controle não apenas das seções transversais e da resistência do concreto, mas também dessas em conjunto com as dimensões dos vãos, número de pavimentos e números de replicações horizontais da unidade básica do pórtico.

Figura 6 - Definição das características reológicas do concreto nos componentes do Karamba

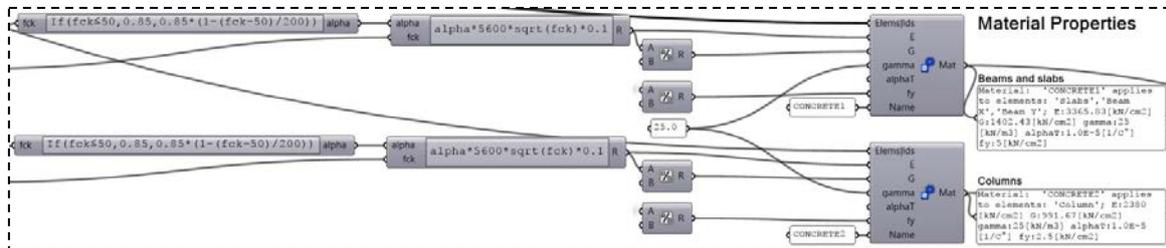


Figura 7 - Montagem, motor de cálculo e visualização do modelo em EF no Karamba

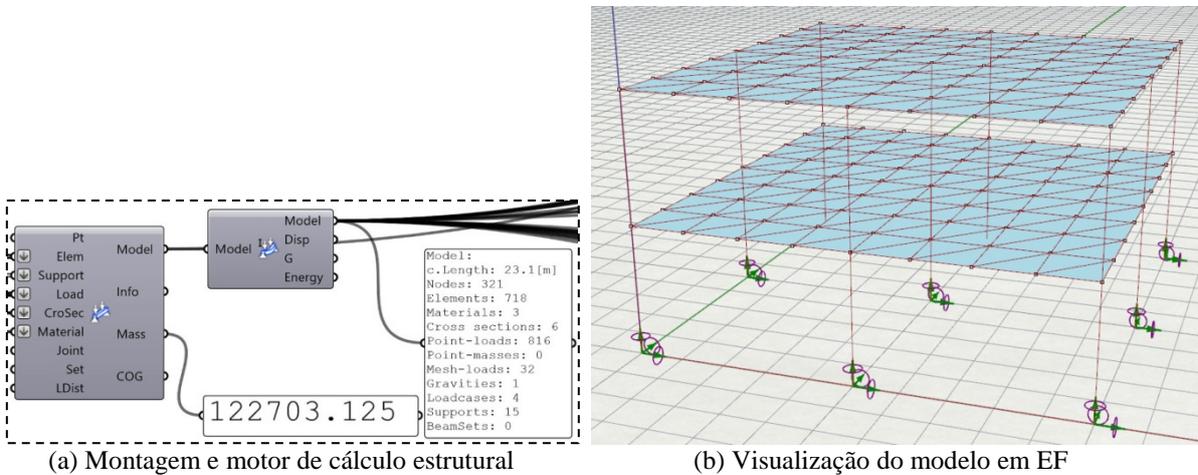


Figura 8 - Índices de projeto para as peças estruturais do modelo

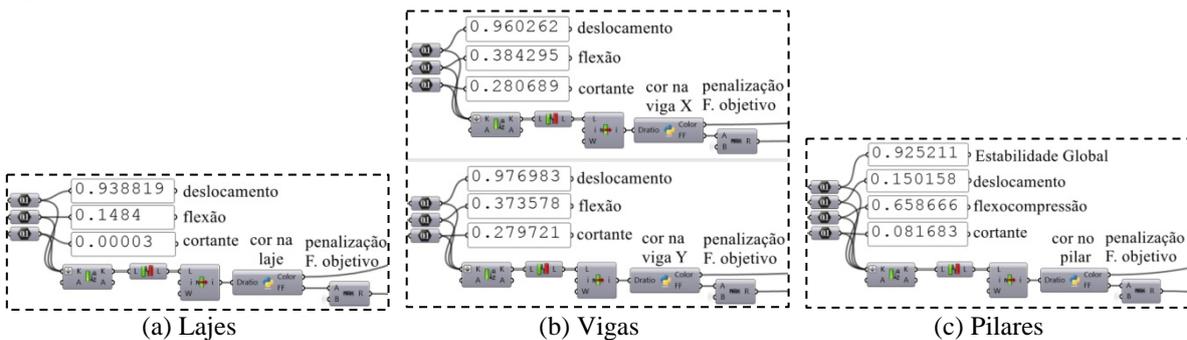


Figura 9 - Vigas da direção X não atendem a algum requisito de aceitabilidade estrutural

