

CONSTRUÇÃO AUTOMATIZADA EM BLOCOS CERÂMICOS

Do processo paramétrico à aplicação robótica

AUTOMATED HOLLOW BRICK CONSTRUCTION
From parametric design to robotics application

**Júlio César Pinheiro Pires¹, Laline Elisângela Cenci²
e Olavo Avalone Neto³**

Resumo

O bloco, estrutural ou vedação, é o módulo industrializado mais utilizado na construção civil, desde a revolução industrial. A demanda crescente por formas cada vez mais complexas e experimentações formais fomentada pelo uso de novas tecnologias vêm exigindo conhecimento de processos que permitam a aplicação dessa unidade no cenário da construção civil. Objetiva-se aqui demonstrar um método de construção automatizada de uma parede de blocos cerâmicos com disposição espacial parametrizada e executadas em escala reduzida através de um braço robótico, conferindo precisão no processo repetitivo. Pretende-se difundir a estruturação de um fluxo de trabalho para aprimorar e viabilizar a execução de modelos não convencionais.

Palavras chave: desenho paramétrico, blocos cerâmicos, automação.

Abstract

The hollow brick is probably the most ubiquitous building block since the industrial revolution. The growing demand for more complex formal design brought by improvements in computing technology requires the knowledge and adoption of new processes and systems for its application in contemporary building sites. This paper aims to demonstrate a method for building hollow brick parametric walls using a low cost robotic arm. It provides a proof of concept through the construction of a scale model and provides a workflow for design and execution of non-conventional structures.

Keywords: parametric design, hollow brick, automation.

¹ Arquiteto e Urbanista, Doutor e Mestre em Design, Professor adjunto da faculdade de arquitetura da UFSM-CS.

² Arquiteta e Urbanista, Doutora em Arquitetura e Professora adjunta da faculdade de arquitetura da UFSM-CS.

³ Arquiteto e Urbanista, Doutor em Arquitetura e Professor adjunto da faculdade de arquitetura da UFSM-CS.

Introdução

Os primeiros materiais de construção industrializados foram os tijolos. No fim do século 19, com a multiplicação das olarias, começou a se difundir uma nova tecnologia: a alvenaria de tijolos, usada em substituição à taipa (VARGAS, 1994). A sua fabricação evoluiu, acompanhando as grandes revoluções tecnológicas; no entanto, o seu assentamento manual manteve-se. Ao longo da sua história, o tijolo passou por diferentes processos de manufatura e foi usado de várias formas na construção.

No início do século XX o tijolo aparente (bloco cerâmico maciço) foi desprezado como material de composição das superfícies pela disseminação do Estilo Internacional, que privilegiava as superfícies rebocadas, brancas, aparentemente desprovidas de materialidade. Apesar de arquitetos bastante reconhecidos deste movimento, como Mies van der Rohe, Frank Lloyd Wright, Le Corbusier e Louis Kahn utilizaram o tijolo aparente com indiscutível êxito. Entre os casos latino-americanos, cabe destacar o trabalho do engenheiro uruguaio Eladio Dieste, do arquiteto colombiano Rogelio Salmona, do arquiteto paraguaio Solano Benitez, e do brasileiro Joaquim Guedes. O tijolo chegou ao século XXI alheio ao já superado antagonismo entre tradicionalismo e modernidade, mas ainda carregado dos estigmas de familiaridade e frequentemente relacionado às definições de arquitetura local ou regional (CAMERIN, 2016).

A construção de paredes de alvenaria de blocos cerâmicos ainda é, essencialmente, feita com as mesmas ferramentas e técnicas, apresentando baixa inserção de tecnologia no processo desde o século XIX, quando, em função da revolução industrial, começou-se a fazer tijolos de furação horizontal (DIAS, 2011).

No Brasil, a cerâmica tem seu berço na cultura indígena, mas foi somente com a chegada dos portugueses que trouxeram toda a estrutura necessária e concentraram a mão-de-obra dando início às primeiras olarias, que esta técnica evoluiu. O setor cerâmico é um dos principais ramos da construção e está presente em quase todos os canteiros de obras. Contudo, o processo ainda é muito artesanal, enfrentando grandes atrasos tecnológicos, sendo que ainda poucas empresas utilizam sistemas automatizados de produção e controle de qualidade de seus produtos (ROSSI, 2017).

Com o recente anseio por novas formas, cada vez mais complexas, nos mais distintos materiais, o tijolo foi perdendo o lugar de material de eleição para outros materiais que permitiam uma maior liberdade formal e expressiva (OLIVEIRA, 2015).

A arquitetura digital na década de 1990 estava predominantemente preocupada com novas estratégias de design auxiliado por computador e era frequentemente criticada por negligenciar questões de materialização e construção. A lacuna entre o que é digitalmente possível de projetar e o que é fisicamente viável de construir diminuiu quando, no início dos anos 2000, tecnologias se tornaram mais comumente disponíveis onde vem influenciando de maneira mais intensa o modo de produzir arquitetura (KOLAVERIC, 2003; BURRY e BURRY, 2010; WOODBURY, 2010; GRAMAZIO e KOHLER, 2014).

A expansão de conhecimentos nas áreas de robótica e programação alcança locais fora dos núcleos das áreas de engenharia. Antes este tema estava aderido às disciplinas da mecatrônica e aos sistemas de controle e automação. Entretanto, estudos de informática nas ciências sociais aplicadas têm colaborado para uma evolução no sentido transversal entre as áreas (CELANI E SEDREZ, 2018).

