

# Processo de Padronização para Criação de Estruturas de Microfluidos

Matteo C. Bonato<sup>2</sup>, Harrson S. Santana<sup>1</sup>, Marcelo F. Oliveira<sup>1</sup>, Leonardo M. Machado<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratório Aberto de Impressão 3D/Divisão de Tecnologia para Produção e Saúde  
LAprint/DITPS  
CTI/MCTI Renato Archer – Campinas/SP

<sup>2</sup>Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia (CEATEC)  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC-Campinas) – Campinas/SP

{mbonato,hsantana,marcelo.oliveira,leonardo.machado}@cti.gov.br

**Abstract.** *This paper details the process of producing microreactors, focusing on the standardization of their development to enhance the study of microfluids. The creation of the models involved the use of computer-aided design (CAD) tools, including extensions and components of the Rhinoceros® 7 software, such as Grasshopper, as well as other mechanisms integrated into the program itself.*

**Resumo.** *Este artigo detalha o processo de produção de microrreatores, com foco na padronização de seu desenvolvimento para aprimorar o estudo de microfluidos. Para o estudo dos modelos, foram utilizadas ferramentas de design auxiliado por computador (CAD), incluindo extensões e componentes do software Rhinoceros® 7, como o Grasshopper, além de outros mecanismos integrados ao próprio programa.*

## 1. Introdução

No campo da engenharia química e de processos, o desenvolvimento de sistemas de reação eficientes e versáteis tornou-se uma prioridade essencial. As limitações dos processos tradicionais em batelada, como transferência de calor e massa inadequadas, escalabilidade ineficiente e controle limitado do processo, têm estimulado a exploração de tecnologias alternativas [Patel et al. 2011, Schwalbe et al. 2002]

Uma dessas inovações é o uso de microrreatores, que oferecem várias vantagens em relação aos seus equivalentes em macroescala. Os microrreatores, com suas altas razões de superfície para volume, permitem uma melhor transferência de calor e massa, resultando em uma cinética de reação aprimorada, maior seletividade e melhor controle do processo [Al-Sulaimi et al. 2023, Schwalbe et al. 2002]. A integração da tecnologia de microrreatores com o design assistido por computador (CAD) revolucionou ainda mais o campo, permitindo a fabricação precisa e sob medida desses sistemas de reação miniaturizados. [Quiroz-Pérez et al. 2019, Kockmann 2012, Bianchini et al. 2021]

Projetar microrreatores requer uma abordagem multidisciplinar, onde engenheiros devem considerar cuidadosamente uma gama de fatores, incluindo dinâmica de fluidos, transferência de calor e cinética química, para otimizar o desempenho e a eficiência desses sistemas de reação miniaturizados. O advento da tecnologia CAD foi transformador nesse

processo, fornecendo aos engenheiros uma variedade de ferramentas poderosas que facilitam a prototipagem rápida, simulação e personalização dos designs de microrreatores para atender aos requisitos específicos de vários processos químicos.

Uma das principais vantagens de usar CAD no design de microrreatores é a capacidade de simular e otimizar a dinâmica de fluxo dentro do reator, garantindo uma mistura eficiente e distribuição do tempo de residência. [Osa et al. 2015]

O objetivo principal deste projeto é desenvolver microrreatores utilizando CAD, buscando uma construção simétrica dentro do software, de modo a maximizar a eficiência e o controle do processo.

## 2. Metodologia

Para a construção das estruturas, foi utilizado o software de modelagem 3D Rhinoceros® (versão 7.0). Durante o processo de produção das peças, foi adotado tanto métodos manuais quanto automatizados, seguindo a sequência apresentada no fluxograma da figura 1.

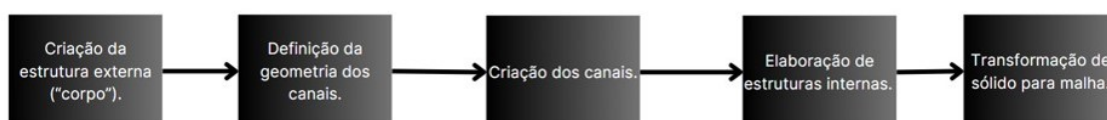


Figura 1. Fluxograma da elaboração do microrreator. Fonte: Autoral

A construção dos microrreatores foi feita visando dois tipos de geometria de canais, em formatos de "T" e "Y" (figura 2), dos quais se dão por conta das ligações dos canais de entrada e saída.