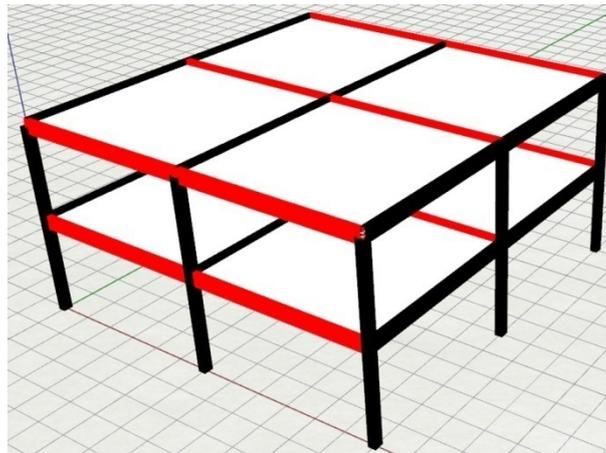
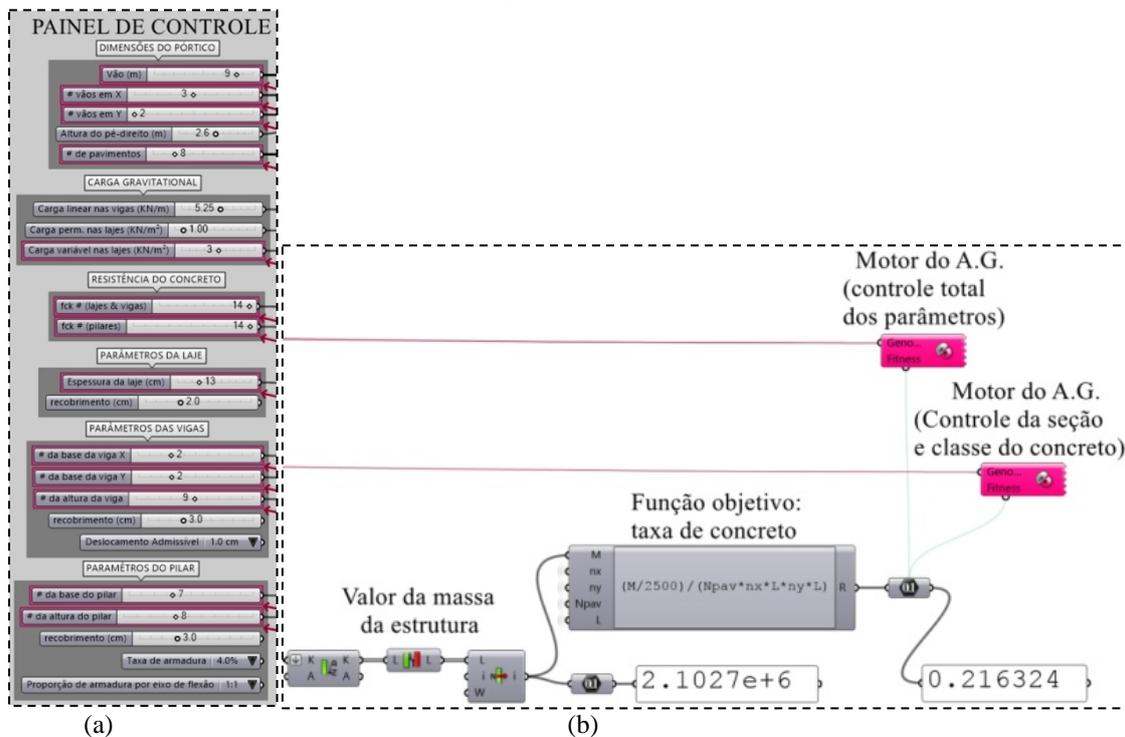


Figura 10 - (a) Painel de controle com os parâmetros do modelo e (b) Função objetivo com motor de cálculo de otimização com base em algoritmo genético



Nesse algoritmo proposto, todas as dimensões das espessuras estruturais do modelo podem ser controladas pelo usuário ou modificadas pelo AG. A taxa de eficiência do modelo foi extraída do output de massa total do modelo do Karamba, convertida em peso e relacionada como somatório das reações de apoio verticais no caso de carga sem consideração do vento.

Na Figura 11 pode-se observar uma visão geral do algoritmo proposto com todos os seus blocos algorítmicos que o compõe conectados entre si. Todos esses sub-blocos algorítmicos foram descritos nas seções e figuras anteriores

individualmente, com exceção da checagem automática em Python script (SILVA, 2017b).

Observa-se que no funcionamento natural do Grasshopper, da esquerda para a direita, os componentes que parametrizam o modelo geométrico dos eixos estruturais se conectam com os componentes do Karamba, assim como a definição das cargas do vento, controlados pelo painel de controle. Após os componentes do Karamba, estão os componentes que extraem os resultados do modelo estrutural (esforços e deslocamentos) e passam pelos scripts Python de verificação estrutural segundo a norma. Ainda, o

bloco algorítmico com modelo digital de saída oferece ao usuário uma resposta visual colorindo o modelo na janela do Rhinoceros e possibilita sua exportação para outro programa. Por último, o bloco algorítmico com o motor do AG capta o valor da taxa de consumo de concreto e conecta-se aos controladores dos parâmetros do modelo no painel de controle.

Vale observar que o bloco de geração dos eixos estruturais está relativamente desacoplado do todo, indicando a possibilidade de se conceber outras geometrias de sistemas estruturais formados por pilares, vigas e lajes maciças.

