

SIMULAÇÃO CFD DA LIMPEZA DE TROCADORES DE CALOR COM USO DE GRANALHA DE AÇO

Brayner, P.H.A. ¹, Lira Jr, J.C. ², Peixoto, J.A.C. ³ e Henriquez, J.R. ⁴

- 1: Instituto Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Mecânica, Recife, Pernambuco, Brasil pedrobrayner@gmail.com.br
- 2: Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Acad. Hélio Ramos s/n, Recife, Pernambuco, Brasil claudino.lira@ufpe.br
- 3: Instituto Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Mecânica, Recife, Pernambuco, Brasil angelocosta@recife.ifpe.edu.br
- 4: Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Acad. Hélio Ramos s/n, Recife, Pernambuco, Brasil rjorge@ufpe.br

Palavras-chave: Simulação, CFD, Trocador de calor, Incrustação, Limpeza *Online*

Resumo. *O processo de refino de petróleo é uma atividade que demanda uma grande quantidade de trocadores de calor que são normalmente afetados pela deposição de material na superfície dos tubos, reduzindo a eficiência de troca térmica e levando a parada do equipamento para manutenção e limpeza. Normalmente os processos de limpeza desses equipamentos apresentam um elevado custo para operação, seja pela intervenção ou redução da produtividade. Esforços são feitos no sentido de prolongar os intervalos entre limpezas, porém o tempo prolongado de depósito pode ocasionar a formação de incrustação. A incrustação nas tubulações ocorre por mecanismos de naturezas distintas como biológicas, deposição de partículas, corrosão, cristalização ou reação química. Cada forma tem sua característica específica que variam em função do fluido transportado, da temperatura, do regime de escoamento e condições de projetos dos equipamentos. Para mitigar os impactos dessas variáveis e reduzir a deposição no interior dos tubos foi desenvolvido um modelo, utilizando o pacote computacional ANSYS, para avaliar o comportamento dos trocadores, considerando os dados de processo. Após a calibração do modelo foram feitas análises paramétricas com objetivo de identificar as melhores práticas para prolongar o tempo de parada dos equipamentos. Os resultados apresentados pelo modelo foram satisfatórios e indicam a viabilidade de uso do processo industrialmente.*

1. INTRODUÇÃO

O uso de trocadores de calor já se estende a todos os setores da indústria, sendo mais evidente nas indústrias química, petroquímica, processos de geração de energia, processamento de alimentos e refino de petróleo. A eficiência térmica desses equipamentos é de extrema importância, pois está diretamente relacionada aos custos de operação do processo do qual ele faz parte. Um dos aspectos que influenciam diretamente a eficiência do equipamento, é a deposição de materiais indesejáveis na superfície de troca térmica, que podem aderir a ela ou reagir quimicamente de modo a formar substâncias que aderem à superfície, fenômeno comumente designado como incrustação. O fenômeno da incrustação representa um aumento no custo de instalação e de operação do equipamento. No projeto de trocadores de calor tubulares, geralmente é prevista uma área extra de troca térmica, o que aumenta os custos com a fabricação, instalação, transporte e espaço. Além disso, o aumento da perda de carga através do equipamento representa uma necessidade de aumento na potência de bombeamento para manter a mesma taxa de fluxo. Há também os custos com manutenção, limpeza do trocador, uso de anti-incrustantes e os custos decorrentes da perda de produção devido a paradas programadas ou não-programadas, para a limpeza da incrustação. Por fim, temos a perda de eficiência de transferência de calor, que geralmente significa que, em algum lugar do sistema, energia adicional é necessária para compensação das perdas, comumente refletindo num aumento do consumo de combustível (Awad, 2011). Muller-Steinhagen (1995) apud Deshannavar et al (2010) estimou o custo total com incrustação, para todos os trocadores de calor do Reino Unido, como sendo da ordem de US\$ 2,5 bilhões na época, enquanto que nos Estados Unidos alcançava cifras de US\$ 14 bilhões. Diante de dados como esses, é notável a necessidade de maior atenção ao problema da incrustação, buscando alternativas para minimização dos seus efeitos. É sabido que, muitas vezes são necessárias paradas para limpeza off-line, já que é de extrema importância que o equipamento seja mantido em condições adequadas de funcionamento. Entretanto, já existem métodos que reduzem, ou até mesmo eliminam, a necessidade de custosas paradas de produção. São algumas delas: técnicas *online* de limpeza, uso de revestimentos superficiais, inserções metálicas, trocadores com configuração auto-limpante, uso de materiais não-metálicos, entre outros. O presente trabalho apresenta o estudo de uma nova metodologia de limpeza *online* com base no efeito de erosão por granalha de aço num escoamento turbulento, em tubos retos de trocadores de calor do tipo tubo duplo, que é pré-validado por meio da mecânica dos fluidos computacional (CFD), através do pacote comercial ANSYS® Workbench™.

