

SISTEMA DE AGITAÇÃO DE UM REATOR BATELADA UTILIZADO PARA A PRODUÇÃO DE BIOPOLÍMEROS

Daniela Moura Yoshida, Universidade Estadual de Campinas, mourady@fem.unicamp.com.br
Cecilia Amélia de Carvalho Zavaglia, Universidade Estadual de Campinas, zavagl@fem.unicamp.com.br
Cleudmar Amaral de Araújo, Universidade Federal de Uberlândia, cleudmar.araujo@ufu.br
Carmen Gilda Tavares Dias, Universidade Federal do Pará, carmen87dias@gmail.com
Jessica Firmino Ferreira, Universidade Federal de Uberlândia, jehferreira06@gmail.com

Resumo. A busca do Homem por qualidade de vida e longevidade tem gerado cada vez mais a necessidade de alternativas para a reconstrução ou substituição de partes do organismo. A necessidade envolve o desenvolvimento de estudos avançados e novas tecnologias de biofabricação e obtenção de novos biomateriais que apresentem propriedades de biocompatibilidade através de interação compatível entre o material e as células. Outro aspecto inovador que vêm sendo pesquisado é a possibilidade de obtenção de biomateriais à base de recursos renováveis. Neste caso, existe uma grande dependência da tecnologia de reatores que são equipamentos responsáveis pelo controle das condições adequadas de polimerização. Um reator batelada vem sendo desenvolvido no Labiomec/Unicamp. Este trabalho mostra a modelagem matemática e numérica do sistema de agitação que é composto por 02 pás. A análise mostrou que um motor de passo de 15 Kgf cm e um conjunto de pás fabricada em aço inox suporta uma mistura de reagentes com densidade acima de 850 kg/m³.

Palavras-Chave: Biopolímeros, Reator batelada, Poliuretano, Biomateriais, Engenharia de tecidos.

1. INTRODUÇÃO

Os polímeros são utilizados pela humanidade desde a antiguidade. Em torno de 1000 A.C. se conhecem aplicações de polímeros naturais. No entanto, a ciência e a indústria dos polímeros tiveram origem no início do século XIX quando Hancock, na Inglaterra, descobriu o efeito da “mastigação” da borracha natural (Franchetti e Marconato, 2006).

Dentre os diversos materiais poliméricos que vem sendo desenvolvidos, os biomateriais apresentam versatilidade e propriedades que, em geral, são adequadas para diversos segmentos da engenharia tecidual para aplicações em biomedicina.

Biopolímeros podem, inclusive, serem obtidos a partir de plantas naturais como o açaí, a soja, o milho, a linhaça, a mamona, e o girassol. Estes biomateriais apresentam maior versatilidade e biocompatibilidade na formação dos biopoliuretanos. (Dias, *et al.* 2010; Gabriel, 2012). Por exemplo, a associação de poliuretano de açaí com hidroxiapatita é uma excelente alternativa como material para próteses e reparo de tecido ósseo, pois, além de ser biocompatível, é biodegradável e possui boas propriedades mecânicas e biológicas para estas aplicações (Silveira, 2012; Ereno, 2015).

Neste cenário, novos estudos necessitam de técnicas e tecnologias de biofabricação através do controle específico de variáveis do processo [Gabriel, 2012; Jardim 2015]. Um processo de polimerização requer ambiente controlado para a temperatura, a pressão, a adição e a agitação. O controle destas variáveis é essencial para estabelecer um equilíbrio da difusão das propriedades de reticulação e expansão física na formação dos biopolímeros [Gabriel, 2012]. Este controle é feito por um equipamento denominado de reator.

Reatores de bancada são equipamentos adequados para estudar novos processos para a obtenção de biopolímeros. No entanto, a fabricação de reatores de bancada, operando em modo batelada, ainda é fonte de estudos e pesquisas (Júnior, 2004).

A primeira etapa para projetar um reator batelada é avaliar a fonte de potência necessária para realizar a mistura dos componentes. Paralelamente, a estrutura das pás de agitação deve suportar as cargas resistivas devido à ação da força de arrasto que ocorre entre as pás e os componentes líquidos.

