REVISTA DESIGN & TECNOLOGIA
ISSN: 2178-1974
2023, Vol. 13, No. 27
DOI 10.23972/det2023iss27pp83-92

PGDESIGN
www.pgdesign.ufrgs.br

Aumento da precisão por meio do uso de encaixes

Filipe M. de Campos[1]; Gabriela Celani[2]

1 *Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Tecnologia e Cidade, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, Brasil*

2 *Departamento de Arquitetura e Construção, FECFAU, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, Brasil*

RESUMO

A aplicação da montagem robótica em arquitetura vem sendo explorada desde a década de 1980, tendo como objetivo a montagem de estruturas e geometrias complexas. Independente do robô ou método de montagem utilizado, os modelos físicos finais apresentam diferenças em relação ao modelo digital. Estas diferenças se dão pelo fato dos equipamentos e peças não apresentarem precisão absoluta. Tendo em vista esta questão, quais estratégias podem ser utilizadas para aumentar a precisão dos processos de montagem? Esta pesquisa teve como objetivo analisar o uso de encaixes modificados (adaptados a partir de encaixes tradicionais) em madeira no processo de montagem robótica e como estes afetam a precisão do processo. Constatou-se que o uso destes encaixes modificados aumenta a precisão do processo de montagem, mesmo mantendo a alta tolerância dos robôs utilizados. Para realizar estas modificações no design dos encaixes e peças, utilizou-se os princípios do Projeto para Fabricação e Montagem (Design For Manufacturing and Assembly, ou DFMA), o qual tem como objetivo reduzir o número operações e peças no processo de montagem, tornando-o mais fácil, rápido e preciso. Para os experimentos foram selecionados dois tipos de encaixes: por pinos (sendo este uma variação da cavilha e furo-espiga) e rabo-de-andorinha. Ambos são amplamente utilizados na marcenaria tradicional. Os experimentos de montagem foram realizados utilizando robôs de baixo custo (braço robótico e cablebot). Para cada tipo de encaixe foram realizadas iterações incrementais de design visando a facilidade de montagem e o aumento de precisão do processo. Como resultado, as peças com encaixes modificados apresentaram maior sucesso de montagem, com aumento significativo na precisão do resultado. Como contribuição à área, foram identificadas e sistematizadas estratégias e diretrizes para a modificação de encaixes e suas possíveis aplicações.

PALAVRAS-CHAVE

Encaixes;
Robôs em arquitetura;
Montagem robótica;
Alta precisão;
Tolerância

Higher precision enabled by the use of joints

ABSTRACT

The application of robotic assembly in architecture has been explored since the 1980s, with the objective of assembling complex structures and geometries. Regardless of the robot or assembly method used, the final physical models differ from the digital model. Those differences are due to the equipment and parts not having absolute precision. Regarding that matter, what strategies can be used to increase the accuracy of assembly processes? This research aims to analyze the use of modified wooden joints (adapted from traditional joints) in the robotic assembly process and how they affect the accuracy of the process. It was verified that the use of these modified joints allows higher precision of the assembly process, even maintaining the high tolerance of the robots used. The modifications in the design of joints and parts followed the principles of Design for Manufacturing and Assembly (or DFMA), which aims to reduce the number of operations and parts in the assembly process, making it easier, faster, and more accurate. For the experiments, two types of joints were selected: by pins (this being a variation of the dowel and spike-hole) and dovetail. Both widely used in traditional joinery. The assembly experiments were carried out using low-cost robots (robotic arm and cablebot). For each type of joint, incremental design iterations were carried out aiming at easier assembly and increased accuracy. As a result, parts with modified joints were more successful in assembly, with a significant increase in process accuracy. Strategies and guidelines for modifying joints and possible applications were also identified.

KEYWORDS

Joints;
Robots in architecture;
Robotic assembly;
High precision;
Tolerance

CONTATO: Filipe M. de Campos – *filipecamposarq@gmail.com*

© 2023 – Revista Design & Tecnologia

1. INTRODUÇÃO

Desde a década de 1980, explora-se a aplicação de robôs em arquitetura (BRELL-ÇOCKAN, BRUMANN, 2012; SOUSA et al, 2016). Seu uso se dá, principalmente, na produção de peças únicas (BURRY, 2016) ou na montagem de estruturas ou geometrias complexas. Estas geometrias costumam apresentar posicionamento, orientação e rotações únicas para cada peça, ou inúmeras peças únicas, com baixa tolerância a erros de posicionamento. Esta variedade e a necessidade de grande precisão inviabilizam o uso de métodos tradicionais e manuais para a produção e montagem destas estruturas, sendo necessário o uso de robôs.

Diversos grupos de pesquisa realizaram aplicações robóticas na área de montagem em arquitetura. Um projeto icônico foi a fachada do Vinhedo de Gantenbein, realizado pelo escritório Gramazio & Kohler em 2006. Neste projeto, a intenção era criar a imagem de uvas através do efeito de pixels. Para isso, tijolos foram posicionados com angulações diferentes e empilhados utilizando-se um braço robótico industrial (BONWETSCH et al, 2007). A variação no ângulo dos tijolos permite diferentes aberturas, bem como áreas de sombra e luz, criando um efeito de pixels claros e escuro, gerando a imagem desejada.

Este exemplo utiliza a técnica de montagem por empilhamento de blocos, uma técnica que tem sido amplamente explorada. Nela, os blocos são posicionados em planos paralelos ao plano de base, com rotação somente no eixo perpendicular a este. O grupo Gramazio Kohler Research realizou diversos estudos com este método aplicado, principalmente, à construção de paredes de dupla curvatura, como o experimento Estruturas Oscilantes (DORFLER et al, 2016).

Além do uso de braço robótico e o método de empilhamento, outros tipos de robôs ou métodos foram explorados na montagem em arquitetura. Entre eles, podemos citar o uso de cablebots (SOUSA et al, 2016) e de drones (GRAMAZIO et al, 2014; MAYER et al, 2017; MIRJAN et al, 2016), além de métodos de posicionamento de peças no espaço tridimensional (com rotação nos três eixos) e métodos de tecelagem de fios.

Independentemente do robô ou métodos de montagem utilizados, os modelos físicos finais acabam sempre apresentando algumas diferenças em relação ao modelo digital. Estas diferenças se dão pelo fato de os equipamentos e peças não apresentarem precisão absoluta, seja no posicionamento, nos movimentos ou na geometria das peças. Precisão pode ser definida como a concordância entre resultados obtidos em testes de repetibilidade (ABNT NBR ISO 5725-1/2018), sendo obtida através destas diferenças. A precisão pode ser obtida através de diferentes métodos, tendo como base princípios estatísticos de repetibilidade e desvio (FIGLIOLA; BEASLEY, 2007).

Cada equipamento ou processo apresenta sua precisão própria. No experimento Estruturas Oscilantes do grupo Gramazio Kohler Research, por exemplo, a construção resultante apresentou uma precisão final de ±7mm (DORFLER et al, 2016).

Para todo o processo de montagem, é fundamental levar em conta a precisão dos equipamentos e processos. Se a precisão representa as características estatísticas de um equipamento ou processo, a tolerância diz respeito ao quanto se aceita de diferença entre as características virtuais ou hipotéticas e as características reais do produto ou processo. A determinação da tolerância costuma anteceder a escolha do equipamento ou processo utilizado, analisando se a precisão destes está dentro da tolerância estabelecida. Dependendo da aplicação, uma precisão de posicionamento de ±1mm, por exemplo, pode estar dentro da tolerância esperada (como é o caso da construção civil tradicional) ou inviabilizar o projeto (como é o caso de componentes eletrônicos).

Contudo, será possível utilizar um equipamento com uma precisão menor do que a necessária? Quais estratégias tomar quando há limitações de equipamentos e hardware?

Para responder estas perguntas é fundamental compreender alguns aspectos do processo de montagem. No processo de montagem os componentes devem ser (1) pegos pelo robô em uma posição e orientação determinada, (2) movimentados sem que haja colisão com peças já posicionadas ou danos à peça em movimento, (3) posicionados corretamente de acordo com as demais peças existentes e (4) fixados na posição correta, antes que sejam soltos pelo robô.

