



Avaliação das medidas 2D-PIV em tanque de agitação

ESPINA, G. R. A.¹, AYALA, J. S.¹, MOURA, H. L.¹, CASTILHO, G. J.¹

¹ Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Departamento de Engenharia de Processos

RESUMO - Neste trabalho, analisaram-se as estruturas do escoamento laminar e de transição de um fluido não newtoniano (solução aquosa de carboximetilcelulose 0,5% wt) em um tanque agitado por um impelidor de 4 pás inclinadas PBT 45° a partir de medidas ângulo resolvidas por Particle Image Velocimetry (PIV). A distribuição da média temporal da velocidade (\bar{U}) e seus componentes axial (\bar{v}) e radial (\bar{u}) foram estudados nas posições de ângulo resolvido (AR) de 0°, 22,5°, 45° e 67,5° do impelidor. Os resultados permitiram afirmar que não existem diferenças significativas conforme a angulação é alterada no escoamento laminar, entretanto, o regime de transição apresenta diferenças significativas entre as imagens AR. Concluiu-se, por fim, que o fluxo desprendido pelo impelidor PBT 45° é axial-radial, com predominância radial para os dois regimes estudados.

1. INTRODUÇÃO

A Velocimetria por Imagem de Partícula (PIV) tem sido uma técnica experimental amplamente empregada no ambiente acadêmico com o intuito de analisar escoamentos em tanques de agitação (GUTKOSKI, 2001). A PIV destaca-se dentre as técnicas experimentais por ser não intrusiva e capaz de visualizar e quantificar o campo de velocidade instantâneo em alta resolução espacial. Por meio de partículas traçadoras que percorrem trajetórias semelhantes ao do escoamento, um feixe de luz laser ilumina o sistema e indica a posição destas, para que uma câmera de alta resolução possa registrá-la e armazená-la num dispositivo computacional (RAFFEL, 1998). A velocidade do escoamento é determinada a partir da análise das posições sequenciais dos traçadores nas imagens gravadas de modo que as duas variáveis independentes, o espaço e o tempo, são processadas por um software que interpreta a probabilidade de deslocamento resulta na formação de um perfil vetorial de velocidade. Tais perfis indicam regiões de maiores e menores velocidades, possibilitando a análise dos sistemas experimentais (ILYIN; STRELETS, 2018; JAHANMIRI, 2011).

Embora a maior parte de fluidos a serem misturados nos processos industriais apresentem alta viscosidade e comportamento não newtoniano, a maioria das pesquisas concentra-se em fluidos newtonianos (CORTADA-GARCIA, 2017). O desafio dos estudos utilizando fluidos não newtonianos deve-se ao comportamento da viscosidade e elasticidade em relação a taxa de cisalhamento. Além disso, a resposta observada pela deformação do fluido é modificada conforme a pressão e a temperatura em que se encontra, dessa forma, impelidores específicos são utilizados para otimizar cada operação e minimizar o aparecimento de heterogeneidades no escoamento

(STORY, 2017; CREMASCO, 2014; LAMBERTO, 1996; MAEGAVA, 1986).

Ademais, o comportamento reológico de fluidos não-newtonianos em tanques de agitação pode causar a formação de cavernas ou pseudocavernas, regiões de alta viscosidade e baixa quantidade de movimento que criam áreas de estagnação no escoamento, localizadas no interior de loops de circulação provenientes da descarga do impelidor (ZAZONE; CEKINSKI, 2016).

A caracterização do escoamento em tanques agitados é dada a partir do número de Reynolds (Re), cujo valor numérico é calculado a partir do diâmetro do impelidor, das características do fluido e da velocidade rotacional, subdividindo-se em três tipos, de acordo com Green e Perry (2008): laminar ($Re \leq 10$), transição ($10 < Re \leq 10.000$) e turbulento ($Re > 10.000$). Cabe ressaltar que ainda não há consenso quanto ao fim do regime laminar e início do turbulento, uma vez que diferentes pesquisadores utilizam valores discordantes. Sossa-Echeverria et al., (2015), determinaram a região laminar até $Re = 300$ em contraposição a Ramsey et al., (2016), que considera o valor final como 134. Fontaine et al., (2013) considera um valor de Reynolds inferior aos anteriores, classificando como 40 o fim do escoamento laminar. Existem também autores ainda mais conservadores quanto ao valor de Reynolds para o regime laminar, como Kelly et al., (2003), que classifica a mudança para o regime de transição em 25.

