



DESENVOLVIMENTO DE MATRIZ PARA CONFECÇÃO DE ELEMENTOS VAZADOS DE GEOPOLÍMERO

Alexandre Marques Capato¹

João Mota Neto²

Rodrigo Cesar Nunes Maciel³

Resumo: O desenvolvimento de novas aplicações para geopolímeros motiva pesquisas em áreas da arquitetura e do *design*. O conceito de blocos vazados do tipo cobogó vem sendo resgatado na busca pelo controle ambiental e design de interiores. Neste sentido o objetivo desta proposta de aplicação foi desenvolver e produzir uma matriz de moldagem para formação de blocos vazados com geometria complexa. Baseado em tecnologias consolidadas, os equipamentos de fabricação subtrativa do tipo router CNC, o projeto buscou produzir a cavidade molde de bloco vazado a partir de camadas de MDF usinado. O presente trabalho visou realizar, com auxílio de ferramenta CAD/CAM, o *design*, gerou o roteamento de usinagem e simulação dos processos de fabricação tendo em vista baixo tempo de processamento. Para tal, foi possível obter e avaliar os parâmetros e estratégias de usinagem para validar o procedimento experimental em busca de resultados dimensionais, qualidade e baixo tempo de usinagem que permitissem a formação do bloco vazado.

Palavras-chave: Geopolímeros. Cobogó. CNC *router*. Parâmetros de usinagem.

1 INTRODUÇÃO

Na sociedade moderna, a busca pelo conforto térmico ampliou o consumo energético devido ao uso crescente de equipamentos de calefação e refrigeração de ar. O advento de novas tecnologias tem permitido vencer desafios de natureza ecológica, ambiental e climática (SANTANA NETO; SILVA, 2016).

Atualmente, a preocupação com o meio ambiente e consequente luta pela redução das emissões de carbono tem motivado priorizar tecnologias com baixa emissão de gases de efeito estufa dos processos de manufatura (GLASBY *et al.*, 2015). Novas práticas de construção de paredes com blocos vazados, segundo Santana Neto e Silva (2016), permitem reduzir o fluxo de ar e incidência de luz solar, de forma a atuar como elementos de controle de ventilação e redutores da taxa de iluminação de ambientes.

¹ Graduado em Engenharia Mecatrônica, UniSATC. E-mail: amcapato@terra.com.br

² Prof. UniSATC. E-mail: joao.neto@satc.edu.br

³ Prof. UniSATC. E-mail: rodrigo.maciel@satc.edu.br



São elementos denominados COBOGÓS, que com apoio de design em computação gráfica se mostram promissores a favor de maior conforto térmico e eficiência energética.

Na produção do cimento, a etapa de clínquerização em que se processa a queima de argila e calcário, ocorre a altas temperaturas o que gera alta liberação de dióxido de carbono (CO₂) e alto consumo energético. No entanto, a manufatura de blocos vazados com argamassa geopolimérica apresenta baixa emissão de dióxido de carbono, economia de energia e sustentabilidade ambiental (FORNASA, 2017).

Estudos em torno das formas construtivas de cobogós devem ser realizados de forma que se justifique o emprego de geopolímeros, em busca de características, como ventilação, iluminação, design, durabilidade e resistência, adequadas às normas NBR 6136/14 e NBR 12118/13. Durante o processo criativo, são necessários testes com a finalidade de encontrar modelos que atendam às exigências estruturais, químicas e estéticas desejadas para validar o produto (JEREMIAS, 2016). O controle da forma tridimensional, através da exploração de variações do desenho paramétrico do projeto substitui constantes ajustes e alterações (HORTA, 2009 *apud* MIOTO, 2016).

Jeremias (2016), sugere o uso de uma estação fresadora automatizada para fabricar matrizes de moldagem devido ao número de protótipos e a facilidade em planejar a forma e o traçado dos vazios de cobogós, em busca de flexibilidade, velocidade e precisão. Os mecanismos de um equipamento fresador prescindem de atenção especial em relação a estabilidade do processo, a rugosidade da superfície usinada, assim como parâmetros de corte e ferramenta empregada (WEI *et al.*, 2017).

Com base neste contexto, este trabalho apresenta o seguinte problema de pesquisa: como, por meio de um equipamento de fabricação subtrativa, é possível fabricar uma matriz para moldagem de blocos vazados em geopolímero?

Desta forma, este trabalho visa desenvolver e produzir, através de um equipamento de fabricação subtrativa, uma matriz para moldagem em geopolímero de blocos vazados do tipo cobogó.

Para atingir o propósito deste trabalho, as seguintes etapas foram elaboradas: a) utilizar *softwares* de modelagem 2D e 3D para criar um *design* inovador; b) utilizar as ferramentas de programação e operação conforme o equipamento existente na Faculdade Satc; c) definir as ferramentas de usinagem e parâmetros de corte para obter a melhor estratégia de usinagem; d) avaliar os resultados obtidos com o propósito de buscar bom acabamento e baixo tempo de processamento.



Esta proposta se justifica pelo fato que a usinagem de uma matriz em um equipamento de fabricação subtrativa para fabricação de blocos vazados, traz como benefício a garantia de customização da manufatura, importante para o desenvolvimento de projetos. A ideia de criar e inovar está vinculada ao processo de compreender um mercado e propor soluções que agreguem valor e mantenham uma marca. Assim, neste trabalho o autor buscou investigar e comprovar os conhecimentos adquiridos durante o período de formação em engenharia mecatrônica e colaborar com a instituição de ensino Satc na divulgação e estímulo ao empreendedorismo criativo. Ao redor do mundo, novas ideias são adotadas em prol do controle climático e diminuição de emissões de dióxido de carbono (SANTANA NETO; SILVA, 2016). Neste contexto, empregar uma tecnologia comprovada e de baixo custo para produzir a matriz que viabilizará testes de performance de blocos perfurados em argamassa geopolimérica, fundamenta-se na possibilidade de modelar e validar novos produtos com apelo estético-ambiental ao público consumidor, além de fomentar a geração de novas atividades empresariais.

Quanto a metodologia, esta pesquisa se caracteriza como sendo experimental pois envolve a adaptação de equipamentos, construção de protótipos, realização de testes e análise de dados, sob uma abordagem qualitativa e metodologia descritiva,

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão explanados temas pertinentes à pesquisa que norteará o desenvolvimento deste artigo. Baseado em artigos de pesquisa e periódicos, esta etapa pretende discorrer sobre a proposta, as ferramentas computacionais de design, os materiais, o equipamento, as ferramentas e parâmetros de usinagem.

2.1 COBOGÓS

Historicamente, o cobogó foi concebido como elemento pré-fabricado de ventilação, encontra-se presente no imaginário do brasileiro desde a década de 1930, e está inserido no cenário de arquitetura, design de interiores e exterior de edificações (CAMACHO *et al.*, 2017). Estes elementos perfurados, de tradição herdada da cultura islâmica e muçulmana, inspirou a cultura portuguesa, que por sua vez, a adaptou para a realidade brasileira (BORGES, 2015). No Brasil, os idealizadores Amadeu Coimbra, Ernst A. Boeckmann e Antônio Góes emprestaram suas iniciais Coimbra, Boeckmann e

Góes ao nome original do produto - “CoBoGó” (SANTOS, 2018). A Tab. 1 abaixo apresenta, conforme análise quantitativa e qualitativa, um quadro comparativo em que classifica alguns produtos existentes no mercado.

Tabela 1: Resultados de análise sincrônica referente a Cobogós.

Pç.	Produto	Material	Acabamento	Valor	Tamanho	Peso
01		Cobogó Vazado esmaltado	Esmaltado brilhante	R\$ 56,90 Unitário	190x180x80 mm	1,94 kg
02		Cerâmica vermelha	Rugoso Fosco	R\$ 3,79 Unitário	180x250x70 mm	2,24 kg
03		Concreto	Rugoso Fosco	R\$ 31,90 Unitário	390x390x70 mm	11 kg
04		Vidro	Liso Brilhante	R\$ 6,90 Unitário	190x190x80 mm	2 kg
05		Vidro	Liso Brilhante	R\$ 26,90 Unitário	200x200x100 mm	1 kg
06		Mármore <i>pietra fina.</i> Ônix	Várias Texturas	R\$ 800,00 a R\$ 1000,00 por m ²	Vários Tamanhos	Pesos Variados

Fonte: Adaptado de Borges (2015).

Tais peças integram-se perfeitamente a ambientes, delimita-os em espaços menores enquanto permitem mobilidade, otimização de espaços, iluminação, ventilação e sentido de amplitude (ANTUNES, 2018).

Um questionário de pesquisa foi proposto por Borges (2015), e reflete a importância destes elementos conforme segue: a) relativo à quais ambientes o consumidor aplicaria blocos cobogó, 70% preferiram, ambos ambientes, interno e externo; b) uma questão sobre a função obteve 82% para divisão de ambientes; c) sobre o tipo de aplicação, optaram 55% por cobogós e 45% elementos translúcidos; d) sobre a tendência de compra, obteve 97% de aceitação.