Existem diversos métodos e produtos que podem ser utilizados para a fixação ou estabilização das peças, como uso de resinas, adesivos ou parafusos (SONDERGAARD et al, 2016; GRASER et al, 2020). Contudo, estes não apresentam a função de auxiliar no aumento da precisão do processo. Outro método é o uso de encaixes, o qual quase não foi explorado nas aplicações de montagem robótica em arquitetura. Os encaixes podem desempenhar a função de correção no posicionamento, aumentando a precisão do processo. Para isso, é necessário utilizar estratégias de projeto relacionadas à correção de curso e direcionamento geométrico.

Esta pesquisa tem como objetivo analisar o uso de encaixes adaptados para a montagem robótica e como estes afetam a precisão e a tolerância do processo. Acredita-se que o uso destes encaixes modificados permite um aumento da precisão do processo de montagem, mantendo alta tolerância dos robôs utilizados. Para realizar modificações no design de encaixes tradicionais, utilizou-se os princípios do Projeto para Fabricação e Montagem (*Design For Manufacturing and Assembly*, ou DFMA).

1.1 Projeto para fabricação e montagem (DFMA)

O Projeto para Fabricação e Montagem tem como objetivo reduzir o número operações e peças no processo de montagem, tornando-o mais fácil de realizar (BOOTHROYD et al, 2011). Métodos tradicionais de projeto priorizam fatores de produção e material gasto, podendo resultar em maior número de peças, complexidade na montagem e necessidade de ajustes manuais (BOOTHROYD et al, 2011). A automação da montagem visa reduzir ou eliminar a necessidade de ajustes manuais e aumentar a eficiência na montagem. Sabe-se que os processos de fabricação têm impacto decisivo no projeto e design das peças (NOLTE, WITT, 2014). Portanto, o mesmo deve ocorrer com os processos de montagem, visando sua automação.

O procedimento de montagem deve ser levado em consideração e planejado desde o projeto conceitual, de forma a obter um design que unifique as soluções de fabricação e montagem. Ao reduzir o número de peças e levar em conta as operações de montagem, este método de projeto pode reduzir os erros e tornar o processo mais rápido (BOOTHROYD et al, 2011).

Considerando a montagem com robôs e o foco na questão de precisão e tolerância, nesta pesquisa selecionou-se como estratégias para as modificações dos encaixes (1) o uso de guias ou superfícies inclinadas para direcionar o movimento das peças, (2) o arredondamento de cantos e (3) a redução das folgas entre peças ao mínimo necessário. Outras estratégias, como ordenação das camadas do produto ou uso de assimetria no encaixe, podem ser utilizadas em outros casos, tipos de montagem e produtos.

Como citado acima, outros projetos de pesquisa utilizaram-se de adesivos, resinas ou parafusos para fixar ou estabilizar as peças, a quais são operações complexas e

demoradas de se realizar (BOOTHROYD et al, 2011). Por isso, nesta pesquisa estas operações e métodos foram desconsiderados.

1.2 Encaixes em madeira

Encaixes podem ser fabricados em diversos materiais e utilizando diferentes métodos de fabricação. Na indústria automotiva, por exemplo, são comuns encaixes em peças de plástico (como ABS) fabricadas por métodos de injeção de plástico.

Nesta pesquisa, utilizou-se a madeira como material, por sua versatilidade, facilidade de fabricação e existência de uma grande variedade de soluções de encaixes tradicionais. Foram utilizados métodos de fabricação subtrativa, tendo em vista o material escolhido e as geometrias utilizadas.

Diversas culturas desenvolveram e utilizam encaixes em madeira, criando diferentes efeitos visuais ou para diferentes distribuições de forças. Na cultura japonesa, por exemplo, a arte de marcenaria é de extrema importância, sendo usados encaixes feitos com técnicas tradicionais até hoje (KANASAKI; TANAKA, 2013). Estes encaixes podem ser vistos em templos, arquitetura tradicional e até em peças de mobiliário. Entre os encaixes tradicionais utilizados, existem mais de duzentos tipos diferentes (KANASAKI; TANAKA, 2013), podendo apresentar sistemas de travamento de peças, conexão entre mais de duas peças e outros.

Outras culturas também desenvolveram encaixes próprios, ou absorveram os encaixes de outras culturas. Independentemente da origem e cultura, alguns tipos de encaixes e conexões são mais utilizados, normalmente por sua versatilidade e simplicidade. Dentre estes podemos citar a junta de topo (a mais simples de todas, mas que depende de adesivo ou parafusos), meia-madeira, lingueta-ranhura, rabo-de-andorinha, furo-espiga e com cavilhas (Figura 1).

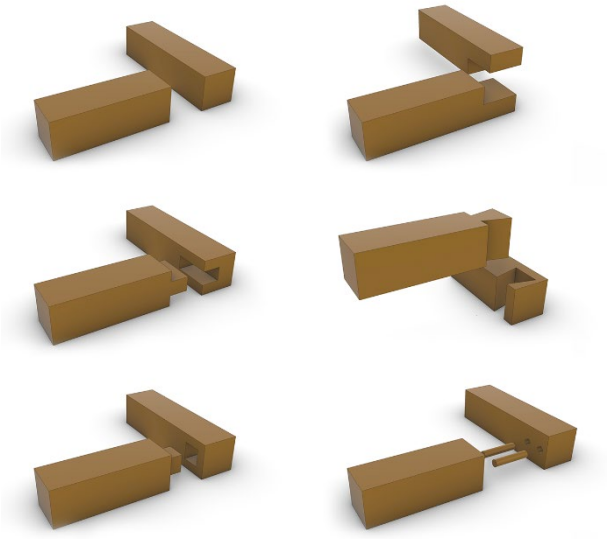


Figura 1 Modelos de conexões em madeira, respectivamente: junta de topo, meia-madeira, lingueta-ranhura, rabo-de-andorinha, furo-espiga e cavilhas. (Fonte: Elaborado pelos autores)

Estes encaixes foram adaptados anteriormente em diversos projetos para a fabricação digital ou modificados para uso não-ortogonal em geometrias complexas. Estas adaptações costumam apresentar cantos arredondados e outras características de projeto intrínsecas à fabricação digital, diferenciando-se dos encaixes fabricados manualmente.

Nesta pesquisa foram selecionados dois encaixes para serem modificados: por pinos (sendo este uma variação da cavilha e furo-espiga) e rabo-de-andorinha. Ambos foram escolhidos por serem amplamente utilizados na marcenaria tradicional e foram empregados de modo a permitir a conexão entre peças de modo vertical e horizontal, respectivamente.

2. MÉTODOS E MATERIAIS

Esta pesquisa é do tipo exploratória e experimental (GROAT; WANG, 2013), com foco em métodos de montagem robótica e fabricação digital. Utilizando-se de experimentos práticos, ela se insere na metodologia *Research By Design* (HAUBERG, 2011).

Os modelos foram fabricados utilizando uma fresadora CNC Roland MDX 540, com eixo rotacional. Este equipamento permite realizar o desbaste superior e depois efetuar a rotação de 180° para desbaste na face inferior.

A montagem foi realizada com dois robôs: braço robótico MyCobot Pi da Elephant Robotics e um cablebot, o qual foi desenvolvido pelo autor (Figura 2). O braço robótico apresenta seis graus de liberdade e alcance de 280 mm. O cablebot é composto por uma garra que é movimentada a partir de quatro cabos, os quais estão conectados a motores de passo. A garra apresenta rotação de 360° e a área de movimentação pode ser ajustada de acordo com a necessidade do projeto.