Neste projeto de Iniciação Científica, o objetivo principal é analisar as estruturas do escoamento laminar e de transição de um fluido não newtoniano em um tanque agitado por um impelidor de 4 pás inclinadas PBT 45° a partir de medições ângulo resolvidas por PIV nas posições de AR 0°, AR 22,5°, AR 45° e AR 67,5° do impelidor. Para isso,



estuda-se a distribuição da média temporal da velocidade (\bar{U}) e de seus componentes axial (\bar{v}) e radial (\bar{u}) utilizando como fluido de trabalho uma solução aquosa de carboximetilcelulose (CMC 0,5 wt%).

2. EXPERIMENTAL

Para a realização do experimento, utilizou-se um tanque acrílico com diâmetro $T = 380 \text{ mm}$ de fundo torisférico ASME 10% equipado com 4 pás inclinadas 45° de proporções $D = 2 \cdot T / 5$ e $C = T / 3$. O tanque foi equipado com 4 defletores equidistantes ($B = 0,1 \cdot T$), altura H do líquido igual ao diâmetro interno T e a altura do tanque de 0,693 m. A Figura 1 mostra o esquema da montagem experimental.

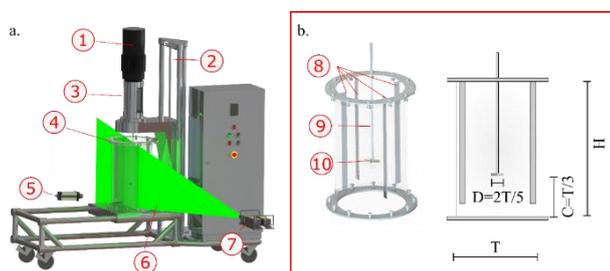


Figura 1 – Montagem experimental com tanque de agitação piloto e sistema PIV 1. Motor, 2. Eixo para ajuste da altura do agitador, 3. Torquímetro, 4. Tanque de agitação, 5 e 6. Câmera, 7. Folha de luz, 8. Laser, 9. Defletores, 10. Eixo, 11. Impelidor PBT 45° . (AYALA, 2020).

As partículas utilizadas para estudar o escoamento foram esferas de vidro ocas revestidas de prata com diâmetro médio de $10 \mu\text{m}$. As imagens foram registradas a partir do sistema PIV 2D-2C desenvolvido pela *Dantec Dynamics* e a iluminação do sistema foi realizada por um laser pulsado Nd: YAG de 532 nm , 200 mJ por pulso, com uma folha de luz de 2 mm . Utilizou-se uma câmera *FlowSense EO 8M-21*, 3112×2488 para obter um espaço amostral de 300 pares de imagens em modo *double-frame* com um tempo *interframe* de $150 \mu\text{s}$, assegurando a consistência dos dados obtidos na análise estatística. A partir de um microcontrolador Arduino conectado ao sincronizador PIV, obteve-se as medidas ângulo-resolvidas (AR) cujos disparos fotográficos foram realizados por um gatilho externo (*encoder*) na frequência de um pulso por revolução do eixo. As imagens foram obtidas para posições do impelidor em relação a dois defletores em AR 0° deslocado em $0,5^\circ$ a fim de evitar que o laser emitisse luz sobre o defletor, AR $22,5^\circ$, AR 45° que se tratou do ângulo bissetor relativo aos dois defletores e AR $67,5^\circ$.

O fluido utilizado foi uma solução aquosa de carboximetilcelulose (CMC 0,5 wt%) o qual é descrito pelo modelo de Herschel-Bulkley (Equação 1) a partir dos parâmetros τ , τ_0 , K , $\dot{\gamma}$ e n , que correspondem à tensão de cisalhamento (Pa), à tensão inicial (Pa), à constante de consistência, à taxa de deformação (s^{-1})

e índice de comportamento do fluido, respectivamente, de valores $\tau_0 = 2,183 \text{ Pa}$, $n = 0,578$ e $K = 0,740 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. (ALBERINI, 2017).

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

De acordo com o modelo utilizado, classificou-se o comportamento reológico do fluido de trabalho como pseudoplástico com tensão de escoamento (*yield – pseudoplastic*), com propriedades físicas iguais a massa específica $\rho = 1000,38 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$ e índice de refração $\eta = 1,334$ e o perfil reológico, obtido com o auxílio de um viscosímetro do Laboratório de Engenharia de Processos FEA/UNICAMP (Figura 2).