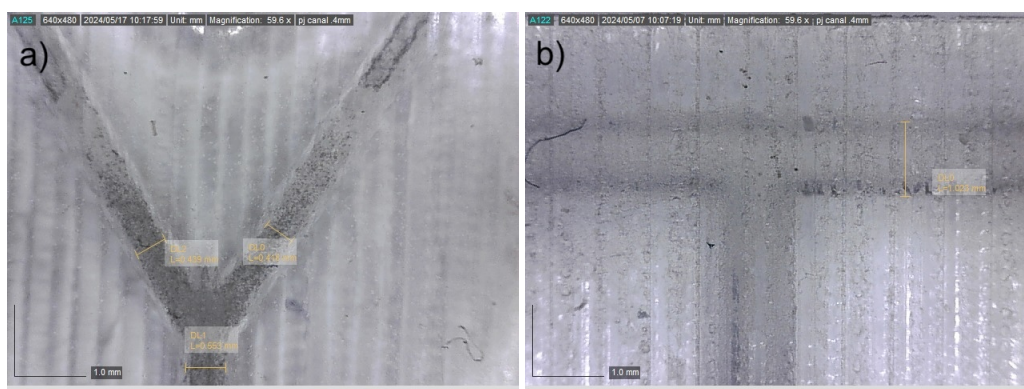


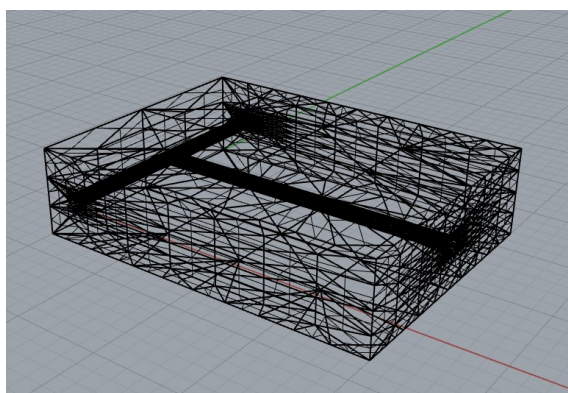
Figura 2. Estruturas de canais em "Y" (a) e "T" (b). Fonte: Autoral

### 2.1. Processo de Programação em Blocos

Na automatização, utilizamos a extensão Grasshopper dentro do Rhinoceros®, que possui mecanismos para a construção de estruturas por meio de programação em blocos. Este método é uma forma de programação visual, sem necessidade de linhas de código.

A criação neste meio envolve um processo de sequência lógica a ser seguida, de modo que, como tópicos principais se tem a montagem do sólido (estrutura externa) e dos canais. Inicialmente será visto a produção do corpo da estrutura, onde este começa com a definição das dimensões (comprimento, largura, altura), visando assim uma modelagem retangular. Já com relação aos canais, seguiu-se uma elaboração de canal com geometria circular, sendo estes de entrada e saída.

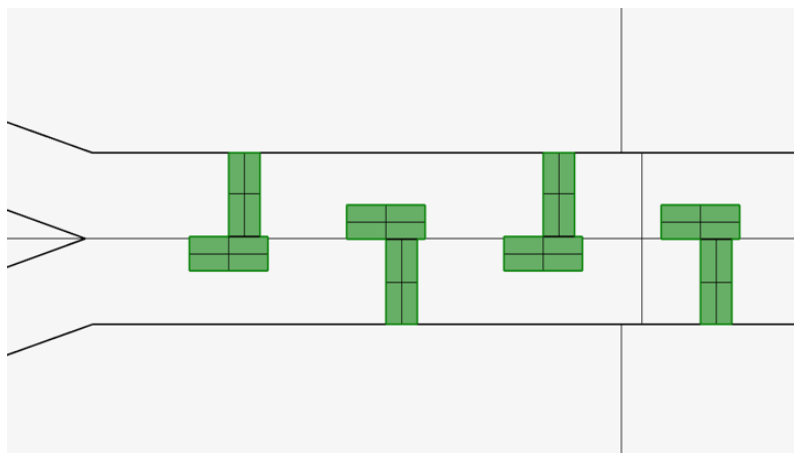
Com as geometrias definidas, gera-se as 2 estruturas, corpo (bloco retangular) e canal (cilindro), onde para gerar os espaços dos canais se utiliza a função *Boolean2Objects* para realizar a subtração de uma geometria da outra, neste caso retirar o formato do cilindro de dentro do corpo do microrreator. Obteve-se assim o modelo apresentado na figura 3, como resultado do desenvolvimento da peça pela automatização.