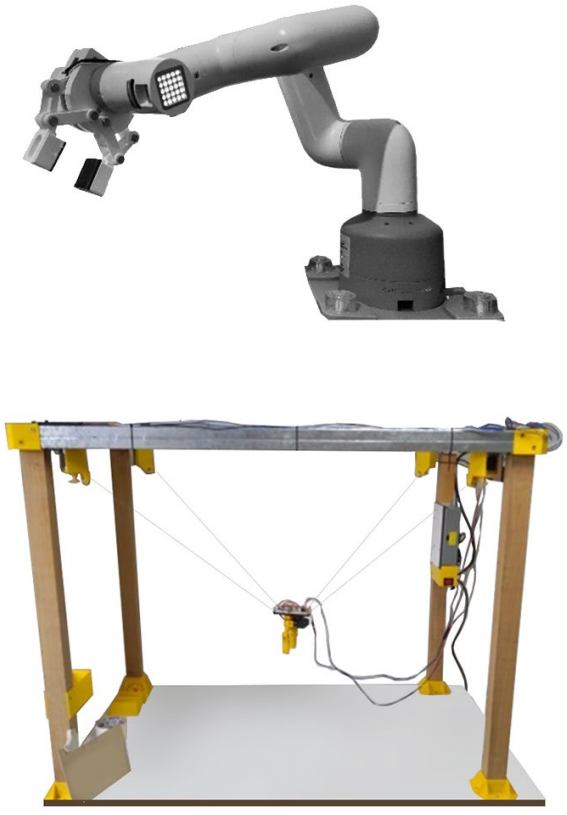


Figura 2 Braço robótico MyCobot Pi (imagem superior) e cablebot (imagem inferior). (Fonte: Elaborado pelos autores)

A verificação do posicionamento das peças resultante da montagem robótica foi realizada utilizando o digitalizador por pontos MicroScribe G2LX. Após realizada cada montagem, os vértices principais dos blocos foram digitalizados, permitindo recriar o modelo físico no ambiente digital do programa Rhinoceros e sobrepô-lo ao modelo original, utilizado na programação dos robôs.

Para cada tipo de encaixe foram realizadas iterações incrementais de design visando a facilidade e o aumento de precisão do processo de montagem. As modificações realizadas seguiram os princípios do design para fabricação e montagem

(DFMA) citados anteriormente. Em cada caso, analisou-se a facilidade de montagem robótica e a precisão do processo.

Diversos métodos podem ser utilizados para aferir a precisão do processo de montagem. Entre eles, podemos citar: (1) através do desvio padrão dos resultados de medição e (2) intervalo dos resultados de medição (ABNT NBR ISSO 5725-1/2018; FIGLIOLA; BEASLEY, 2007; CHUI et al, 2009). Nesta pesquisa será utilizado o segundo método (intervalo dos resultados, em sua totalidade), por ter uma variação maior e ser mais abrangente. A precisão foi medida em valores absolutos.

3. EXPERIMENTOS

Foram realizados três séries de experimentos: (1) um experimento preliminar visando determinar a precisão dos robôs utilizados, (2) montagem com o encaixe por pinos e (3) montagem com o encaixe rabo-de-andorinha. O experimento preliminar consistiu na montagem de duas paredes em escala reduzida, uma reta e a outra com curvatura. Foram utilizados onze blocos de isopor sem encaixes com dimensões de 6 x 4 x 2,5 cm. O experimento apresentou quatro fases: modelagem digital, montagem robótica de modelo físico, digitalização do modelo físico e comparação com o modelo digital, conforme a Figura 3.

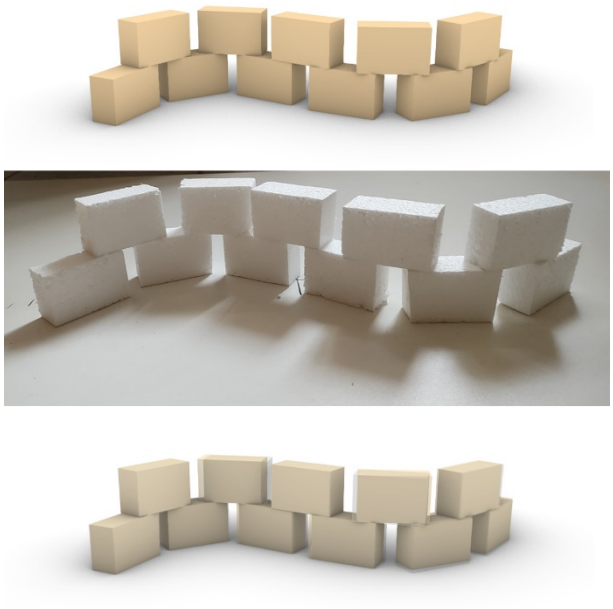


Figura 3 Modelo digital inicial, modelo físico e sobreposição do modelo digitail inicial e modelo digitalizado. (Fonte: Elaborado pelos autores)

A montagem foi realizada tanto com o braço robótico quanto com o cablebot, visando determinar a precisão de cada robô. Como citado, para avaliação da precisão considerou-se a maior diferença entre o modelo digital inicial e o modelo digitalizado como o valor para a precisão do robô. Deste modo, o processo de montagem utilizando o braço robótico apresentou uma precisão de ±4mm, enquanto o processo utilizando o cablebot apresentou uma precisão de ± 12mm.

Para cada tipo de encaixe analisado foram realizadas três etapas: (1) montagem inicial do sem modificações do encaixe, (2) iterações incrementais de modificações com análise de sua influência na montagem e (3) montagem do encaixe modificado final e análise de precisão.

As modificações realizadas para cada encaixe variam de acordo com as características intrínsecas a eles. Contudo, foram seguidos os princípios do design para fabricação e montagem citados anteriormente: (1) o uso de guias ou superfícies inclinadas para direcionar o movimento das peças, (2) arredondamento de cantos retos e (3) redução das folgas entre peças ao mínimo necessário. Em especial a inclinação de faces – ou chanfros – visa permitir o redirecionamento das peças durante a montagem, realizando a correção de seu posicionamento, como demonstrado na Figura 4.

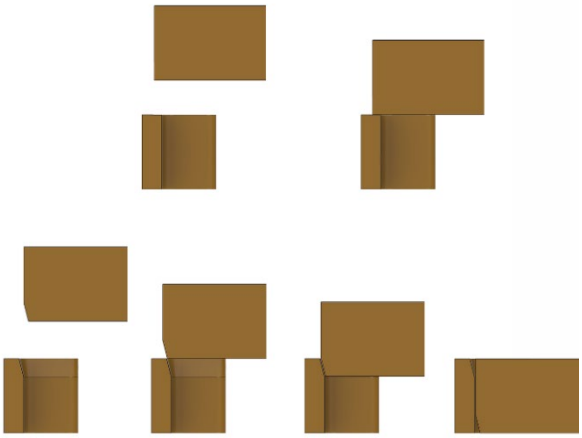


Figura 4 Exemplo de montagem sem chanfro e com chanfro, demonstrando a correção realizada na montagem. (Fonte: Elaborado pelos autores)

As peças sem chanfros não permitem o redirecionamento da peça no caso de uma colisão, impossibilitando a montagem. Já no caso de uso de chanfros ou superfícies inclinadas, adotamos como hipótese que, mesmo com variações no posicionamento, ao invés de ocorrer a colisão das peças, haveria o redirecionamento destas, de modo a corrigir o posicionamento. Esta correção permitiria a montagem correta e o aumento de precisão do processo.

O uso de cantos arredondados está relacionado, principalmente, à fabricação das peças. Os equipamentos de fabricação subtrativa comumente utilizados empregam fresas cuja secção é circular, não permitindo que o encontro de faces ocorra com faces planas, exceto em ângulos maiores que 180°. Deste modo, torna-se necessário este arredondamento.

Os testes de folga permitem identificar qual a folga mínima para cada caso, levando em conta a força necessária para realizar o encaixe e o torque dos robôs utilizados. Quanto maior a folga, menos preciso o processo se torna, devido à possibilidade de movimentação no encaixe. Contudo, na redução desta diferença, faz-se necessário o uso de maior força para poder realizar o encaixe. Deste modo, é necessário equilibrar a folga entre a força necessária para realizar o encaixe e o deslocamento possível.