2. MÉTODO DE LIPEZA POR GRANALHA DE AÇO

O método proposto se baseia na limpeza interna dos depósitos e incrustações presentes no tubo através da introdução de granalha de aço esférica e aumento da vazão do escoamento, com a finalidade de promover uma ação erosiva de remoção de material. O sistema de funcionamento é esquematizado abaixo (ver figura 1), e prevê um acionamento periódico, afim de manter a eficiência do equipamento dentro dos níveis aceitáveis.

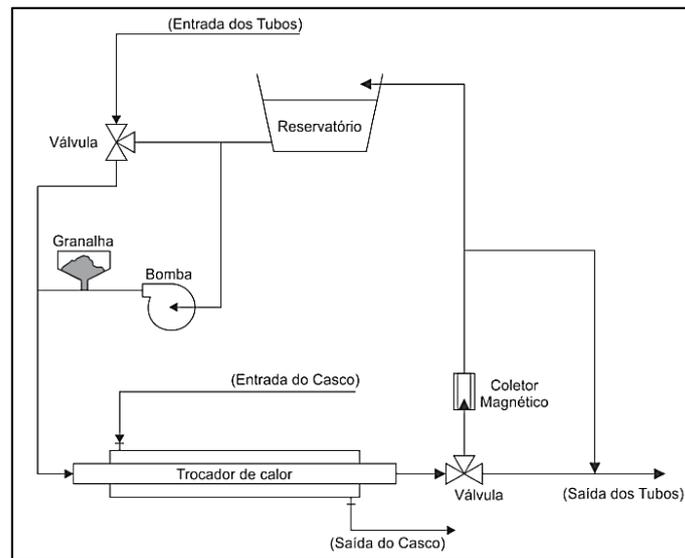


Figura 1. Representação esquemática do sistema de limpeza.

Durante o acionamento do sistema de limpeza, uma válvula desvia o escoamento para uma linha de bombeamento, no qual é acelerado até a condição adequada para a limpeza. O volume extra de fluido necessário é fornecido por um reservatório. A granalha é introduzida na linha após o bombeamento e removida na saída do trocador de calor, por um coletor magnético. O material removido é retido por um sistema de filtros.

Para os estudos realizados foi utilizada uma malha híbrida, formada por elementos tetraédricos e prismáticos. Afim de garantir a correta discretização aos efeitos da camada limite, foi aplicado um refinamento próximo à superfície da parede do tubo com elementos prismáticos alongados (ver Figura 3.8), que produz o nível de discretização necessário à detecção dos efeitos da camada limite e erosão, sem que haja um número excessivo de elementos, como ocorreria com o uso de uma malha exclusivamente tetraédrica, devido à isotropia necessária a estes elementos.

Os estudos realizados foram configurados como escoamentos internos multifásicos, na qual partículas sólidas eram transportadas por um fluido, de modo que há uma mistura de duas fases a nível macroscópico, em regime de escoamento permanente turbulento. O modelo calcula então uma solução média representativa do escoamento, uma aproximação satisfatória do ponto de vista da engenharia.

O escoamento multifásico adotado é composto por uma fase líquida Euleriana contínua de água, com as características padrão do software a uma temperatura de referência de 300 K, e uma fase Lagrangeana dispersa de partículas sólidas de granalha de aço, com distribuição normal de diâmetros por massa conforme os parâmetros listados abaixo (ver Tabela 1). Não foram aplicados fatores de forma à granalha, considerando-a perfeitamente esférica. O modelo Euler-Lagrangeano adotado, realiza o cálculo discreto das trajetórias de partículas da fase dispersa, sendo calculadas 5000 partículas nos estudos realizados neste trabalho.

Densidade	7850 [kg/m ³]
Dmax	500 · 10 ⁻⁶ [m]
Dmin	50 · 10 ⁻⁶ [m]
Dmed	250 · 10 ⁻⁶ [m]
σ (desvio padrão)	70 · 10 ⁻⁶ [m]

Tabela 1. Parâmetros da granalha padrão

O acoplamento entre as duas fases foi adotado apenas em um sentido (One Way Coupling), de forma que a trajetória das partículas é baseada num pós-processamento do escoamento do fluido, não tendo influência sobre o mesmo. Isto é válido devido ao fato de que a fração mássica e a influência destas partículas são insignificantes, frente ao nível de turbulência do fluxo, sendo adotada para economia de processamento e possibilidade de cálculo de um número maior de partículas, aumentando sua acurácia.

O modelo de força de arrasto selecionado para o cálculo da transferência de momento entre as fases foi o Schiller Naumann, que é indicado para a simulação de partículas sólidas esféricas, em pequenas frações volumétricas. O efeito de empuxo foi considerado desprezível, diante do arrasto imposto pelo escoamento.

Os modelos de turbulência de duas equações são amplamente utilizados em simulações de CFD pois oferecem um bom compromisso entre complexidade, precisão e robustez. Para os estudos realizados, foi selecionado o modelo k- ω , pois apresenta melhor aproximação da turbulência próximo às paredes do tubo.