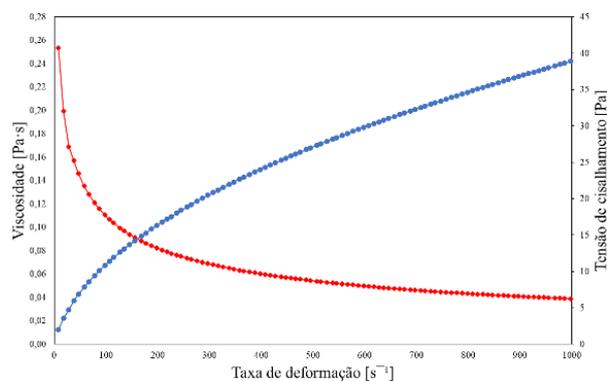


Figura 2 – Viscosidade e tensão de cisalhamento como função da taxa de deformação para a solução aquosa de CMC (0.5 wt %).

Por se tratar de um fluido não newtoniano, assumiu-se que o movimento do fluido nas regiões próximas ao impelidor podem ser descritas pela taxa de deformação média apresentada pela Equação 2, utilizando a constante Metzner-Otto para o impelidor PBT ($k_s = 13$) (ALBERINI, 2017), nas velocidades angulares de 60 rpm e 840 rpm, cujos valores de Reynolds $Re = 55,21$ e $Re = 3431,01$ caracterizam o escoamentos laminar e transição alta, respectivamente (METZNER & OTTO;1957).

$$\bar{\gamma} = k_s \cdot N \quad (2)$$

O valor do número de Reynolds da solução aquosa de carboximetilcelulose foi calculado utilizando-se o modelo de Herschel-Bulkley, Equação 3 (ALBERINI, 2017).

$$Re = \frac{\rho \cdot k_s \cdot N^2 \cdot D^2}{\tau_y + k \cdot (k_s \cdot N)^n} \quad (3)$$

Sendo ρ a massa específica, dada em $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, N a velocidade rotacional do impelidor, dada em $\text{rev} \cdot \text{s}^{-1}$, D o diâmetro do impelidor, dada em metros.



3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta a distribuição da média temporal da magnitude de velocidade (\bar{U}), constituída pela sobreposição dos campos das componentes axial \bar{v} (Figura 2 b) e radial \bar{u} (Figura 3c) da solução aquosa de CMC escoando a uma velocidade angular de 60 rpm, para as medidas ângulo-resolvidas AR 0°, AR 22,5°, AR 45° e AR 67,5°. Os campos estão normalizados com a velocidade da ponta do impelidor, definida por $U_{tip} = \pi DN = 0,48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

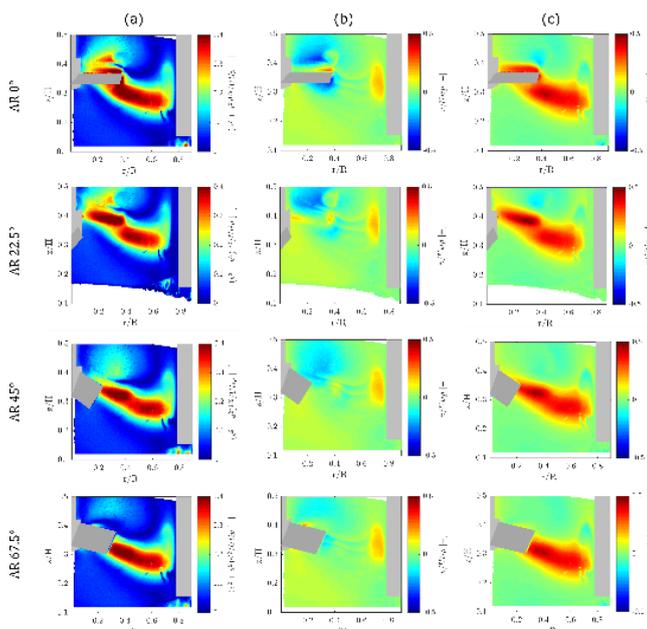


Figura 3. Distribuição da média temporal normalizada da magnitude de velocidade (\bar{U}) e dos componentes axial (\bar{v}) e radial (\bar{u}) da solução aquosa de CMC $N = 60 \text{ rpm}$, para os campos resolvidos em ângulo AR 0°, AR 22,5°, AR 45° e AR 67,5. \bar{U} (a), \bar{v} (b), \bar{u} (c).