2.2 GEOPOLÍMEROS



Considerados a terceira geração de cimentos, os geopolímeros são como polímeros inorgânicos e podem ser descritos também como geocimentos, cimentos álcali-ativados, cerâmicas de ligação alcalina ou hidrocerâmicas. Suas propriedades, superiores em relação ao cimento, atestam durabilidade, impermeabilidade, baixa condutividade térmica, baixo consumo energético e baixa emissão de carbono (ZIVICA *et al.*, 2015).

Os geopolímeros são obtidos a partir da ativação de material sólido composto por sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), denominados aluminossilicatos, em meio de solução alcalina. Ampla gama de propriedades e características candidata os geopolímeros a inúmeras aplicações, conforme atestou estudos com utilização de cinza de casca de arroz como fonte de alumina (ARAUJO, 2017).

As fontes de materiais aluminossilicatos são oriundas da natureza, de origem mineral como a argila caulim, ou originada de resíduos orgânicos em que há presença de sílica e alumina. O caulim, ou caulinita, é convertido em metacaulim através de um processo térmico chamado calcinação, o que gera como resultado um material de elevada reatividade tipo pozolânico, um material sílico reativo que confere ligação e impermeabilidade (ZIVICA *et al.*, 2015).

Conforme Novais (2016), resíduos com destinação ao aterro sanitário são fontes de alumina e sílica e podem ser aproveitados em substituição ao metacaulim.

Atualmente, geopolímeros tem amplo emprego em setores como a indústria civil, rodoviária e ferroviária, no tratamento de resíduos e engenharia subterrânea. As aplicações vão desde blocos refratários, painéis, estabilização de solos contaminados, ao piso para ambientes agressivos e aplicações balísticas (FORNASA, 2017).

2.3 FABRICAÇÃO DIGITAL - CAD/CAM

A fabricação digital, quando surgiu, representou inovação com uso da tecnologia de Controle Numérico Computacional (CNC), uma vez que ela preconizava a transferência direta de um código de programação para uma máquina gerenciada por computador (ABRÃO, 2016).

O desenvolvimento tecnológico digital permitiu atuar em novas áreas e adquiriu um caráter multidisciplinar. Este conceito veio propiciar através da computação, a criação

de formas complexas, parâmetros de controle, e customização de características digitais para o processo de produção de protótipos (MIOTO, 2016).

A manufatura por CNC baseia-se em uma sequência de *softwares*, a saber: Software de Desenho, Software de Manufatura e Software de Controle.

2.3.1. Software CAD

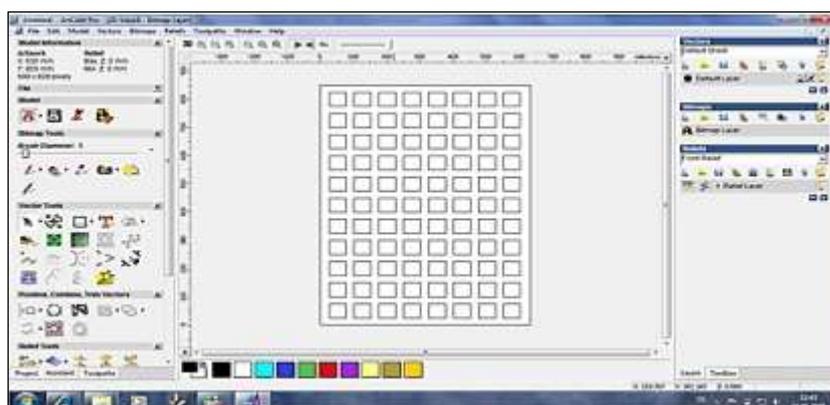
O *Software* de Desenho Assistido por Computador (CAD) é usado para dar assistência à criação. Nele se inicia o esboço do desenho da peça e se processam as modificações, para formar o objeto 3D a ser usinado (KRISHNA *et al.*, 2014).

2.3.2. Software CAM

O *Software* de Manufatura Assistida por Computador (CAM) é a ferramenta que manipula o arquivo gerado pelo CAD e realiza a exportação em formato de código de máquina (*G-code*) compatível com a placa controladora da máquina de usinagem.

Na imagem da Fig. 1 abaixo, pode ser visto a área de trabalho de um *software* CAD/CAM (SUTCU; KARAGOZ, 2012).

Figura 1: Interface de *Software* CAD/CAM.



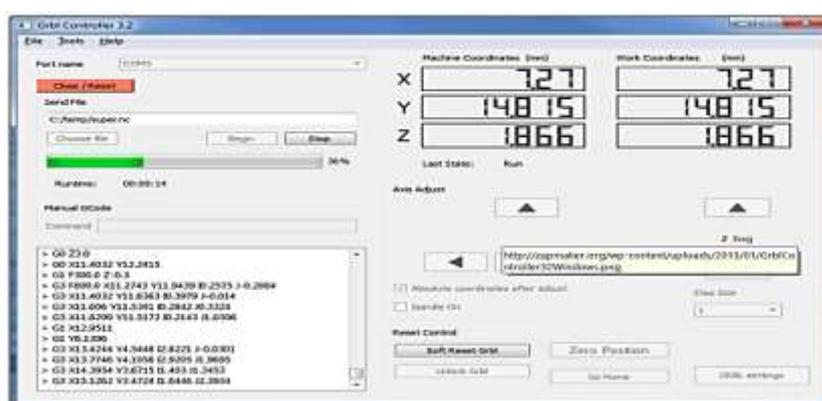
Fonte: Adaptado de Sutcu; Karagoz (2012).

No *software* CAM é possível definir a trajetória da ferramenta e assim otimizar o trabalho a ser executado pela máquina CNC.

2.3.3. Software de Controle CNC

É o *software* transmissor dos arquivos de código de máquina, *G-code*, para um hardware integrado na máquina de usinagem. Conforme Weiss (2012), o Código-G compreende uma serie de dados numéricos que são interpretados pelo hardware da máquina ferramenta a realizar algum processo de manufatura. A Fig. 2 a seguir, exhibe a interface de um *software* de código aberto (*open-source*) GRBL Controller.

Figura 2: Interface do Software Controlador CNC.



Fonte: Adaptado de Krishna *et al.* (2014).

Na imagem pode ser visto cada etapa de código sendo executada, enquanto na máquina os sinais de comando atuam a ferramenta de corte e o deslocamento dos atuadores nos eixos X, Y e Z (REIS, 2018).

2.4 MÁQUINAS CNC

As vantagens do uso de máquinas CNC, são inúmeras e podem ser mencionadas a grande produtividade, operação autônoma, precisão, flexibilidade, repetitividade, controle sobre o processo, previsão de tempos de fabricação e, também, balanço de produção. O Termo Comando Numérico Computadorizado (CNC) revela uma tecnologia através da qual se envia sinais a máquinas ferramentas, e originou-se na década de 50, em que cartões de controle perfurados eram empregados na concepção de controle de máquinas ferramenta. Inicialmente foram empregadas pelo exército americano como teste de tecnologia emergente e tornou-se um dos marcos da transformação da indústria de manufatura (REIS, 2018).

2.4.1. Estação de Trabalho CNC

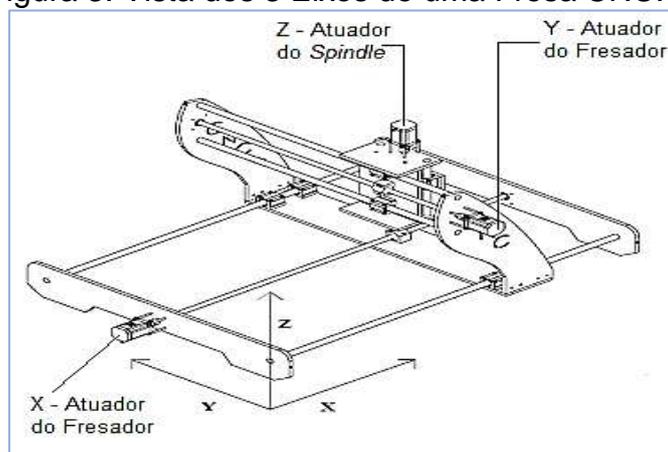
Uma estação de trabalho CNC tem características bem definidas, como: porte robusto, movimentos em 3 eixos ou mais, troca automática de ferramentas, e são usadas no desbaste, acabamento de metais e materiais mais resistentes, daí uma velocidade operacional relativamente menor (SANTI; SPEROTTO, 2016).

2.4.2. Fresadora Router CNC

A fresadora Router CNC é uma variação de uma estação CNC de trabalho e, diferente destas, são concebidas para se ajustar a manufatura do objeto a que se propõe produzir. São projetadas para operar sobre uma superfície estacionária ou mesa fixa. Reservam-se à produção de protótipos em madeira, plásticos e outros materiais macios (BAL; DUMANOGLU, 2019). A maior parte dos CNC routers possui algumas partes específicas em comum: Controlador CNC de hardware dedicado, um ou mais atuadores por eixo, motores de passo ou servomotores atuadores para cada eixo, inversores de frequência para controle de rotação do motor de usinagem (*spindle*), guias lineares, superfície estática base de trabalho com recursos para fixação de peças e sistema exaustor para coleta de resíduos de usinagem (SANTI; SPEROTTO, 2016).