Assim a arquitetura, bem como o design têm se apropriado de temas diversos, como

desenho paramétrico, desenho generativo e processos automatizados na construção civil. Neste contexto o presente trabalho visa apresentar um processo de construção de paredes projetadas por métodos paramétricos e executadas em blocos cerâmicos em escala reduzida através do uso de um braço robótico, conferindo precisão no processo repetitivo e viabilizando a execução de estruturas com desenhos não convencionais.

Desenho paramétrico e design script

Com origem nas matemáticas, o termo *paramétrico* refere-se a um valor ou medida do qual algo depende, geralmente representado por uma variável, que pode ser alterada. O conceito de parametrismo no desenho tem sido associado à noção de variabilidade do desenho, especificamente no desenvolvimento da representação computacional de um objeto e da sua modelação geométrica (MITCHELL, 1995; MC CULLOUGH E MITCHELL, 2008).

Atualmente existem várias ferramentas de modelagem tridimensional que permitem ao projetista representar geometrias na tela do computador. No entanto, estas têm limitações que não permitem que o processo de modificação se realize rápida e facilmente. A concepção paramétrica oferece a possibilidade de encontrar novas maneiras de originar soluções e de controlar o processo de concepção. Desta forma, há tanto automatização no que diz respeito à definição de geometrias, como na geração de um modelo que permite alterações e/ou edições ao desenho de uma forma ágil e significativa (TEDESCHI, 2011).

A modelagem paramétrica, também conhecida como modelagem de restrições, introduz uma mudança no processo de concepção, relacionando e alterando a informação envolvida de forma sistematizada (WOODBURY, 2010).

O poder dos computadores está na sua capacidade de calcular rapidamente complexas fórmulas matemáticas. No âmbito do projeto de edifícios, este fato tem permitido viabilizar geometrias complexas, introduzindo a possibilidade de criar e manipular novas famílias de formas e de superfícies curvas. Novas ferramentas computacionais, em ambientes paramétricos, permitem programar as dependências entre componentes por meio do uso de variáveis, chamadas parâmetros. Estes permitem construir regras, traçar relações entre os pontos de uma curva, e definir o relacionamento e dependência entre eles. Portanto, as curvas derivadas deles capacitam a criação de superfícies curvas controladas parametricamente (FLORIO, 2011).

Para Florio (2011), há diferentes modos de estabelecer parâmetros. A Modelagem Paramétrica por *scripts* é extremamente eficiente para programar algoritmos complexos. No entanto, alguns *plug-ins*, como o *Grasshopper* e o *Paneling Tools*, têm facilitado o trabalho daqueles que não são programadores, ou mesmo daqueles que não possuem interesse em realizar a verdadeira programação.

As linguagens *script* para softwares CAD podem variar muito, não apenas em termos de sua sintaxe e estrutura, mas também em relação aos resultados que podem ser obtidos por sua aplicação. Alguns exemplos de linguagens de programação para aplicativos CAD são o Rhinoscript do Rhinoceros, o MEL do Maya, o MaxScript do 3DMax e o VBA ou Autolisp do AutoCAD (CELANI e VAZ, 2011).

Outro exemplo deste processo de programação visual é o Autodesk Dynamo. Este aplicativo permite explorar a programação através de conectores de fluxo de trabalho

em vários softwares, é desenvolvido em uma plataforma de código aberto que possibilita o aprimoramento contínuo.

Os ambientes de programação visual para modelagem paramétrica podem ser comparados às Linguagens de Programação Visual (VPLs), também chamadas de linguagem de programação diagramática. As VPLs permitem que os usuários criem programas por meio da manipulação de componentes gráficos em vez do uso de linhas de código. Em outras palavras, usam uma representação analógica para os algoritmos (CELANI e VAZ, 2011).

Nas plataformas BIM, onde a modelagem dos objetos é paramétrica, ao designar propriedades e variáveis a um determinado objeto é possível obter e intercambiar dados. Ao anexar um valor ou características específicas em uma peça ou produto obtém-se através de tabelas tanto o quantitativo como as propriedades dos mesmos, permitindo a interoperabilidade entre distintos programas. O benefício relacionado ao uso de elementos inteligentes e objetos paramétricos que, ao serem controlados automaticamente por um tipo variado de regras e atributos, fazem com que o projeto mantenha sua viabilidade, reduzindo a necessidade do usuário de gerenciar todas as pequenas mudanças de projeto (EASTMAN, *et al.*, 2014).

Fabricação robótica na arquitetura

Desde a *Visão do ano 2000*, por Villemard em 1910, na sua pintura é possível observar um arquiteto operando máquinas através de um painel de controle. Nas últimas décadas, estas utopias se tornaram realidade e os robôs atuam com inúmeras habilidades, na indústria automotiva. Esses equipamentos têm vários eixos de rotação, o que lhes dá uma grande liberdade de movimentação no espaço, podendo fazer tarefas mais complexas (BRELLOÇOKCAN e BRAUMANN, 2013).

De acordo com Mitchell (2001), os arquitetos tendem a desenhar o que conseguem construir e construir o que conseguem desenhar, por isso a aproximação da arquitetura à utilização de robôs tem criado um foco na resolução de falhas no trabalho manual, nomeadamente na ineficiência e na baixa produtividade.

Na última década, a fabricação robótica na arquitetura teve sucesso onde a arquitetura digital inicial falhou: na síntese da lógica imaterial dos computadores e do material realidade da arquitetura onde a reciprocidade direta do digital designs e produção arquitetônica em grande escala estão habilitados. Com robôs, agora é possível enriquecer radicalmente a natureza física da arquitetura, para informar os processos materiais e amalgamar design computacional e realização construtiva como marca registrada característica da arquitetura na era digital, levando ao surgimento de um fenômeno que descrevemos há alguns anos como materialidade digital (GRAMAZIO e KOHLER 2014, p.14).