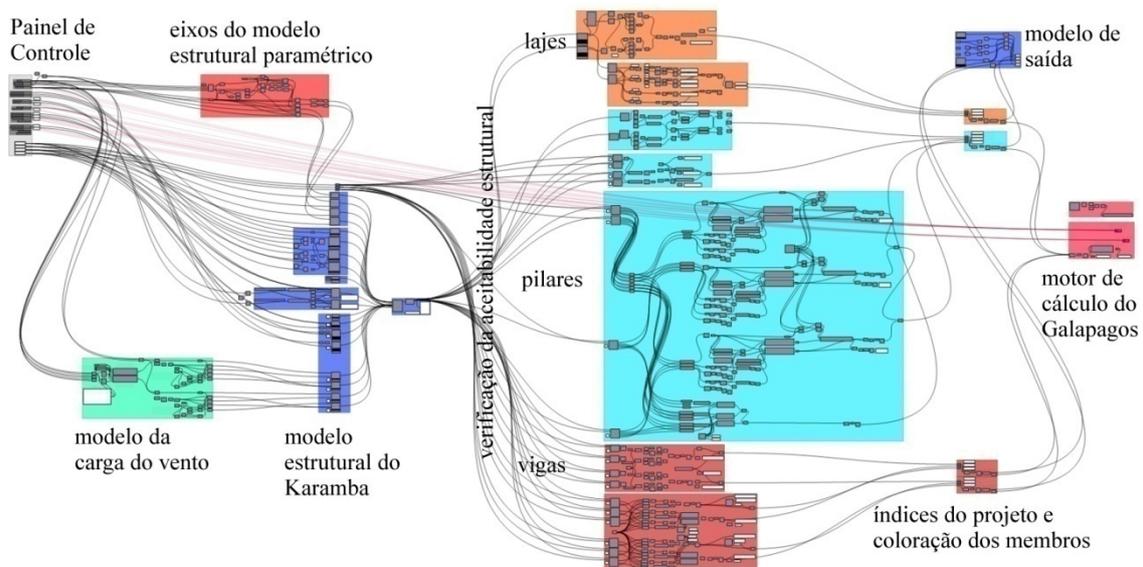
Contudo, a verificação estrutural automática que foi programada aqui neste estudo só verifica uma seção de viga para cada direção, uma seção de pilares e uma seção de laje, considerando apenas o pior caso. Em futuras implementações, poderiam ser admitidas duas ou três dimensões diferentes para a seção transversal do pilar e, no caso em hipótese de geometrias globais não regulares, outras variedades de dimensões de viga. Essas possibilidades não consideradas aqui neste artigo certamente exigiria a verificação de todas as seções transversais individualmente, e não apenas o pior caso. Sem dúvida, verificar todas as seções transversais de todas as peças de um modelo teria um custo computacional alto, o que demandará uma programação mais eficiente de modo que a resposta ainda seja bastante rápida ao usuário.

## Otimização utilizando o algoritmo genético

O AG consiste em um algoritmo de busca de extremos funcionais de um sistema cuja estratégia básica é mimetizar a mecânica da seleção natural das espécies (GOLDBERG, 1989). Buscas por extremos funcionais são características de problemas de otimização de uma função objetivo (*fitness function*), cuja função é descrever alguma característica de um sistema. Os problemas de otimização têm por objetivo achar uma solução válida para os parâmetros do sistema em que o valor da função objetivo é máximo ou mínimo.

Diferentemente dos algoritmos de busca comuns por meio do cálculo diferencial, os AG possuem a capacidade de encontrar extremos funcionais globais. São assim chamados de holísticos. Sua metodologia consiste basicamente em considerar cada instanciamento de parâmetros de um dado sistema como um indivíduo, tendo nos valores dos parâmetros uma analogia de um código genético. O AG então se utiliza de duas operações básicas: cruzamento, que gera uma instanciamento do sistema a partir da combinação de duas outras instâncias; e mutação, que gera um novo indivíduo alterando os parâmetros solitariamente. Notadamente, a reprodução de soluções por essa estratégia deve seguir a melhoria da função objetivo, selecionando os indivíduos com melhores valores do critério adotado.

Figura 11 - Visão geral do algoritmo proposto e seus blocos algorítmicos



Assim, são obtidas algumas gerações de soluções utilizando essas três operações: cruzamento, mutação e seleção. No início do processo de busca geralmente é necessário configurar os critérios que o AG possui e que vão ditar como cada geração será selecionada e de como os indivíduos menos aptos serão descartados a cada geração. Esses últimos critérios de seleção e cruzamento do AG pode variar de acordo com o estilo da implementação utilizada.

Para este estudo foi utilizado o *add-on* Galapagos, um motor de soluções em AG para a interface do Grasshopper/Rhinoceros. Um dos critérios de seleção do Galapagos é a seleção isotrópica (*isotropic selection*), que consiste em igual probabilidade de agrupamento de casais no processo de cruzamento em uma geração, isto é, sem regra de combinação a partir de sua aptidão (RUTTEN, 2013). Outros mecanismos de seleção são a seleção exclusiva, em que apenas um percentual dos indivíduos mais aptos se recombinará em casais, e a seleção tendenciosa, em que os casais se formam a partir de sua aptidão em relação à função objetivo. Após selecionados, o processo de cruzamento entre os indivíduos no Galapagos formam casais a partir de uma distância genética ou endogamia: mais parecidos (incestuosos) ou mais diferentes (zoofílicos) em suas características genéticas. Para cada casal, dependendo de suas características e em conjunto com a aleatoriedade, são gerados novos indivíduos. Por fim, as mutações são os recursos que proveem variabilidade maior de soluções, sendo disponível no Galapagos apenas a mutação de um gene por indivíduo (*point mutation*). Além desses parâmetros, podem ser configurados no Galapagos o tamanho da população em cada geração, o número máximo de gerações sem evolução e o percentual de indivíduos mantidos por geração.