O perfil descrito pelo regime deste trabalho foi considerado como laminar (60 rpm e $Re = 55,21$) e permite observar a ineficiência do impelidor em transmitir quantidade de movimento ao volume de controle em sua totalidade, evidenciada pelo baixo alcance do fluxo, restrito inicialmente ao intervalo de $0,1 z/H$ a $0,35 z/H$, regiões limítrofes às pás onde a tensão de cisalhamento se mostra intensificada e a velocidade alcança o valor máximo de $0,4U_{tip}$. Observa-se para todos os ângulos resolvidos a predominância de velocidades baixas, de intensidade $> 0,1U_{tip}$ nas regiões superior e inferior do tanque.

Nota-se que a região de recirculação do tanque é predominantemente radial, atingindo valores de até $0,4U_{tip}$ (Figura 3c), aproximadamente. A componente axial (Figura 3b) apresenta uma pequena variação na velocidade, localizada próxima à parede do tanque, não ultrapassando $0,1U_{tip}$. Também é possível destacar uma pequena região de alta velocidade encontrada acima do impelidor na velocidade média (Figura 3a)

em AR 0°, o fluxo é posteriormente deslocado para o lado do impelidor em AR 67,5°.

A análise do perfil de velocidade média do escoamento (Figura 3a) apresenta um fluxo radial saindo da área inferior das pás em direção às paredes do tanque com pequena variação vertical. Como fluido pseudoplástico com tensão de cisalhamento, o início do escoamento depende da aplicação de uma tensão inicial, observada através do alto gradiente de velocidade encontrado na imagem AR 0°, onde há a formação de um pequeno vórtice acima do impelidor de baixa viscosidade. Apesar de desenvolver uma região de grande velocidade, o escoamento possui a predominância de áreas segregadas, cuja velocidade é baixa e não há a existência de agitação.

As imagens da componente \bar{u} (Figura 3c) mostram que o fluido se move radialmente e, ao atingir a parede do tanque, apresenta a tendência a adquirir um movimento ascendente, entretanto, perde velocidade e fica retido na altura em que ocorre o choque. Não há a formação de cavernas, fenômenos característicos do escoamento de fluidos não newtonianos. Neste trabalho, os resultados experimentais para o regime laminar mostram um fluxo predominantemente radial.

A ineficiência da mistura está associada ao efeito da resistência do fluido ao escoamento, observado pelo aumento da viscosidade do fluido, quando a tensão cisalhante diminui (baixa rotação) característica principal dos fluidos com comportamento pseudoplástico.

Apesar de pequenas variações obtidas nas imagens ângulo-resolvidas da Figura 3, pode-se afirmar que o escoamento laminar não apresenta mudanças significativas relacionadas à posição do impelidor em relação do defletor, exibindo uma característica uniforme no fluxo.

A Figura 4 apresenta a distribuição da média temporal da magnitude de velocidade (\bar{U}), constituída pela sobreposição dos campos das componentes axial \bar{v} (Figura 4b) e radial \bar{u} (Figura 4c) da solução aquosa de CMC escoando a uma velocidade angular de 840 rpm, para as medidas ângulo-resolvidas. Os campos estão normalizados com a velocidade da ponta do impelidor, definida por $U_{tip} = \pi DN = 6,69 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

O regime de transição (840 rpm e $Re = 3431,01$) intensifica a transferência de quantidade de movimento (ALBERINI, 2018) através do aumento da velocidade angular e da baixa viscosidade relativa do sistema, causando a diminuição da heterogeneidade na distribuição da velocidade, além da eliminação das regiões de segregação do tanque encontradas no regime laminar. A partir das imagens da velocidade média para as diferentes posições do impelidor (Figura



4a), percebe-se a formação de uma circulação primária no escoamento, descrevendo uma trajetória semicircular na parte inferior do tanque.

Inicialmente, observa-se a presença de áreas de intensa velocidade na Figura 4a, atingindo $0,4U_{tip}$ entre as posições $0,3z/H$ e $0,1z/H$. No decorrer do escoamento, há uma atenuação dos valores, indicada pela mudança entre os valores observados em AR 0° e AR $22,5^\circ$. Nas imagens AR 45° e AR $67,5^\circ$, o vórtice superior identificado no começo da agitação dissipa-se e os valores máximos de velocidade diminuem para $0,3U_{tip}$, alcançando o fundo do tanque e intensificando a homogeneidade do sistema.