No entanto, outras atividades artesanais envolvidas na construção também representam uma oportunidade ilimitada de pesquisa. É o caso da antiga atividade de alvenaria, que durante a década de 1990 obteve grande avanço com a implantação do ROCCO e do BRONCO, destinados à fabricação automatizada de alvenaria in loco (GRAMAZIO e KOHLER, 2014).

Atualmente pode-se citar algumas obras que utilizaram o desenho paramétrico e execução robótica: O *Tongxian Gatehouse*, *Z53 Social Housing* e o Centro de Documentação dos Direitos Humanos, são alguns exemplos bem sucedidos na implementação da tecnologia robótica aplicada a blocos cerâmicos.

Para Gramazio e Kohler (2014), o uso de um robô torna possível informar radicalmente os processos de construção de materiais e capacitar montagens espaciais complexas a partir de um grande número de pequenos elementos.

Materiais e métodos

Os referenciais teóricos e metodológicos mencionados na seção anterior foram utilizados no desenvolvimento de um fluxo de processo de montagem de uma parede paramétrica, da concepção à execução. Propõe-se demonstrar a aplicabilidade da adoção de um equipamento mecânico de baixo custo para a execução de paredes parametricamente modeladas, assegurando a montagem de um sistema complexo de disposição dos blocos cerâmicos com precisão e sem a necessidade de interferência humana.

Embora a utilização de equipamentos mecânicos para tal tarefa não seja novidade, propõe-se a construção e adoção de um equipamento feito de baixo custo e executado com placa lógica simples, materiais reconicionados e outros materiais amplamente disponíveis, permitindo a larga aplicação da técnica.

Para averiguar a eficácia e aplicabilidade do equipamento adotou-se a simulação como metodologia de trabalho, criando o equipamento mecânico e blocos em escala reduzida para posterior extrapolação dos resultados observados para o tamanho real.

Visando a transposição dos resultados para a escala real, utilizou-se miniaturas dos blocos cerâmicos e um mini braço robótico. Adotou-se as dimensões de mini blocos cerâmicos existentes, com características similares àquelas encontradas em blocos cerâmicos em tamanho real e utilizados na indústria da construção civil.

O mini braço robótico utilizado é composto por partes em MDF 3mm cortadas a laser e montadas com auxílio de parafusos, além de mini atuadores e sua fiação. O equipamento foi ligado a uma placa microcontroladora para permitir o posicionamento automatizado de cada mini bloco cerâmico.

Foram adotadas diferentes ferramentas com o objetivo de exemplificar e identificar as etapas para a execução do experimento. O Quadro 1 mostra o fluxo do método desenvolvido para realização da montagem da parede paramétrica, do processo de modelagem até a execução.

| A | B | C | D |
|---|--|--|---|
| Modelagem paramétrica | Obtenção de dados numéricos | Geração de código de posicionamento | Execução da parede |
| Elaboração do modelo da parede baseada em parâmetros como permeabilidade lumínica e conforto térmico. | Aquisição de valores de coordenadas cartesianas e ângulo de rotação dos elementos modelados. | Transformação de dados digitais em sinais analógicos para operação de posicionamento através de atuadores. | Operação de montagem da parede pelo posicionamento de cada bloco em sua posição pré-programada. |
| Modelagem no Revit e Dynamo. | Saídas criadas no Dynamo. | Programação em C++ para Arduino. | Atuação do braço robótico. |

Quadro 1: Fluxo do método desenvolvido. Fonte: dos autores, 2020.

O Quadro 1 apresenta quatro etapas em que se desenvolveu o experimento. A seguir serão descritas cada uma delas.

Etapa A - modelagem paramétrica

Como referência para a modelagem foram coletadas as dimensões dos cinco blocos mais comercializados por uma olaria da região. Cada um deles foi modelado conforme suas especificações, estruturais e de vedação, conforme descrito na Tabela 1.

| Tipos | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------------|---|---|---|---|---|
| Descrição | Estrutural | Vedação 1 | Vedação 2 | Vedação 3 | Vedação 4 |
| Dimensões LxAxP (cm) | 14x19x29 | 9x14x19 | 11,5x14x29 | 14x19x29 | 11,5x19x24 |
| Figura |  |  |  |  |  |

Tabela 1: Tipos de blocos e suas dimensões. Fonte: dos autores, 2020.

Os blocos cerâmicos foram modelados como famílias paramétricas no Software BIM Revit. Para a modelagem dos tipos utilizou-se o *template* de criação de família modelo genérico: métrico adaptativo. Primeiramente, criou-se um ponto adaptativo. Logo após, o plano de trabalho original foi redefinido para o do elemento recém criado. Gerou-se então um novo ponto, localizado sobre o anterior, e atribui-se a ele um novo parâmetro de restrição, de família e sobre instância, de ângulo de rotação. Deste modo, os blocos eram modelados a partir da extrusão de linhas referências criadas sobre o plano de trabalho do ponto que havia sido submetido ao parâmetro de rotação.