O Labiomec/Unicamp vem desenvolvendo um novo reator batelada para estudos de novos biopolímeros. Neste trabalho é apresentado o modelo matemático para estimar a fonte de potência do motor e uma avaliação da resistência mecânica das pás de agitação através da modelagem por elementos finitos.

2. REAÇÕES DE POLIMERIZAÇÃO

Biopolímeros são macromoléculas constituídas pela ligação de um grande número de monômeros gerados por reações químicas específicas. Os polímeros são capazes de adquirirem condições plásticas pela ação do calor e da pressão (KANTOVISCKI, 2011). Para parametrizar as reações de interesse é necessário um monitoramento eficaz do processo de copolimerização dos biopolímeros.

Para biomateriais de origem vegetal, como biopolímeros extraídos do Açaí (poliol) com Nanopartículas de Hidroxiapatita (HA) é necessário o uso de um reator de batelada com controle de variáveis. Neste caso, a mistura, em geral, é agitada no reator com taxa de aquecimento de 10 °C/min até 75 °C e pressão de 4 kgf/cm² a uma rotação de 100 RPM. Para outros materiais seriam necessários outros testes de fabricação com variação de parâmetros de processo, (Gabriel, 2012). Em um reator batelada não há entrada e nem saída de materiais para o interior do vaso, enquanto as reações estão sendo processadas. O processo por meio de batelada trabalha com controle da pressão, agitação, temperatura e adição, que variam com o tempo do processo.

Um reator em batelada possui aplicação na indústria química, porém, é limitado para processos industriais pesados, pois não permite uma produção contínua, em grande escala, devido ao tempo morto de esvaziamento e limpeza (RODRIGUES, 2015).

Visando a busca por novas tecnologias para o desenvolvimento de reatores batelada, a ISA criou em 1988, um grupo de estudos e, em 1995, foi divulgada sua primeira norma para controle de sistemas de batelada visando unificar a linguagem e os modelos para batelada, de forma que ficasse mais simples o uso das novas tecnologias. A norma ANSI/ISA S-88 é dividida em três partes; a primeira parte define o que é batelada, sua estrutura, projeto e a operação dos sistemas (ANSI/ISA-S88.01); a segunda parte é voltada para a linguagem e a codificação estrutural (ANSI/ISA-S88.02); e a terceira parte destaca as receitas (VALETE, 2015).

Por meio da definição de um modelo universal e de terminologias para processos em batelada, a norma ISA S88 permitiu a criação de uma linguagem comum ou notação, para que o processo em batelada não seja um problema e sim uma solução para laboratórios que atuam nesta área. Considerando esta norma é possível utilizar uma metodologia chamada de Automação Modular de Processos em Batelada.

3. MODELAGEM DO SISTEMA DE AGITAÇÃO E MISTURA.

A agitação de líquidos em um tanque ou vaso de forma cilíndrica deve ser feita através de um eixo suspenso conduzido por um motor (McCabe, W. L. et. al., 1993). O impulsor ou agitador cria um padrão de fluxo no sistema, fazendo com que o líquido circule através do vaso e retorne ao impulsor. Os três principais tipos de impulsores são hélices, pás e turbinas. Devido às correntes de fluxo geradas, as hélices são utilizadas com maior eficácia em vasos de grandes dimensões, onde que em agitadores mais simples é adotado o sistema de pás planas fixadas em um eixo vertical, podendo ter duas e/ou quatro lâminas. No reator batelada proposto foi projetado um sistema com 02 pás de agitação, como mostrado na figura 1.