**Figura 3. Microrreator desenvolvido por programação de blocos. Fonte: Autoral**

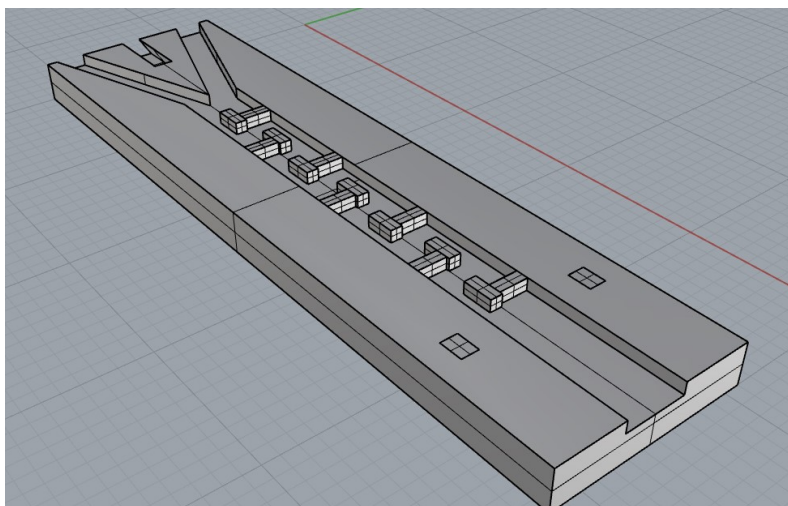
## 2.2. Processo Manual

O processo manual de criação das estruturas segue, em geral, a mesma sequência lógica utilizada no Grasshopper. Entretanto, é necessário realizar cada passo diretamente no Rhinoceros®. A sequência é similar à geração por padronização, criando as estruturas do corpo e dos canais. Neste processo, foram criadas estruturas internas (Figura 4) no canal de saída.



**Figura 4. Vista superior das estruturas internas no canal de saída. Fonte: Autoral**

Essas estruturas internas foram desenvolvidas de forma similar ao corpo principal, definindo suas dimensões para gerar dois sólidos retangulares que se unem formando uma geometria em "L". Essas estruturas têm o propósito de aumentar o nível de mistura das espécies dentro dos microcanais. Quando desenvolvidas completamente, as estruturas junto dos canais, obteve-se o microrreator da figura 5.



**Figura 5. Vista 3D do microrreator aberto. Fonte: Autoral**

### **2.3. Produção das Peças**

Após a elaboração das estruturas, os sólidos foram convertidos em malhas, permitindo que o design fosse salvo no formato de estereolitografia (.stl) para impressão.

Os materiais utilizados na produção incluem resinas Vero Blue, Vero White e Vero Clear, que diferem apenas na coloração, sem alterações na composição da peça. Após a produção, é necessário realizar a limpeza das peças para garantir que os canais estejam livres e abertos, permitindo a passagem dos fluidos de estudo.

## **3. Resultados e Discussão**

Durante o desenvolvimento das peças, tanto manualmente quanto por programação de blocos, foram observadas algumas limitações significativas, principalmente relacionadas à geometria do canal, à limpeza das peças e aos limites de criação da impressora Connex 350.

A dificuldade de limpeza das peças foi atribuída ao limite mínimo de escala da máquina de impressão, que é de  $400\mu\text{m}$ . Os testes iniciais foram realizados em escalas próximas a esse limite, o que resultou em deficiências na criação das estruturas. Essa limitação dimensional impôs desafios na remoção de materiais de suporte e resíduos dos canais.

Em relação à geometria do canal, algumas peças foram projetadas com canais de entrada apresentando quinas vivas, ou seja, curvas muito drásticas (Figura 6). Essas geometrias complexas dificultaram ainda mais o processo de limpeza, pois os ângulos agudos e curvas acentuadas dificultaram o acesso para a remoção de resíduos e materiais de suporte.

Para superar essas limitações, recomenda-se otimizar o design dos canais, suavizando curvas e quinas para facilitar a limpeza, e garantir que a escala dos canais esteja bem acima do limite mínimo da impressora, permitindo uma produção mais eficiente e funcional das peças.