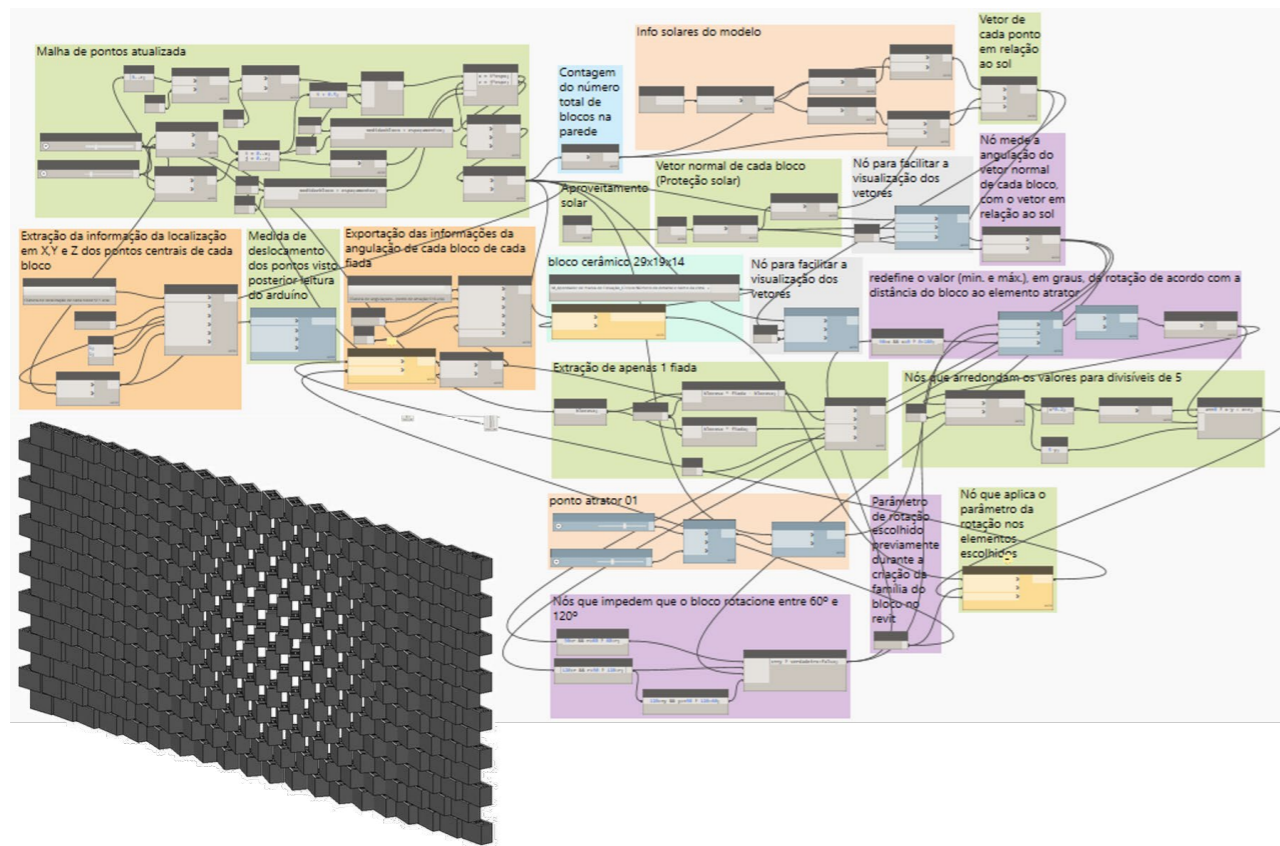
Os blocos foram modelados como paralelepípedos simples, representando as dimensões de largura, altura e profundidade apenas, sem as informações de ranhuras e furos. Deu-se dessa forma para que o processo posterior, da programação paramétrica no Dynamo, fosse mais leve, dinâmico e menos suscetível a falhas.

Após a modelagem da geometria do bloco, deu-se início à elaboração da parede paramétrica utilizando *Design Script* com o software Autodesk Dynamo Studio. Este processo de modelagem 3D consiste na união lógica de nós e criação de características específicas como instâncias de objetos e seus comportamentos. Isto possibilita a edição interativa, onde atribui-se valores aos parâmetros que por sua vez determinam as características dos modelos.

Depois de definir os parâmetros e os comportamentos desejados, pode-se atribuir isto a qualquer parede de blocos. Independente das dimensões, a parede sempre assumirá as características estabelecidas. A mudança ou edição de um parâmetro irá alterar toda a forma de maneira automática.

A Figura 1, a seguir, apresenta o modelo de parede projetado com a disposição paramétrica do bloco Tipo 1- Estrutural, utilizando o método descrito, para realização do teste de montagem com mini braço robótico.

Figura 1: Parede paramétrica modelada com Design Script na Interface do Dynamo. Fonte: dos autores, 2020



Qualquer parâmetro pode ser utilizado para determinar a rotação dos blocos, ou seja, pode-se utilizar como parâmetros a incidência solar, fluxo de vento ou mesmo parâmetros artísticos como a simulação de um padrão ou rotação em função de uma imagem ou foto. Além disso, é possível estipular regras que permitam ou facilitem a execução da parede, eliminando erros, como o percentual mínimo de sobreposição dos blocos entre fiadas ou mesmo distância máxima entre blocos de uma mesma fiada.

Etapa B - obtenção de dados numéricos

O processo de parametrização da parede no Revit possibilitou extrair o quantitativo de blocos utilizados e as coordenadas de cada bloco (fiada, posição na fiada e rotação) de forma a permitir a programação do braço robótico para sua execução.

A Tabela 2 apresenta os dados numéricos de 10 blocos da primeira fiada da parede modelada. Para esse conjunto de informações, definiu-se como parâmetros as coordenadas X, Y e Z, além da rotação de cada bloco. Esses dados servirão como *inputs* na programação do microcontrolador Arduino.