A Fig. 3. abaixo, ilustra os detalhes de um sistema destinado a uma router CNC.

Figura 3: Vista dos 3 Eixos de uma Fresa CNC.



Fonte: Adaptado de Reis (2018).

O sistema acima, destaca os motores do spindle e os atuadores dos eixos.

2.5 FABRICAÇÃO DE MOLDES E MATRIZES



Os processos de moldagem permitem a otimização de experimentos, a descoberta de artefatos e a criação de componentes novos, com possibilidade de produção seriada de objetos ainda não disponíveis para comercialização. A simulação de projetos, e sua fabricação, torna menos abstrato os aspectos físicos, antes intangíveis, de desenhos e formas bidimensionais (ARAUJO, 2019). No processo de moldagem com uma substância amorfa, uma vez vazado no interior de uma cavidade, a matéria assume o formato solidificando-se no interior da matriz (CHIAVERINI, 1986 *apud* LEVY, 2018). A madeira naval revestida em fórmica e a madeira conhecida por fibra de média densidade (MDF) são os materiais preferenciais para a produção de protótipos, pelo baixo custo e usinabilidade (MAIA; MELO, 2018).

Mohring *et al.* (2019), analisou as ranhuras de usinagem mais precisas na fresagem lateral de materiais compósitos de madeira e concluiu que o cenário está em franco desenvolvimento uma vez que a tendência é de modificação e aplicação de ferramentas de corte da indústria metal mecânica. Deus (2015), em seu estudo, destacou a característica do MDF que possui em sua composição fibras compactas e devido a isso forma em sua superfície usinada uma aspereza constante, com visível melhora a velocidades de cortes elevadas.

Na produção de moldes, os ângulos de desmolde são sugeridos por Ulsenheimer (2017) na moldagem para fundição por areia e na moldagem de termoplásticos por Carrion (2014), para se evitar defeitos na desmoldagem. Chiaverini (1986) os menciona entre 2º e 3º. Nesse contexto, para que o *software* CAM tenha êxito ao gerar o código numérico da superfície a ser usinada, deve-se fornecer ao sistema as operações desejadas para o modelo geométrico a ser usinado, este por sua vez deve ser uma imagem negativa do produto final.

2.5 USINAGEM E PARÂMETROS

Usinagem é a operação que modifica um material bruto e lhe atribui forma ou dimensão (JEREMIAS, 2016). No processo de usinagem, as operações que devem ser consideradas são desbaste, pré-acabamento e acabamento (DINIZ *et al.*, 2010). Os parâmetros de corte em que consiste o processo de fresamento são: a) Velocidade de corte V_c [m/min]; b) Velocidade de avanço V_f [mm/min]; c) Velocidade do Fuso n [rpm]; d) Profundidade de corte a_p [mm]; e) Passo lateral a_e [mm]; f) Sentido de corte



concordante ou discordante (DEUS, 2015). Isleyen; Karamanoglu (2019) demonstrou que a usinagem de madeira MDF mostrou-se complexa por ter influencias opostas na rugosidade da superfície usinada, em função das velocidades de corte (V_c) e avanço (V_f), e concluiu que a rugosidade diminui a medida que aumenta a velocidade de corte e diminui o avanço. Avanços em torno de 2500 mm/min produziram baixa rugosidade. O efeito do passo vertical (a_e), de 4 a 6mm, na rugosidade foi negligenciado pois não se mostrou significativa devido à pouca variação na densidade do MDF.

Sutcu; Karagoz (2012), salienta vantagens na usinagem do MDF em função da qualidade superficial obtida pois reflete no resultado final do produto usinado. Deus (2015), destaca a velocidade de corte e condições da ferramenta como fatores que influenciam diretamente na rugosidade. Com o aumento do rpm e a diminuição da velocidade de avanço, a rugosidade tende a ser menor (CHEN *et al.*, 2012).

A velocidade de corte (V_c) é dada pela expressão da Eq. (1) (DINIZ *et al.*, 2013):

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \text{ [m/min]} \quad (1)$$

Onde:

d = diâmetro da fresa (mm).

n = velocidade do fuso (rpm).

A velocidade de avanço (V_f) é dada pela Eq. (2) (DINIZ *et al.*, 2013):

$$V_f = f_z \cdot n \cdot Z_{eff} \text{ [mm/min]} \quad (2)$$

Onde:

f_z = avanço da ferramenta por dente; quantidade de material removido (mm).

Z_{eff} = Numero efetivo de dentes em contato com o material.

Para Profundidade Radial (a_e), Sandvik (2020) sugere Eq. (3) e (4):

- Fresa de topo:

$$a_e < (d_{cap}/2) \text{ ou } 40\% \text{ do diâmetro.} \quad (3)$$

- Fresa BallNose:

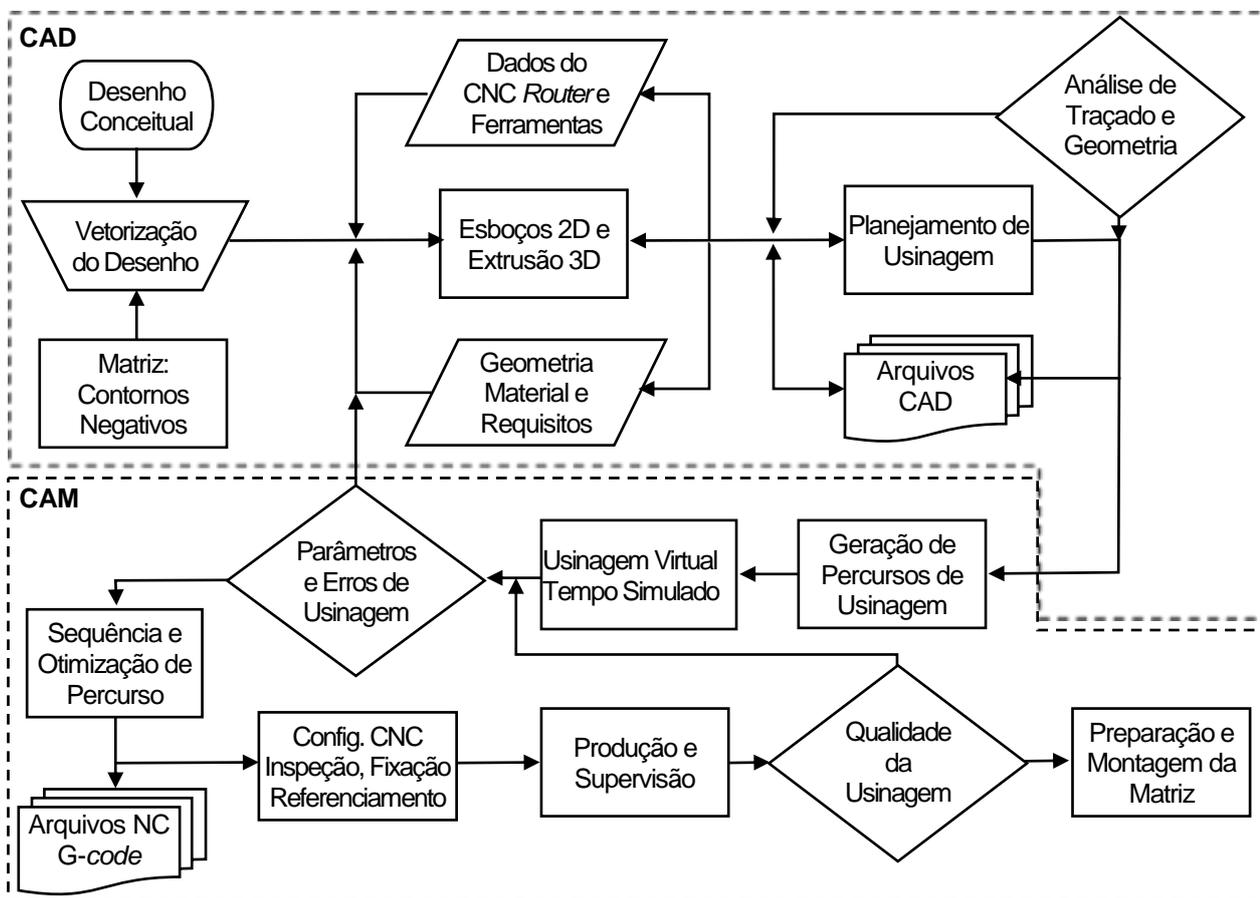
$a_e = 10$ a 20% do diâmetro.

(4)

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este trabalho dividiu-se a princípio em quatro blocos: a) Desenvolvimento do desenho em CAD/CAM; b) Planejamento de Usinagem; c) Fabricação; d) Preparação e Montagem. O fluxograma da Fig. 4 abaixo, ilustra os procedimentos adotados a partir de pesquisa metodológica e laboratorial com apoio de computador e *router* CNC.