3.1 Encaixe por pinos

O encaixe por pinos é uma variação do encaixe por cavilha e furo-espiga, no qual o pino está incorporado à peça e tem a função de unir a outra peça. Pode ser considerado uma peça com cavilha embutida ou um furo-espiga com perfil circular, ao invés do perfil retangular tradicional. Seu funcionamento é similar ao dos blocos de montar da marca Lego, e foi utilizado nesta pesquisa de forma a se realizar o empilhamento em camadas, de modo que os pinos unam os blocos de uma camada com a camada seguinte.

O encaixe inicial foi projetado com pinos de 10mm, com orifícios de 13mm, levando em conta o arredondamento causado pela fresa. Os blocos projetados possuem dimensões totais de 10 x 4,6 x 4,3 cm. Foram testados três encaixes, sendo estes: sem folga, com folga de 0,5mm, 1mm e 1,5mm. Neste

caso, não foram usados chanfros, nem superfícies inclinadas. A montagem manual do encaixe apresentou facilidade na montagem para folga de 0,5mm, 1mm e 1,5mm, sendo necessário aplicar força para realizar a montagem sem a folga. A Figura 5 apresenta as peças deste experimento.

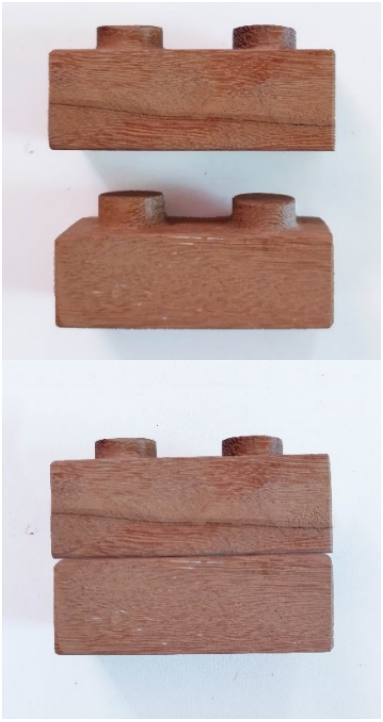


Figura 5 Encaixe por pinos sem modificação. (Fonte: Elaborado pelos autores)

Foi realizada a tentativa de montagem com ambos os robôs com o encaixe por pinos sem modificações com folga de 0,5mm. O encaixe apresentou baixo sucesso nos testes de montagem por ambos os robôs.

A seguir, foram realizados os testes de montagem com as variações do encaixe quanto à folga, área inclinada, inclinação e dimensões do encaixe. Estas modificações foram feitas de modo incremental, se sequência citada acima.

A folga se deu pela diferença entre os raios do pino e do orifício (entre 11mm e 13mm). Considerando uma variação de 0,5mm para cada teste. Foram testadas folgas de 0,5mm até 2mm.

A porcentagem de área inclinada foi testada em três situações: considerando inclinação somente no pino, somente no orifício ou em ambos. Em todos foi usada, inicialmente, inclinação de 45°. Foram aplicados os valores de 30% a 70% de área inclinada. No caso de área inclinada em ambos, notou-se que havia pouca área sem inclinação com contato entre o pino e o orifício, podendo causar deslocamentos e diferença no posicionamento. Entre a inclinação somente no pino e somente no orifício, as variações de inclinação somente no orifício apresentaram maior retirada de material se comparada à inclinação somente no pino. Deste modo, selecionou-se a inclinação somente no pino, com 60% de área inclinada.

A inclinação variou entre 30°, 45° e 60°, considerando a área de inclinação definida anteriormente. O ângulo de 30° apresentou uma correção menor no posicionamento, enquanto o de 60° apresentou maiores dificuldades na montagem. O ângulo de 45° apresentou um bom equilíbrio entra a correção e a facilidade na montagem.

A altura do pino variou entre 10mm e 13mm. A profundidade do orifício apresentou a mesma variação, sendo que a profundidade do orifício foi até 2mm maior que a altura do pino. Deste modo, ficou um espaço livre na área interna no encaixe de até 2mm. A relação entre a altura do pino e área inclinada é fundamental para definir a área de contato entre as duas peças, visando maior estabilidade na montagem. Já a diferença entre o pino e o orifício permite um espaço para possíveis diferenças na fabricação. Estas características foram testadas de modo incremental de acordo com o Figura 6.

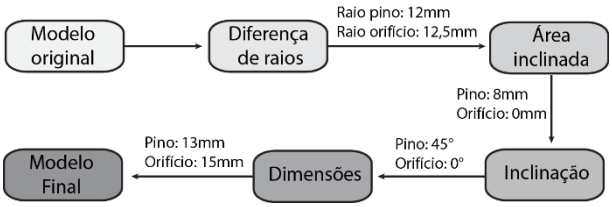


Figura 6 Fluxograma de testes do encaixe por pinos. (Fonte: Elaborado pelos autores)

O modelo final apresentou uma folga de 1mm (pino com raio de 12mm e orifício com raio de 12,5mm), com 8mm de superfície inclinada no pino (60%) e sem inclinação no orifício, angulação de 45° nas superfícies inclinadas e altura de 13mm no pino e profundidade de 15mm no orifício (diferença de 2mm). Foi necessário considerar também o arredondamento causado pela fresa, sendo necessário incluir um sulco na base do pino, visando aumentar a área de contato. A Figura 7 apresenta o desenho técnico e a peça fabricada final e comparativo com o protótipo inicial. A montagem por empilhamento foi testada com ambos os robôs, ocorrendo sucesso na montagem, como se pode ver na Figura 8.

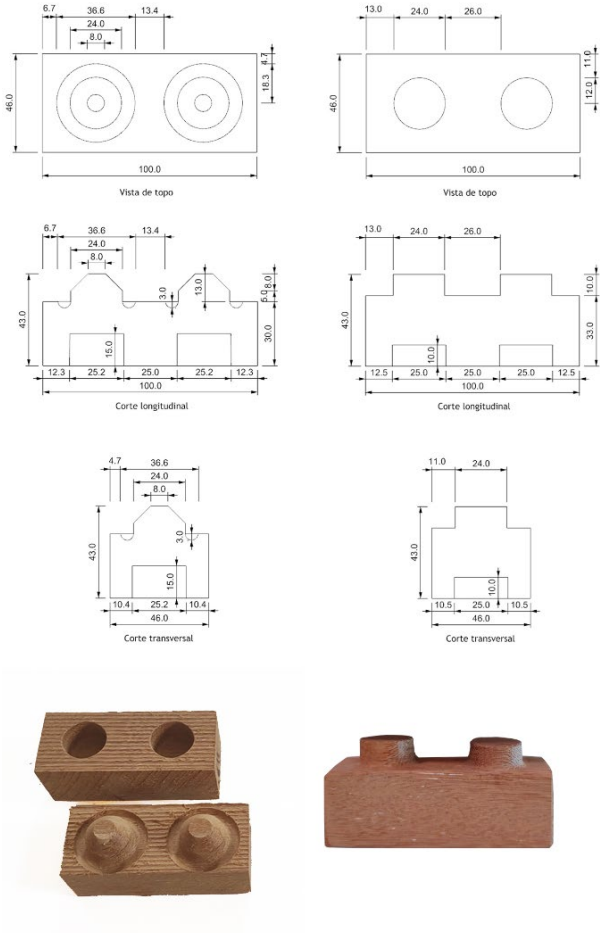


Figura 7 Desenho técnico do encaixe por pinos final (sem escala) e seu modelo físico à esquerda e modelo inicial à direita. (Fonte: Elaborado pelos autores)

