

Design generativo aplicado às estruturas: Otimização do plano de corte dos painéis de tela soldada em paredes de concreto

<https://doi.org/10.21814/uminho.ed.32.30>

**Gabriel P. Veloso¹, Danielle M. Oliveira²,
Carmen Ribeiro³, Sidnea Ribeiro⁴**

¹ Universidade Federal de Minas Gerais 1, Belo Horizonte 1, 0000-0001-5932-5684

² Universidade Federal de Minas Gerais 2, Belo Horizonte 2, 0000-0003-4379-5096

³ Universidade Federal de Minas Gerais 3, Belo Horizonte 3, 0000-0002-6698-9865

⁴ Universidade Federal de Minas Gerais 4, Belo Horizonte 4, 0000-0001-7875-9314

Resumo

O “Design Generativo” é um processo que proporciona iteratividade, para avaliação de situações de projeto, que envolvem múltiplos objetivos de otimização. A utilização deste conceito proporciona ao projetista testar e avaliar um maior número de soluções de projeto, encontrando a opção ótima em menor tempo. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo realizar uma revisão bibliográfica a respeito de algoritmos genéticos, que são a estrutura computacional das ferramentas de *Design Generativo*, assim como, avaliar a utilização destes em etapas de desenvolvimento de projetos estruturais. Ademais, foi realizado um estudo de caso, da geração do plano de corte de painéis de tela soldada em um projeto de paredes de concreto em BIM. Neste estudo, foi desenvolvido um script no Dynamo, com o suplemento “Design Generativo”, introduzido no *software* Revit, na versão 2021, para geração dos planos de corte. Os objetivos de otimização foram definidos com base em uma lógica de empacotamento bidimensional, e o resultado do fluxo foi comparado, qualitativamente e quantitativamente, com resultados obtidos para o mesmo projeto, utilizando o *software* TQS e outro *software* que tem como base algoritmos genéticos. Assim, foi possível avaliar que, no cenário estudado, a utilização de algoritmos genéticos, de maneira geral, pode-se equivaler quantitativamente a métodos convencionais de otimização, e aprimorar o fluxo de projeto.

1. Introdução

O “Design Generativo” é um processo iterativo de desenho, baseado na geração de um certo número de resultados atrelados às condicionantes de projeto, e cada um destes resultados é avaliado relativamente a cada uma destas condicionantes, que são por fim os objetivos que regem a modelagem. As ferramentas de “Design Generativo” usam princípios da evolução, como os operadores de seleção, cruzamento e mutação, para iterativamente gerar soluções e avaliá-las de acordo com os objetivos, sendo assim, considerados algoritmos genéticos [1].

Diante desta perspectiva, o “Design Generativo”, torna-se uma importante ferramenta para o desenvolvimento de processos de “*design*” e modelagem, que envolvem uma multiplicidade de critérios. Desta maneira, ferramentas baseadas neste conceito têm se tornado muito úteis, principalmente para profissionais da Arquitetura, em fases iniciais de projeto, como estudo de viabilidade, que visam definir o cenário mais otimizado de implantação de um projeto.

Embora menos utilizado em outras disciplinas da construção, tem sido possível observar também os impactos e possibilidades de uso do “Design Generativo” para a área de estruturas. Desta forma, este trabalho terá como base estudar, dentro do contexto da Modelagem da Informação da Construção (Building Information Modeling – BIM), o uso de algoritmos genéticos na área de estruturas, a partir de um estudo de caso que visará otimizar o plano de corte dos painéis de tela soldada em sistemas de parede de concreto moldadas no local.

Ademais, este trabalho se justifica, principalmente, pelo objetivo de aumentar a racionalização do uso das telas soldadas, sendo possível otimizar resultados para produção no método construtivo de Paredes de Concreto Moldadas no Local. O qual, atualmente no Brasil, é o sistema mais utilizado para construção de edificações de interesse social no programa Casa Verde e Amarela (Minha Casa Minha Vida), representando mais de 250 mil unidades habitacionais realizadas ao ano.

