



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

ENGENHARIAS 2020

VIABILIZAÇÃO DO USO DE MANUFATURA ADITIVA NO PROCESSO DE AGITAÇÃO E MISTURA

Mateus Bueno Veris¹
Tadeu Henrique Aparecido da Silva¹
Monica Tais Siqueira D'Amelio Felipe, monica.felippe@usf.edu.br²
Universidade São Francisco
tadeu_henrique33@hotmail.com

¹Aluno do Curso de Engenharia Química, Universidade São Francisco; Campus Bragança Paulista.

²Doutora e Professora Orientadora, Curso de Engenharia Química, Universidade São Francisco; Campus Bragança Paulista.

Resumo. Na Engenharia Química uma das áreas mais atuantes no mercado de trabalho são as operações unitárias, dentro destas a de agitação e mistura. Neste projeto, através do estudo de impelidores de um agitador, impressos em impressora 3D, houve abordagens significativas que impulsionam o uso de manufatura aditiva em impelidores. Foi dividido em projeto, impressão e testes do impelidores impressos, além de teste de resistência do material. As correntes formadas foram identificadas pelo *software* de rastreamento Kinovea® e identificaram-se as correntes radial e axial para as pás retas, sendo estas minimizadas pela inserção de chicanas, e nos impelidores tipo âncora, foram identificadas a corrente tangencial nitidamente. O método se mostrou viável pela resistência do material e pela eficiente aplicação e identificação das correntes.

Palavras-chave: agitação; mistura; correntes; impressão 3D.

Abstract. In Chemical Engineering one of the most working areas in the labor market are unit operations, within these the agitation and mixing. In this project, through the study of impellers of an agitator, printed on a 3D printer, there were significant approaches that drive the use of additive manufacturing in impellers. It has been divided into design, printing and testing of printed impellers, as well as material strength testing. The formed currents were identified by the Kinovea screening software® and radial and axial currents were identified for the straight blades, which were minimized by the insertion of chicanes, and in the anchor-type impellers, the tangential current was clearly identified. The method proved to be viable by the resistance of the material and the efficient application and identification of currents.

Key-words: agitation; mixture; chains; 3D printing.

Introdução

Na engenharia química há diversos segmentos em que o engenheiro pode atuar, podendo ser desde a área de processos químicos até desenvolvimento de produtos. Área que

fortemente deve ser compreendida por este engenheiro é a de Operações Unitárias que são os meios pelos quais acontecem os processos químicos. Dentro das operações unitárias, a agitação e mistura se destacam pela sua diversidade industrial, e que devem promover perfeita homogeneização de materiais como em indústrias de cosméticos, de medicamentos e aquelas que realizam reações heterogêneas.

Operações Unitárias

As operações unitárias são encontradas desde o “chão da indústria” até na vida doméstica, nota-se nas atividades domésticas onde há a filtração do pó no preparo de café ou no preparo e mistura de ingredientes para produzir um bolo, ou uma simples diluição de um suco concentrado. Já na área industrial como as áreas de mineração, fundição, alimentícias ou na extração do açúcar e do álcool da cana de açúcar, nos processos de filtração e tratamento de água e esgoto e em outras ramificações de produção.

Na engenharia química, projetos e construções estão em sua essência. Importante dizer que o domínio dos princípios físicos e químicos são de grande relevância quando se refere à fabricação. O êxito do empreendimento, não só depende do domínio dos princípios físicos e químicos, mas também do domínio dos desafios que a engenharia proporciona ao longo do projeto. O estudo de operações unitárias proporciona a experiência que definirá o alcance do objetivo desejado.

As operações unitárias são as etapas individuais de um processo, que visam ao tratamento, separação e o transporte físico de matéria e/ou energia (CREMASCO, 2014). Estão intimamente relacionadas com os princípios da termodinâmica e mecânica dos fluidos. Perry (2008) destaca os conceitos de cada operação unitária e aquelas que utilizam duas ciências é o processo de Agitação e Mistura que é possível atribuir o cálculo da potência do equipamento e a definição do tipo de impelidor para cada tipo de escoamento, de acordo com os componentes utilizados.

Sistema de Agitação e Mistura

Em sua definição, a agitação é um movimento circulatório induzido de maneira direta sobre um material dentro de um recipiente. Destaca-se que a agitação consiste numa operação com uma fase só, a partir do momento que se adiciona uma segunda, a operação unitária é denominada de mistura. Conforme sua definição, mistura é uma distribuição aleatória de duas ou mais fases que inicialmente estavam separadas e visa a homogeneização. Como exemplo, podemos citar, a própria produção de bolo caseiro, no qual colocam-se vários ingredientes, por consequência, várias fases e a batedeira tem a função de homogeneizar em uma única fase.

As duas operações têm o mesmo princípio, mas como elas diferem em quantidade de componentes e cada um deles tem propriedades físico-químicas diferentes, elas podem até apresentar equipamentos com o mesmo princípio, porém seus impelidores são diferentes. Decorrente disso identifica-se que o equipamento deve ser bem projetado o qual é completo devido aos diversos fatores que influenciam no sistema (PERRY, 2008).

McCabe (2005) fala que o projeto de um agitador é um tanque de fundo arredondado para que não haja formação de zonas mortas, com um eixo apoiado, no centro, com um motor acoplado nele e que gira os impelidores na outra ponta do eixo (Figura 1). Na Tabela 1 se encontra cada parte do agitador especificados individualmente.