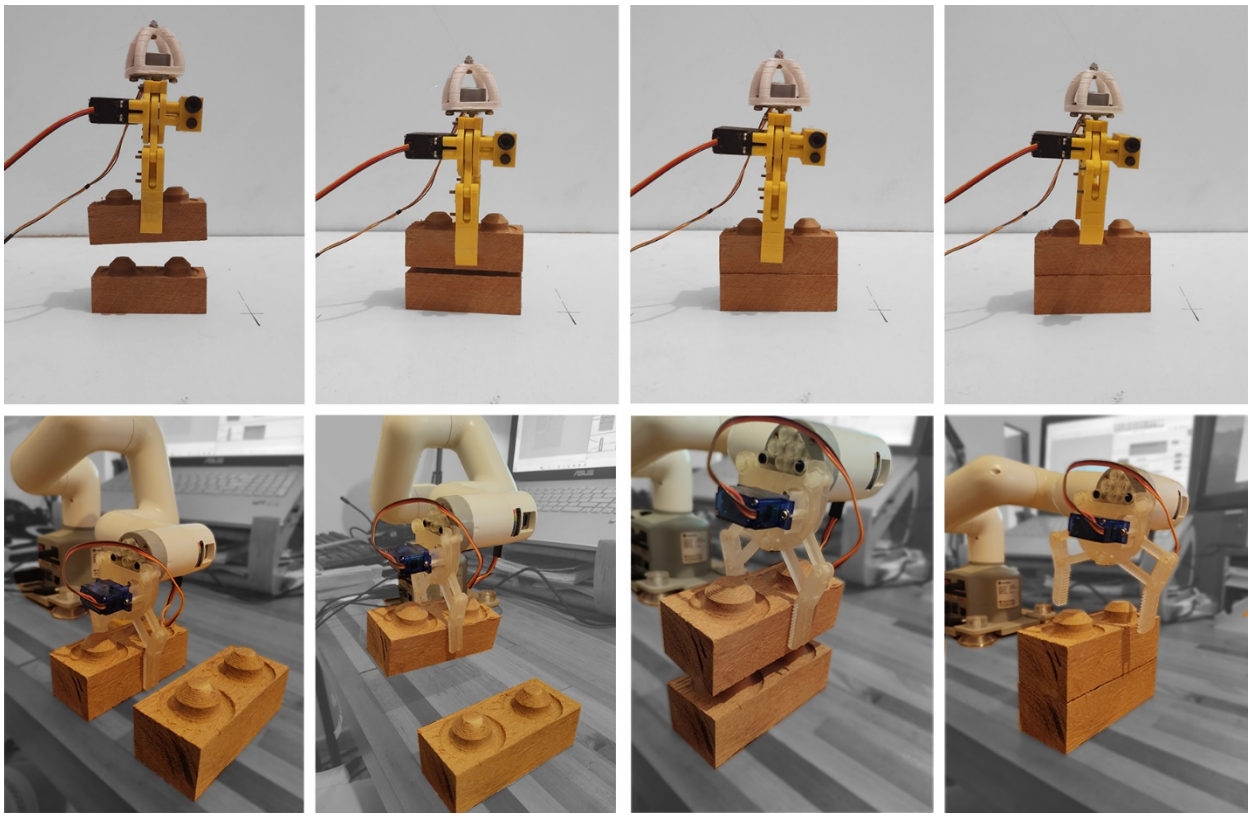


Figura 8 Teste de montagem do encaixe por pinos modificado utilizando cablebot (sequência superior) e braço robótico (sequência inferior). (Fonte: Elaborado pelos autores)

3.2 Encaixe rabo-de-andorinha

O encaixe tipo rabo-de-andorinha é amplamente utilizado em diversas indústrias, inclusive a moveleira, devido à resistência do encaixe quanto à tração. Este apresenta uma lingueta na qual a ponta do encaixe é maior do que a base do encaixe.

Para a fabricação das peças, que possuem dimensão de 15 x 4,6 x 4,5cm, foi necessário arredondar as quinas do encaixe, pela geometria da fresa utilizada. Para os testes com o encaixe original, foram fabricadas peças sem folga e com folga de até 1,5mm, com variação de 0,5mm cada. Além da inclinação tradicional da peça, outras inclinações ou chanfros não foram utilizados. A peça sem folga teve sua montagem manual bem-sucedida (Figura 9). Contudo, esta apresentou baixo sucesso nos testes de montagem com o braço robótico e não teve sucesso na montagem utilizando o cablebot.

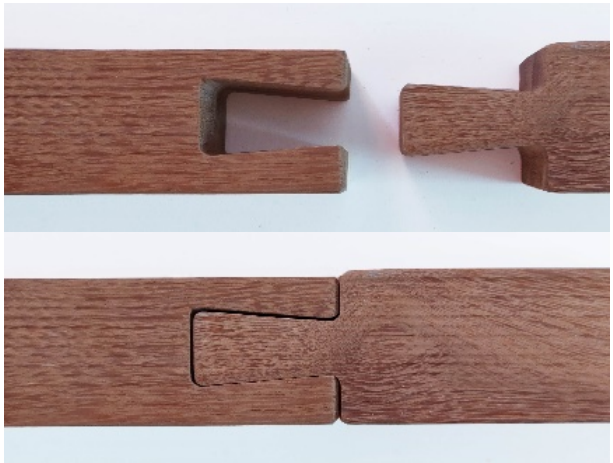


Figura 9 Montagem manual do encaixe rabo-de-andorinha sem modificações. (Fonte: Elaborado pelos autores)

As peças com folga de 0,5mm até 1,5mm apresentaram deslocamentos de 2mm até 11mm, como se pode ver na Figura 10. Considerando que este tipo de encaixe naturalmente é utilizado quando se deseja travar a peça no sentido da lingueta, deve-se evitar a ocorrência deste tipo de deslocamento, ou seja, reduzir ao máximo a folga entre encaixes.

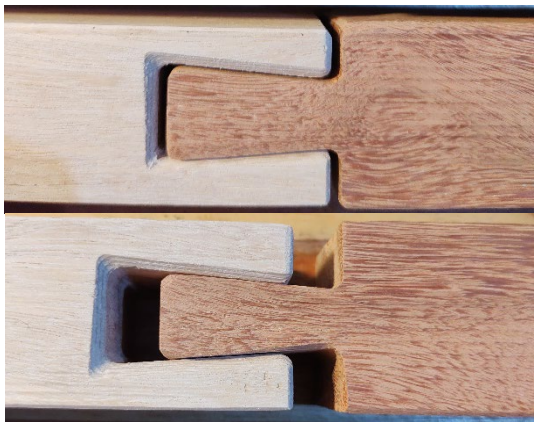


Figura 10 Deslocamentos no encaixe rabo-de-andorinha com tolerância de 0,5mm e 1,5mm. (Fonte: Elaborado pelos autores)

No encaixe rabo-de-andorinha modificado, houve limitações nas dimensões dos blocos e inclinação em função do método de produção utilizado (fresadora CNC de 3 eixos com eixo rotacional MDX 540 Roland). Devido ao alcance da fresa e geometria da peça, modificou-se o projeto do encaixe, de modo que cada bloco produziu duas peças, ao invés de uma. Deste modo, as peças finais apresentaram 15 x 4,6 x 22,5 cm.

Foram realizadas modificações quanto à folga do encaixe, inclinação e dimensão do encaixe. Os testes do encaixe sem

modificação demonstraram que a presença de áreas não inclinadas requeria maior força para realizar a montagem, caso a folga fosse pequena ou nula. Levando em conta este resultado preliminar, optou-se por considerar que as faces da lingueta apresentariam inclinação em toda sua extensão.

A folga se deu pela diferença entre as partes positiva e negativa do encaixe. Considerou-se os modelos sem diferença de tamanho e de até 2mm, com variação a cada 0,5mm.

A inclinação variou entre 34°, 24° e 12,5° que correspondem, respectivamente, a uma diferença entre o perfil superior e inferior de 15mm, 10mm e 5mm. A inclinação foi limitada pela geometria da peça e proporções do encaixe. Inclinações maiores do que 34° necessitariam de peças mais largas ou com redução do perfil inferior da lingueta, que poderiam comprometer a utilização desta.

A dimensão da lingueta variou entre 50mm e 25mm. Os modelos iniciais apresentavam 50mm e notou-se que poderiam apresentar limitações de uso, além de haver maior gasto de material. Com o uso da lingueta de 25mm houve redução do material utilizado, sem diferenças no processo de encaixe, permitindo outros usos além do testado.