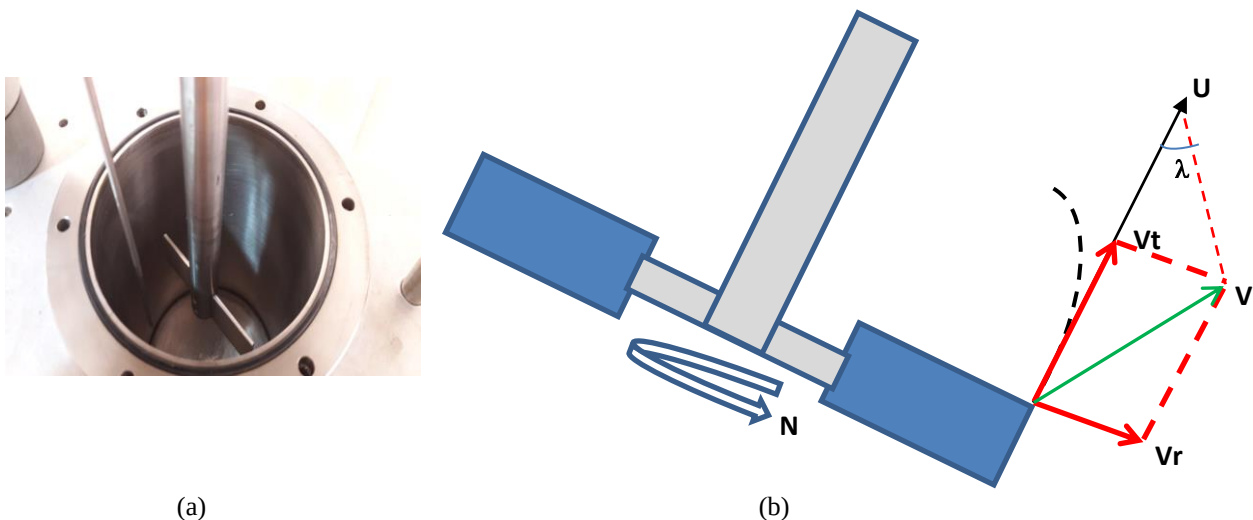


Figura 1 – a) Estrutura do vaso e do sistema de agitação do reator batelada desenvolvido no Labiomec/Unicamp. “Proteção e Registro enviada ao INPI” b) Relação entre a velocidade do fluido e a velocidade do agitador.

Nas operações de mistura e dispersão, a taxa de circulação não é o único fator, ou mesmo o mais importante; a turbulência é o fator mais eficiente desta operação. Embora a taxa de fluxo e a dissipação de energia aumentem com a velocidade do agitador, a seleção do tipo e tamanho das pás influenciam os valores relativos da taxa de fluxo e da dissipação de energia.

Considerando um reator operando em uma faixa de 70 a 80% de sua capacidade, as pás devem ser projetadas considerando o tempo de reação e os efetivos reagentes no processo. É de fundamental importância que as pás

resistam às solicitações impostas e neste trabalho esta análise foi feita através de uma modelagem matemática e modelagem numérica por elementos finitos.

Para avaliar os efeitos da vazão, mistura e potência gerada pelo agitador é necessária uma suposição do movimento do fluido associado com as pás. Considere o agitador mostrado na figura 1b e as dimensões indicadas na figura 2.

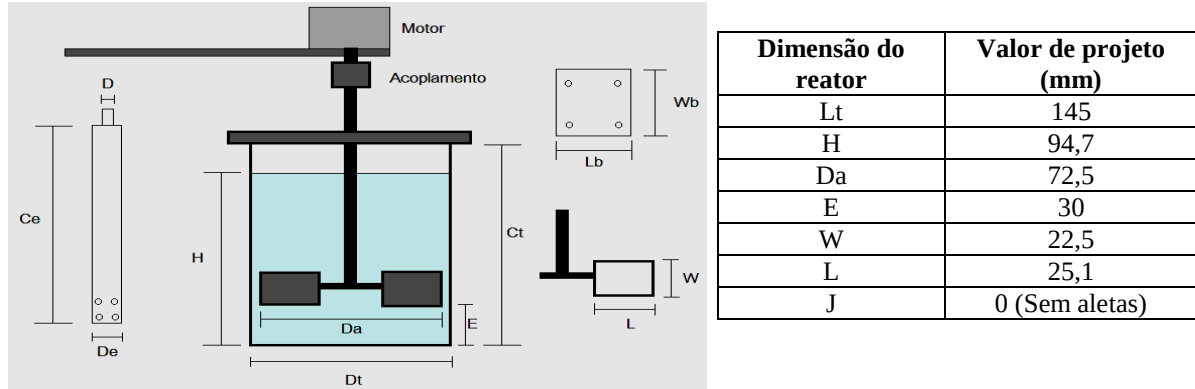


Figura 2 – Variáveis previamente definidas para o sistema de agitação por pás.