Figura 4: Fluxograma de desenvolvimento experimental.



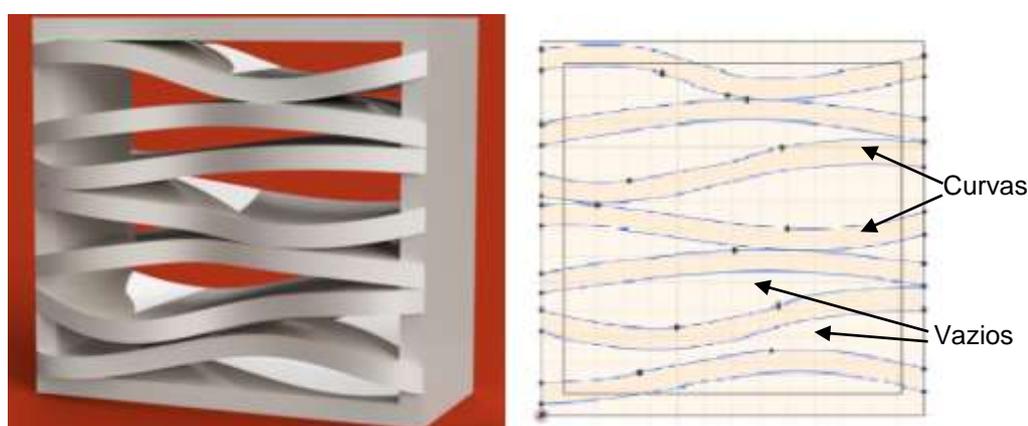
Fonte: do autor (2020).

3.1 DESENHO CONCEITUAL

A inspiração para a forma do desenho do bloco vazado foi baseada em atividade acadêmica desenvolvida na Instituição de Ensino Satc, no curso de *Design*, na disciplina de Projetos, através de metodologia ativa da Agenda 2030.

A Fig. 5 ilustra a arte que inspirou o formato com geometria complexa para fabricação de elemento vazado. O desenho proposto para o feitiço do cobogó segue o conceito de Arte Ideia.

Figura 5: a) Proposta de cobogó; b) Esboço original.



Fonte: Adaptado de Bruna Pereira, Curso de Design Satc (2019).

O desenho caracterizado como arte contemporânea compõe-se de linhas curvas e formas não tradicionais. Demonstra a criatividade do autor por sua geometria complexa e o torna inovador do ponto de vista estético.

3.2 CONCEPÇÃO DE MATRIZ

Com base no exemplo da Fig. 5a, o formato frontal possui relevo positivo ondulado e a condição para se obter um molde com baixos relevos é através de uma fôrma com relevo negativo. Do esboço original, as áreas da esquerda e direita do relevo frontal se apresentavam com orientação invertida. O esboço original sofreu correção com a finalidade de modelar contornos negativos e espelhados com a mesma simetria do objeto 3D.

3.3 VETORIZAÇÃO DA IMAGEM



A partir da gravura da Fig. 5b, iniciou-se o processo de importação da imagem para uma ferramenta computacional de auxílio ao desenho - CAD. Nesta etapa, o desenho importado foi submetido a espelhamento e depois um processo denominado vetorização em que ocorre a varredura dos principais pontos componentes das linhas da imagem. Este processo definiu os principais pontos dos vetores tangentes às formas curvas do desenho e os converteu em pontos de coordenada XY.

Após a vetorização, as formas curvas originaram vetores abertos que foram fechados pelas extremidades e ajustados com espessura e 20 mm.

3.4 DEFINIÇÕES - DIMENSIONAIS E MATERIAL.

Conforme os pré-requisitos de montagem e usinagem, ou seja; baixo custo, tempo e customização para produzir o molde de cobogó, adotou-se os seguintes critérios:

- Material a ser usinado:
 - Madeira de fibra de média densidade (MDF) com 25,4 mm;
- Dimensões da matriz:
 - Externa: 320 mm x 320 mm x 76,2 mm;
 - Cavidade Interna: 292 mm x 292 mm x 50,8 mm;
 - Espessura da borda: 14 mm.

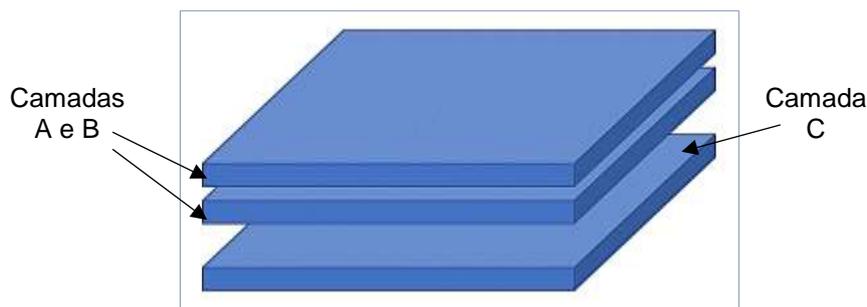
Com base nestas definições, as paredes externas do cobogó foram delimitadas pelas paredes internas da Matriz, que moldaram a cavidade da fôrma onde se depositou a argamassa de geopolímero.

Para se obter a cavidade da fôrma, foi definida uma usinagem de secção quadrada de 292 mm de lado e espessura de 50,8 milímetros, a espessura de duas placas MDF identificadas por camadas “A” e “B”.

A usinagem do relevo negativo do frontal, foi realizada em uma placa de MDF com 25,4 mm, identificada por camada “C”. A modelagem de sua maior profundidade de usinagem ficou estabelecida em 15,0 mm.

A ilustração da Fig. 6 a seguir, apresenta as três camadas A, B e C.

Figura 6: Camadas de MDF A, B e C.



Fonte: do autor (2020).

Neste trabalho, portanto, utilizou-se 3 placas de MDF que representaram 76,2 mm de espessura externa de matriz, fixadas por parafuso e sem colagem nas bordas.

3.5 EQUIPAMENTO CNC E FERRAMENTAL.

Os equipamentos, ferramentas e acessórios que viabilizaram este trabalho estão relacionados a seguir:

3.5.1 CNC Router

A Fig. 7 abaixo, ilustra o equipamento CNC *router* utilizado no experimento.

Figura 7: Máquina CNC *router*.



Fonte: Adaptado de Máquinas, Rhino (2020).

A seguir, as principais características do equipamento CNC:

- CNC Router - Mod. RMC800 - 220V;



- Sistema mecânico com 3 Eixos (X, Y, Z);
- 2 Motores de passo no eixo Y;
- 2 Motores de passo nos eixos X e Z;
- Eixo *spindle*: Tupia Maquita - Motor 530W M3700G - 35000 rpm;
- Ventilador Exaustor para coletor de pó - 3 CV, 3F;
- Computador de comunicação e controle da máquina;
- Velocidade de avanço controlado (máx.): 5.000 mm/min.

3.5.2 Ferramentas, materiais e acessórios

Dentre as ferramentas utilizadas para o processo de preparação, usinagem, acabamento, revestimento e montagem da matriz, destacamos as seguintes:

- Fresas de topo \varnothing 6,0 mm x 50 mm e fresa \varnothing 3,175 mm x 38 mm;
- Fresa de perfil redondo (*Ball Nose*) \varnothing 3,0 mm x 40 mm;
- Brocas de aço rápido \varnothing 3,0 mm x 65 mm e \varnothing 6,35 mm x 90 mm;
- Furadeira, serra, lixadeira e demais acessórios e materiais.

3.6 ESBOÇO 2D E EXTRUSÃO 3D

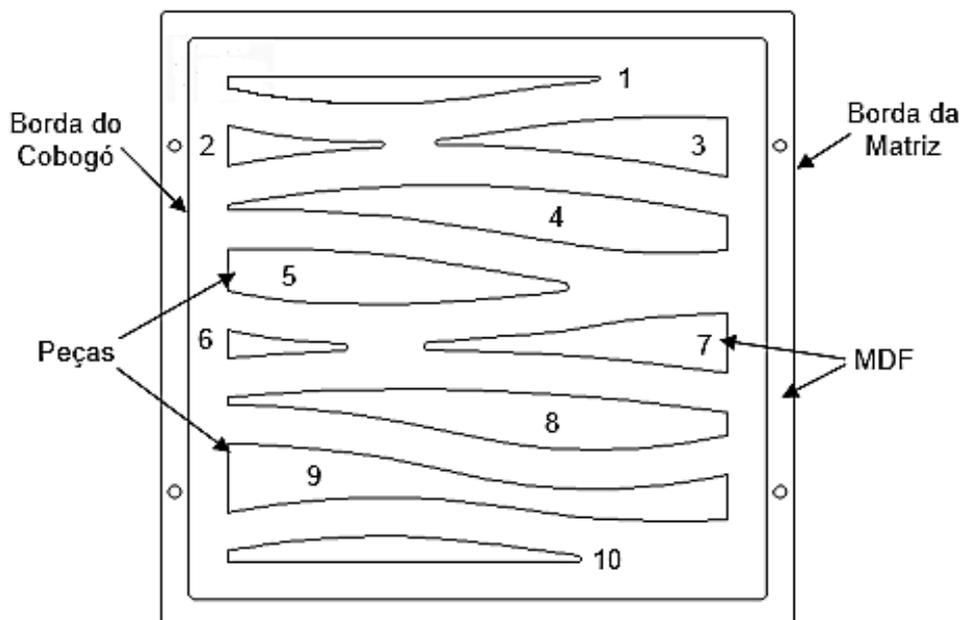
Nesta etapa, foi iniciada a criação do esboço básico 2D das camadas A, B e C.