Durante os testes, notou-se que os modelos com folga de até 1mm apresentavam baixo ou nenhum deslocamento, devido às superfícies inclinadas. No caso de deslocamento, a peça tende a travar, devido ao atrito entre as duas peças

O modelo final apresentou uma folga de 0,5mm, com inclinação de 12,5° em todas as superfícies do encaixe e tamanho do encaixe de 25mm. Como citado antes, em consequência do método de produção, houve uma redução na altura de cada bloco para 22mm. Foi necessário considerar o arredondamento dos ângulos, sendo que nos ângulos agudos foi adotado o raio de 3mm e nos ângulos obtusos o raio de 4mm. A Figura 11 apresenta o desenho técnico da peça e as peças fabricadas. A montagem por empilhamento foi testada com ambos os robôs, ocorrendo sucesso na montagem, como se pode ver na Figura 12.

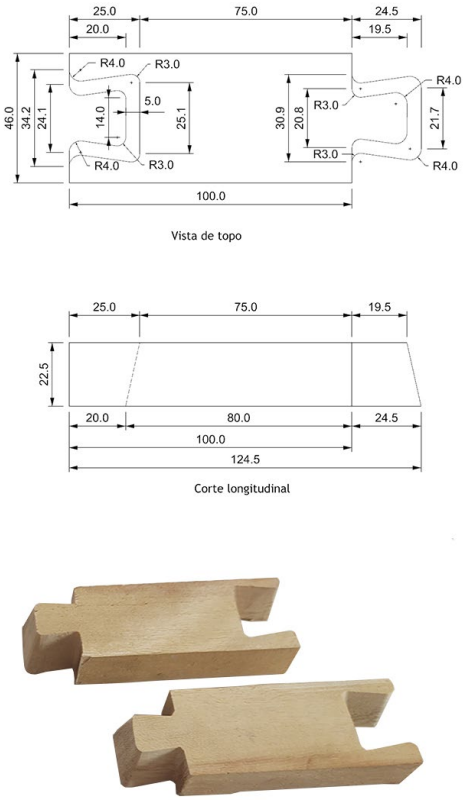


Figura 11 Desenho técnico do encaixe rabo-de-andorinha (sem escala) e seu modelo físico. (Fonte: Elaborado pelos autores)

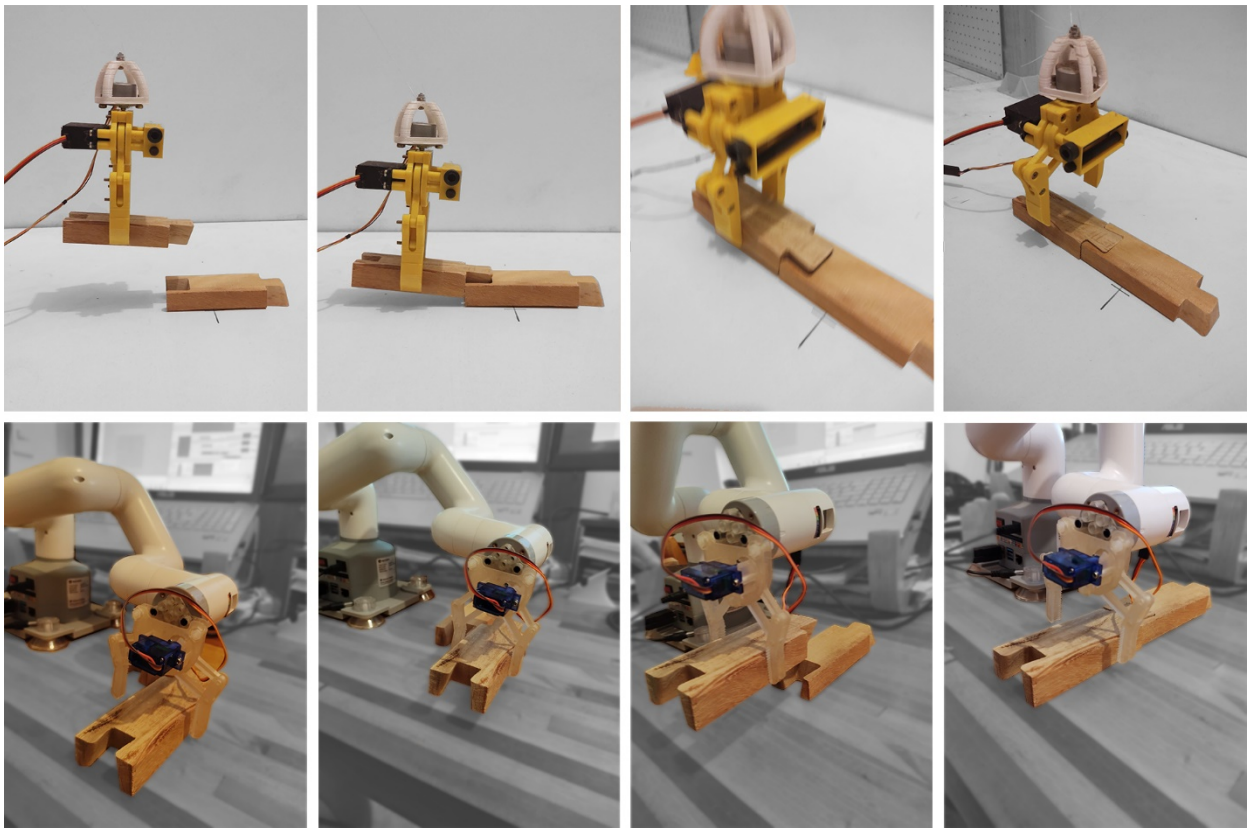


Figura 12 Teste de montagem do encaixe rabo-de-andorinha modificado utilizando cablebot (sequência superior) e braço robótico (sequência inferior). (Fonte: Elaborado pelos autores)

4. RESULTADOS

Comparando a montagem robótica dos encaixes originais com os encaixes modificados, nota-se que houve uma melhora significativa no sucesso das montagens no uso dos encaixes modificados. Ambos os encaixes modificados (por pinos e rabo-de-andorinha) puderam ser montados utilizando tanto o braço robótico quanto o cablebot.

Em ambos os robôs, a precisão no processo de encaixe com pinos foi de ±2mm em relação ao modelo virtual (que equivale a uma precisão de ±2% em relação à largura do bloco). No encaixe tipo rabo-de-andorinha, a precisão foi de ±3,5mm (que equivale a uma precisão de ±2,8% em relação à largura do bloco). A montagem preliminar permitiu definir a precisão do braço robótico e cablebot para ±4mm e ± 12mm, respectivamente. Em termos percentuais, a diferença de montagem nos encaixes modificados foi reduzida entre 12,5% e 83,3%, considerando o caso com menor influência (montagem do encaixe rabo-de-andorinha utilizando o braço robótico) e com maior influência (montagem do encaixe por pino utilizando o cablebot).

Era esperado que a nova precisão dos processos fosse definida pelo conjunto robô e tipo de encaixe. Contudo, não se notou diferença na precisão dos processos com o mesmo tipo de encaixe, mas com os diferentes robôs. Deste modo, concluiu-se que a precisão dos processos está ligada, principalmente, ao design do encaixe, e em menor escala ao tipo de robô utilizado.

As estratégias gerais utilizadas nas modificações dos encaixes foram as mesmas para os dois casos (uso de chanfros, arredondamento de cantos e redução da folga), seguindo os princípios do projeto para fabricação e montagem. Contudo, estas foram aplicadas de modo diferente a cada tipo de encaixe, seguindo as características, potencialidades, geometria e limitações de fabricação de cada um. Como resultado, foram definidas diretrizes de modificação dos encaixes de acordo com os resultados da pesquisa.