Neste modelo, U é a velocidade linear máxima na extremidade da pá, V_t e V_r são as velocidades tangenciais e radiais do líquido que sai da ponta da pá e V é a velocidade total ou resultante do líquido devido ao movimento da pá. Assumindo que a velocidade tangencial do líquido é uma fração da velocidade máxima na ponta da pá e que a taxa de vazão volumétrica da pá (q) é o produto da velocidade radial do fluido com a área varrida pela área cilíndrica gerada pelas pás, tem-se que,

$$q \triangleq N (D_a)^3 \quad (1)$$

O número de vazão (N_q) definido como,
$$N_q = \frac{q}{N (D_a)^3} \quad (2)$$

A vazão total impelida ao fluido pela ação das pás é calculada como,

$$q_T = 0,92 N (D_a)^3 \left(\frac{D_t}{D_a} \right) \text{ Para } 2 \leq \left(\frac{D_t}{D_a} \right) \leq 4 \quad (3)$$

A potência requerida para a movimentação das pás é estimada pelo produto da vazão de descarga na ponta das pás (q) com a energia cinética por unidade de volume do fluido (E_f), ou seja,

$$P = q E_f \quad (4)$$

A energia cinética (E_f) é dada por,
$$E_f = \frac{\rho}{2g} V^2 \quad (5)$$

A velocidade resultante no fluido (V) é proporcional à velocidade linear na ponta das pás (U), ou seja,

$$V = \beta \pi N (D_a) \quad (6)$$

Das equações 2, 4, 5 e 6, tem-se que,
$$P = \frac{\rho N^3 (D_a)^5}{g} \left(N_q \frac{\beta^2 \pi^2}{2} \right) \quad (7)$$

Em forma adimensional, pode-se definir o Número de Potência (N_p) como sendo,

$$N_p = \frac{P g}{\rho N^3 (D_a)^5} = \left(N_q \frac{\beta^2 \pi^2}{2} \right) \quad (8)$$

Para um agitador de pás planas padrão, segundo observações experimentais (MACCABE et. al., 1993), adota-se os seguintes valores: $\beta = 0,9$; $N_q = 1,3$

Com isso, $N_p = 5,2$. Finalmente, considerando a aceleração da gravidade (g) de 9,8 m/s², tem-se que,

$$P = 0,53 \rho N^3 (D_a)^5 \quad (9)$$

A equação 9 permite estimar a potência requerida da fonte motora (P) em Watts. Nesta equação (ρ) é o peso específico estimado para o fluido em (N/m³), N é a rotação em RPM e (D_a) é o diâmetro em (m) varrido pelas pás. O torque no eixo motor (T_m) é determinado considerando a potência (P) em Watts e a rotação (N) em rd/s.

3.1– Modelagem por Elementos Finitos

O comportamento estrutural do sistema de agitação do reator foi avaliado utilizando modelagem por elementos finitos. O objetivo é verificar se as solicitações impostas não provocarão tensões acima do limite elástico podendo causar falha precoce da estrutura. Além disso, a análise avaliou os níveis máximos de deformação estrutural visando verificar possíveis inconvenientes de funcionamento do reator em função de deslocamentos excessivos. A análise estrutural foi feita utilizando modelagem tridimensional por elementos finitos utilizando o Programa Workbench/Ansys para a haste do agitador associado com as pás.

O sistema de agitação e mistura é composto por um conjunto de 02 pás ligado a um eixo central que se comunica diretamente com um motor de passo que possui um incremento de excitação de 1,8° com 200 passos. O drive do motor foi configurado com excitação para uma rotação da ordem de 100 RPM. As forças nas pás variam de acordo com a força de arrasto que ocorre na mistura durante o processo de agitação.

A análise considerou condições críticas para o efeito de torção no eixo visando avaliar sua resistência. Neste caso, a extremidade do eixo foi completamente fixada. Em condições reais de operação o torque no eixo deve movimentar a resistência de arrasto do líquido e funciona como um sistema de segurança, se por acaso, o torque não for suficiente para movimentar os líquidos. Neste caso, o eixo do motor não teria torque suficiente para movimentar. Por isso, a condição de fixação do eixo é uma condição crítica de funcionamento.