3.6.1 Camadas A e B

Com base nas definições de orientação, largura e altura das formas, o espaço dos vazios e dimensionamento das bordas obtidas após a vetorização da Fig. 5b, aplicou-se correção a formas curvas adjacentes para torna-las complementares. Todos os elementos de imagem foram mantidos agrupados e centralizados à futura área de usinagem.

A Fig. 8, a seguir, apresenta o esboço das camadas A e B com destaque para as formas denominadas Peças, numeradas de 1 a 10.

Figura 8: Esboço das camadas A e B.



Fonte: do autor (2020).

Na ilustração, observa-se também os limites da borda em MDF e os pontos de furação previstos para fixação e montagem.

Conforme mostrado na Fig.5b, os vazios entre as curvas, os espaços, deram origem aos vazios do cobogó e os espaços vazios, na forma de vetores abertos, foram fechados e originaram os contornos numerados. Os contornos das peças delimitaram o processo de usinagem denominado perfilagem.

Furos de 6,0 mm de diâmetro foram previstos na borda do esboço para auxiliar na fixação durante a usinagem e na montagem das camadas.

No total, das camadas A e B, foram obtidos 2 “quadros” em MDF 320 x 320 mm externo e 292 x 292 mm interno com paredes paralelas e perpendiculares de 14 mm x 25,4 mm de altura, e 10 peças combinadas em pares similares.

Para as 10 peças, como facilitador de extração do molde, definiu-se atribuir conicidade ao perfil das paredes com adição de pequeno ângulo de desmolde. Para determinar o ângulo de desmolde que resultasse em um desvio (d) no paralelismo, de 1,5 mm de inclinação em cada peça, aplicou-se simples regra trigonométrica.

A relação trigonométrica da Eq. (6), a seguir, forneceu o desvio (d):

$$\tan \alpha = \frac{d}{a} \quad (6)$$

Onde:

α = ângulo desejado

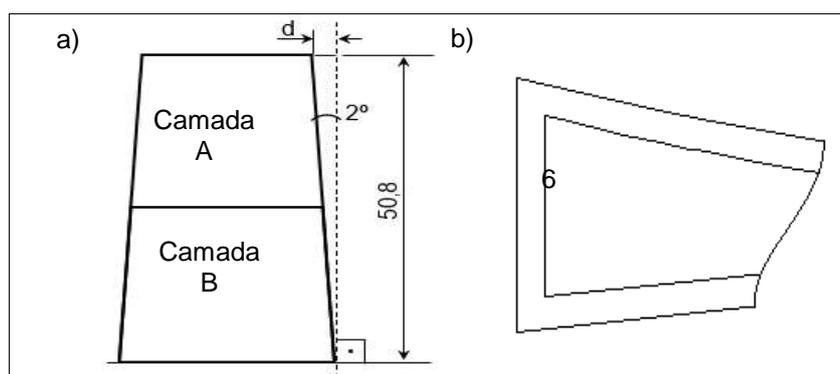
d = desvio (cateto oposto)

a = altura (cateto adjacente)

Devido à interface gráfica do *software* CAD admitir só numerais inteiros para definir o ângulo de inclinação (α), foi calculado e simulado com ângulos de 1 e 2 graus. O ângulo de 2° resultou em um desvio (d) de 1,77 mm, adjacente à espessura de 50,8mm de 2 peças combinadas. As 10 peças 3D foram modeladas a partir do esboço 2D com recurso de extrusão e inclinação de 2°.

A Fig. 9, a seguir, apresenta duas vistas com as seguintes representações: a) Vista de perfil com o ângulo de 2°, como resultado desvio (d) de 1,77 mm; b) Vista superior da peça nº 6 com offset interno de 1,77 mm.

Figura 9: a) Vista lateral do perfil inclinado; b) vista superior.



Fonte: do autor (2020).

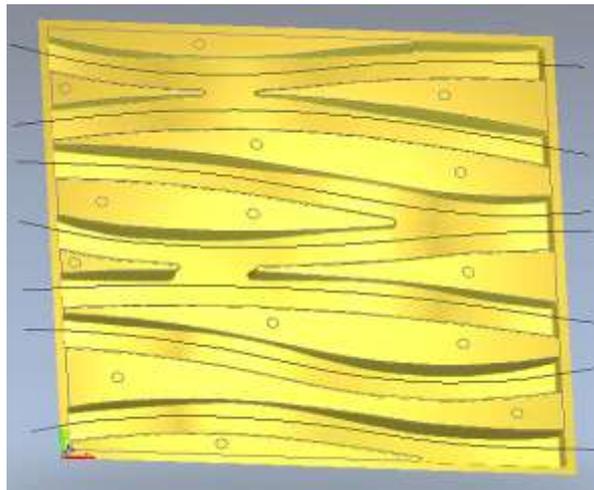
3.6.2 Camada C

Para obter-se o relevo frontal, na camada C, aplicou-se extrusão negativa à superfície pela varredura das linhas guia de centro entre peças, com vetor de perfilagem e a variação da profundidade obtida através de vetor de modulação em Z.

A modelagem do relevo negativo, seguiu as linhas de centro do esboço entre peças, com profundidade entre 2 de 15 mm e largura de canal de 20mm.

A Fig. 10, apresentada a seguir, demonstra o esboço 3D da camada C com sete canais em extrusão negativa e sua extensão de profundidade variada.

Figura 10: Modelagem da camada C.



Fonte: do autor (2020).

3.7 SEQUÊNCIA E ESTRATÉGIA DE USINAGEM

Nesta etapa, o plano de usinagem tem finalidade de melhor aproveitar o material, garantir segurança do equipamento e reduzir tempos de usinagem.

Os procedimentos de usinagem foram organizados em etapas e na ordem em que estão descritos, a saber:

a) Camadas A e B

- Furação de borda – 4 furos passantes \varnothing 6,35 mm simétricos, nas bordas;
- Furação de centro – furos \varnothing 6,0 mm nas peças para centralizar na camada A;
- Corte das Peças – perfilagem do contorno com profundidade de 24,4 mm;
- Usinagem de Relevos 3D – usinagem das peças com relevos cônicos;
- Corte Final – perfilagem da borda e das peças até profundidade de corte.

b) Camada C

- Furação de borda – 4 furos passantes \varnothing 6,35 mm simétricos, nas bordas;
- Furação de centro – furos \varnothing 6,0 mm x 18,0 mm na posição das peças;
- Desbaste em Z – desbaste do relevo negativo até a profundidade de 14,9 mm;
- Acabamento 3D - acabamento do relevo negativo até a profundidade de 15 mm

A estratégia de usinagem, como parte do planejamento inicial, consistiu da busca pela fresa no banco de dados de ferramentas do *software* CAD/CAM. A busca e



determinação dos parâmetros de corte mais adequados, juntamente com a melhor estratégia de usinagem, são fatores chave para atingir o melhor desempenho de tempo e, portanto, qualidade e velocidade de produção. A ordem das operações foi determinada para facilitar a produção das peças, preparação e acabamento manual para montagem.

A Tab.2 apresenta a relação de ferramentas de fresamento empregadas, com dados e parâmetros de usinagem obtidos do banco de ferramentas do *software* CAM.

Tabela 2: Ferramentas consultadas para usinagem.

Ferramenta	$\varnothing d_1$ [mm]	a_e [mm]	a_p [mm]	n [rpm]	V_f em Z [mm/s]	Avanço - V_f [mm/s]	V_f [mm/min]
Fresa Topo Reto	6	2,4	3,5	20000	13	42	2520
Fresa Topo Reto	3,175	1,2	3,5	20000	13	30	1800
Fresa Ball Nose	3	0,36	2	20000	12,7	30	1800

Fonte: do autor (2020).

Para o processo de furação, com a finalidade de evitar aglomeração fibrosa, criação de arestas falsas e aquecimento da fresa, utilizou-se passo vertical com recuo em Z, tipo “pica-pau”, ou picote.

O sentido escolhido para fresamento de perfil e borda interna foi o discordante e com técnica de mergulho espiral. Para a perfilagem de borda externa, o sentido foi o concordante. Para a usinagem de relevos 3D, deu-se preferência à técnica de varredura tipo *raster* linear.