Portanto, este trabalho tem como objetivo principal desenvolver um método de otimização dos planos de corte das telas soldadas em um sistema de paredes de concretos moldadas no local. Tendo como base o conceito de “Design Generativo”, para permitir uma análise de múltiplos critérios e também garantir um processo iterativo dentro do fluxo BIM, proporcionando fluidez ao desenvolvimento do projeto, diante da possibilidade de avaliar diferentes cenários de maneira prática, simplificando a busca pela opção ótima.

2. Revisão da literatura

A revisão da literatura será formulada pelos principais itens que compõem a estrutura do trabalho, para assim, estabelecer as bases de desenvolvimento. Desta forma, serão estudadas referências bibliográficas relativas ao “Design Generativo” com enfoque nos conceitos de otimização e composição de algoritmos genéticos, assim

como, a aplicação em projetos estruturais. O segundo item de pesquisa será a programação visual, tendo em vista que, esta será a forma de desenvolver a estrutura do método de otimização, e por fim, as definições de projetos estruturais com o sistema construtivo de paredes de concreto.

2.1. *Design* generativo

Em um processo de desenvolvimento de projeto, o tempo de elaboração de um *design* é geralmente limitado. Portanto, um projetista não consegue explorar todo o espaço de soluções viáveis e então, apenas testa e melhora uma pequena quantidade de opções para definir a solução final [1]. Neste cenário, surge a necessidade de cooperação entre o projetista, com a intuição e experiência, e os métodos computacionais com a alta capacidade operacional, para se atingir as soluções mais otimizadas para um problema.

Portanto, o conceito de *Design* Generativo surge como uma vertente de métodos de otimização de situações de projeto, que, por sua natureza, precisam satisfazer várias restrições. O *Design* Generativo é baseado em métodos de busca de soluções, chamados de algoritmos genéticos, que se apropriam de processos evolucionários, para alcançar a otimização. Através destes processos é possível aprender com os *designs* que foram analisados, e aplicar esse conhecimento para gerar projetos novos e de melhor desempenho [2]. Logo, o *Design* Generativo se constitui por um processo iterativo de três principais etapas: gerar diferentes soluções para o *design*, avaliar a aptidão de cada opção com base nas restrições de projeto e fazer a união dos parâmetros das melhores soluções para evoluir para uma nova geração de opções.

2.2. Otimizações de objetivos múltiplos

A otimização deve ser considerada uma ferramenta de decisão, em que esta tem como função, a melhoria do resultado e não a obtenção da solução exata para um problema. Desta forma, para usar este tipo de ferramenta é necessário modelar a situação, identificando as variáveis do problema para relacioná-las de maneira a se obter valores ótimos como resultado [3].

Uma otimização de objetivos múltiplos envolve avaliar diferentes objetivos, restrições, para encontrar as decisões ótimas de solução. A complexidade do processo de *Design* geralmente envolve múltiplos critérios a serem satisfeitos, o que gera uma contradição nas definições, tendo em vista que, para maximizar uma função de múltiplos objetivos, seria necessário minimizar pelo menos um dos parâmetros [1]. Desta forma, não haveria apenas uma solução para atingir todos os objetivos, mas sim, um conjunto de opções ótimas para serem avaliadas na decisão. Portanto, se o modelo elaborado é simplista, este não será suficientemente capaz de receber os dados de entrada e avaliá-los de forma correta, e ao ser muito complexo, pode se tornar muito difícil de resolver. A construção de um modelo apropriado deve ser o primeiro passo para a otimização [4].

Os processos de otimização podem ser divididos em métodos clássicos e os modelos computacionais que compõem a computação evolucionária. Os métodos clássicos são aqueles que se baseiam em algoritmos determinísticos, que geram uma sequência determinística de possíveis soluções, logo, estes tendem a utilizar a primeira derivada da função que modela o problema. Os métodos evolucionários, algoritmos genéticos, se baseiam em processos iterativos com a ideia de avaliar a função do modelo. De maneira que é realizada uma busca baseada em conceitos de probabilidade, dirigindo a busca para a região do espaço amostral de possíveis soluções onde é mais provável localizar o ponto ótimo [3].