A estimativa da força reativa da mistura sobre as pás considerou um modelo de arrasto de forma. A força de arrasto é definida por:

$$F_a = C_d \frac{\rho A V^2}{2} \quad (10)$$

Onde A é a área da seção transversal das pás que efetivamente atua na mistura durante o movimento, ρ é o peso específico, V é a velocidade linear média das pás medida no centro da pá e C_d é um coeficiente de arrasto hidrodinâmico estimado pela geometria das pás. Considerando as dimensões das pás (W= 22,5 mm e L= 25,1 mm) fornece uma área de seção transversal reativa de 1287 mm². A figura 3 mostra um desenho esquemático indicando as dimensões do sistema de agitação e o nível de torque máximo no eixo de 1,5 N m.

A velocidade linear média nas pás é estimada considerando a rotação de trabalho de 100 RPM, ou seja, V = 0,23 m/s. Coeficientes de Arrasto para formas planas considerando o ar são obtidos da literatura, Paganelli (1997). Na condição mais crítica estes valores são da ordem de 1,6. Considerando o movimento em meio fluido, o valor deste coeficiente é aproximadamente o dobro em condições críticas, ou seja, de 3,2. Neste trabalho, o valor adotado para C_d foi considerado de 3,0. Portanto, considerando uma densidade máxima de trabalho (ρ) de 850 Kg/m³, a força de arrasto média estimada será de 0,04 N.

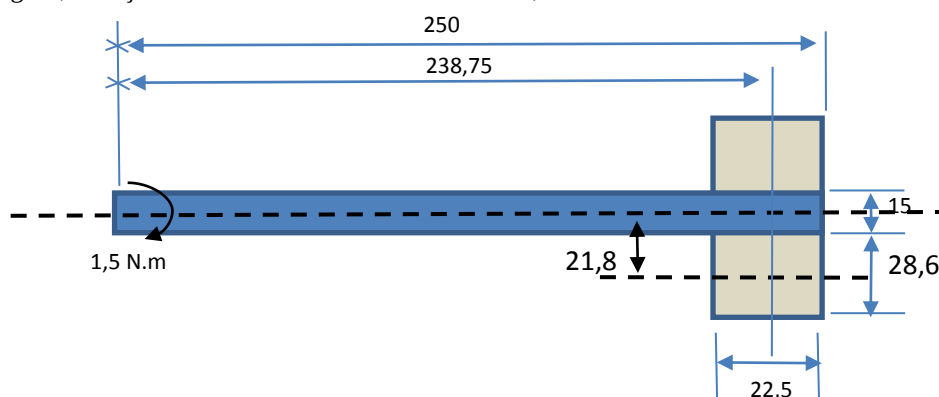


Figura 3 – Dimensões de referência para estimativa da pressão nas pás. Cotas em mm.

A força resultante em cada pá será a diferença da força resistiva de arrasto e a força dada pelo torque no eixo, ou seja, 68,76 N. No modelo de elementos finitos da haste e pás, esta força foi projetada em termos de pressão na área da pá, ou seja, uma pressão de 0,12 Mpa. A figura 4a mostra a configuração da pressão aplicada às pás do agitador e a figura 4b mostra a malha de elementos finitos do sistema de agitação. A tabela 1 mostra as características e propriedades do modelo de elementos finitos utilizado na análise.