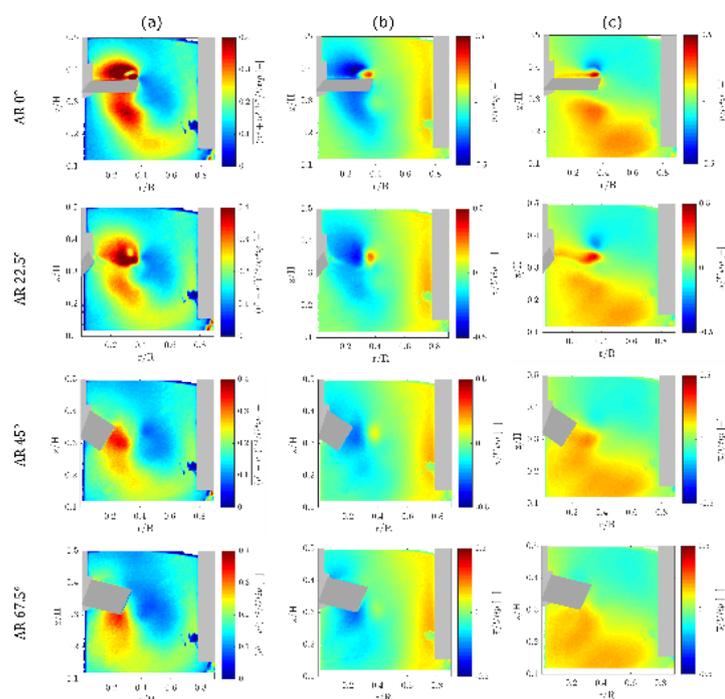


Figura 4. Distribuição da média temporal normalizada da magnitude de velocidade (\bar{U}) e dos componentes axial (\bar{v}) e radial (\bar{u}) da solução aquosa de CMC $N=840$ rpm, para os campos resolvidos em ângulo AR 0° , AR $22,5^\circ$, AR 45° e AR $67,5^\circ$. \bar{U} (a), \bar{v} (b), \bar{u} (c).

Os perfis obtidos da média normalizada evidenciam o aparecimento de um vórtice em AR 0° , resultado do aumento na taxa de deformação do fluido e da baixa viscosidade adquirida pela solução, localizado na região superior às pás. A área circular de alta velocidade encontrada inicialmente é estabilizada conforme o fluido adquire velocidade, diminuindo a intensidade do vórtice até o desaparecimento do fenômeno (AR $67,5^\circ$), de forma mais rápida do que a do regime laminar.

A análise do perfil da velocidade média indica a presença de um fluxo descendente, saindo das pás em direção ao fundo do tanque. Esse fluxo, então, sofre uma inversão direcional e percorre o caminho ascendente nas regiões próximas à parede do tanque

até a superfície. Apesar do aumento da homogeneidade no perfil, é possível observar a presença de uma região de baixa velocidade no interior da trajetória. Essa região segregada é caracterizada pela ausência de quantidade de movimento e pela deficiência de mistura, originando o fenômeno chamado de pseudo-caverna, característico do escoamento de um fluido não newtoniano (ALBERINI, 2017).

Percebe-se a presença de velocidade axial intensa (Figura 4b) nas regiões próximas ao impelidor, mostrando a predominância de um fluxo vertical em direção ao fundo do tanque. A região inferior às pás apresenta uma alta homogeneidade quanto à quantidade de movimento descendente, destacada pela coloração em azul encontrada nas diferentes medidas AR.

As imagens ângulo-resolvidas da componente radial (Figura 4c) mostram um fluxo radial ascendente homogêneo embaixo do impelidor destacado pela coloração em amarelo que se estende em todo o raio do tanque e sobe até a posição $0,3z/H$.

Percebem-se mudanças em relação às diferentes medidas ângulo resolvidas nos campos de velocidade média. Uma pequena área de velocidade intensa ($0,4U_{tip}$) abaixo do impelidor na imagem AR 0° que se dissipa rapidamente conforme à posição do impelidor avança. Isto deve-se à resistência do fluido ao escoamento, um aumento na viscosidade gerada pela diminuição da taxa de cisalhamento.