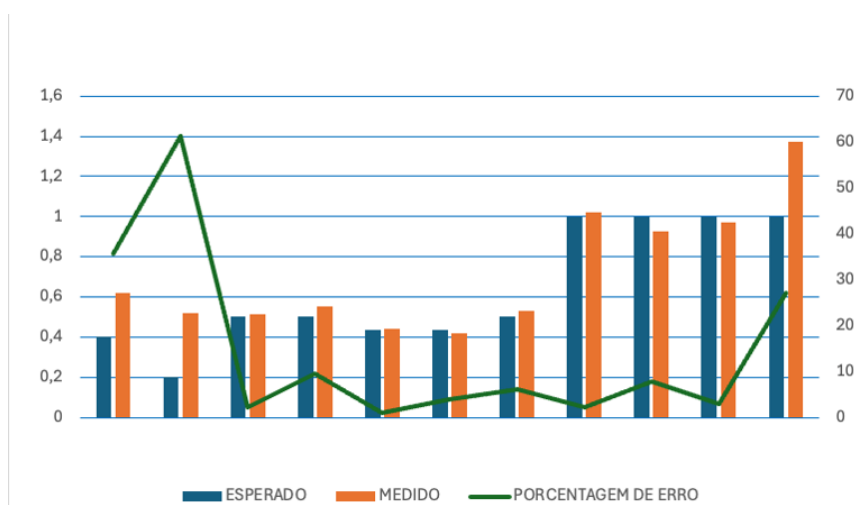


Figura 6. Canal de entrada com quina "viva". Fonte: Autoral.

Tabela 1. Relação de valor esperado e medido.

Esperado(mm)	Medido(mm)	Porcentagem de Erro	Saída/Entrada	Tipo de Canal
0,400	0,622	35,690%	Entrada	Y - Quadrangular
0,200	0,517	61,310%	Entrada	Y - Quadrangular
0,500	0,512	2,340%	Entrada	Y - Triangular
0,500	0,553	9,580%	Saída	Y - Triangular
0,434	0,439	1,130%	Entrada	Y - Triangular
0,434	0,418	3,820%	Entrada	Y - Triangular
0,500	0,532	6,010%	Saída	Y - Triangular
1,000	1,023	2,240%	Entrada	Y - Circular
1,000	0,928	7,750%	Entrada	Y - Quadrangular
1,000	0,972	2,880%	Entrada	Y - Quadrangular
1,000	1,370	27,010%	Saída	Y - Quadrangular

Para realizar uma melhor análise dos dados obtidos plotou-se uma tabela (tabela 1) e conseqüentemente um gráfico (figura 7), de modo a relacionar as variáveis de canais estudadas.



**Figura 7. Relação de valor esperado e medido. Fonte: Autoral.**

#### 4. Conclusão

O processo de padronização de produção das peças demonstrou-se essencial quando visa-se um funcionamento equivalente em toda a área de ação da síntese de fluidos. Em relação a tal desenvolvimento foram encontrados alguns problemas, onde teve-se a dificuldade de limpeza das peças quando retiradas da Connex 350 e também a limitação das escalas das peças.

Estas implicações levaram ao desenvolvimento do conhecimento necessário para a construção da peça completa, de maneira a evitar possíveis delimitações implementadas pelo método de elaboração.

#### 5. Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Harrson S. Santana, meu coorientador, Marcelo Oliveira, e ao Leonardo M. Machado pelos valiosos ensinamentos durante o período de Iniciação Científica. Graças a eles, pude expandir meu conhecimento teórico e prático, o que contribuiu significativamente para o meu desenvolvimento como pessoa e pesquisador. Agradeço também ao MCTI, CNPQ e DITPS pela oportunidade de realizar esta pesquisa através da bolsa concedida e espaço de trabalho.

#### Referências

- Al-Sulaimi, S., Kushwah, R., Al-Sibani, M., Jerry, A. E., Aldrdery, M., and Ashraf, G. A. (2023). Emerging developments in separation techniques and analysis of chiral pharmaceuticals. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 28(17):6175–6175.
- Bianchini, M., Alayo, N., Soler, L., Salleras, M., Fonseca, L., Llorca, J., and Tarancón, A. (2021). Standalone micro-reformer for on-board hydrogen production from dimethyl ether. *Cornell University*.
- Kockmann, N. (2012). Modular microstructured reactors with integrated platform concept. *Elsevier BV*, 42:1214–1218.

- Osa, A., Giroir-Fendler, A., and Valverde, J. (2015). The development of millistructured reactors for high temperature and short time contact. pages 773–796.
- Patel, M., Shah, N., and Ashe, R. (2011). *Plant-wide optimisation and control of a multi-scale pharmaceutical process*. Elsevier BV.
- Quiroz-Pérez, E., Lira-Flores, J. A. D., and Gutiérrez-Antonio, C. (2019). Microreactors: Design methodologies, technology evolution, and applications to biofuels production. pages 15–50. De Gruyter.
- Schwalbe, T., Autze, V., and Wille, G. (2002). Chemical synthesis in microreactors. *Swiss Chemical Society*, 56(11):636–636.