2.3. Algoritmos genéticos

As principais vantagens do uso dos algoritmos genéticos são [5]: lidar com um grande número de variáveis; fornecer uma lista de variáveis ótimas e não apenas uma solução; trabalhar com dados gerados numericamente, dados experimentais ou funções analíticas; a otimização pode ser realizada com variáveis contínuas e discretas; não são necessárias informações sobre as derivadas; a otimização pode ser feita com variáveis codificadas.

O fluxo geral de processos de um AG pode ser definido pela sequência: criação randômica de um conjunto inicial de soluções, sendo este, a população pai da primeira geração; a partir de cada indivíduo da população, é calculado o grau de aptidão para o problema [1]. Se o grau calculado de alguma solução satisfizer o critério de parada, o algoritmo encerra. Caso contrário, dois indivíduos da primeira geração são escolhidos para a reprodução de um novo indivíduo, esse cruzamento gera a população filha da primeira geração. Então, é aplicada uma mutação randômica na população filha para diferenciação dos cromossomos e possivelmente gerar características mais adequadas nas soluções aos problemas. Depois deste processo, é calculado o grau de aptidão dos indivíduos da população filha e junto à população pai, é formada a primeira geração de soluções. Todos estes indivíduos são ordenados pelo grau de aptidão. Então os indivíduos melhor classificados formam a próxima geração.

O processo de classificar a população filha e pai em um mesmo conjunto, formando uma geração, é chamado de elitismo. Desta forma, é assegurado que as soluções com maior grau de aptidão serão preservadas.

Portanto, pode-se considerar quatro principais blocos que compõem um algoritmo genético, a definição das variáveis, sendo os inputs, a geração de uma população inicial, os métodos avaliadores para calcular o grau de aptidão dos indivíduos das populações, e os métodos de convergência para atingimento dos critérios de parada. O fluxo de processos de um algoritmo genético é apresentado na Figura 1 adaptada [3].

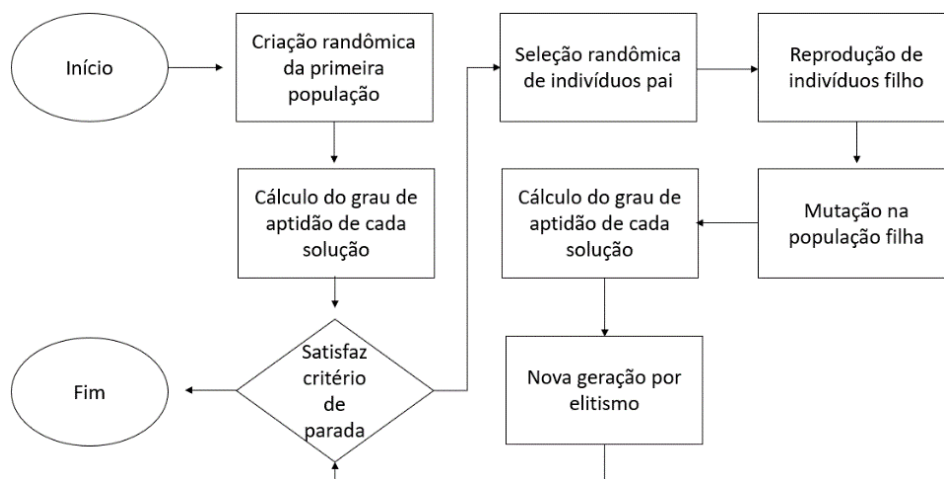


Figura 1
Fluxo de processos de um algoritmo genético.

Os estudos da computação evolucionária e os algoritmos genéticos na engenharia estrutural tiveram início no meio da década de 70. Estes são divididos entre três principais categorias: otimização de tipologia, busca por uma disposição ideal de material para um sistema estrutural; otimização de forma, que busca pelo melhor contorno de um sistema; e otimização de dimensionamento que busca pelas seções e dimensões ótimas [6].

2.4. Programação visual

Na programação visual, os comandos textuais, desenvolvidos por códigos, são substituídos por elementos gráficos e estes, são manipulados para executar tarefas [1]. Atualmente, vários *softwares* de modelagem e desenvolvimento de projetos BIM contemplam ferramentas de programação visual para simplificação e automação de projetos, podendo ser citados como exemplo: “Open Buildings Designer” com a ferramenta “Generative Components”, “Rhinoceros” com o “Grasshopper” e “Revit” com a ferramenta “Dynamo”.