3.8 ANÁLISE DE GEOMETRIA E DOCUMENTAÇÃO CAD

Cada parte do *design* foi ordenada em sucessivos *layers* gráficos e revisados periodicamente quanto a centralização do desenho no plano cartesiano, correspondência entre os *layers* gráficos, bem como a semelhança dimensional dos traçados. Dois arquivos digitais foram mantidos atualizados com nomes sugestivos para futuras consultas.

3.9 PERCURSOS, SIMULAÇÃO E TEMPOS DE USINAGEM



Nesta etapa, com base nas estratégias adotadas e a sequência de usinagem prevista, deu-se a geração das rotas de usinagem com possibilidade de simulação virtual das operações. Este procedimento reconhece as figuras, vetores ou relevos do desenho CAD como objetos a processar e produz o traçado de usinagem conforme algoritmo informático. Além disso, forneceu um resumo do tempo de usinagem de cada recurso roteado. A Tab. 3, a seguir, apresenta a lista de operações de usinagem das camadas A, B. com os percursos gerados e o tempo de usinagem.

Tabela 3: Percursos e tempos de usinagem das camadas A e B.

Processo	Fresa d_f [mm]	a_e [mm]	a_p [mm]	n [rpm]	V_f [mm/s]	Z_{Final} [mm]	Corte Rampa	Tempo [h:m:s]	Acumulado [h:m:s]
Furos Borda	6 R	-	3,5	35000	42	-25,4	Picote	00:05:56	00:05:56
Furos Peças	6 R	-	3,5	35000	42	-25,4	Picote	00:13:06	00:19:02
Perfil Peças	6 R	2,4	3,5	35000	42	-24,4	Disc. Espiral	00:29:18	00:48:20
Usinagem 3D	3 BN	0,36	2,5	35000	30	-25,0	<i>Raster</i>	04:19:04	05:07:24
Corte Borda Ext.	3,175 R	1,2	3,5	35000	30	-25,4	Conc. Espiral	00:12:39	05:20:03
Corte Borda Int.	6 R	2,4	3,5	35000	42	-25,4	Disc. Espiral	00:07:41	05:27:44

Fonte: do autor (2020).

A Tab. 4, a seguir, apresenta a lista de operações de usinagem da camada C com os percursos gerados e o tempo de usinagem

Tabela 4: Percursos e tempos de usinagem da camada C.

Processo	Fresa d_f [mm]	a_e [mm]	a_p [mm]	n [rpm]	V_f [mm/s]	Z_{Final} [mm]	Corte Rampa	Tempo [h:m:s]	Acumulado [h:m:s]
Furos Borda	6 R	-	2	35000	42	-25,4	Picote	00:03:17	00:03:17
Furos Peças	6 R	-	2	35000	42	-18,0	Picote	00:05:14	00:08:31
Desbaste em Z	6 R	2,4	2	35000	42	-14,95	Conc. Caixa	00:45:38	00:54:09
Acabamento 3D	3 BN	0,32	2	35000	42	-15,0	<i>Raster</i>	01:30:07	02:24:16

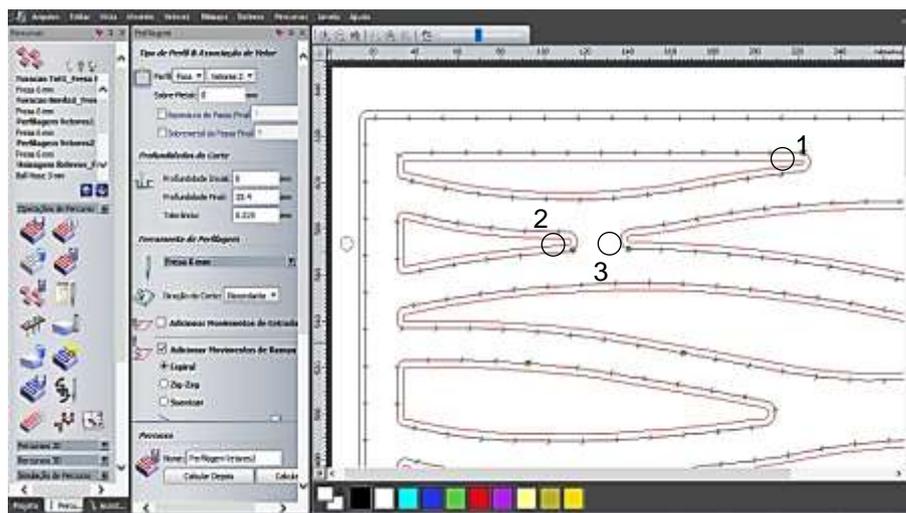
Fonte: do autor (2020).

3.10 ANÁLISE DE ERROS E OTIMIZAÇÕES

Este passo teve como foco a edição de partes da figura e nós de vetores componentes das linhas do desenho. Esta etapa visou igualar simetrias entre camadas gráficas e prevenir colisão da ferramenta com vértice de peças.

A Fig. 11, abaixo, exemplifica este procedimento.

Figura 11: Edição de nós iniciais em torno de vetores fechados.



Fonte: do autor (2020).

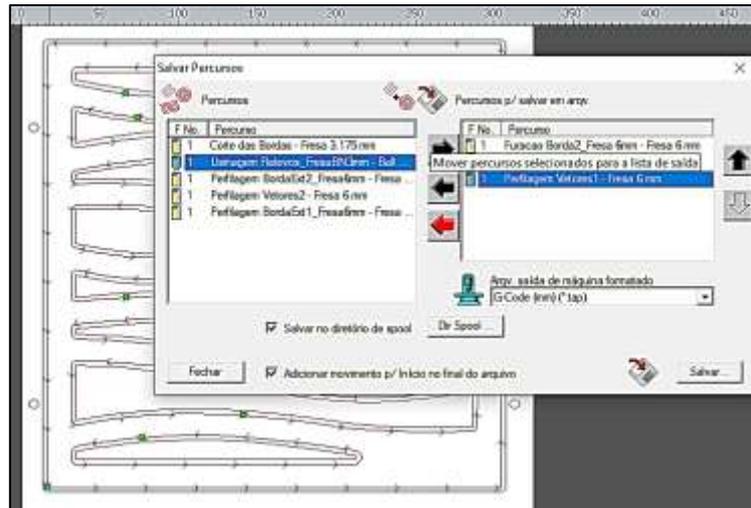
Como demonstrado acima, os três pontos assinalados por círculos representam coordenadas do percurso de perfilagem, para entrada e saída da ferramenta, que estão muito próximos aos vértices dos vetores das peças 1, 2 e 3. São pontos de possível colisão da fresa com o vértice da peça durante a perfilagem. Estes pontos foram editados, mediante redefinição do nó inicial (ponto verde), o percurso foi novamente calculado mediante o botão virtual “Calcular”, para assim prevenir defeitos no fresamento causados por pontos indesejados de entrada da ferramenta.

3.11 GERAÇÃO DO PROGRAMA G-CODE

O Programa G-code é criado distintamente para cada operação de usinagem, de acordo com os parâmetros setados na criação de percursos.

A seguir, a Fig. 12 exhibe a caixa de dialogo do software CAM para geração do G-code.

Figura 12: Configuração de sequência G-code.



Fonte: do autor (2020).

Os arquivos G-code foram organizados conforme a sequência de usinagem predefinida e posteriormente foram transferidos a CPU de operação do CNC *router* através de um dispositivo de armazenamento USB.

3.12 PRODUÇÃO CNC ROUTER

A máquina CNC foi preparada mediante limpeza da área de fixação, posicionamento da placa de MDF na orientação X Y por parafusos do lado externo, instalação da ferramenta de usinagem e referenciamento do ponto zero peça, com Z0 na área da superfície superior. Entre cada operação de usinagem, quando necessário, foi efetuado a troca da ferramenta. Instalou-se quatro parafusos na furação de borda para melhor fixação do MDF à mesa de sacrifício da *router*. Ao final da usinagem, efetuou-se a inspeção visual das partes obtidas.

3.13 MONTAGEM DA MATRIZ

Após preparar e colar as peças, aplicar selante e revestimento autoadesivo, deu-se a montagem da matriz. O conjunto de 10 peças combinadas, foram fixados à camada C por meio de pinos de madeira em furos de centro. Os furos da borda foram alargados para diâmetro 6,3 mm. As bordas do molde foram empilhadas sem colagem, e afixadas à camada com baixo relevo através de barras roscadas de diâmetro 6,3 mm. O molde foi disponibilizado para preenchimento com geopolímero por outra equipe de estudos de

materiais. A desmoldagem ocorreu após adensamento em mesa vibratória e tempo de cura da argamassa.