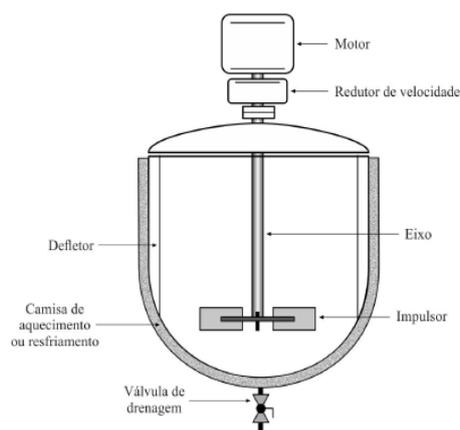


Figura 1. Esquema de um tanque com agitador (Fonte: Tadini et al, 2018).

Tabela 1. Elementos de um Reator tipo Tanque Agitado.

Equipamento	Descrição
Motor	Equipamento que converte energia em movimento, no caso do tanque agitado ele proporciona a rotação do eixo
Redutor de Velocidade	Componente elétrico que controla o quando de energia é convertido no motor e transmitido ao eixo em forma de rotação do eixo. Quanto mais energia é transmitida ao eixo mais velocidade terá a rotação e vice-versa.
Eixo	Haste de suporte que sofre o movimento de rotação transmitido pelo motor e que tem os impelidores conectados.
Impulsor/ Impelidor	Pás ou âncoras que impulsionados pela rotação do eixo movimentam o meio do sistema para que ele se agite ou misture.
Defletor/ Chicana	São placas planas instaladas junto à parede do tanque com o objetivo de eliminar a formação do vórtice ao redor do eixo.
Camisa de aquecimento ou resfriamento	Sistema que contrapõe a temperatura do sistema, pois há reações exotérmicas e endotérmica, ou seja, em certas reações ocorre a transmissão externa de calor e para que ocorra a reação é preciso resfria-la, o contrário também é válido.
Válvula de drenagem	Válvula no qual o meio relacionado é retirado após o término da reação.

Fonte: Adaptado de Tadini et al, 2018.

A escolha do impelidor deve ser dependente do fluxo das correntes, fazendo com que haja misturadores com impelidores diferentes para que misturem conforme as correntes de fluxo. Existem três tipos de correntes: axial, radial e tangencial, podendo ser mistas (PERRY, 2008).

Tipos de correntes

Corrente Axial são correntes geradas pelo impelidor que ocorrem paralelas ao seu eixo. Esse tipo de corrente acontece quando o fluxo sai de um propulsor de cerca de 45°. O padrão de circulação que ocorre é de recirculação (PERRY, 2008), conforme apresenta a Figura 2.

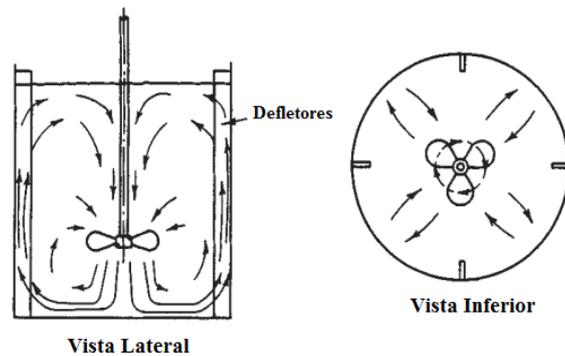


Figura 2. Representação da corrente axial (Adaptado de: PERRY, et al., 2008).

Corrente Radial são correntes geradas pelo impelidor que ocorrem paralelas às pás do próprio impelidor (PERRY, 2008), pode-se observá-la na Figura 3:

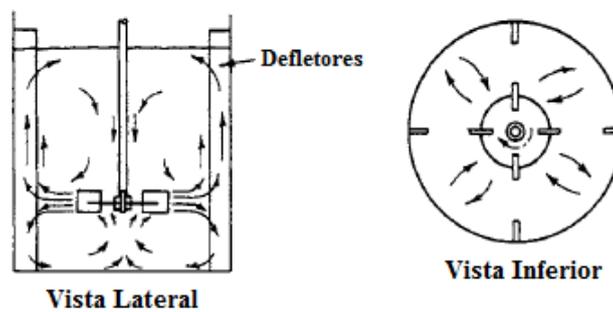


Figura 3. Representação da corrente radial (Adaptado de: PERRY, et al., 2008).

Corrente Tangencial ocorre quando o impelidor gera um fluxo circular e impulsiona o meio em direção em torno da parede do tanque (Figura 4). O grande problema desta corrente é a formação de vórtices, o qual é prejudicial ao sistema (MCCABE, 2005).

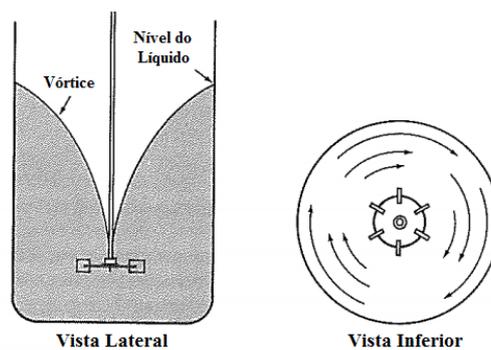


Figura 4. Representação da corrente tangencial (Adaptado de: McCabe, et al., 2005).

Tipos de Impelidores

Ao se falar de impelidores, precisa-se conhecer o produto a ser agitado, pois ele quem irá determinar o tipo de impelidor a ser usado. Para produtos líquidos e de baixa viscosidade é indicado impelidores do tipo propulsores, pás e o de turbina. Já para produtos líquidos com alta viscosidade, é indicado impelidores do tipo hélice como o âncora. Neste trabalho o foco são os impelidores tipos hélices e o do tipo âncora.

Tipo Âncora: normalmente são chamadas de raspadores por ter o diâmetro das pás, próximo ao do tanque, de acordo com McCabe 96% do diâmetro do tanque. Eles são usados para misturas de componentes muito viscosos em regime laminar, no qual só há movimentação circular (Figura 5) (SABIONI, 2013).