O processo descrito nesta etapa constitui uma amostragem para realização do experimento e pode ser adotado para todas as outras fiadas da parede. Por se tratar de uma parede elaborada através de modelagem paramétrica, é possível editar o formato da parede e extrair os dados de posicionamento dos blocos parametricamente, de maneira rápida e ágil.

| | Instância | Ordem (bloco / fiada) | Parâmetro de Posição (X,Y,Z) | Rotação (0-90°) |
|----|------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------|
| 1 | Bloco Estrutural | 01 / 1ª | 0, 0, 0 | 0 |
| 2 | | 02 / 1ª | 31, 0, 0 | 5 |
| 3 | | 03 / 1ª | 62, 0, 0 | 10 |
| 4 | | 04 / 1ª | 93, 0, 0 | 10 |
| 5 | | 05 / 1ª | 124, 0, 0 | 15 |
| 6 | | 06 / 1ª | 155, 0, 0 | 20 |
| 7 | | 07 / 1ª | 186, 0, 0 | 25 |
| 8 | | 08 / 1ª | 217, 0, 0 | 25 |
| 9 | | 09 / 1ª | 248, 0, 0 | 30 |
| 10 | | 10 / 1ª | 279, 0, 0 | 30 |
| 11 | | 11 / 1ª | ... | ... |

Tabela 2: Dados dos blocos da primeira fiada da parede. Fonte: dos autores, 2020.

Etapa C - geração de código de posicionamento

As coordenadas geradas no processo descrito na Etapa B estão em centímetros, sendo o primeiro bloco a origem do sistema (X=0, Y=0, Z=0 e Rotação=0). Os valores de coordenadas da Tabela 2 não podem ser inseridos diretamente na linguagem do microcontrolador Arduino, pois os servo motores que irão movimentar o braço robótico funcionam com rotação de 0 a 180 graus. O mini braço robótico utilizado neste experimento conta com 5 motores atuadores, identificados conforme a Figura 2.

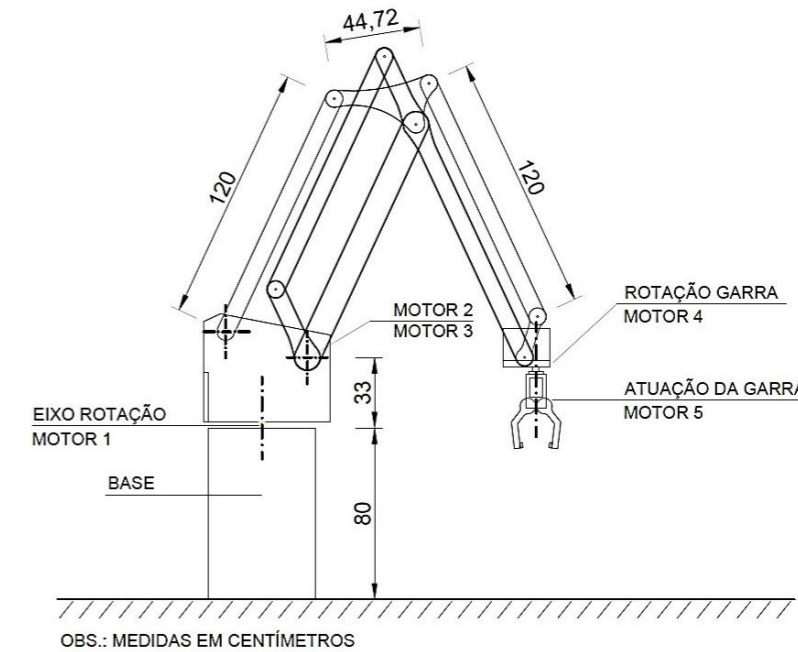


Figura 2: Motores atuadores do mini braço robótico. Fonte: dos autores, 2020.

A partir da identificação dos atuadores, torna-se necessário definir como se dará o movimento de cada servo motor para que o braço execute o posicionamento preciso dos mini blocos. Para isso criou-se um código que realiza o mapeamento de coordenadas com potenciômetros. As posições atribuídas no potenciômetro (leitura analógica de 0 a 1023) são transformadas em valores digitais (de 0 a 180) para que o servo motor gire de 0 a 180 graus. Esses valores são então obtidos pelo manuseio do potenciômetro e transferidos para o servo motor. Assim é possível verificar o movimento do mini braço robótico e fazer medições para estipular coordenadas no espaço.

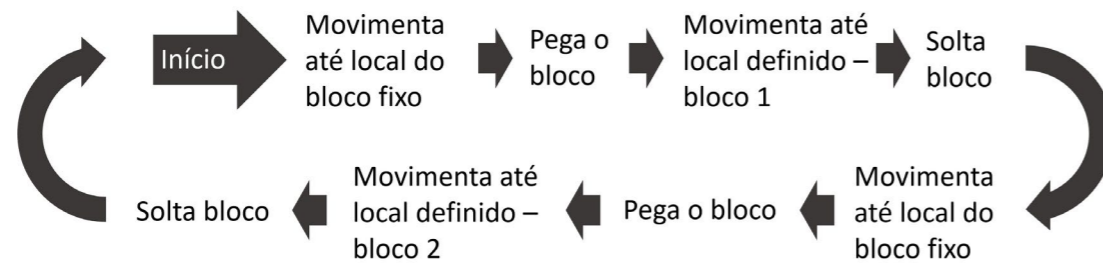
Este processo foi repetido diversas vezes até se obter os intervalos de valores de giro de cada atuador. O atuador que confere movimento de Sobre e Desce do braço,

por exemplo, teve como valor mínimo 115 e máximo 180, sendo o mínimo quando o braço robótico está posicionado com a garra mais abaixo, próxima a superfície onde está apoiado o braço e, o máximo quando o braço está com altura total em relação às suas limitações.

Após o mapeamento, foi possível transferir coordenadas no espaço em valores de giro dos servo motores, ou seja, as coordenadas de cada bloco foram transformadas em posições precisas através da programação do Arduino.

Entretanto, para posicionar cada bloco em seu local específico, é preciso as coordenadas de alocação de cada bloco bem como o local do estoque de matéria prima, ou seja, o local de retirada do bloco pelo braço robótico antes de posicioná-lo.