No encaixe por pinos, sugerem-se as seguintes diretrizes:

- Manter, no mínimo, 5mm de área de contato entre o pino e o orifício (neste caso, pelo menos 38% da altura do pino), para evitar que haja deslocamentos ou instabilidade no encaixe;
- Utilizar superfícies inclinadas, majoritariamente ou somente no pino;
- Uso do ângulo de 45° no encaixe;
- Sulco e outros ajustes devem ser realizadas, se possível, fora do encaixe, visando reduzir a influência neste (como o sulco na base para acomodar o ângulo reto do orifício na base do pino);
- No caso do uso do pino fora do eixo central, considerar uma parede mínima para o orifício de 5mm.

No encaixe rabo-de-andorinha, propõem-se as seguintes diretrizes:

- Utilizar superfícies inclinadas por toda a extensão do encaixe, visando reduzir a força necessária no encaixe;
- Dar preferência a ângulos entre 10° e 15°, devido à geometria do encaixe;
- A lingueta deve ter seu comprimento próximo à metade da largura da peça;
- Considerar as limitações de fabricação no quesito de produção de superfícies inclinadas.

Em ambos os encaixes, observou-se uma correção no posicionamento das peças no momento de seu posicionamento pelos robôs, resultando em melhora da precisão do processo. Virtualmente, o encaixe com pinos proposto é capaz de corrigir o posicionamento em até 8mm por peça (neste caso, 8% da largura do bloco) e o encaixe rabo-de-andorinha proposto em até 5mm por peça (neste caso, 4% da largura do bloco). Esta correção permitiu a realização do encaixe com os robôs, inclusive com a combinação robô-de-andorinha e cablebot.

Nesta pesquisa, os experimentos foram realizados com blocos e o encaixe entre estes de maneira isolada. Contudo, os encaixes modificados podem ser aplicados em diversas geometrias envolvendo um maior número de blocos. A Figura 13 ilustra (1) o uso do encaixe por pinos em blocos compondo uma parede de dupla curvatura, (2) o uso do encaixe rabo-de-andorinha em elementos lineares gerando uma estrutura e (3) o uso do encaixe rabo-de-andorinha na conexão de painéis.

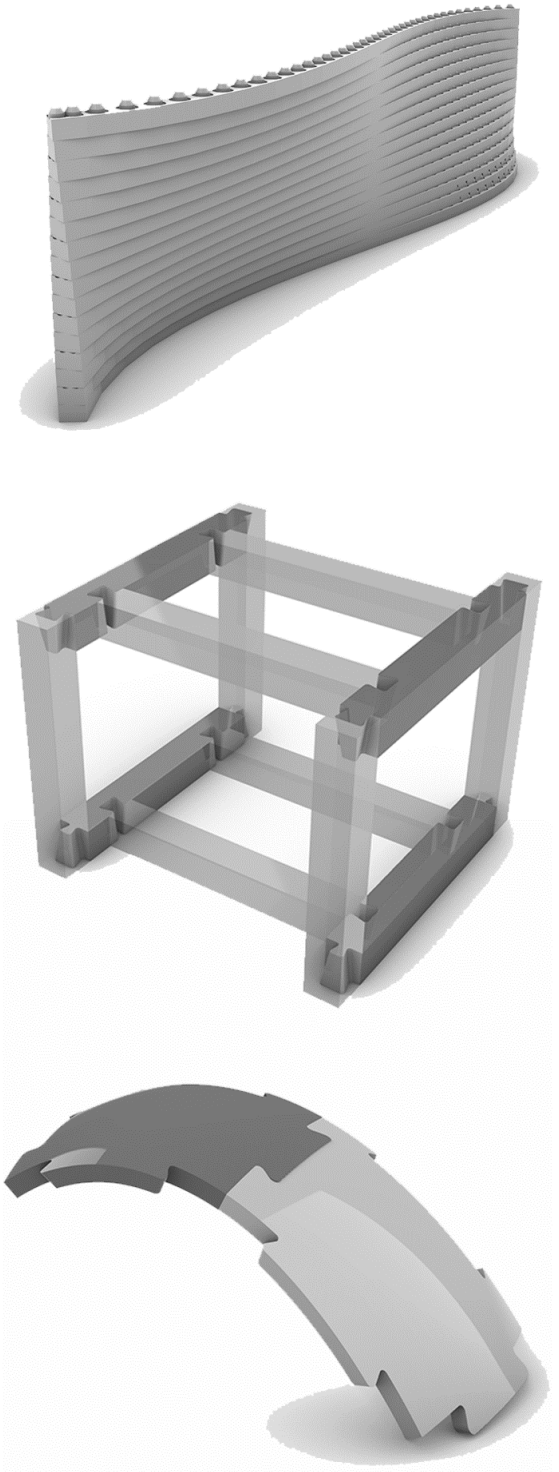


Figura 13 Aplicação dos encaixes em parede de dupla curvatura, elementos lineares e painéis. (Fonte: Elaborado pelos autores)

Estas aplicações apresentam algumas particularidades que devem ser levadas em conta. Para o caso das paredes, os pinos e orifícios não estarão necessariamente alinhados no eixo do bloco, como ocorreu nesta pesquisa, podendo ser deslocados para criar a curvatura através da montagem por camadas. Nos casos das aplicações do encaixe rabo-de-andorinha, é fundamental estabelecer a ordem de montagem, para que as partes positivas e negativas dos encaixes estejam na ordem correta.

Nesta pesquisa, foram explorados os encaixes por pinos e rabo-de-andorinha, contudo, outros encaixes podem ser modificados para uso na montagem por robôs ou com o intuito de correção de posicionamento, seguindo os princípios do projeto para fabricação e montagem. Entre eles, pode-se citar o encaixe tipo meia-madeira em conexão no meio de peças, no qual podem ser aplicados os mesmos princípios (uso de chanfros, arredondamento de cantos e redução de folgas).

É importante salientar que foram utilizadas técnicas subtrativas na fabricação destas peças, o que resulta em um aumento no uso de material se comparado com o bloco paralelepípedo sem encaixes. Considerando os encaixes explorados na pesquisa, houve um aumento de 40% na quantidade de material utilizado no encaixe por pinos e 25% no encaixe rabo-de-andorinha, se comparados com o bloco sem encaixes.

Para aplicações em estruturas, seria necessário avaliar se a rapidez e precisão na montagem se equiparam em termos de custo e impacto ambiental à pré-fabricação dos elementos e quantidade de material gasto. Em diversos casos, apesar de haver maior gasto de material, ha redução nas horas de máquina, custos de armazenamento, transporte e outros itens, sendo um processo de menor custo ou impacto (BOOTHROYD et al, 2011). Esses valores dependem também, como apontado, das proporções das peças e dos encaixes, sendo possível determinar a partir de qual porcentagem de material gasto é indicado o uso dos encaixes.

5. CONCLUSÕES

Projetos e construções que incorporaram novos métodos de fabricação e montagem se deparam com desafios durante o processo, os quais podem ser técnicos, de fluxo de informações, de modelagem, de detalhamento e outros. A mudança de processos manuais para processos automatizados requer uma avaliação das diretrizes de projeto e estratégias utilizadas, visando incorporar aspectos intrínsecos à automatização. Esta pesquisa buscou incorporar no projeto características da fabricação digital e da montagem por robôs e analisar as principais estratégias para solucionar os problemas encontrados.

As mudanças realizadas em dois tipos de encaixes tradicionais tiveram por objetivo facilitar a montagem, aumentar a tolerância e corrigir a precisão do processo. Os métodos utilizados para modificar os encaixes segue os princípios do Projeto para Fabricação e Montagem (DFMA), cujo objetivo é facilitar a montagem (BOOTHROYD et al, 2011). Como resultado, os encaixes modificados permitiram sucesso na montagem com ambos os robôs e correção da precisão dos processos, com possível aplicação em diversas geometrias. Os resultados obtidos nos experimentos demonstram que a adoção do Projeto para Fabricação e Montagem apresenta vantagens nos processos de montagem robotizada.