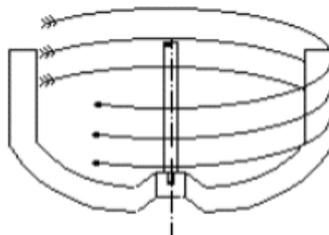


Figura 5. Impelidor do Tipo Âncora. (Fonte: SPOGYS, 2002)

Tipo Pás: normalmente contém de 2 a 6 pás retas, têm como características a formação de correntes paralelas, sendo correntes radiais se as pás estiverem a 90° na vertical (Figura 6) e axiais se as pás estiverem inclinadas a 45° (Figura 7). Em sistemas que a velocidade de agitação é baixa não há necessidade do uso de chicanas, porém em baixas velocidades há presença de vórtice, movimento circular do líquido (SABIONI, 2013).

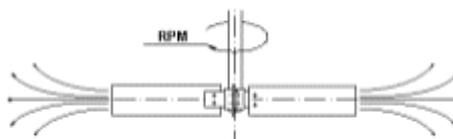


Figura 6. Impelidor do Tipo Pá Reta 90° . (Fonte: SPOGYS, 2002)

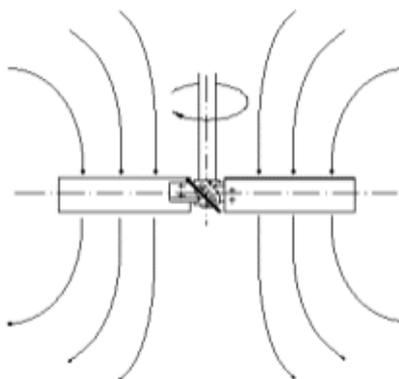


Figura 7. Impelidor do Tipo Pá Reta 45° . (Fonte: SPOGYS, 2002).

Outros tipos de impelidores são usadas para casos específicos como a **tipo turbina** que é semelhante ao tipo pás e é eficaz em uma grande variedade de viscosidade. Também existe impelidores do **tipo Rouston**, que é em formato de disco, ela é usada em misturas de líquidos imiscíveis e gases, única contrariedade é o alto consumo de potência. (SPOGYS, 2002).

Formação de Vórtices

A formação do vórtice não é viável para o processo de agitação e mistura, pois a ação centrífuga que age no líquido em rotação pode gerar estratificação permanente em vários níveis, manter substâncias sem se misturar, acúmulo de sólidos embaixo do agitador, e a não homogeneização da mistura, entre outras consequências (Fonte: SABIONI, 2013). Cada tipo de corrente gera vórtice e para evitar sua formação deve buscar soluções diferentes.

Vórtices em correntes radiais comumente são evitados através de chicanas, colocando de dois a quatro geometricamente separados (PERRY, 2008). Já para o vórtice criado em correntes axiais podemos descentralizar o sistema eixo-impelidor, inclinando-o em 15° ou mantê-lo no centro e usar defletores (Chicanas) 1 a 3 em tanque pequenos e 4 tanques grandes (SPOGYS, 2002).

SPOGYS faz um estudo em CFD (*Computational Fluid Dynamics*) no qual comprova que o uso de chicanas permite a formação de correntes normalmente nos casos de correntes radiais (Figura 8) e correntes axiais (Figura 9).

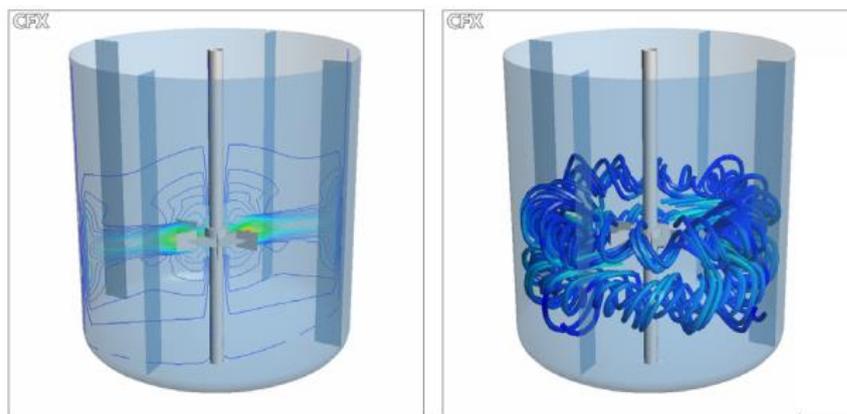


Figura 8. Vórtice formado pela corrente radial. (Fonte: SPOGYS, 2002)

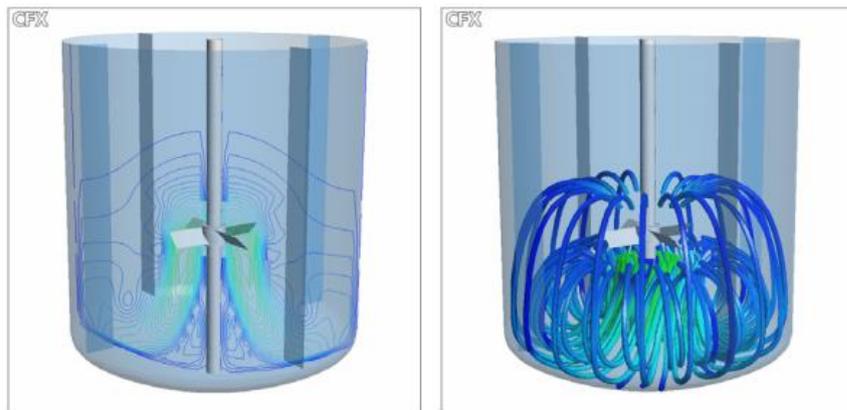


Figura 9. Vórtice formado pela corrente Axial. (Fonte: SPOGYS, 2002)

Já em correntes tangenciais não há necessidade do uso de chicanas, pois o fluxo rotacional dos meios viscosos não forma vórtices, Spogys mostra com o estudo em CFD o movimento circular na Figura 10.