Este local pode ser fixo, sendo alimentado constantemente com um bloco para posicionamento subsequente, ou pode ser programado uma pilha de blocos em local determinado e mapeado. Para este experimento adotou-se um único local fixo, onde o mini braço foi sendo alimentado com um bloco a cada posicionamento do anterior. A Figura 3 mostra o ciclo de movimentos necessários para a montagem da parede paramétrica.



Os passos definidos no ciclo de movimentação do braço robótico foram implementados na linguagem C++, código para Arduino. Cada movimento definido no ciclo deve contemplar uma parte do código que gera o movimento de todos ou de parte dos atuadores.

O Quadro 2 mostra os dados necessários para o posicionamento de um bloco.

O posicionamento dos blocos é feito pela atuação conjunta dos servo motores. Cada um, por sua vez, movimenta uma parte do braço robótico.

O mini braço robótico utilizado no experimento teve sua movimentação suavizada pela implementação de uma série de *loops* de atuação para os servo motores, conforme demonstrado no Quadro 2. Cada movimento exigiu um valor diferente de retardo (*delay*), em milissegundos, considerando a extensão do movimento. Este processo faz com que o movimento seja menos brusco, evitando prejudicar a estrutura do mini braço robótico.

O código completo contemplou cada um dos 10 movimentos necessários para o posicionamento, repetindo todos para cada um dos 10 blocos da primeira fiada da parede paramétrica. Uma otimização no código poderia ser realizada utilizando polimorfismo na orientação a objetos e a criação de uma estrutura de classes. Isto poderia gerar um código em que os *inputs* (dados de posicionamento dos blocos) vindos da modelagem fossem inseridos de maneira mais dinâmica em um bloco inteiro, considerando variáveis que pudessem receber estes valores. Entretanto, essa otimização não foi aplicada nesta etapa da pesquisa.

| | Servo s1 Garra | Servo s2 Sobe/desce | Servo s3 Frente/trás | Servo s4 Giro | Servo s5 Rotação no eixo |
|-----------------|-------------------|--|---|---|--|
| Posição inicial | s1.write(2) | s2.write(72) | s3.write(20) | s4.write(177) | s5.write(1) |
| Pega bloco | | | for (i=20; i<=62; i+=1) {s3.write(i); delay(20);} | | |
| Fecha garra | s1.write(25); | | | | |
| Volta | | | for (i=62; i>=20; i-=1){s3.write(i); delay(40);} | | |
| Gira | | | | for (i=177; i>=136; i-=1) {s4.write(i); delay(20);} | |
| Posiciona | | for (i=72; i<=110; i+=1) {s2.write(i); delay(15);} | for (i=20; i<=85; i+=1) {s3.write(i); delay(15);} | | |
| Rotac. no eixo | | | | | for (i=1; i<=30; i+=1) {s5.write(i); delay(15);} |
| Abre garra | s1.write(2); | | | | |
| Volta | | for (i=110; i>=72; i-=1) {s2.write(i); delay(10);} | for (i=85; i>=20; i-=1){s3.write(i); delay(15);} | | |
| Rotac. no eixo | | | | | for (i=30; i>=1; i-=1) {s5.write(i); delay(15);} |

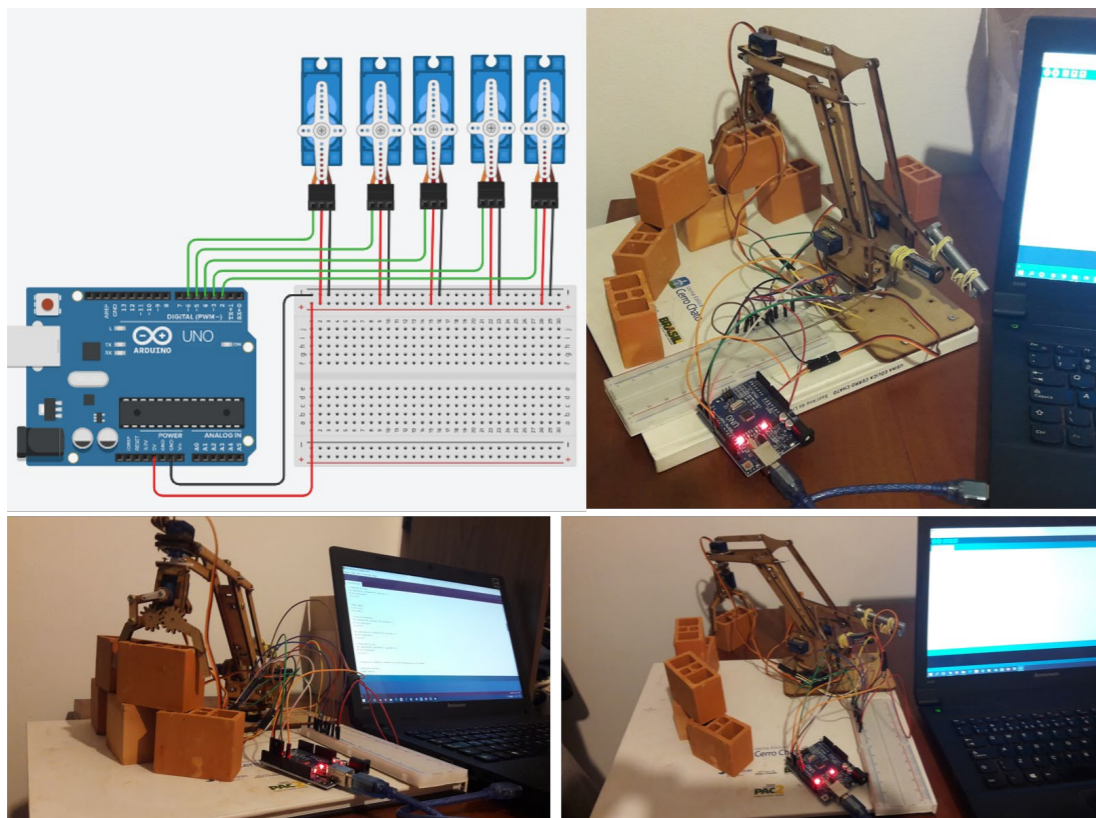
Figura 3: Ciclo de movimentos do braço robótico. Fonte: dos autores, 2020.