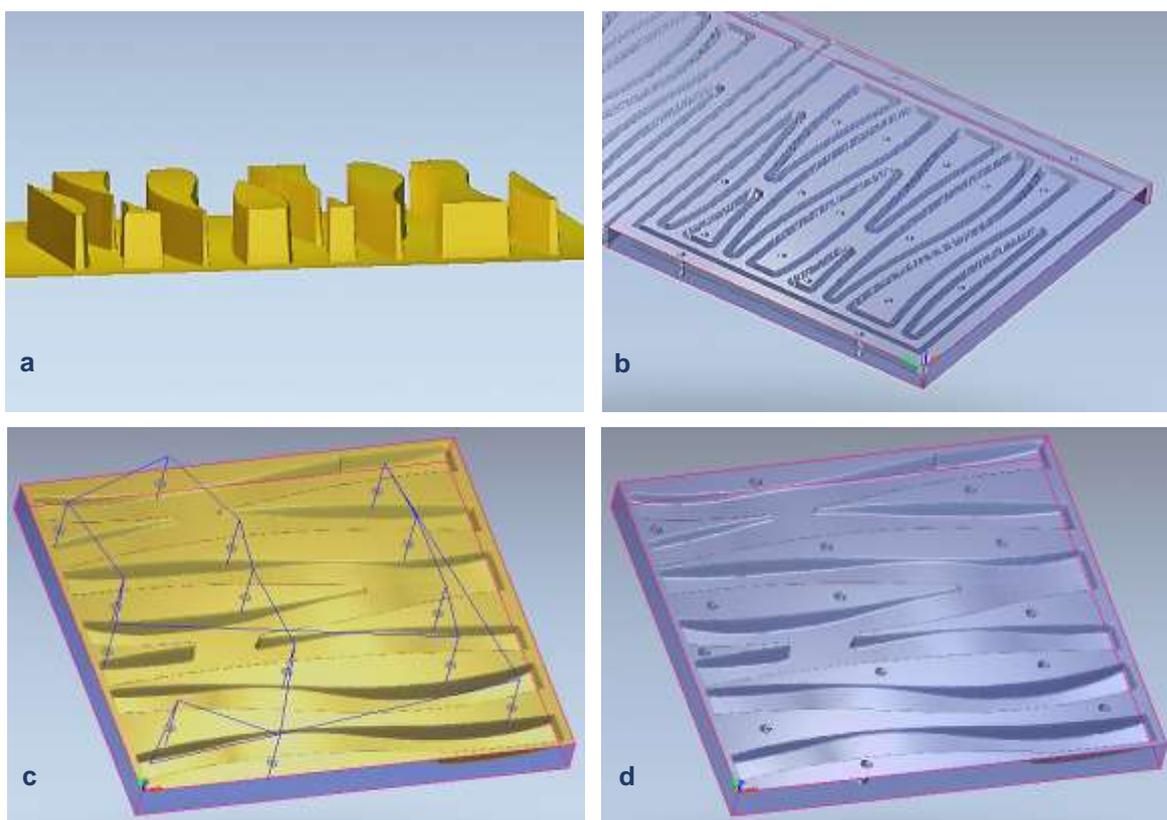
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados, nesta etapa, na ordem em que se desenvolveu o procedimento experimental: Desenvolvimento CAD/CAM, Planejamento, Produção e Montagem.

4.1 DESENVOLVIMENTO CAD/CAM

Segundo os experimentos, o *design* foi considerado conforme com o modelo desejado. Na Fig. 13 a seguir, pode-se ver o desenho das camadas A,B e C.

Figura 13: Resultado do design das camadas A e B: a) Extrusão; b) Simulação.



Fonte: do autor (2020).

Detalham-se as imagens parciais acima: a) Extrusão das peças das camadas A e B;



b) Resultado da simulação de usinagem de A e B; c) Extrusão negativa do relevo da camada C; d) Resultado da simulação de usinagem do relevo frontal.

4.2 PLANEJAMENTO E PRODUÇÃO

O plano de usinagem contemplou às fases de design e produção do molde. Conforme as características da CNC e os dados das Tabelas 3 e 4, a rotação (n) do eixo spindle é fixa em 35000 rpm, o que definiu uma velocidade de corte (V_c) constante para cada fresa, conforme Eq. (1), durante todo o período experimental. A rotação do eixo *spindle* apesar de fixa e elevada, não provocou danos às ferramentas por efeito de aquecimento. As velocidades de avanço (V_f) foram definidas tendo em vista baixa rugosidade e em função do melhor tempo de usinagem. Conforme definição, nota-se na Tab. 5 os valores prefixados para as velocidades de avanço (V_f), os valores equivalentes para o avanço por dente (f_z), obtidos por derivação da Eq. (2).

Tabela 5: Resultado dos parâmetros de usinagem.

Ferramenta	$\varnothing d_1$ [mm]	n [rpm]	V_c [m/min]	V_f [mm/min]	f_z [mm]	Z_{eff} Dentes	a_e [mm]	a_p [mm]
Fresa Topo Reto	6	35000	660	2520	0,036	2	2,4	3,5
Fresa Topo Reto	3,175	35000	349	1800	0,026	2	1,2	3,5
Fresa <i>Ball Nose</i>	3	35000	330	1800	0,051	1	0,36	2

Fonte: do autor (2020).

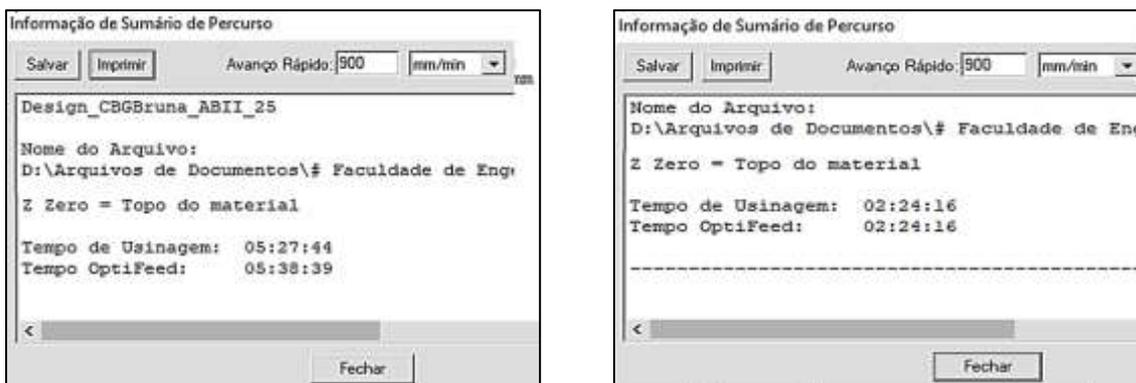
Na operação de fresamento lateral com passo radial (a_e) reduzido, para a ferramenta *BallNose*, considerou-se o número de dentes efetivos (Z_{eff}) em usinagem igual a 1.

Os tempos de usinagem das operações mais longas, conforme as Tabelas 3 e 4, representaram 79% e 62,5% do tempo total de usinagem das camadas A B e camada C, respectivamente.

Devido aos valores das grandezas e em função de aproximações nos cálculos, os experimentos tiveram os seguintes resultados para mais ou para menos: Velocidade de corte: tolerância 22,3 m/min, Velocidade de avanço: tolerância 59,5 mm/min, Rotações por minuto do fuso: tolerância 1750 rpm.

As Figuras 14a e 14b a seguir, apresentam o resumo de tempos de percursos.

Figura 14: Sumário de tempos de percursos: a) camadas A e B; b) camada C.



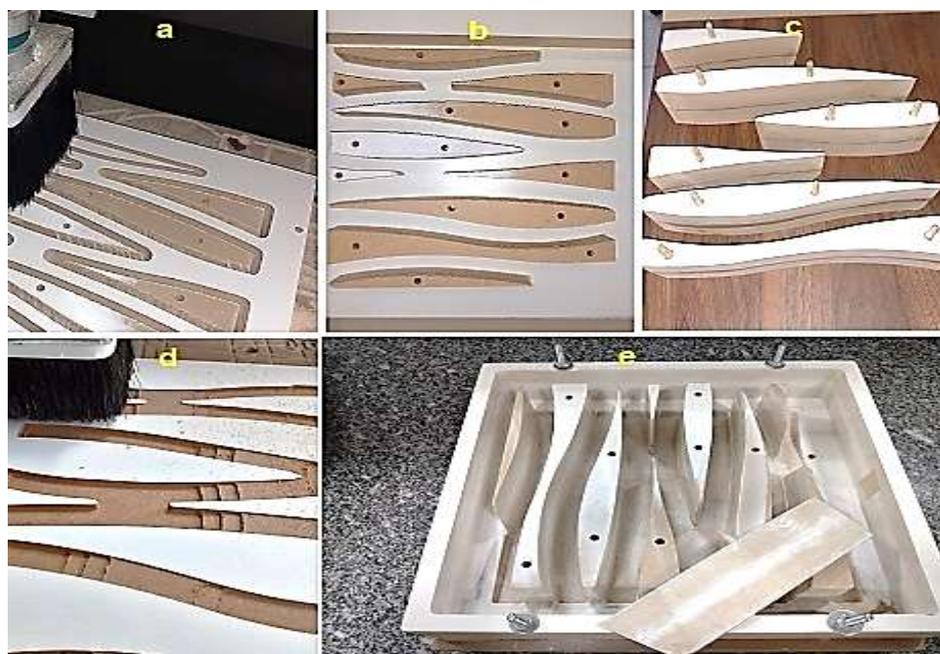
Fonte: do autor (2020).