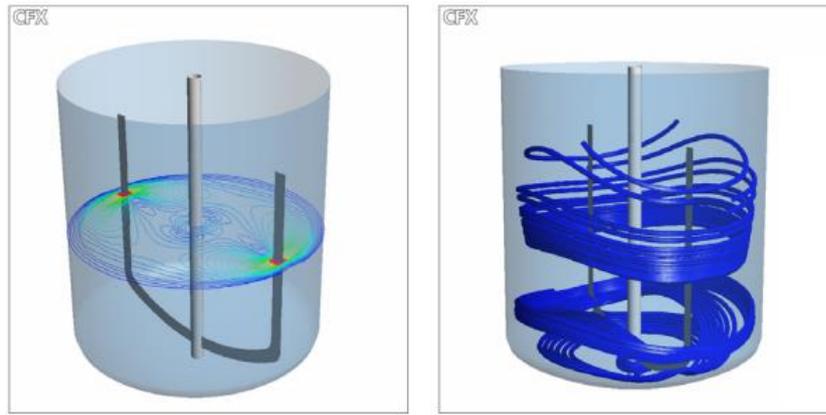


Figura 10. Vórtice formado pela corrente Tangencial. (Fonte: SPOGYS, 2002)

Analisando a influência do vórtice no sistema nos mostra a importância do correto e de um bom dimensionamento do sistema agitado.

Dimensionamento do Tanque Agitado

A partir do momento que é escolhido o tipo de impelidor considerando o tipo de fluxo, pode-se realizar o dimensionamento do tanque. Segundo Tadini e colaboradores (2018), foram realizados diversos estudos os quais estabeleceram as proporções dos impelidores com o tanque. Deve-se considerar o tipo e localização do impulsor, as proporções do vaso, o número e as dimensões dos defletores, entre outras variáveis (MCCABE, 2005). A seguir estão apresentadas as correlações entre os impelidores e o tanque e na Figura 11 estão apresentadas as variáveis identificadas no tanque.

$$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3} \quad \frac{H}{D_t} = 1 \quad \frac{J}{D_t} = \frac{1}{12} \quad \frac{E}{D_a} = 1 \quad \frac{W}{D_a} = \frac{1}{5} \quad \frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$$

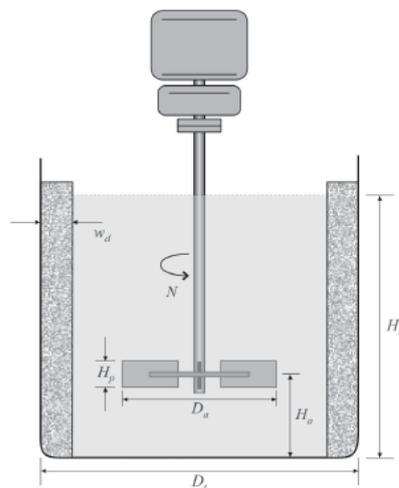


Figura 11. Definição dos elementos de um agitador (Fonte: TADINI, 2018).

O bom projeto de um agitador proporciona ao equipamento melhor funcionamento e melhor eficiência. O estudo dos impelidores e as correntes que serão formadas são de grande importância na Engenharia química, relacionando toda questão de projeto, desenho e dimensionamento.

Processos de fabricação de impelidores: manufatura aditiva

A viabilização do estudo de diferentes geometrias para impelidores depende fortemente de estudos experimentais. Infelizmente, a fabricação de impelidores é um processo caro em função da matéria prima e da dificuldade de construção. Em geral se utilizam metais e eles são obtidos por processos como fundição, soldagem e até fresagem. Esses processos são executados por empresas especializadas e os equipamentos empregados nestes processos são de alto custo. Assim, com os recentes avanços no campo de materiais, surgiu a oportunidade de empregar um novo método de fabricação: a manufatura aditiva.

A manufatura aditiva é um processo que permite a criação de formas geométricas por meio da adição de materiais, normalmente através de empilhamento de camadas do material. O princípio dessa tecnologia se baseia no fato de que qualquer objeto, teoricamente, pode ser fatiado em camadas e posteriormente ser reconstruído com elas, independentemente de sua complexidade (Figura 12) (GEBHARDT e HÖTTER, 2016).

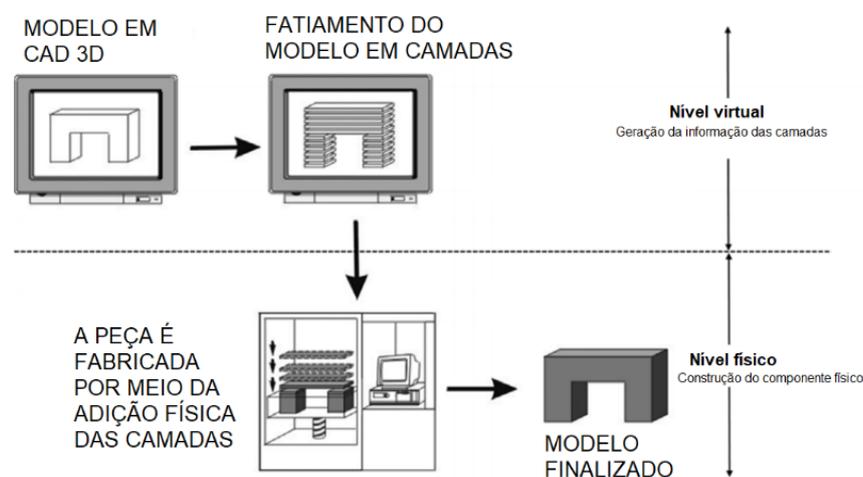


Figura 12. Conceito de manufatura aditiva. (Adaptado de: GEBHARDT e HÖTTER, 2016).