Quadro 2: Fluxo do método desenvolvido. Fonte: dos autores, 2020.

Etapa D - execução da parede

O experimento foi composto pela simulação de montagem da parede paramétrica com mini blocos cerâmicos por um mini braço robótico. Apesar da escala reduzida, o processo pode ser validado pela funcionalidade associada. Todos os elementos constantes no experimento atuaram de forma real, constituindo um protótipo funcional.

O sistema completo (braço robótico + microcontrolador Arduino) foi montado com auxílio do aplicativo Autodesk Tinkercad, onde se pode simular ligações de equipamentos eletrônicos e programar a atuação dos servo motores na linguagem C++, utilizada pelo micro controlador real. A Figura 4 mostra o esquema de ligação, principalmente dos 5 atuadores, e a ligação completa das partes que compõem o sistema, além de demonstrar o posicionamento de alguns mini blocos.



O protótipo é composto pelo mini braço robótico, que conta com partes em madeira, 5 mini servo motores *SG90 Tower Pro*, *jumpers* e cabos, um microcontrolador genérico do tipo Arduino UNO, uma placa de ensaio (*protoboard*) para realizar as ligações e um PC.

Na Figura 4 é possível ver que a garra (parte responsável por segurar os objetos que serão movimentados) está na posição vertical. Esta parte foi montada assim para permitir o giro da garra no próprio eixo, viabilizando o posicionamento dos mini blocos cerâmicos. A montagem da parede é realizada, por fiadas de baixo para cima, iniciando na primeira junto à superfície de apoio. A posição da garra permite tal montagem peça a peça sem interferir em blocos adjacentes, uma vez que é necessária precisão neste processo.

Todas as 4 etapas definidas na metodologia foram implementadas. O código elaborado com os dados de posições dos blocos foi carregado no microcontrolador e o conjunto foi ligado. Cada bloco foi posicionado conforme esperado.

Resultados e Discussões

A execução de uma parede modelada através de sistema paramétrico, onde cada bloco cerâmico apresenta uma posição e rotação específica e cuja execução requer um grau de precisão, se mostrou possível através do método apresentado. A execução manual de uma parede deste tipo exigiria maior tempo de um profissional qualificado em relação a uma parede mais convencional, dificultando ou inviabilizando a execução.

O método apresentado permitiu o desenho e planejamento da execução automatizada de paredes paramétricas através de quatro etapas: modelagem paramétrica, obtenção de dados de posições dos blocos modelados, geração de código de posicionamento para programação do microcontrolador e execução da parede com o mini braço

robótico.

A partir deste método é possível incorporar variáveis para, por exemplo, otimizar a luz solar considerando distintas orientações de fachadas, permitindo também uma solução tanto compositiva como ambientalmente adequada e executada com precisão. Também promove-se aqui a discussão sobre meios de construção que propiciem a integração de distintos saberes.

A partir da experiência deste trabalho, uma possibilidade futura procuraria ajustar as condições de assentamento dos blocos na escala reduzida de uma parede completa. As condições para a execução em escala real podem exigir uma mudança substancial no processo, uma vez que o um braço robótico para a escala real exige tanto o refinamento de técnicas e equipamentos como principalmente a disponibilidade orçamentária. Cabe salientar ainda que os blocos cerâmicos mais utilizados na região são os blocos vazados, de menor custo, porém, não há ainda estudos que comprovem a estabilidade dos blocos e variabilidade a partir dos eixos, neste caso, existe uma lacuna de pesquisa para a sistematização destes processos.

Conclusões

A execução do protótipo em escala reduzida, demonstra que é possível a projeção e execução de paredes com técnicas paramétricas através da utilização de braços mecânicos de estrutura eletrônica simples e baixo custo.

Embora a aplicação de braços robóticos para a construção de paredes de blocos cerâmicos já exista, a tecnologia ainda não está disseminada, nem tampouco é utilizada em larga escala em virtude do alto custo do maquinário, entre outros motivos.

Ao utilizar um braço robótico feito em MDF, com baixa complexidade eletrônica e sem a necessidade de motores mais potentes, este trabalho buscou apresentar e validar um método que pode ser utilizado por grandes construtoras ou empresas de tecnologia, mas também em construções convencionais e não convencionais de qualquer escala, em locais diversos e sem altos investimentos. Espera-se, com isso, possibilitar a ampla utilização de paredes paramétricas pela indústria e possibilitar a expansão da indústria através da incorporação destas novas tecnologias e modos de projeção.

Entende-se, no entanto, que ainda é necessária a transposição do conceito apresentado para a escala real. Os principais desafios para esta transposição de escala incluem a estruturação dos elementos em função do peso e em função do raio de alcance do braço, além dos elementos de fixação dos blocos.

Também se faz necessária a verificação da precisão alcançada em função dos elementos utilizados na construção do braço, já que pequenas variações de posicionamento na escala reduzida podem acumular e resultar em desalinhamentos severos na escala real.

O processo paramétrico, no que diz respeito a importação de dados, foi aqui apresentado e é sugerido como alternativa onde os conceitos de concepção e programação são combinados para serem adaptados. Procura-se ainda explorar as possibilidades existentes em torno do desenvolvimento de uma ideia que pode ser levada a cabo do processo paramétrico à execução robótica, viabilizando a execução de modelos não convencionais, e assim constituir-se uma forma de pensar os problemas neste campo.