A Fig. 14, representam o resultado de experimentos com base no (V_c) de cada fresa, no (V_f) pré-definido, nas estratégias de usinagem 3D e foco no baixo tempo.

4.3 PRODUÇÃO E MONTAGEM

A Fig. 15 abaixo ilustra as etapas de produção e a montagem do conjunto.

Figura 15: Produção das peças da matriz.



Fonte: do autor (2020).

Pode-se ver em: a) usinagem das peças cônicas; b) peças usinadas dispostas sobre placa branca; c) peças cônicas finalizadas; d) usinagem do relevo frontal; e) matriz montada.

O resultado após a desmoldagem pode ser visto na Fig. 16 a seguir, onde se verifica a correta formação do relevo positivo frontal, a formação dos vazios e a espessura das bordas e linhas do cobogó.

Figura 16: Resultado após a desmoldagem do bloco vazado.



Fonte: do autor (2020).

O desmolde ocorreu com relativa facilidade na região da borda limite das paredes externas e com maior dificuldade nos elementos internos apesar da existência de ângulo de desmolde nos perfis. A remoção das 10 peças foi realizada com uso forçado de ferramentas e embora o esforço tenha provocado algumas avarias e trincas, a forma do bloco vazado se manteve unida. Notou-se que a argamassa sofreu dilatações desiguais por toda a extensão, antes e durante o processo de cura, mostrando-se com trincas e fendas. Observou-se que houve uma contração, após a cura e solidificação, da argamassa geopolimérica com maior ligamento da argamassa às peças, que tinha por função dar forma aos vazios. O fato pode estar relacionado à necessidade de maior tempo de adensamento da argamassa ou à sua formulação.



5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho teve como finalidade produzir um molde para envase de argamassa geopolimérica. Demonstrou-se o resultado da aplicação de parâmetros de usinagem (velocidades de corte, avanço e rotação) empregados no fresamento de MDF, com três fresas cilíndricas, para formação de bloco vazado tipo cobogó. Em busca de bom acabamento e baixo tempo de processo, com uso de usinagem simulada e experimentação prática, obteve-se um tempo satisfatório de usinagem sem prejuízo à segurança do operador e dos equipamentos utilizados.

Conclui-se que a qualidade das superfícies resultantes de usinagem lateral, paralelas à normal, apresentaram bom acabamento com rotação fixa em 35000 rpm. A simulação de usinagem trouxe a percepção de possíveis pontos de colisão da ferramenta com arestas de objetos e permitiu antecipar eventuais erros no processo através da interferência no roteamento original da ferramenta. Além disto, o programa de auxílio a manufatura (CAM) forneceu um resumo do tempo de usinagem, o que permitiu decidir sobre alterações nos parâmetros e estratégia de usinagem.

Concluiu-se, portanto, que apesar das dificuldades apresentadas na desmoldagem, o resultado obtido na produção da matriz cumpriu sua função de moldar a forma, os contornos e ondulações do relevo do elemento vazado tipo cobogó.

Como trabalhos futuros pode-se sugerir testes de desempenho de acabamento com diferentes ferramentas de usinagem após a inclusão de um inversor de frequência monofásico para variação da rotação do *spindle* e correções no acoplamento do fuso do equipamento CNC,

REFERÊNCIAS

- ABRÃO, J.S.; NUNES, V.G. Fabricação Digital, Resíduos e Meio Ambiente: o Caso da CNC Fresadora. Uberlândia, MG. FAU, 2019.
- ANTUNES, F.F.S. Design de Superfície: Padronagem Aplicada em Divisória Vazada de MDF para Ambientes. Curitiba, PR. UTFPR, 2018.
- ARAUJO, L.E. Desenvolvimento de Argamassas Geopoliméricas com Uso de Resíduos de Construção e Demolição. Joinville, SC. UFSC, 2017.
- ARAUJO, N.S. As Novas Tecnologias no Ensino de Arquitetura: Memória e Cultura das Cidades. Higienópolis, SP. FAU, 2019.



BAL, B.C.; DUMANOGLU, F. Surface Roughness and Processing Time of a Medium Density Fiberboard Cabinet Door Processed via CNC Router, and The Energy Consumption of the CNC Router. Turquia. Vocational School of Technical Sciences, 2019.

BORGES, B.D. Revestimento Cerâmico Translúcido Inspirado no Cobogó. Criciúma, SC. UNESC, 2015.

CAMACHO, D.O.J.; SACHT, H.M.; VETTORAZZI, E. De los Elementos Perforados al Cobogó: Histórico de Uso em la Arquitetura Brasileira y Consideraciones sobre su Adaptacion al Clima. Campinas, SP. UNICAMP, 2018.

CHEN, C.C. *et al.* Experimental Investigation of Tool Vibration and Surface Roughness in The Precision End-Milling Process Using the Singular Spectrum Analysis. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. V 63, 2012. p 797–815.

CHIAVERINI, V. Tecnologia Mecânica. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986, 314p.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. 8. ed. São Paulo: Artliber, 2013, 270p.

DEUS, P. ROEL DE; Análise do Processo de Fresamento de MDF em Centro de Usinagem CNC. Guaratinguetá, SP. UNESP, 2015.

FORNASA, B.L. Utilização de Concreto Reciclado para a Produção de Geopolímero. Joinville, SC. UFSC, 2017.

GLASBY, T. *et al.* Commercial Scale Geopolymer Concrete Construction. The Saudi International Building and Constructions Technology Conference p1 -11, 2015.
Disponível em: https://www.wagner.com.au/media/1516/geopolymer-concrete_saudi-conference-2015.pdf
Acesso em: 03/04/2020.

ISLEYEN, U. K.; KARAMANOGLU, M. The Influence of Machining Parameters on Surface Roughness of MDF in Milling Operation. Turquia. Kastamonu University, 2019.

JEREMIAS, T.D. Avaliação do Acabamento Gerado por Fresamento em Chapas de MDF a Partir de Diferentes Combinações de Parâmetros de Corte. Porto Alegre, RS. UFRS, 2016.

KRISHNA, O.V.; JAYACHANDRAIAH, B.; KHAN, A.; REDDY, R.A. Fabrication of Low Cost 3-Axis Cnc Router. Srikalahasti, Índia. SriKalahateeswara Institute of Technology, 2014.

LEVY, R.S. Análise de Porosidade em Alumínio com Adição de Celulose. Guarapuava, PR. UFTPR, 2018.

MAIA, R.D.A.; MELO, A.B. Processo de Concepção de Componente Construtivo: Estudo para os Blocos Vazados Cimentícios com Resíduos EVA. Revista de Engenharia e Tecnologia, 2018 Vol.10 nº 3 (pg. 8 – 22).



MIOTO, J. Fabricação Digital na Arquitetura Efêmera, de Estandes em Feiras Comerciais, Aplicada em Visual Merchandising. Florianópolis, SC. UFSC, 2016.

MOHRING, C. *et al.* En Route to Intelligent Wood Machining – Current Situation and Future Perspectives. Stuttgart Germany. University of Stuttgart, 2019

NOVAIS, R.M. *et al.* Waste Management. Aveiro. Campus Universitário de Santiago. Portugal, 2016.

REIS, A.D.S. Projeto de Máquina CNC 3 Eixos. Ituverava. FFCL, 2018.

MÁQUINAS, RHINO. Rhino Máquinas e Equipamentos. Novo Hamburgo. RS, 2020. Disponível em <https://www.rhinomaquinas.com.br/> Acesso em: 05/04/2020

SANDVIK COROMANT. Formulas e Definições de Fresamento. 2020. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx?Country=br>

SANTANA NETO, E. J.; SILVA, R. C. Computação material: um estudo sobre a atualização geométrica de elementos vazados na arquitetura. Buenos Aires. SIGradi - XX Congresso de la Sociedad Ibero-Americana de Grafica Digital, 2016.

SANTI, K.R.C.; SPEROTTO, L.K. Desenvolvimento de Fresadora CNC de Baixo Custo. Alto Araguaia, MT. FALECT, 2016.

SANTOS, V.B.O. Cobogó com Abertura Regulável. Rio de Janeiro, RJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

SUTCU, A.; KARAGOZ, U. Effect of Machining Parameters on Surface Quality after Face Milling of MDF. Turquia. Suleyman Demirel University, 2012.

ULSENHIMER, L. Melhoria Aplicada ao Processo de Moldagem de Componentes Fundidos com Base no Mapa de Fluxo de Valor. Pato Branco PR. UTFPR, 2017.

WEI, *et al.* The Research Progress of Machining Mechanisms in Milling Wood-based Materials. Nanjing, CH. Bioresources of Nanjing Forestry University, 2017.

WEISS, A. Processos de fabricação mecânica. Curitiba: Livro Técnico, 2012. 264 p. ISBN 978-85-63687-42-5.

ZIVICA, V.; PALOU, M.T.; KRIZMA, M. Geopolymer Cements and Their Properties: A Review. Bratislava, Slovak Republic. Institute of Construction and Architecture, 2015.