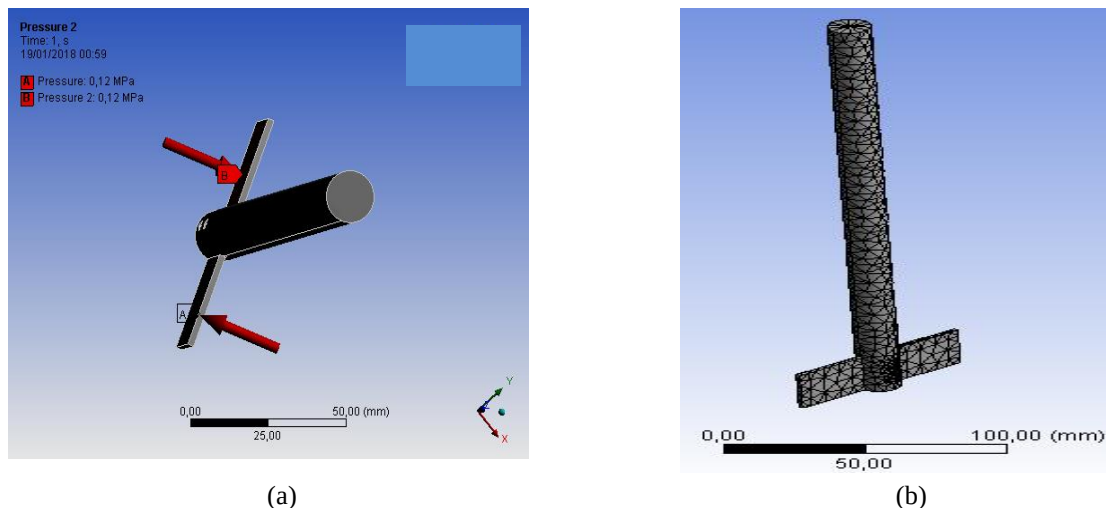


Figura 4 – a) Condições de contorno e carregamentos para o modelo da haste/pás. b) Malha do sistema de agitação.

Tabela 1 - Conjunto do reator em batelada: Tanque de reação, Eixo do Rotor, Pás e Base do motor.

Geometria/Propriedades		Estatística da Malha		Propriedades do Aço Inox	
Comprimento X	36,235 mm	Volumes	1	Densidade	7,85e-006 kg mm ⁻³
Comprimento Y	64,729 mm	Nós	6546	Limite de escoamento	350 MPa
Comprimento Z	250, mm	Elementos	3383	Limite de Resistência	480 MPa
Volume	49426 mm³			Módulo de elasticidade Longitudinal	210000 MPa
Mass	0,38796 kg			Módulo de elasticidade Transversal	77000 MPa
				Coefficiente de poisson	0,30

4. RESULTADOS

Considerando dimensões de referência para o sistema de agitação e misturas (Figura 2). A rotação máxima do agitador (N) será de 100 rpm e o peso específico máximo de trabalho será de 8500 N/m³. A tabela 1 mostra os dados utilizados na modelagem por elementos finitos. Logo, a potência requerida do motor será de 10,5 W. Considerando um fator de serviço de 1,2, é possível estimar uma potência requerida para o motor da ordem de 12,5 W (~ 0,02 cv), com um torque da ordem de 12 Kgf cm. Para um sistema de agitação e mistura nas condições impostas foi selecionado um motor passo NEMA 23 de capacidade 15 Kgf cm, com ângulo 1,8°, 200 passos, corrente de 2.1^a/fase, enrolamento com espiras bifilares e temperatura máxima de operação de 80° C.

O reator será composto por um recipiente cilíndrico de aço inox AISI 304, resistente à corrosão com dimensões 150 x 102 x 3,05mm e volume total de 1L. O reator conterá uma única abertura na parte superior que é acoplada a um cabeçote fixado na parte superior da plataforma central do reator com uma abertura central para entrada da haste do agitador. A figura 5a mostra os valores para as tensões de Von Mises no sistema de agitação e a figura 5b mostra os níveis de deslocamento máximo nas pás do agitador.