A Figura 5 apresenta a distribuição da média temporal da magnitude de velocidade (\bar{U}), da solução aquosa de CMC nos ângulos AR 0° e AR 45° , para o regime laminar ($N=60$ rpm) (Figura 5a) e de transição ($N=840$ rpm) (Figura 5b). Os campos não estão normalizados. Esta figura apresenta resultados importantes para o escoamento de fluidos não newtonianos dado que permite a identificação da mudança no escoamento descrito pelo impelidor. O fluido estudado é caracterizado como pseudoplástico com tensão e necessita da aplicação de uma tensão inicial a fim de desenvolver um escoamento.

A comparação entre o fluxo descrito pelo impelidor PBT 45° no regime laminar e no de transição demonstra a assimetria retratada na distribuição da quantidade de movimento no campo analisado. No primeiro (Figura 5a), observa-se um fluxo predominantemente radial e concentrado, cujo fluido é lançado para as paredes do tanque sem variação axial expressiva. No segundo (Figura 5b), nota-se um movimento semicircular, descrito por uma maior homogeneidade de velocidades na totalidade do volume, além do o aparecimento de um fenômeno particular do escoamento de fluidos não newtonianos, as cavernas. Apesar de características expressivamente diferentes no movimento do fluxo, em ambos os

regimes há a formação de vórtices acima das pás, que é dissipada conforme a agitação segue.

A imagem AR 0° da Figura 5b indica a formação de um vórtice de grande intensidade, adquirindo velocidade de até 3 m/s acima da pá, com um loop de circulação em todo o tanque. Para a imagem AR 45° (figura 5b), o vórtice formado anteriormente não se apresenta no escoamento, atenuando a velocidade média para 1.5 m/s. Com os valores apresentados para todas as imagens ângulo-resolvidas, pode-se afirmar que o escoamento tem influência de ambas as componentes da velocidade.

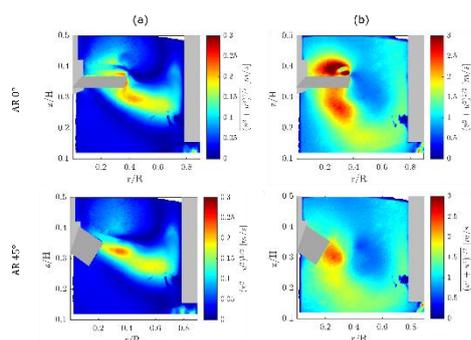


Figura 5. Distribuição da média temporal da magnitude de velocidade (\bar{U}) da solução aquosa de CMC $N=60$ RPM (a) e $N=840$ rpm (b), para os campos resolvidos em ângulo AR 0° e AR 45°.

4. CONCLUSÕES

A partir do estudo da distribuição da média temporal da velocidade e de seus componentes axial e radial observou-se o aparecimento de um fluxo predominantemente radial no regime laminar com uma intensa heterogeneidade nas velocidades desenvolvidas pelo fluido. Houve a breve formação de um pequeno vórtice no início da agitação que se dissipou conforme a continuidade da operação. Foi observada a ineficiência do impelidor em garantir uma agitação axial, característica do PBT em fluidos newtonianos, com a predominância de áreas com baixa quantidade de movimento no tanque sem a formação de pseudocaverna. A pouca efetividade na agitação esteve associada à baixa rotação do impelidor, a qual leva a baixas taxas de cisalhamento, gerando um aumento na resistência do fluido ao escoamento.

Estudou-se, e, seguida, o regime de transição, cujo perfil despreendido mostrou uma melhora na homogeneidade do sistema, garantindo a transferência da quantidade de movimento para as regiões mais afastadas das pás. Também houve a formação de um vórtice na região superior do impelidor, que, assim como no regime laminar, foi dissipado conforme a agitação prosseguiu. A atuação do impelidor sobre o fluido descreveu um fluxo axial-radial com a formação de uma pseudocaverna na parte interna do escoamento. Também foi observada uma diminuição no perfil de velocidade média em relação às medições ângulo

resolvidas. Isto ocorreu devido à resistência do fluido ao escoamento conforme o avanço da posição do impelidor tanque.