Por outro lado, na otimização estrutural, frequentemente, mas não apenas exclusivo a esse caso, a função objetivo é considerada como o consumo de material que compõe a estrutura e os parâmetros são as dimensões das seções transversais (CHRISTENSEN; KLARBRING, 2009). No experimento realizado neste artigo, além de se considerar as dimensões das seções transversais com parâmetros modificáveis no processo de busca, também puderam ser consideradas as dimensões do sistema estrutural, como comprimento e número de vãos, número de pavimentos, resistência do concreto e cargas. Dessa maneira, a partir da geração de soluções pelo AG, pode-se guardar uma coleção de soluções estruturais aceitáveis e assim obter um espaço de soluções que pode ser visualizado graficamente em pares de parâmetros. Esse resultado pode ser

particularmente útil sob o conceito do *optioneering*.

## Resultados

Foram realizados alguns testes exploratórios na ferramenta proposta, comparando o seu desempenho com o algoritmo automático proposto por Silva (2017b).

Inicialmente, foram gerados gráficos a partir da relação entre os parâmetros que definem o modelo paramétrico estrutural, realizando uma varredura nos domínios dos parâmetros e obtendo assim gráficos que mostram as capacidades e limitações do sistema estrutural em estudo. A partir desse ponto, foram verificados no software TQS alguns modelos estruturais tanto para validar a implementação deste protótipo de ferramenta como para verificar as taxas de aço relacionadas a cada solução obtida. Os modelos estruturais escolhidos tiveram variadas características em seus parâmetros globais, como o número de pavimento máximo atingido pelo sistema, o vão máximo entre pilares e a classe do concreto.

O sistema TQS é uma ferramenta CAD/BIM estrutural, que consiste em uma ferramenta de cálculo, verificação e geração de desenhos de detalhamento das armaduras de estruturas de concreto armado, de acordo com a norma brasileira NBR6118 (ABNT, 2014).

Posteriormente, foram comparados os desempenhos dessa ferramenta proposta com a proposta desenvolvida por Silva (2017b), verificando as dimensões e taxas de consumo de material, o tempo de execução dos algoritmos, obtidos por meio do software TQS.

### **Optioneering: característica do modelo paramétrico considerado**

Em um processo de projeto, para viabilizar um processo de busca pela forma com maior probabilidade de sucesso, é de grande valia ter disponível a visualização gráfica da combinação de todos os parâmetros de um modelo estrutural paramétrico. Ter esse recurso em mãos é útil ao informar quais os vãos máximos, número máximo de pavimentos e relação com esses parâmetros com as espessuras estruturais. Informações sobre o desempenho do sistema estrutural também é de fundamental importância para a busca de uma concepção estrutural com melhor desempenho.

A partir dessa concepção de projeto, foram variados os seguintes parâmetros do modelo estrutural: vão entre pilares, número de replicações horizontais e verticais da unidade básica,

resistência característica do concreto, dimensões das seções transversais dos membros estruturais e a carga variável sobre a laje. Foi mantida constante a espessura de cobrimento das armaduras em 1,5 cm para lajes e 3,0 cm para vigas e pilares; altura do pé-direito em 2,6 m, carga linear nas vigas no valor de 5,25 KN/m; carga constante de 1,0 KN/m<sup>2</sup> sobre a laje representando seu revestimento; deslocamento admissível das vigas em 1,0 cm; taxa de armadura longitudinal dos pilares em 4% e proporção de distribuição dessa taxa nos dois eixos de flexão em 1:1. Na Tabela 1 podem ser observados os parâmetros que foram variados pelo motor de otimização em AG e a definição dos seus domínios pelos limites inferior e superior.

O número de combinações possíveis considerando todos estes domínios definidos na Tabela 1 é de 11,9 trilhões de possibilidades, caso fossem geradas todas as combinações desses parâmetros por método de força bruta. Se o processamento do algoritmo proposto levasse 10 milissegundos para verificação de cada solução, sendo essa uma estimativa muito otimista, gerar todos esses 11,9 trilhões de resultados levaria aproximadamente 3.775 anos, o que é algo impraticável. Para resolver esse problema, foram gerados um número infinitamente menor de combinações utilizando motor de cálculo do AG, visando otimizar a taxa de consumo de concreto e gravando apenas aqueles genomas que apresentassem taxas inferiores a 0,40 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, considerando este como um valor alto e acima disso totalmente inadequado.

Assim, foram executados algumas vezes o motor de cálculo em AG com seus parâmetros distintos visando captar maior variabilidade de dados possível. Os valores dos parâmetros do AG na geração dessa tabela de dados, que representa o *footprint* do sistema estrutural, são mostrados na Tabela 2. Foram consideradas cinco rodadas com valores diferenciados de número máximo de gerações estagnadas, número populacional, impulso inicial da população, percentual de manutenção populacional e endogamia.

Optou-se por se fazer rodadas com diferentes valores de endogamia para tentar atingir maior variabilidade de genomas, os quais no extremo +100% significam cruzamentos totalmente incestuosos e no extremo -100% cruzamentos totalmente zoofílicos.

A tabela com todos os indivíduos gerados teve um total de 31.412 linhas, gerando uma nuvem de pontos para cada par de parâmetros relacionado, obtendo-se um contorno dessas nuvens de pontos por meio do algoritmo *concave-hull* (FÜHRER; SOLEM; VERDIER, 2016). Assim, os dados foram apresentados com regiões poligonais que delimitaram agrupamentos de resultados com três faixas de eficiência estrutural: de 30% a 50%, de 50% a 60% e de 60% a 99%, como podem ser observadas na Figura 12. Na tabela gerada, foram obtidos indivíduos que possuíam eficiência estrutural variando entre 33% e 73%, e taxas de consumo entre 0,12 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> e 0,40 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.