A partir do Revit 2021, foi incorporada uma ferramenta chamada “Generative Design”, que permite desenvolver estudos de *design* com base em algoritmos genéticos. Esta ferramenta trabalha em conjunto ao Dynamo no Revit, de forma que a implementação lógica é estruturada no Dynamo e exportada para o “Generative Design”, permitindo que o usuário desenvolva os estudos de otimização. Inicialmente, esta ferramenta foi liberada ao usuário, em fase de testes, em 2019, com o nome Refinery.

Um possível fluxo para o desenvolvimento de estudos de otimização de *design* em fases iniciais de projeto, pode ser estruturado da seguinte forma [1]:

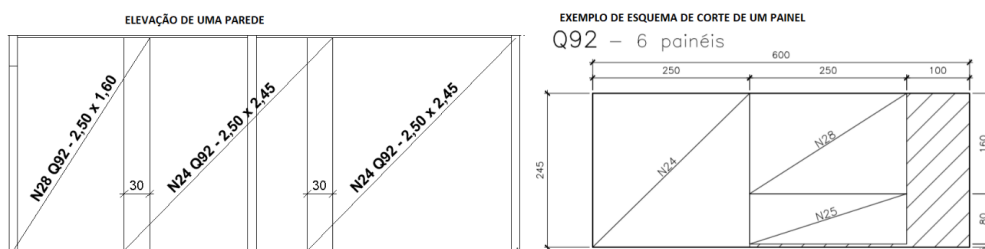
- as variáveis e restrições são implementadas no Dynamo, este é o trecho do código responsável por gerar as características dos indivíduos da população;
- também no Dynamo é implementada a avaliação de aptidão dos indivíduos com base nos objetivos;

- os dados de saída das avaliações são enviados para o Refinery, o qual funciona como o “motor” de otimização, a partir de um algoritmo genético;
- após terem ocorrido os processos evolucionários no Refinery, os dados processados retornam como parâmetros de entrada para o Dynamo e ciclo recomeça.

2.5. Projeto Estrutural em Paredes de Concreto

O projeto estrutural de paredes de concreto deve ser constituído por desenhos que contenham as plantas de forma e elevações das paredes, com as respectivas armaduras [7]. Neste tipo de projeto, a armadura principal das paredes, em geral, é detalhada com telas soldadas de aço (malha de armadura eletrosoldada) que possuem a mesma área de aço na direção longitudinal e transversal (tipo Q). A área de aço a ser utilizada, é definida principalmente pela espessura da parede e deve-se garantir um trespasse mínimo de 30 cm entre os cortes de tela, conforme Figura 2. Com base nas dimensões de trechos de tela definidas nas elevações, uma etapa importante do projeto é a definição do plano de corte dos painéis comerciais. Que tem o objetivo de minimizar a quantidade a ser comprada, consistindo em definir a forma ótima de cortar os painéis de 600cm x 245cm, para obter todos os cortes requeridos (Figura 2). Para realizar este processo, é comum utilizar ferramentas computacionais como o TQS e o CutLogic2D.

Figura 2
Exemplos de detalhamento de um projeto estrutural em Paredes de Concreto.



3. Implementação

Foi definido um estudo de caso como metodologia para avaliar o desenvolvimento da abordagem generativa na otimização dos planos de corte das telas soldadas, e este terá os seguintes passos:

- extração dos quantitativos de comprimento, largura, peso e tipo dos cortes de tela soldada das paredes de concreto do modelo estrutural no Revit, de um projeto de referência de uma edificação multifamiliar de 5 pavimentos. O projeto possui paredes de 10cm de espessura, em que majoritariamente foram utilizadas telas Q92 (0,92cm²/m de área de aço, com fios de 4,2mm espaçados por 15cm nas duas direções);
- geração do plano de corte dos painéis comerciais, com base nos dados extraídos do modelo, com auxílio de *software* consolidado, baseado em algoritmos genéticos, para obtenção de referência;

- definição da função objetivo de otimização em *script* no Dynamo, para desenvolvimento da abordagem generativa, com o “Design Generativo” no Revit 2021.
- comparativo de resultados entre os quantitativos do plano de corte do projeto de referência, feito com a ferramenta “Esquema de Telas” do *software* TQS, com os obtidos pelo *software* baseado em algoritmos genéticos e com o *script* desenvolvido.