Referências

BÄRTSCHIM Ralph; KNAUSS, Michael; BONWESTSCH, Tobias; GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias. Wiggled Brick Bond. In: *Advances in Architectural Geometry*. Vienna: Springer, 137-147, 2010.

BONWESTSCH, Tobias; KOBEL, Daniel; GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias. The Informed Wall: applying additive digital fabrication techniques on architecture. In: *Synthetic Landscapes: 25^a Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture*, Louisville. 2006.

BRELL-ÇOKCAN, Sigrid; BRAUMANN, Johannes. Industrial Robots for Design Education: Robots as Open Interfaces beyond Fabrication. Association for Robots in Architecture & TU Vienna, Vienna, Austria. In: *CAAD Futures 2013*, CCIS 369, pp. 109–117, 2013. © Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.

BURRY, Jane; BURRY, Mark. *The new mathematics of architecture*. London: Thames & Hudson, 2010.

BURRY, Mark. *Scripting Cultures Architectural design and programming*. John Wiley & Sons Ltd, 2011.

CAMERIN, Suelen. *O tijolo em Solano Benítez*. (Mestrado em Arquitetura). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura, 2016.

CELANI, Gabriela; VAZ, Carlos Eduardo. Scripts em CAD e ambientes de programação visual para modelagem paramétrica: uma comparação do ponto de vista pedagógico. In: *Anais do V Encontro de Tecnologia de Informação e Comunicação na Construção - TIC*, 1-13, Salvador: Ed. da UFBA, 2011.

CELANI, Gabriela; SEDREZ, Maycon. *Arquitetura Contemporânea: prática e reflexão*. São Paulo: Probooks, 2018.

DIAS, António Baio. *Uma Breve Retrospectiva de Soluções de Paredes de Elementos Cerâmicos*, in: Lourenço et al. (eds.). *Paredes divisórias: Passado, presente e futuro*, Portugal: Universidade do Minho, 2011.

EASTMAN Chuck; TEICHOLZ, Paul; SACKS, Rafael; LISTON, Kathleen. *Manual de BIM: Um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores*. Porto Alegre: Bookman, 2014.

FLORIO, Wilson. Modelagem Paramétrica, Criatividade e Projeto: duas experiências com estudantes de arquitetura. *Gestão e Tecnologia de Projetos* [ISSN: 19811543], v. 6, n. 2, 2011. DOI: 10.4237/gtp.v6i2.211.

GIL, Carlos. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 4. ed. - São Paulo: Atlas, 2002.

GRAMAZIO, F.; Kohler, M. *Digital Materiality in Architecture*: Lars Müller, 2008.

KOLAREVIC, Branko. *Architecture in the Digital Age: Design and manufacturing*. New York: Spon Press, 2013.

MIYASAKA, Elza L.; Vasconcelos; Tássia B. de; Scheeren, Rodrigo; Sperling, David e Fabricio Márcio M. *Hybrid cultures: design and construction strategies of complex*

shapes in Brazil in the first digital age. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/284714550_Fabricacao_digital_na_America_do_Sul_um_mapeamento_de_linhas_de_acao_a_partir_da_arquitetura_e_urbanismo. Acesso em 15/02/2021.

MITCHELL, William J. The theoretical foundation of computer-aided architectural design. *Environment and Planning B*, v. 2, n. 2, 127-150, 1975. Doi:10.1068/b020127.

MITCHELL, William J. *A Lógica da Arquitetura: projeto, computação e cognição*. Tradução de Gabriela Celani. São Paulo: Editora da USP, 2008. ISBN: 8523807986.

MITCHELL, William J.; MCCULLOUGH, Malcolm. *Design Digital Media*. Canada: John Wiley & Sons, 1995.

OLIVEIRA, Rui Miguel. *Possibilidades de desenho e construção digital em tijolo a partir da obra de Raúl Hestnes Ferreira*. Dissertação de Mestrado em Arquitetura. Universidade do Porto, 2015.

PEREZ, G. *Robotics in Architecture Potential applications and current limitation*. Disponível em: https://www.academia.edu/34623222/Robotics_in_Architecture_Potential_applications_and_current_limitations_Robotics_in_Architecture_Potential_applications_and_current_limitations. Acesso em 29/11/2020.

ROSSI, Camila. *Análise técnica dos tijolos maciços e blocos cerâmicos de vedação 6 furos produzidos na Região da Grande Santa Rosa - RS*. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Santa Rosa, 2017.

SOUZA, Livia; AMORIM, Sérgio; LYRIO, Arnaldo. Impactos do uso do BIM em escritórios de arquitetura: oportunidades no mercado imobiliário. *Gestão e Tecnologia de Projetos*, v. 4, n. 2, p. 26-53, 2009.

SCHEEREN, Rodrigo; SPERLING, David M. Technological appropriation and socio-technical adequacy in South America: applications of digital fabrication in architecture and design. In: *XXII Congresso Internacional Da Sociedade Iberoamericana De Gráfica Digital*. São Paulo, 2018. Anais Blucher Design Proceedings, 2018. v. 5. p. 1347-1354

TEDESCHI, Arturo. *Parametric Architecture with Grasshopper*. Brienza, Italia: Le Penser, 2011.

VARGAS, Milton. *Para uma filosofia da tecnologia*. São Paulo: Alfa-Ômega, 1994. p.171-286.

WOODBURY, Robert. *Elements of Parametric Design*. New York: Routledge, 2010. ISBN-10: 0415779871 | ISBN-13: 978-0415779876 0.