Com esse *footprint* gerado obtém-se a informação de que esse sistema estrutural apresenta melhor eficiência em vãos até 6,0 m e um número abaixo de dez pavimentos. O sistema atinge vãos maiores e um número de pavimentos próximo a 30, contudo com baixa eficiência nessa altura e com dimensões das espessuras estruturais muito elevadas. Pode-se observar também que o crescimento na resistência do concreto não aumentou necessariamente eficiência do sistema, e isso pode não ser necessariamente uma característica, mas uma consequência de como o motor de cálculo em AG procurou essas soluções.

## Validação do modelo e obtenção das taxas de armadura no TQS

Na Tabela 3 estão elencados os quatro indivíduos selecionados para a realização de comparações entre o algoritmo proposto e o proposto por Silva (2017b) e uma lista com os valores máximos de alguns parâmetros importantes para o projeto do sistema estrutural: máximo vão do sistema de piso; máximo número de pavimentos; máximo valor para razão Vão/taxa de concreto e para a razão #Pavs/taxa de concreto. Nessa tabela também está listada na última coluna a taxa de aço desses quatro casos, obtida pelo processamento destes no sistema TQS. Todos os quatro casos não apresentaram nenhum tipo de problema de dimensionamento detectado pelo sistema TQS. Os valores das dimensões desses casos foram retirados da tabela gerada no processo anterior com 31.142 casos.

Tabela 1 - Limites do domínio dos parâmetros em que se submeteu a uma varredura pelo AG

	Vão (m)	# de vãos em X	# de vãos em Y	# de pavs.	Carga var. (KN/m <sup>2</sup> )	Classe concreto piso (MPa)	Classe concreto pilares (MPa)	Espesura da laje (cm)	Base vigas bw (cm)	Altura vigas (cm)	Base pilares (cm)	Altura pilares (cm)
Inf.	4	2	2	2	2	20	20	8	15	30	20	20
Sup.	10	4	4	30	4	90	90	25	50	120	120	120

Tabela 2 - Parâmetros do AG considerados nas cinco rodadas e o número de genomas obtidos

Rodada	Número máximo de gerações estagnadas	Número populacional	Impulso inicial da população	Percentual de manutenção	Endogamia	# genomas obtidos
1	50	50	1	5%	+75%	2.665
2	50	75	1	10%	+50%	2.827
3	100	100	1	15%	0%	12.129
4	100	100	1	25%	-50%	7.036
5	100	100	1	50%	-50%	6.755

Figura 12 - Resultado da varredura dos parâmetros do sistema estrutural em estudo