3.1. Objetivos de otimização das telas

O processo de otimização das telas soldadas envolvem dois principais aspectos, a definição da paginação dos recortes nas elevações, respeitando os trespasses e áreas de aço, e o encaixe destes recortes nos painéis comerciais, processo denominado de plano de corte. Este tem como função determinar a quantidade de painéis necessária para executar o detalhamento estrutural.

Desta forma, torna-se possível, avaliar o peso de aço na estrutura, sem perdas e com perdas, determinando assim, o índice de otimização. Portanto, a função objetivo deve ser maximizada pelas soluções que atingem o menor número de painéis.

3.2. Empacotamento bidimensional

Os problemas de otimização de corte, têm uma estrutura idêntica e podem ser descritos computacionalmente como problemas de empacotamento bidimensional. De maneira geral, são compostos por dois conjuntos de objeto: os objetos de grande tamanho, chamados de recipientes e os de menor tamanho, chamados de itens [8]. Desta forma, no caso deste estudo, os painéis comerciais são os recipientes e os itens são os recortes de tela.

Ademais, estes conjuntos, devem possuir duas dimensões geométricas e os itens devem ser selecionados e organizados em conjuntos que serão inseridos nos recipientes. As regras a serem respeitadas são: os itens de um conjunto devem caber totalmente no recipiente atribuído e nenhum item pode se sobrepor. Portanto, não se pode ter sobreposição dos recortes de tela dentro dos painéis e os recortes não poderão ultrapassar a linha limite que define os painéis.

Portanto, a função objetivo estabelecida será implementada com auxílio de programação visual, no plugin Dynamo do Revit, assim como as restrições definidas pelas regras. Desta forma, a busca pela resolução do problema, será realizada por meio de algoritmos genéticos implementados pela ferramenta “Generative Design” do Revit. Ademais, para referência e estudo dos padrões de corte, será desenvolvido um fluxo para definição dos planos de corte no *software* CutLogic2D, que tem como método de resolução algoritmos genéticos.

3.3. Extração de quantitativos do projeto referência

A modelagem do projeto foi desenvolvida com uma estruturação em vínculos Revit, de pavimento térreo, tipo e cobertura, posicionados em um arquivo hospedeiro. Para extração dos quantitativos necessários, foi criada uma tabela, considerando a estrutura de modelagem, da categoria “Structural Fabric Reinforcement”, com os campos dos parâmetros “Type”, “Mark”, “Cut Overall Length”, “Cut Overall Width” e “Cut Overall Mass”, especificando assim, cada um dos cortes de tela, modelados no projeto. Estas informações foram exportadas para o excel, para integração com o CutLogic2D.

3.4. Fluxo de definição de planos de corte no CUTLOGIC2D

Com base na extração descrita no item 3.3, foi possível mapear estes parâmetros no CutLogic2D, criando o banco de dados dos “itens”. Então, foram configuradas as dimensões dos painéis “recipientes”, sendo: 6,00 metros x 2,45 metros. Por fim, o programa foi executado duas vezes, uma utilizando o padrão de corte “guilhotina” e a outra “aninhado”, disponíveis no programa, obtendo-se o resultado mais favorável entre as duas. Assim, foi possível exportar as informações de: desenho dos planos de corte em formato CAD, a quantidade de painéis necessária, o índice de aproveitamento e a quantidade de “layouts” para cortar os painéis.

3.5. Abordagem generativa para definição dos planos de corte

Para o desenvolvimento da abordagem generativa no Revit, foi utilizada a versão 2021 do mesmo, tendo em vista que, o *addin* para criação de estudos generativos só é compatível a partir desta versão. A lógica foi desenvolvida no *addin* de programação visual, Dynamo 2.6.1.

Nele, foram definidas as variáveis, restrições e objetivos de otimização que compõem a lógica do *design*. Assim, o estudo no “Generative Design”, funcionará como motor de geração de soluções com base na aptidão calculada.