Nesta pesquisa, adotou-se como hipótese que as modificações no projeto do encaixe seriam capazes de aumentar a precisão do processo. Outras pesquisas adotam outras estratégias para solucionar o problema da montagem com robôs, seja com ou sem o uso de encaixes. Cabe citar a pesquisa “Timber assembly with distributed architectural robotics”, desenvolvida em ETHz, na qual a solução para a montagem robótica com encaixes se deu através de equipamentos (como grampos de pressão automáticos) e software (como visão robótica) (LEUNG et al, 2021). Cada abordagem apresenta soluções diferentes, que podem ser aplicadas a diferentes cenários. A pesquisa em ETHz apresenta um foco em hardware, utilizando robôs industriais e equipamento de ponta, enquanto a pesquisa apresentada utilizou braço robótico e cablebot de baixo custo, com foco em projeto do encaixe. Os princípios do projeto para fabricação e montagem podem ser aplicados em qualquer pesquisa que trate da montagem robótica, permitindo viabilizar aplicações de robôs de baixo custo na montagem de estruturas complexas.

O foco desta pesquisa se deu na geometria e no projeto das peças e encaixes, utilizando-se a madeira como material de base e técnicas de fabricação digital subtrativas. Como citado, as técnicas de fabricação subtrativas geram resíduos durante a produção, aumentando o consumo de matéria-prima. Outros métodos de fabricação e materiais podem ser utilizados. Métodos de fabricação aditiva como impressão 3D FDM ou moldes dinâmicos robotizados podem ser utilizados. Quanto aos materiais, pode-se citar o plástico reciclado, o concreto e a cerâmica como algumas opções a serem consideradas. Cada material se adequará a diferentes usos e tipos de produção, e apresentará diferentes peculiaridades quanto à precisão na produção das peças. Para cada método, equipamento e material deve-se testar variações dos fatores aplicados em cada encaixe.

É importante também salientar que, embora nesta pesquisa se tenha obtido um aumento significativo da precisão do processo, não se espera uma precisão absoluta, ou tolerância zero. Todo equipamento e processo tem sua precisão. Materiais variam suas dimensões ou características de acordo com a temperatura, umidade e outras forças como o vento ou cargas (KOLAREVIC, 2014). Peças de madeira, por exemplo, se expandem e contraem de acordo com a umidade do ambiente. Peças de metal ou concreto fazem o mesmo, dependendo da temperatura ambiente. Mesmo na indústria mecânica é comum considerar-se tolerâncias, deste modo, se aceitam variações dentro de um valor estipulado e estes são levados em conta (Ibid.). Na construção civil o mesmo ocorre, seja através de juntas de dilatação e materiais e estratégias que permitem e acomodam estas diferenças e movimentações naturais das coisas. Peças completamente fixadas entre si, de modo que não tenham espaço para movimentação, expansão e contração, podem fadigar e se partir ou deformar.

Deve-se levar em conta qual a tolerância desejada e projetar dentro desta. Métodos como o apresentado nesta pesquisa podem aumentar a precisão dos processos, mesmo com uma maior tolerância dos equipamentos utilizados. A tolerância e a precisão podem ser encaradas frente à flexibilidade. A flexibilidade é planejada e leva em conta os fatores do material, objeto e processos (Ibid.).

Como colocado, os métodos e encaixes usados nesta pesquisa podem ser utilizados em diversos casos e, possivelmente, permitir o uso de robôs acessíveis em aplicações complexas de montagem. Para uso de blocos maiores e com diferentes materiais – logo, diferentes pesos e dimensões – faz-se fundamental analisar as dimensões e características dos encaixes. Apesar dos ajustes necessários, os princípios de modificação e estratégias utilizadas se mantêm.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, ao LAPAC, à FAPESP (processo 2018/07786-3) e à CAPES, pelo apoio e bolsas que proporcianaram os recursos para ests pesquisa.

REFERÊNCIAS

1. ABNT NBR ISO 5725-1/2018: Exatidão (veracidade e precisão) dos métodos e dos resultados de medição. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2018.
2. BONWETSCH, T., GRAMAZIO, F., KOHLER, M. Digitally Fabricating Non-Standardised Brick Walls. In: **ManuBuild, conference proceedings**, p. 191–196, 2007.
3. BOOTHROYD, G.; DEWHURST, P.; KNIGHT, W. **Product Design for Manufacture and Assembly**. CRC Press, Terceira edição, EUA, 2011.
4. BRELL-COCKAN, S., BRAUMANN, J. Towards Robots in Architecture. In: **Proceedings of Rob| Arch: Robotic Fabrication in Architecture, Art, and Design 2012**, p. 8-11, 2012.
5. BURRY, M. Robots at the Sagrada Família Basilica: A Brief History of Robotised Stone-Cutting. In: Reinhardt, D.; Saunders, J., Burry, J. (eds). **Proceedings of Rob| Arch: Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016**. Springer, 2016. p. 2-15.
6. CHUI, Q.; BARROS, C.; SILVA, T. Parâmetros r e R obtidos de programa interlaborial – como usá-los. In: **Química Nova**, vol. 32, no. 8, p. 2209-2213, 2009.
7. DORFLER, H., SANDY, T., GIFTHALER, M., GRAMAZIO, F., KOHLER, M., BUCHLI, J. Mobile Robotic Brickwork. In**: Proceedings of Rob| Arch: Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016**, p. 204-217, 2016.
8. FIGLIOLA, R.; BEASLEY, D. **Teoria e Projeto Para Medições Mecânicas**. Editora LTC, 4ª edição, 2007.
9. GRAMAZIO, F., KOHLER, M., WILLMANN, J. **Authoring robotic processes**. In: Architectural Design: Made By Robots, vol. 84, no. 3, p. 14-21, 2014.
10. GRASER, K., BAUR, M., APOLINARSKA, A., DOFLER, A., et al. **DFAB House: a comprehensive demonstrator of digital fabrication in architecture**. In: Fabricate 2020: Making Resilient Architecture, p. 130—139, 2020.
11. GROAT, L.; WANG, D. **Architectural Research Methods**. Segunda Edição, Wiley, Nova Jersey, 2013.
12. HAUBERG, J. Research by Design: a research strategy. **AE... Revista Lusófona de Arquitectura e Educação**. N 5, p. 45-56, 2011.
13. KANASAKI, K.; TANAKA, H. **Traditional Wood Joint System in Digital Fabrication**. Digital Fabrication, vol. 1, Computation and Performance – eCAADe 31, p. 711-716. 2013.
14. KOLAREVIC, B. WHY WE NEED ARCHITECTURE OF TOLERANCE In: **Architectural Design: High Definition: Zero Tolerance in Design and Production**, vol.84, no. 1, 2014.
15. LEUNG, V., APOLINARSKA, A., TANADINI, D., GRAMAZIO, F., KOHLER, M. Automatic Assembly of Jointed Timber Structure using Distributed Robotic Clamps. In **PROJECTIONS - Proceedings of the 26th CAADRIA Conference** - Volume 1, The Chinese University of Hong Kong and Online, Hong Kong, 2021, p. 583-592.
16. MAYER, H., GRAMAZIO, F., KOHLER, M. Disarmed strategies: new machines and techniques for an era of computational contextualism in architecture. In: Architectural Design, vol. 87, no. 4, p. 110-119, 2017.
17. MIRJAN, A., AUGUGLIARO, G., ANDREA, R., et al. Building a Bridge with Flying Robots. In: **Proceedings of Rob| Arch: Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016**, p. 34-47, 2016.
18. NOLTE, T., WITT, A. Ghery Partner's Fondation Louis Vuitton: Crowdsourcing Embedded Intelligence. In: **Architectural Design: High Definition: Zero Tolerance in Design and Production**, vol.84, no. 1, 2014.
19. SONDERGAARD, A., AMIR, O., EVERSMANN, P., et al. Topology optimization and robotic fabrication of advanced timber space-frame structures. In**: Proceedings of Rob| Arch: Robotic fabrication in architecture, art and design 2016**, p. 190-203, 2016.
20. SOUSA, J., PALOP, C., MOREIRA, E., PINTO, A. et al. The SPIDERobot: A cable-robot system for on-site construction in architecture. In: **Proceedings of Rob| Arch: Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016**, p. 230-239, 2016