Os equipamentos utilizados para fabricação por manufatura aditiva são chamados de impressoras 3D. Estes dispositivos podem trabalhar com uma grande diversidade de materiais, desde polímeros até metais, cerâmicas, vidros e, recentemente, células vivas (JANG et al 2018). Dada a gama de materiais e aplicações, os preços também podem variar entre US\$200,00 até mais de €800.000,00 (LOCKER, 2019 e GEBHARDT e HÖTTER, 2016). A Universidade São Francisco dispõe de impressoras 3D em seus campos, assim como os filamentos de polímeros ABS e PLA, tipicamente empregada em impressoras deste porte.

Devido à escala industrial ser de altas dimensões, o engenheiro deve evitar desperdícios e erros que causem gastos incisivos na empresa. O estudo desta operação unitária requer a variação de muitos itens de operação, como velocidade de rotação, viscosidade do fluido, temperatura, tipo de impelidor, entre outros. Logo é necessário o estudo em pequenas escalas, na qual ele supõe o necessário reduzido e assim que pronto o projeto realiza-se o aumento de escala real.

O estudo em escala laboratorial permite que todas essas variáveis sejam ajustadas. Entretanto, seu custo também deve ser minimizado. Uma alternativa é a aplicação da manufatura aditiva para a fabricação dos impelidores, pois desta forma, é possível testar diversos tipos em diferentes dimensões. Utilizando a manufatura aditiva, podem-se projetar diversos impelidores para estudar as diferentes correntes formadas no meio.

Neste âmbito, visando a otimização de um processo de agitação e mistura, pretende-se dimensionar impelidores para impressão 3D utilizando manufatura aditiva e estudar as

correntes que eles geram através do acompanhamento de uma esfera no meio, além de verificar parâmetros de processo como tempo de mistura e cálculo de potência.

Metodologia

Impressão e Testes dos Impelidores

Após os estudos foram definidos os tipos de impelidores e assim conhecer a impressora 3D da Universidade. As dimensões dos impelidores tiveram como limite as dimensões permitidas na impressora. A partir desta condição de contorno, os impelidores foram desenhados e definiu-se um padrão para todos os impelidores em função dos limites da Impressora.

Foi utilizado o Software AutoCAD®. A impressão dos impelidores foi realizada na Impressora 3D Zmorph 2.0 SX disponível no Campus Bragança Paulista da Universidade São Francisco (Figura 13). Com os desenhos prontos, foi gerado o arquivo em formato próprio (.stl) e enviado para o setor de impressão para que fosse convertido pelo Software exclusivo da impressora.



Figura 13. Impressora 3D Zmorph 2.0 SX disponível no campus Bragança Paulista.

O material utilizado para a impressão foi o ABS de alta densidade, devido à necessidade que ele fosse resistente a altas rotações e que resistissem a forças de arraste e centrífuga no agitador. A configuração de impressão foi máxima densidade, com preenchimento maior que 75%, o que os tornou bem mais resistentes.

Assim que impressos os impelidores, foi testada sua resistência em dois tipos de rotores: primeiro em um *mixer* utilizado para fabricação de cremes no laboratório de química da USF e depois em uma furadeira Tork devido à sua alta potência e força. O segundo teste com a furadeira, também foi realizado em água para verificar sua resistência às forças contidas em um tanque com um meio aquoso.

Teste de Resistência do material

Para saber a resistência dos impelidores, foram impressos três corpos de prova (Figura 14), que foram tracionados na máquina de tração da Universidade São Francisco do campus de Itatiba.



Figura 14. Corpos de prova impressos em ABS.

A impressão de corpos de provas foi realizada com a mesma densidade, porcentagem de preenchimento da impressão dos impelidores e o mesmo material. O corpo de prova seguiu os parâmetros da norma ASTM D638 (Padronização de Métodos de Testes para propriedades de Tensão de Plásticos), como pode ser observado na Figura 15 e na Tabela 2.

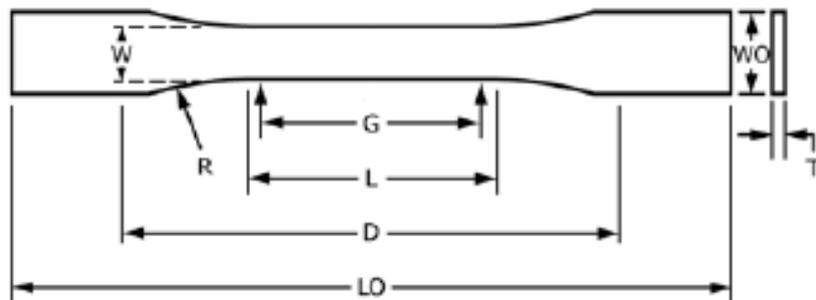


Figura 15. Desenho do corpo de prova (Adaptado de: ASTM, 2014).

Tabela 2. Dimensões da amostra.

Sigla	Significado	Dimensão (mm)
W	Largura da seção estreita	13
L	Comprimento da seção estreita	57
WO	Largura total	19
LO	Comprimento total	165
G	Comprimento da seção de ensaio	50
D	Distância entre as garras	115
R	Raio do arco	76
T	Espessura	7

Fonte: Adaptado de: ASTM, 2014.

Determinação das Correntes

Para a identificação das correntes foram definidas algumas formas de acompanhamento das correntes, como o uso de pigmentos e objetos que assim carregados pelo fluxo auxiliam na sua identificação. Para caracterizar as correntes foi escolhido utilizar o *software* Kinovea®, o qual consegue seguir um ponto e assim traçar a trajetória deste.