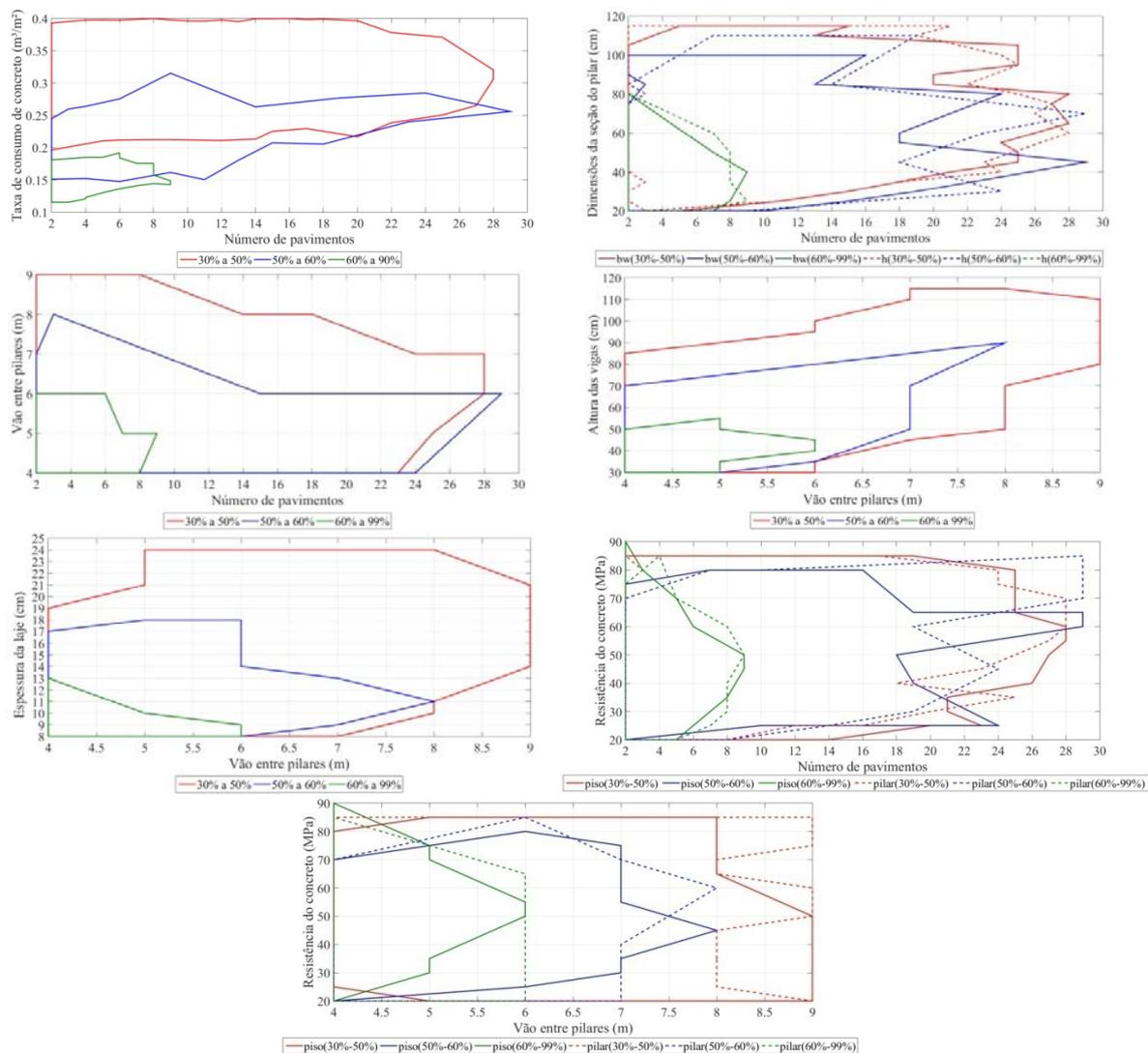


Tabela 3 - Características da amostra de modelos para validação e comparação

Vão (m)	nx	ny	# Pav	Carga var. (KN/m <sup>2</sup> )	fck piso (MPa)	fck pilar (MPa)	d laje (cm)	bw vigasX (cm)	bw vigasY (cm)	h vigas (cm)	bw pilar (cm)	h pilar (cm)	Eficiência (%)	Taxa conc. (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	Taxa aço do TQS (kg/m <sup>2</sup> )
9	3	2	8	3,0	40	50	14	45	40	85	75	70	43	0,30	24,0
6	3	2	29	3,0	60	70	10	25	35	70	45	70	50	0,26	25,2
6	4	4	2	2,0	55	20	9	25	15	40	45	25	60	0,14	13,1
6	3	2	23	3,0	60	70	10	25	30	70	45	60	52	0,24	23,7

Os quatro casos selecionados para validar o algoritmo proposto e comparar com o algoritmo proposto por Silva (2017b) são ilustrados na Figura 13.

Observa-se na Tabela 3 que a medida de esbelteza na classificação de torres de pórtico em edifícios altos, considerado como tal se a razão entre a altura total pela menor dimensão da planta geralmente considerado acima do valor de 6,0. No segundo genoma selecionado tem-se  $29 \cdot (2,6 + 0,7) / 12 = 7,9$ , podendo definitivamente entrar na classe dos edifícios altos, enquanto o quarto genoma apresenta um índice de  $23 \cdot (2,6 + 0,7) / 12 = 6,3$ , apresentando também uma esbelteza elevada. Esses dois casos apresentaram razão de dimensionamento na condição da estabilidade global com valores acima de 0,95, o que indica, assim, que a estabilidade global provavelmente é o fator limitante em edifícios verticais nesse sistema estrutural. Vale ressaltar que os genomas testados de pórticos com maior número de pavimentos possuem eficiência mais baixa, enquanto aqueles com menos pavimentos apresentam eficiência mais alta.

### Comparação entre os algoritmos de dimensionamento automático

A Tabela 4 mostra o resultado desses quatro pórticos investigados obtido pelo algoritmo de dimensionamento automático proposto por Silva (2017b), gerado a partir das definições dos parâmetros das dimensões globais dos quatro casos testados. Foram mantidas fixas além das dimensões dos pórticos a resistência do material, variando apenas as dimensões das seções transversais.

Além da comparação das taxas de consumo de material em relação à referência, obtida pela tabela inicial gerada pelo motor em AG, foram registrados os tempos de processamento das duas

ferramentas em comparação: a proposta por este estudo e a proposta por Silva (2017b).

Observando a Tabela 4 pode-se verificar que, apesar do algoritmo proposto por Silva apresentar uma relativa boa velocidade de processamento, mostrou uma piora nos índices de consumo de material como também na eficiência em três dos quatro genomas em estudo. Pode-se observar que se manteve a característica de que os pórticos com mais pavimentos são menos eficientes.

Obtendo as dimensões das espessuras estruturais dos quatro casos analisados utilizando o algoritmo proposto neste artigo observou-se melhora generalizada dos índices de desempenho dos quatro genomas estudados em relação à referência, contudo o tempo de processamento é imensamente superior. Para a otimização desses quatro casos foram considerados os parâmetros do motor do AG com um estagnação máxima de cinco gerações, endogamia de +75, impulso inicial de 1, manutenção por geração em 15% e populações de 50 indivíduos, variando além das dimensões das seções transversais também os valores das resistências do concreto do sistema de piso e das colunas. Os resultados dessa busca são apresentados na Tabela 5.

De imediato pode-se observar na Tabela 5 que foram obtidas respostas otimizadas com resistência do concreto mais elevadas e seções transversais mais reduzidas, levando a uma redução considerável em todos os casos na taxa de consumo de concreto. Contudo, observou-se também um pequeno aumento nas taxas de armaduras, como é de se esperar quando se diminui a seção bruta de concreto, levando a reforçar o fato de que otimizar a taxa de consumo de concreto não significa em todo o caso otimizar por completo o projeto estrutural uma vez, sobretudo pelo fato de o aço ser um insumo de relativo alto custo.