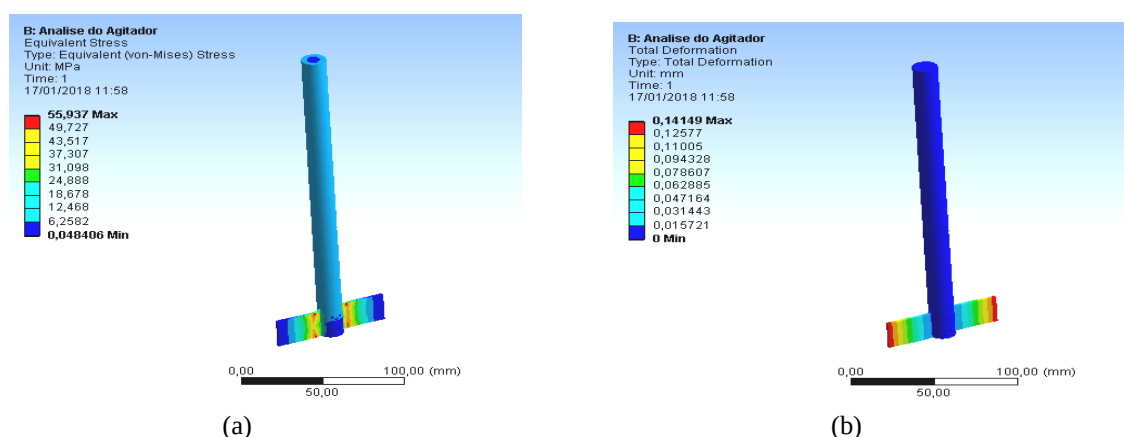


Figura 5 – a) Tensões de Von Mises no sistema de agitação do reator. b) Deslocamentos no sistema de agitação.

5. CONCLUSÕES

As forças nas pás geram tensões máximas de 57 MPa em uma região próxima da união com o eixo motor. Do ponto de vista estrutural, as pás suportam os carregamentos impostos. Seria possível utilizar as pás para efetuar uma mistura com componentes possuindo um peso específico bem superior ao avaliado no modelo. No entanto, somente após testes experimentais é que será possível avaliar seu comportamento real e a eficiência da mistura.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DIAS, R.; GÓES, A. M.; SERAKIDES, R.; AYRESA, E., ORÉFICE, R.; LAMBERT. Porous Biodegradable Polyurethane Nanocomposites. Preparation, Characterization, and Biocompatibility Tests. **Materials Research**. 13(2). p.211-218, 2010.
- ERENO, D. Próteses Sob Medida; Instituto Biofabris produz implantes de liga de titânio para pacientes que perderam ossos do crânio ou da face após acidente ou doenças; (Artigo Científico), **Revista de Pesquisa FAPESP**. ED. 233. Pg 66-69. JULHO 2015.
- FRANCHETTI, S. M.; MARCONATO, J. Polímeros Biodegradáveis – Uma solução parcial para diminuir a quantidade dos Resíduos Plásticos, **Quim. Nova**, 2006.
- GABRIEL, L. P. **Caracterização de Poliuretano a Base de Açaí Formulado para Construção de Dispositivos Biomédicos**. Dissertação . Campinas, São Paulo, Brasil, 2012.
- JARDINI, A. L.; LAROSA, M., MACIEL FILHO, R.; ZAVAGLIA, C.; BERNARDES, L.; LAMBERT, C.; KHARMANDAYAN, P. Cranial reconstruction: 3D biomodel and custom-built implant created using additive manufacturing; **J Craniomaxillofac Surg**. 2014 Dec;42(8):1877-84. doi: 10.1016/j.jcms.2014.07.006. Epub 2014 Aug 6. PUBMED,
- JÚNIOR, K. A. **Automação e Controle de um Sistema em Batelada para Estudo de Controle Híbrido - SBECH**. 2004. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2004.
- KANTOVISCKI, A. R. **Materiais Poliméricos Conceitos e Definições**. 2011. Renault do Brasil S.A. Disponível em: < <https://pt.scribd.com/document/142295173/Polimeros-II> > Acesso em 18 dez. 2017.
- MACCABE, W. L.; SMITH, J.; HARRIOTT, P. Unit Operations of Chemical Engineering, International Editions. 1993. Fifth Edition. **McGraw-Hill Book co**.
- RODRIGUES, L. A. **Reatores Químicos Industriais**. 2015. Disponível em: < <http://docplayer.com.br/59904751-Reatores-quimicos-industriais-pra-dra-liana-alvares-rodriques.html> .>
- SILVEIRA, E. D. Plástico de Açaí; Semente de fruta tropical é matéria-prima para substituir ossos do crânio. **Pesquisa Fapeso**. ED. 196 - JUNHO 2012. 56-57.
- VALENTE, E. T. **Controle e Instrumentação**. 2015. Revista. Editora Técnica Comercial Ltda. São Paulo

7. AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG pelo apoio financeiro. Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica/UNICAMP. Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica/UFU. À CAPES/PGPTA e CNPq.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho. Daniela Moura Yoshida, Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia, Cleudmar Amaral de Araújo, Carmen Gilda Tavares Dias, Jessica Firmino Ferreira.