De maneira geral, a rotina no Dynamo coletará no modelo as informações das telas soldadas, e inicialmente gerará uma quantidade mínima de painéis no tamanho comercial (Figura 3 – etapa A) e serão inseridos todos os cortes com pelo menos uma dimensão equivalente a do painel (etapa B). A partir disso, serão gerados pontos de referência dentro destes painéis, para a inserção dos demais cortes coletados do modelo nas áreas disponíveis (em vermelho na etapa C). A definição destes pontos (etapa D) e a quantidade de painéis adicionais que será necessário incluir, serão regidas a cada iteração, pela avaliação da área de cortes sobrepostos e a área de cortes fora dos painéis. A estrutura da lógica no Dynamo foi organizada em quatro agrupamentos principais: dados de entrada, geradores, avaliadores e dados de saída. Os dados de entrada são compostos pelo dados obtidos do modelo e os nós do tipo “slider”, que representam as variáveis: quantidade de painéis, posição em X dos cortes dentro dos painéis e um número randômico “semente”, para definir a ordem de inserção dos cortes nos painéis; os geradores são os trechos do *script* responsáveis por recriar

o plano de corte com base nos dados de entrada; os avaliadores definem a função objetivo para calcular a aptidão do que foi gerado; por fim, os dados de saída são os valores calculados para otimização: quantidade total de painéis, área de cortes fora dos retângulos que definem os painéis e quantidade de cortes que possuem áreas sobrepondo. Cada grupo foi classificado em um destes agrupamentos, através de um sistema de cores, para melhor documentação da lógica.

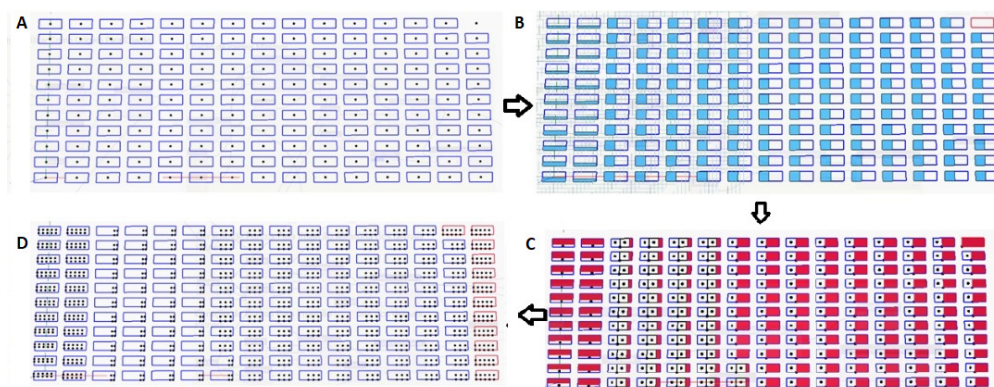


Figura 3
Processo de
“preenchimento” dos
painéis com os cortes
de tela.

3.6. Estudo generativo

Com todas as etapas desenvolvidas no Dynamo, a rotina pode ser exportada para o “Generative Design”, e assim, fica acessível para criação dos estudos. Os passos para definição do escopo do estudo estão atrelados ao que foi desenvolvido no Dynamo e os objetivos fins de para avaliação do estudo.

Considerando o método de otimização, a primeira etapa consiste em definir as variáveis que poderão ser manipuladas. As variáveis, são exatamente os nós configurados como dados de entrada, do tipo “slider”. Estas, possibilitarão ao AG, fazer a busca por soluções em um maior espaço amostral, pela variação dos valores em cada iteração. Desta forma, torna-se possível aumentar a “variabilidade genética” dos indivíduos nas gerações.

A segunda etapa consiste em definir as metas de otimização para cada um dos dados de saída. Com base nessas definições e as funções de avaliação o algoritmo estabelecerá os indivíduos com maior aptidão para o atingimento dos resultados.

No caso da definição do plano de cortes, tem-se como objetivo, obter a quantidade mínima de painéis comerciais a serem comprados, atendendo os requisitos do projeto. A quantidade de sobreposições e a área de cortes fora dos painéis deve ser minimizada, e em um cenário de projeto deve ser igual a 0, para que se tenha um plano de corte real, tendo em vista que todos os “itens” devem estar dentro dos “recipientes” e não podem se sobrepor [8].