Figura 13 - Perspectiva dos modelos selecionados para validação e comparação

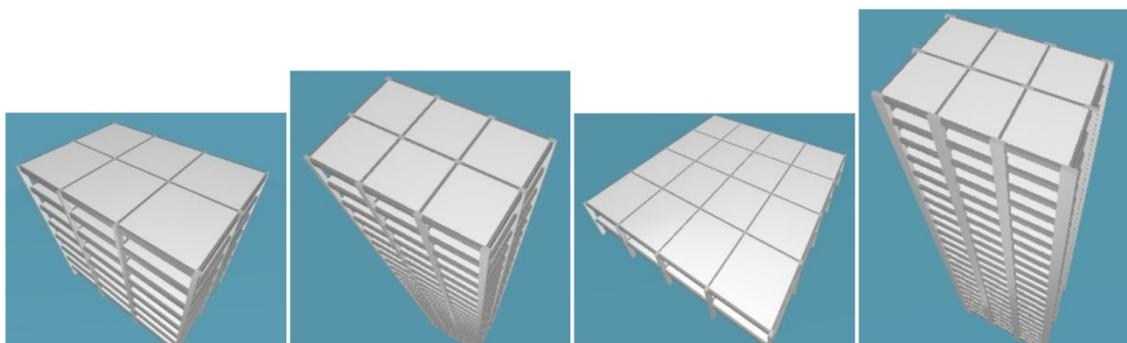


Tabela 4 - Resultados obtidos pelo algoritmo proposto por Silva (2017b)

fck piso (MPa)	Fck pilar (MPa)	d laje (cm)	bw vigas X (cm)	bw viga sY (cm)	h vigas (cm)	bw pilar (cm)	h pilar (cm)	Efic. (%)	Taxa conc. (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	Δ (%)	Taxa aço do TQS (kg/m <sup>2</sup> )	Δ (%)	Tempo de execução do algoritmo (s)	Tempo de exec. TQS (s)
40	50	15	30	30	85	70	50	47%	0.26	-13	22.8	-5%	36	180
60	70	11	30	30	70	45	75	49%	0.27	+4	25.4	+1%	126	660
55	20	9	20	20	35	45	30	58%	0.15	+7	13.6	+4%	22	120
60	70	11	30	30	75	45	130	44%	0.32	+33	27.0	+14%	108	480

Tabela 5 - Resultados obtidos pelo algoritmo proposto neste artigo

fck piso (MPa)	fck pilar (MPa)	d laje (cm)	bw vigas X (cm)	bw vigas Y (cm)	h vigas (cm)	bw pilar (cm)	h pilar (cm)	Efic. (%)	Taxa conc. (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	Δ (%)	Taxa aço do TQS (kg/m <sup>2</sup> )	Δ (%)	Tempo de execução do algoritmo (s)	Tempo de exec. TQS (s)
80	75	13	25	25	75	55	60	51	0.22	-27%	24.7	+3	1.320	240
85	85	8	25	25	65	50	60	55	0.21	-19%	26.4	+5	3.960	900
90	90	8	20	20	50	20	20	62	0.13	-7%	13.6	+4	360	180
90	90	8	20	20	60	45	65	57	0.19	-21%	26.8	+10	1.440	480

No processamento dos dois algoritmos percebe-se que os modelos maiores consomem mais tempo de processamento, naturalmente por possuírem mais dados a serem processados em cada passo da busca da solução ótima.

## Conclusões

Duas versões de uma ferramenta de projeto foram comparadas neste artigo: uma aqui proposta e outra proposta por Silva. Esses dois protótipos de ferramenta têm por objetivo ajudar a conceber a estrutura de forma integrada com a forma

arquitetônica nos estágios iniciais do projeto do edifício. Deve-se dizer que a ferramenta de projeto não elimina as ferramentas atuais e sim traz um estudo de caso para auxiliar o processo de concepção nas fases iniciais do projeto do edifício.

Nesse novo conceito de processo de projeto, os resultados da ferramenta de projeto proposta podem alimentar sistemas baseados no conceito *optioneering*. Nesse contexto, os gráficos de dimensões preliminares de Corkill podem agora ser utilizados como uma indicação das capacidades do sistema estrutural em estudo.

Além desses gráficos os índices de desempenho do sistema são de grande valia para o conhecimento das capacidades do sistema estrutural e suas limitações. Neste artigo foram tratados de eficiência estrutural e índices de aceitabilidade estrutural. Observa-se que, especificamente nesse sistema de pórticos em concreto armado, a eficiência do sistema é mais frequente entre 50% e 70%. Para as soluções de edifícios com vários pavimentos observou-se que o fator crítico de aceitabilidade estrutural dos pilares foi a estabilidade global. Confirmando estudos anteriores, o fator crítico de aceitabilidade das vigas e lajes para o nível de cargas usuais é o deslocamento, sobretudo quanto maior for a resistência do concreto.

A recente permissão da norma brasileira para o projeto de estruturas de concreto armado para se projetar com concretos com uma resistência característica entre 50 MPa e 90 MPa demonstrou nesses resultados aumento na esbeltez de todos os elementos estruturais. No entanto, em alguns casos também mostrou aumento na taxa de consumo de aço, sendo aqui obtida pelo sistema TQS.

É ainda válido ressaltar que em todos os doze casos analisados tiveram o dimensionamento e a quantificação das armaduras como também a verificação dos requisitos da norma aprovadas pelo sistema TQS, cuja verificação se utiliza da mesma norma de estruturas considerada no algoritmo proposto.