O teste foi realizado em pequena escala, no qual foi coletado a amostra e colocada em um béquer de 5 litros com o impelidor fixado em um *mixer* de bancada e depois em um manual, com controle de velocidade. Como o béquer possui paredes transparentes, foi possível realizar as gravações. Para os testes foram utilizado água como líquido menos viscoso e um amaciante de roupas da marca Downey, como líquido viscoso.

Para a visualização das correntes foram realizados seis testes, três com cada misturador, devido ao *mixer* de bancada ter velocidade inicial de 400RPM, e o *mixer* manual possuir 3 velocidades: 100RPM, 250RPM e 400RPM. Foram utilizados dois tipos de partículas e o uso de chicanas, devido à velocidade e à força de arraste. Os testes estão especificados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros dos Testes de Visualização das Correntes

Teste	Impelidor	Corrente Visualizada	Chicana	Mixer	Meio	Partícula
1	Pá Reta 90°	Radial	Não	Bancada	Água	Carvão Ativado
2	Pá Reta 90°	Radial	Sim	Manual	Água	Carvão Ativado
3	Pá Reta 45°	Axial	Não	Bancada	Água	Carvão Ativado
4	Pá Reta 45°	Axial	Sim	Manual	Água	Carvão Ativado
5	Âncora Chapada	Tangencial	Não	Bancada	Amaciante	Corante
6	Âncora Cruzada	Tangencial	Não	Manual	Amaciante	Corante

Fonte: Próprio autor.

Resultados e Discussão

Impressão e Testes dos impelidores

A revisão bibliográfica realizada auxiliou no desenvolvimento teórico da metodologia a ser empregada e permitiu definir *a priori* 4 tipos de impelidores para o estudo: dois do tipo pá reta, um com pá 90° e um com pá 45°, para a realização de testes com alta viscosidade, e dois do tipo âncora, um chapado e outro cruzado, para líquidos com baixa viscosidade, como pode ser visto na Figura 16.



Figura 16. a) Impelidores impressos do tipo pá reta 45° e 90°. b) Impelidores impressos do tipo âncora.

Para determinar a dimensão dos impelidores, foram conhecidos os limites da impressora, a qual possui limite de altura de 15 cm. A partir desta condição de contorno, os impelidores foram desenhados. Também se definiu um padrão para todos os impelidores em função da altura: o diâmetro do eixo deve ter 1 cm, a pá deve ter espessura de 0,3 cm e 5 cm de comprimento e o impelidor todo deve ter largura máxima de 11 cm.

Para manter as dimensões padrões propostas, foram realizadas algumas adaptações como, por exemplo, no impelidor pá 45° foi necessário desenhar uma base quadrada para que fosse possível colocar o ângulo proposto no eixo. No impelidor âncora, foi colocada uma haste de suporte, como pode ser visto na Figura 17.

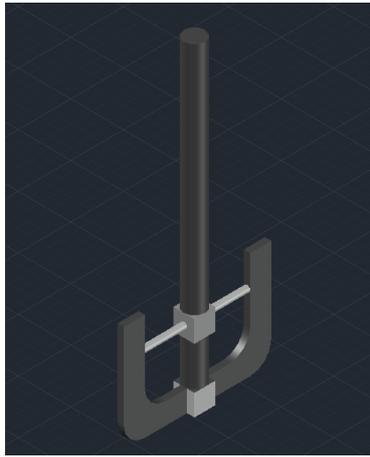


Figura 17. Impelidor âncora com haste de suporte.

Os testes dos impelidores consistiram em visualizar a capacidade do impelidor se manter estável sobre pressão, força de arraste e sob variação de temperatura. Primeiramente, os impelidores foram testados com dois tipos de rotores. O primeiro, com baixa rotação e o segundo, uma furadeira (Figura 18), com o objetivo de verificar a estabilidade da estrutura dos impelidores. Todos os impelidores apresentaram boas características para as situações.



Figura 18. Teste do impelidor do tipo âncora em recipiente translúcido.

Testes de Resistência do material

Já os testes de resistência mecânica, obtiveram uma curva de deformação com uma inclinação menor e alta deformação (Figura 19), devido aos valores de seu eixo x se prolongarem, enquanto aos valores do eixo y não tanto. Assim, nos mostra a ductilidade do material, representando que o material ele é resistente, não se quebra facilmente, mas pode sofrer deformações de acordo com a pressão exercida nele, pelo tempo de uso, ou seja, quanto maior a velocidade, maior a força de arraste gerada e maior a pressão sobre ele, causando deformações.

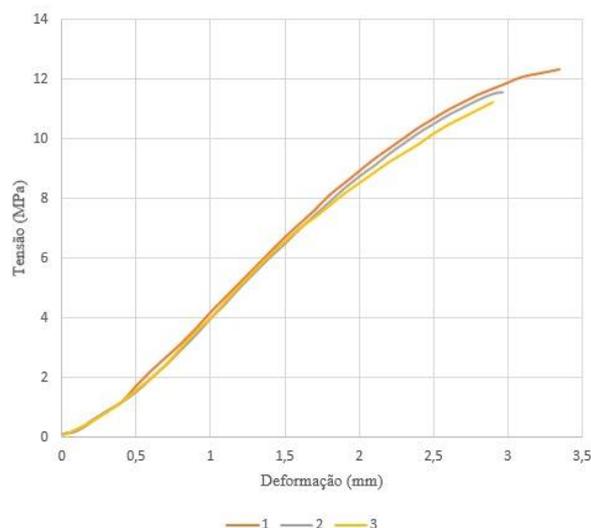


Figura 19. Curva de deformação do material.