Ademais, foi possível observar o efeito da velocidade do impelidor dentro do domínio de mistura para ambos os regimes. Para o regime laminar, o fluxo predominantemente foi radial, no entanto, no regime de transição, o escoamento teve influências de ambas as componentes da velocidade. Além disso, houve diferenças significativas entre as medições ângulo resolvidas nas imagens obtidas para o regime de transição. Em contraposição, não é possível visualizar mudanças importantes durante o escoamento laminar.

5. BIBLIOGRAFIA

- ALBERINI, F.; LIU, L.; STITT, E. H.; SIMMONS, M. J. H. Comparison between 3-D-PTV and 2-D-PIV for determination of hydrodynamics of complex fluids in a stirred vessel. *Chemical Engineering Science*, v. 171, p. 189–203, 2017.
- AYALA, J. S.; MOURA H. L.; AMARAL, R.L.; SILVA, P.T.; OLIVEIRA, F.; NUNHEZ, J. R.; CASTILHO, G. J. ANÁLISE DO ESCOAMENTO TURBULENTO A PARTIR DE MEDIDAS ÂNGULO-RESOLVIDAS EM UM TANQUE DE AGITAÇÃO UTILIZANDO VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Gramado, RS. 2020.
- CREMASCO, M. A. Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidomecânicos. São Paulo: Editora Blücher, 2014.
- CORTADA-GARCIA, M.; DORE, V.; MAZZEI, L. Experimental and CFD studies of power consumption in the agitation of highly viscous shear thinning fluids. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 119, p. 171–182, 2017.
- FONTAINE, A.; GUNTZBURGER, Y.; BERTRAND, F.; FRADETTE, L.; HEUZEY, M.-C. Experimental investigation of the flow dynamics of rheologically complex fluids in a Maxblend impeller system using PIV. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 91, Issue 1, p. 7–17, 2013.
- GREEN, D. W. PERRY, R. H. Perry's Chemical Engineers' Handbook. McGraw-Hill, 8 ed. New York, 2008.
- GUTKOSKI, L. L. Ferramenta computacional para a medição de campos de velocidade utilizando processamento digital de imagens. Tese de Mestrado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- ILYIN, S.; STRELETS, L. Basic Fundamentals of Petroleum Rheology and Their Application or the Investigation of Crude Oils of Different Natures, *Energy Fuels*, v. 32, p. 268–278, 2018.
- KELLY, W.; GIGAS, B. Using CFD to predict the behavior of power law fluids near axial-flow impellers operating in the transitional flow regime. *Chem Eng Sci*. 2003;
- LAMBERTO, D. J., F. J. MUZZIO, P. D. SWANSON, and A. L. TONKOVIC. Using Time-Dependent RPM to Enhance Mixing in Stirred Vessels, *Chem. Eng. Sci.*, 51, 733, 1996.
- MAEGAVA, L. M. Escoamento de soluções poliméricas: a redução do arraste. 1986. 251p. Tese (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1986.
- METZNER, A., OTTO, R., Agitation of non-Newtonian fluids. *AIChE J.* 3, p. 3–10, 1957.
- MOSQUEDA, J. C. R.; ORTIZ, J. L. L.; VÁSQUEZ, J. C. V. ANÁLISIS DE LA HIDRODINÁMICA DE FLUIDOS EN TANQUES AGITADOS. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, Guanajuato, v. 5, 2019.
- RAFFEL, M., WILLERT, C., KOMPENHANS, J. Particle image velocimetry, a practical guide. Springer, 2nd ed. Berlin Heidelberg New York, 1998.
- RAMSAY, J.; SIMMONS, M. J. H.; INGRAM, A.; STITT, E. H. Mixing of Newtonian and viscoelastic fluids using “butterfly” impellers. *Chemical Engineering Science*, v. 139, p. 125–141, 2016.
- SOSSA-ECHVERRIA, J.; TAGHIPOUR, F. Computational simulation of mixing flow of shear thinning non-newtonian fluids with various impellers in a stirred tank. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v. 93, p. 66–78, 2015.
- STORY, A.; JAWORSKI, Z.; SIMMONS, M.J.; et al. Comparative PIV and LDA studies of Newtonian and non-Newtonian flows in an agitated tank. *Chem. Pap.* 72, 593–602. <https://doi.org/10.1007/s11696-017-0307-4>, 2018.
- ZANONE, A.; CEKINSKI, E. ESTUDO COMPUTACIONAL SOBRE FORMAÇÃO DE CAVERNAS EM TANQUES AGITADOS. Escola de Engenharia Mauá, 2016.