Para uma avaliação mais abrangente, o algoritmo proposto poderia ter uma função-objetivo mais elaborada, ou mesmo mais de uma em uma avaliação multiobjetivo que otimizasse o custo real de construção. A fim de simplificar a primeira apresentação dessa proposta de ferramenta de projeto, foi decidido considerá-la como a taxa de consumo de concreto, uma vez que esse índice incorpora indiretamente o custo de material e questões relacionadas ao impacto ambiental. No entanto, seria muito útil que versões futuras dessa proposta pudessem também modelar a armadura das peças, gerando-as automaticamente e, ser providas da capacidade de avaliar automaticamente as taxas de consumo de aço.

Isso permitiria uma avaliação nas fases iniciais da concepção do edifício com uma precisão muito maior em relação ao custo de construção da estrutura, bem como avaliar o impacto ambiental frente ao nível de consumo de material.

Como foi implementado no ambiente Grasshopper, essas propostas têm o modelo geométrico estrutural totalmente independente do resto do algoritmo. Isso significa que esse algoritmo já está disponível para ser utilizado com outros tipos de

estruturas em concreto armado formado por lajes, vigas e colunas. Isso vem a permitir o uso desse algoritmo para verificar outros modelos paramétricos que se utilizam dessa mesma coleção de membros estruturais, o que também pode ser interessante caso se queira verificar uma estrutura já construída, utilizando como dado de entrada um modelo com eixos estruturais sem uma definição paramétrica.

Finalmente, sugere-se que uma ferramenta de projeto poderia ser desenvolvida para esse propósito específico, sob o manto de interoperabilidade com os sistemas *optioneering* e BIM, porém em uma plataforma de programação mais eficiente computacionalmente.

## Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: forças devido ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- BRITO, B. L.; SILVA, F. T. Estudo Paramétrico de Sistemas de Piso Bidirecional e Unidirecional Modulados em Concreto Armado. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 7., Recife, 2015. **Anais...** Recife, 2015.
- BUELOW, P. V. **Creative Evolutionary Systems**: a volume in The Morgan Kaufmann Series in Artificial Intelligence. Elsevier, 2002.
- CORKILL, P. A. Preliminary Structural Design Charts for Architects. **Architectural Science Review**, v. 12, n. 1, p. 15-20, 1969.
- CHRISTENSEN, P. W.; KLARBRING, A. **An Introduction to Structural Optimization**. New York: Springer, 2009.
- FÜHRER, C.; SOLEM, J. E.; VERDIER, O. **Scientific Computing with Python 3**. Packt, 2016.
- GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. Addison-Wesley, 1989.
- HOLZER, D.; HOUGH, R.; BURRY, M. Parametric Design and Structural Optimization for Early Design Exploration. **International Journal of Architectural Computing**, v. 5, n. 4, p. 625-643, 2007.

HOLZER, D. Optioneering in Collaborative Design Practice. **International Journal of Architectural Computing**, v. 8, n. 2, p.165-182, 2010.

KIMURA, A. **Informática Aplicada em Estruturas de Concreto Armado**: cálculo de Edifícios com o Uso de Sistemas Computacionais. São Paulo: Pini, 2010.

KOLAREVIC, B. Towards Integrative Design. **International Journal of Architectural Computing**, v. 7, n. 3, p. 335-344, 2009.

MOUSSAVI, F. **The Function of the Form**. Barcelona: Actar, 2009.

MUELLER, C. T.; OCHSENDORF, J. A. Combining Structural Performance and Designer Preferences in Evolutionary Design Space Exploration. **Automation in Construction**, v. 52, p. 70-82, 2015.

ROLVINK, A.; STRAAT, R. V.; COENDERS, J. Parametric Structural Design and Beyond. **International Journal of Architectural Computing**, v. 8, n. 3, p. 319-336, 2010.

RUTTEN, D. Galapagos: on the logic and limitations of generic solvers. **Archit Design**, v. 83, p. 132-135, 2013.

SANDEKER, B. N. **On Span and Space**: exploring structures in architecture. Routledge, 2007.

SILVA, F. T. Automatic Structural Preliminary Design of a 3d Concrete Frame by Numerical Parametric Structural Modeling. In: Brazilian-German Conference, 7., Campinas, 2016. Proceedings... Campinas, 2017b.

SILVA, F. T. Concepção Interativa e Parametrizada de Edifícios de Múltiplos Pavimentos em Concreto Armado. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v. 12, n. 1, p. 9-27, 2017a.

TEDESCHI, A. **AAD-Algorithms Aided Design**: parametric strategies using Grasshopper. Le Penseur, 2014.

## Agradecimentos

O autor deste artigo agradece à TQS pelo indispensável apoio a esta pesquisa. O autor também agradece a disponibilidade do *add-on* Galapagos para a pesquisa científica.

Felipe Tavares da Silva

Núcleo de Tecnologia, Projeto e Planejamento, Faculdade de Arquitetura | Universidade Federal da Bahia | Rua Caetano Moura, 121, Federação | Salvador - BA - Brasil | CEP 40210-905 | Tel.: (71) 3283-5884 | E-mail: felipe.tavares@ufba.br

### *Revista Ambiente Construído*

Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído  
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro  
Porto Alegre - RS - Brasil  
CEP 90035-190  
Telefone: +55 (51) 3308-4084  
Fax: +55 (51) 3308-4054  
[www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido](http://www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido)  
E-mail: [ambienteconstruido@ufrgs.br](mailto:ambienteconstruido@ufrgs.br)