Para verificar a resistência do impelidor foi testado a velocidades elevadas, nos testes no *mixer* de bancada, ao alcançar velocidade maiores que 600 RPM, elevou-se a temperatura no impelidor, e assim observou-se deformação nos impelidores de pá reta, devido ao ponto de fusão do material ser baixo e ao material ser dúctil. Já nos testes dos impelidores âncora apresentaram vibrações após a velocidade de 300 RPM, apresentando instabilidade.

Isso demonstrou que o material tem suas limitações de rotação e assim definiu-se os limites de velocidade, a partir do momento de percepção da deformação e das vibrações, da seguinte forma:

- O impelidor de pás retas 90°, apresentou deformação há 650 RPM;
- O impelidor de pás retas 45, apresentou deformação há 800 RPM;
- O impelidor âncora de 4 pás, apresentou forte vibração há 300 RPM;
- O impelidor âncora de 2 pás, apresentou forte vibração há 400 RPM.

Quando se compara essas velocidades com as velocidades características de cada um deles percebe-se a extrema resistência dos impelidores impressos com ABS, mesmo o material sendo passivo à deformação, só a ocorreu nos impelidores de pá reta, a partir de uma velocidade seis vezes maior que a referente. Na literatura de Penny (1970), encontramos as velocidades características de cada impelidor, assim como mostra a Figura 20.

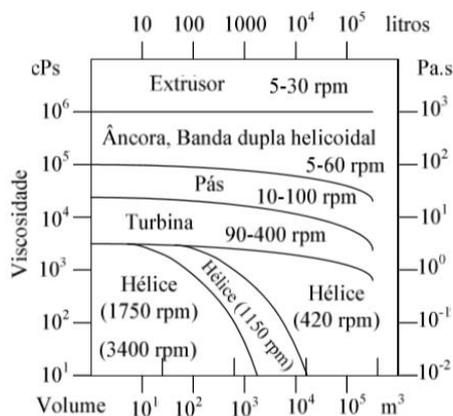


Figura 20. Ábaco com o tipo de agitador em função da viscosidade do fluido e do volume a ser agitado. (Adaptado de: PENNY, 1970).

Determinação das correntes

Para a determinação das correntes foi utilizado o *mixer* manual devido a ter um controlador de velocidade, alcançando uma velocidade mais próxima à ideal. Nos primeiros testes, foi observada a presença de vórtices (Figura 21). Para solucionar esse problema, foi introduzida uma chicana para eliminar o vórtice formado (Figura 22).



Figura 21. A) Vórtice no sistema. b) Vórtice sequenciado pelo Software Kinovea®.



Figura 22. Sequenciamento da Trajetória da Corrente Axial.

Com o auxílio da chicana e da utilização de uma quantidade maior de partículas, foi possível observar a corrente, no qual fazia a circulação do carvão ativado em paralelo ao eixo (Figura 23). Entretanto, com o excesso de partículas, o *software* Kinovea® não conseguiu fazer o rastreamento pela alta quantidade de partículas.



Figura 23. Corrente Axial visualizada lateralmente.

Já nos testes com o impelidor pá reta 90° , foi visualizada a corrente radial (Figura 24). Foi perceptível a movimentação das partículas em paralelo às pás acima delas. Com isso, pode-se concluir que é necessário diminuir a alturas das pás do impelidor de pá reta 45° , que são de 1 cm.

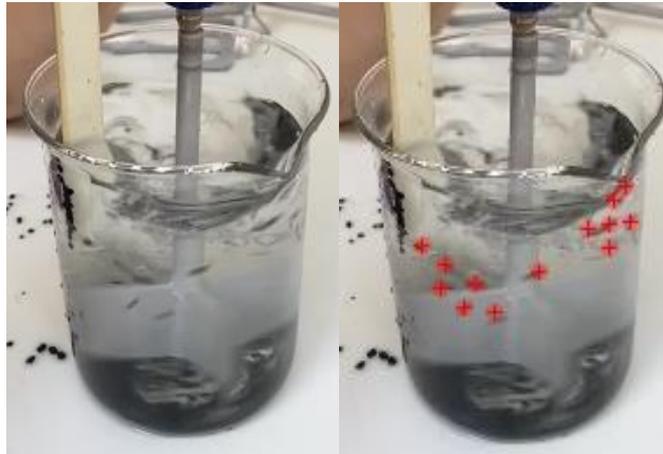


Figura 24. Sequenciamento da Trajetória da Corrente Radial.

Nos testes com os impelidores do tipo âncora, a visualização da corrente tangencial foi percebida mesmo sem o corante, que se mostrou desnecessário (Figura 25).

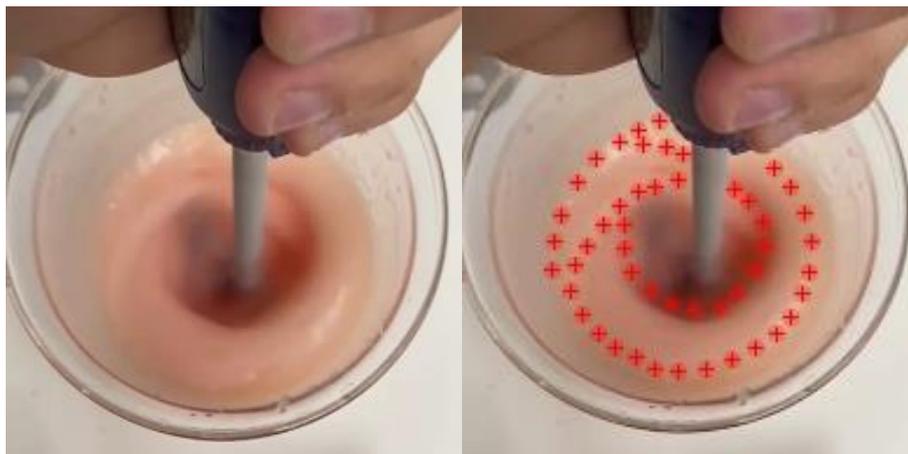


Figura 25. Sequenciamento da Trajetória da Corrente Tangencial.