Por fim, deve-se definir a quantidade de populações e gerações, buscando o equilíbrio entre a demanda de indivíduos para percorrer o espaço de busca e o tempo de processamento que populações grandes e muitas gerações podem demandar.

Ademais, é válido ressaltar que a configuração de uma pequena população para muitas gerações, pode condicionar a pressão de seleção em uma área limitada de busca, assim como, poucas gerações para grandes populações, podem refletir em soluções pouco aprimoradas devido ao curto processo evolutivo.

Após o processar, obtém-se as soluções de maior aptidão, podendo avaliar as características de cada uma, e compará-las em gráficos para a tomada de decisão. Conforme na Figura 4.

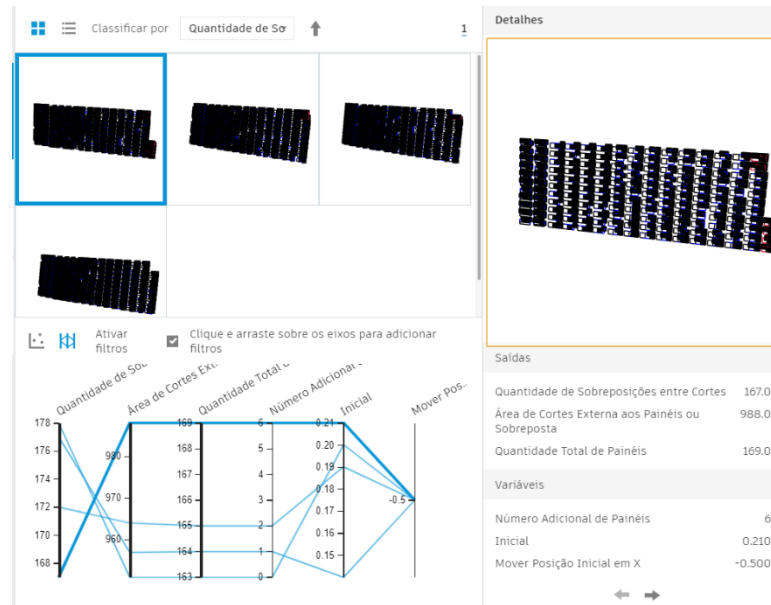


Figura 4
Visão geral da interface de resultados do estudo generativo.

4. Análise dos resultados

O plano de corte do projeto de referência indicava a necessidade de 171 painéis do tipo Q92 para realizar a armação das paredes. Com a utilização do CutLogic2D obteve-se o resultado de 170 painéis necessários. A partir do estudo generativo realizado com o *script* desenvolvido no Dynamo, não foi possível alcançar um resultado, restringindo a 0 o valor resultante nas sobreposições entre cortes e área de cortes externa aos painéis. Esta condição de processamento, é requisito para utilização do método em situação de projeto, pois, qualquer valor resultante nestes avaliadores, indica soluções não realísticas para definição do plano de corte. Portanto, não é possível comparar os resultados com o projeto de referência ou o CutLogic2D.

Para avaliar os resultados do algoritmo, foi feito um processamento sem restrições nos avaliadores, mas com metas de minimização das sobreposições e áreas externas aos painéis. Para isso, foi considerada a população com 20 indivíduos e um total de 10 gerações. Os indivíduos melhor ranqueados estão representados na Tabela 1.

Indivíduo	QTD de Painéis Q92	Área externa aos painéis	Sobreposição entre cortes
1	165	964	172
2	169	988	167
3	164	957	177
4	163	951	178

Tabela 1
Indivíduos melhor raqueados.