Após a realização dos testes com cada um dos impelidores, observou-se que mesmo visualizando parcialmente as correntes axiais e radiais e totalmente a tangencial, as correntes são formadas como na teoria ilustrada por McCabe e Perry. Assim, demonstra-se que o software é capaz de visualizar as correntes em certas situações.

Conclusões

A impressão de impelidores por manufatura aditiva demonstrou eficácia em questão de fabricação dos impelidores, como são impressos camada por camada, mantém boa qualidade em partes complicadas de serem usinadas, como partes com ângulo de 90° . Assim, observou-se qualidade e rapidez na fabricação de impelidores, nos quais conhecendo as limitações da impressora e definindo parâmetros de impressão, pode-se obter a melhor impressão possível destes.

Quanto ao material o ABS, mesmo apresentando certa ductilidade, também demonstrou ótima resistência, suportando velocidades de cinco a seis vezes maiores que sua velocidade característica. Isso nos permite concluir o quão adequado é o material para a impressão de impelidores e seu uso, mesmo excedendo sua velocidade.

No quesito de visualização das correntes, foi possível observar parcialmente a formação das correntes axiais e radiais, nos quais as partículas se movimentavam paralelas às suas referências, mas precisando de maior quantidade de partículas para ser visualizada, que impediram o sequenciamento de sua trajetória, e totalmente na tangencial, que foi perceptível, mesmo sem o uso do corante. Assim, pode-se dizer que o *software* Kinovea® se demonstrou eficiente para a visualização das correntes.

Com base no demonstrado, conclui-se que há viabilidade no uso de impelidores impressos por manufatura aditiva, pois podem reproduzir às correntes referentes a eles, mostrando que são eficazes e podem ser utilizados em diversas áreas, desde as industriais até as laboratoriais. Pode-se sugerir o uso deles em sistemas em menor escala, como em testes específicos, que proporcionalmente, reproduzem a fabricação de alguma mistura, não havendo a necessidade de encomenda de um impelidor de material metálico que será usado em pequenas quantidades, economizando valores e tempo de produção.

Referências Bibliográficas

ASTM, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638 – 14: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**: ASTM-International, U.S.A. 15 dez. 2014.

BARBOSA, E. J. **Dimensionamento do eixo do impelidor em sistemas de agitação e mistura para processos industriais** / Eduardo José Barbosa. --Campinas, SP: [s.n.], 2004.

CREMASCO, Marcos A. **Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluido mecânicos**. 2. Ed. São Paulo: Blucher, 2014.

DICKEY, D.S., FENIC, J.C. **Dimensional analysis for fluid agitation system**. Chemical Engineering, p. 139-145, January 1976.

EARLE, R.L. Earle, M.D. **Unit Operations in Food Processing**. 2. Ed. Pergamon: NZIFST (Inc.), 1983.

ELMER, J.J.; KRAUT, D.A. **3-D Printing and Arduino in the Chemical Engineering Classroom: Protein Structures, Heat Exchangers, and Flow Cells**. In: 2018 ASEE Annual Conference & Exposition. 2018.

FASANO, J.B., BAKKER, A., PENNEY, W.R **Advanced impeller geometry boosts liquid agitation**. Chemical Engineering, p. 110-6, Aug.1994.

GEBHARDT, A.; HÖTTER, J.S. **Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing**, Munique: Carl Hanser Verlag, 2016.

GOMIDE, REYNALDO. **Operações Unitárias 1º Volume: operações com sistemas sólidos granulares**. São Paulo: R. Gomide, 1980.

JANG, J.; PARK, J.Y.; GAO, G.; CHO, D.W. **Biomaterials-based 3D cell printing for next-generation therapeutics and diagnostics**. Biomaterials, v. 156, p. 88-106, 2018.

LOCKER, A. **Best Cheap 3D Printer Priced Under \$200/300/500/1000**. Disponível em: <<https://all3dp.com/1/best-cheap-budget-3d-printer-affordable-under-500-1000/>>. Acesso em 10 de março de 2019.

MARTINI, Tiago L. **Influência dos impelidores e condições de mistura na produção de insumos químicos para o setor coureiro**. (Trabalho de conclusão de curso – Engenharia Química). UFRGS. Porto Alegre, RS: [S.N.], 2010.

MCCABE, WARREN L. SMITH, J.C. HARRIOT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 5. ed. McGraw-Hill, Inc., 2005.

NILSSON, S.M.E.; HAAPALA, M.; PÖHÖ, P.; GENNÄS, G.B.; KAUALUOMA, J.; KOTIAHO, T. **A miniaturized 3D printed polypropylene reactor for online reaction analysis by mass spectrometry**. Reaction Chemistry & Engineering, v. 2, n. 3, p. 299-303, 2017.

PENNY, W.R. **Guide to trouble free mixers**. Chem. Eng., Vol.77, No.12, 1970, p.171.

PERRY, ROBERT H. **Perry's chemical engineers' handbook**. 7. Ed. McGraw-Hill, Inc. 2008.

SABIONI, L.C. SILVA, E.C. **Sistemas de Agitação e Mistura** (Trabalho de Conclusão de Curso – Técnico em Mecatrônica Industrial). Garça, SP: [s.n.], 2013.

SPOGYS N. **“Metodologia para determinação de curvas de potência e Fluxos característicos para impelidores axiais, radiais e Tangenciais utilizando a fluidodinâmica computacional”**. (Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Química). UNICAMP. Campinas, SP: [S.N.], 2002.

TADINI, Carmen C. **Operações unitárias na indústria de alimentos**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

TATTERSON, G.B. **Scale-up and Design Industrial Mixing Process**. McGraw-Hill, Inc., 1994.