A partir dos dados da Tabela 1, pode-se inferir que, nas melhores soluções encontradas pelo algoritmo, houve sobreposição em 20% dos cortes, tendo em vista, a quantidade total em projeto de 887. Considerando que a área total dos cortes se aproxima de 2400 m², observa-se que, aproximadamente 40% está fora dos painéis. Ademais, a quantidade de painéis obtida, não é realista, diante dos valores resultantes superiores a 0 nos avaliadores. Essa ineficiência tende a estar principalmente relacionada com a forma de definição dos pontos de inserção dos cortes, dentro das iterações. Para o projeto utilizado, foram gerados aproximadamente 1100 pontos (Figura 3 – etapa D), para inserção de aproximadamente 650 cortes restantes. Como não foi criada nenhuma condição de penalização ou regra específica de seleção dos pontos, esta ficou muito generalista, resultando em definições pouco restritas, para um espaço de busca muito grande. Através de uma combinação entre os pontos (p) e itens (i) a serem alocados, pode-se ter a magnitude desse espaço de busca, que supera a 4×10^{300} .

Destaca-se também o tempo de processamento, que nesse estudo foi de 30 minutos, enquanto o CutLogic2D, gastou 3 minutos para encontrar a melhor solução. A baixa performance da solução condiz com o elevado uso de programação visual adotado no desenvolvimento.

5. Considerações finais

Em relação ao principal objeto de estudo, as otimizações envolvendo algoritmos genéticos, o primeiro ponto a se destacar é que pelos resultados obtidos em comparação do CutLogic2D, com o projeto de referência, pode se observar uma equivalência, entre os processos de empacotamentos bidimensionais, em relação à métodos de otimização exatos, convencionais e de computação evolucionária.

Diante desse aspecto, o desenvolvimento de melhorias, na lógica proposta no módulo de “Generative Design” do Revit, para habilitar o uso em projetos, tem sentido no contexto de acelerar as tomadas de decisão no desenvolvimento do projeto, reduzir tempo de etapas e aumentar a gestão da informação, mas pouco afetaria na eficiência de redução de perda alcançadas com outras ferramentas.

As correções e melhorias levantadas estão relacionadas a melhor definição dos pontos para inserção, reduzindo o espaço de busca e tempo de processamento. Os métodos para seleção da ordem dos itens a serem inseridos, que envolvem processos

semelhantes aos utilizados na inserção dos dois primeiros conjuntos de cortes, demandam ciclos contínuos de verificação das dimensões dos elementos e reordenação com base nas posições de inserção, sendo necessário estruturas de repetição [8]. Essa implementação vai de encontro à melhoria de desempenho, pois, ambas demandam maior uso de programação textual, que no Dynamo, é viabilizado por Python. Desta forma, entende-se ser possível atingir resultados mais realísticos.

Referências

- [1] ROHRMANN, J., "Design Optimization in Early Project Stages A Generative Design Approach to Project Development", Dissertação (Master of Science Program Civil Engineering) – Department of Civil, Geo and Environmental Engineering, Technical University of Munich, Munich, 2019.
- [2] NAGY, D. Design optimization. Medium, 2017. *apud* ROHRMANN, J., "Design Optimization in Early Project Stages A Generative Design Approach to Project Development", Dissertação (Master of Science Program Civil Engineering) – Department of Civil, Geo and Environmental Engineering, Technical University of Munich, Munich, 2019.
- [3] PIRES, S. L., "Otimização por Algoritmos Genéticos de pilares esbeltos de concreto armado submetidos à flexão oblíqua", Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP, Campinas, 2014.
- [4] NOCEDAL, J.; WRIGHT, S. J. Numerical Optimization – Springer, 1999 *apud* PIRES, S. L., "Otimização por Algoritmos Genéticos de pilares esbeltos de concreto armado submetidos à flexão oblíqua", Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP, Campinas, 2014.
- [5] HAUPT, R. L.; HAUPT, S. L. Practical Genetic Algorithms – 2ª ed – A Wiley Interscience Publication – New Jersey, 2004 *apud* PIRES, S. L., "Otimização por Algoritmos Genéticos de pilares esbeltos de concreto armado submetidos à flexão oblíqua", Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP, Campinas, 2014.
- [6] KICINGER, R.; ARCISZEWSKI, T.; JONG, K., "Evolutionary computation and structural design: a survey of the state-of-the-art", Computers & Structures, vol. 83, pp. 1943-1978, 2005
- [7] NB5 16055:2012 Parede de concreto moldada no local para construção de edificações – Requisitos e Procedimentos, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2012.
- [8] SILVA, E., "Otimização de estruturas de concreto armado utilizando algoritmos genéticos", Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, São Paulo, 2001.