Para o cálculo numérico do efeito de erosão, foi adotado o modelo de Finnie, o primeiro a propor o mecanismo de corte erosivo de partícula única. Segundo Silva (2008), este mecanismo prevê o efeito de corte da superfície por ação do impacto de partículas duras a uma velocidade V_p sob determinado ângulo α (ver Figura 2).

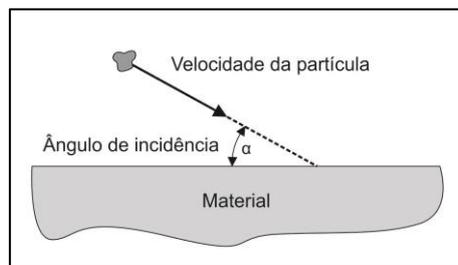


Figura 2. Esquema de impacto de partícula sobre superfície

Os parâmetros k e n foram usados com os valores de 1m/s e 2 respectivamente, com a proposta de analisar a homogeneidade da erosão superficial, sendo realizada uma avaliação comparativa entre os casos estudados.

Não foram levados em consideração efeitos térmico e de troca de calor, portanto tais modelos não foram acionados.

Foram aplicadas três condições de contorno: *inlet*, *wall* e *outlet*. Na entrada (*inlet*) foi definida uma velocidade normal uniforme de 15m/s, com injeção uniforme de granalha a uma vazão mássica de 0,015kg/s. Já a parede do tubo (*wall*) foi definida como uma parede rugosa e com condição de não deslizamento, além de coeficiente de restituição perpendicular de 0,9. Na saída (*outlet*), a pressão relativa foi definida como 0 Pa.

3.1. Geometria

Foram testadas três geometrias, a fim de encontrar a que melhor apresenta o efeito de erosão uniforme sobre a superfície do tubo. A primeira geometria testada foi uma redução de diâmetro de 100mm para 25mm, com comprimento de 100mm.

A segunda geometria testada apresenta uma inserção helicoidal de 20mm de diâmetro e 100mm de comprimento, com passo de 20mm. A geometria do domínio fluido (ver Figura 4.4) e a inserção helicoidal (ver Figura 3) são apresentadas em detalhe a seguir.

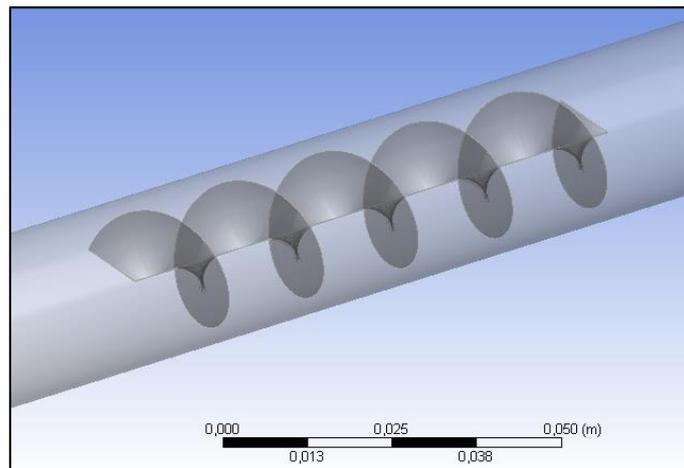


Figura 3. Detalhe da inserção helicoidal

Por fim, a terceira geometria testada apresenta uma inserção de defletores de 20mm de diâmetro posicionados a 45° e com 100mm de comprimento total. A geometria dos defletores é apresentada em detalhe a seguir (ver Figura 4).

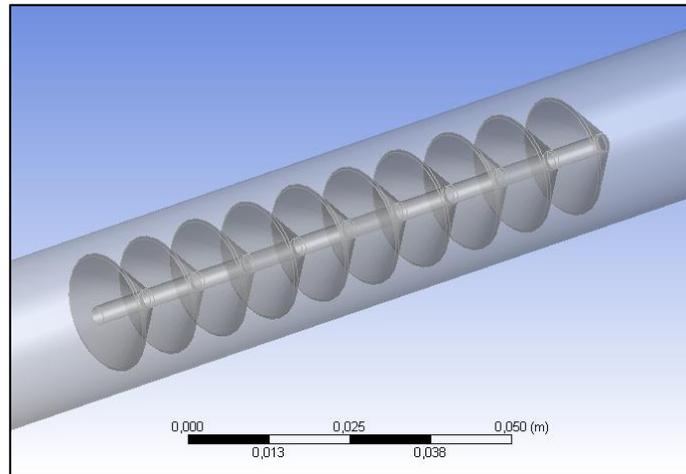


Figura 4. Detalhe de defletores

Ao final dos cálculos, uma análise comparativa da taxa de densidade de erosão foi realizada, e os resultados são apresentados abaixo (ver Figura 5).

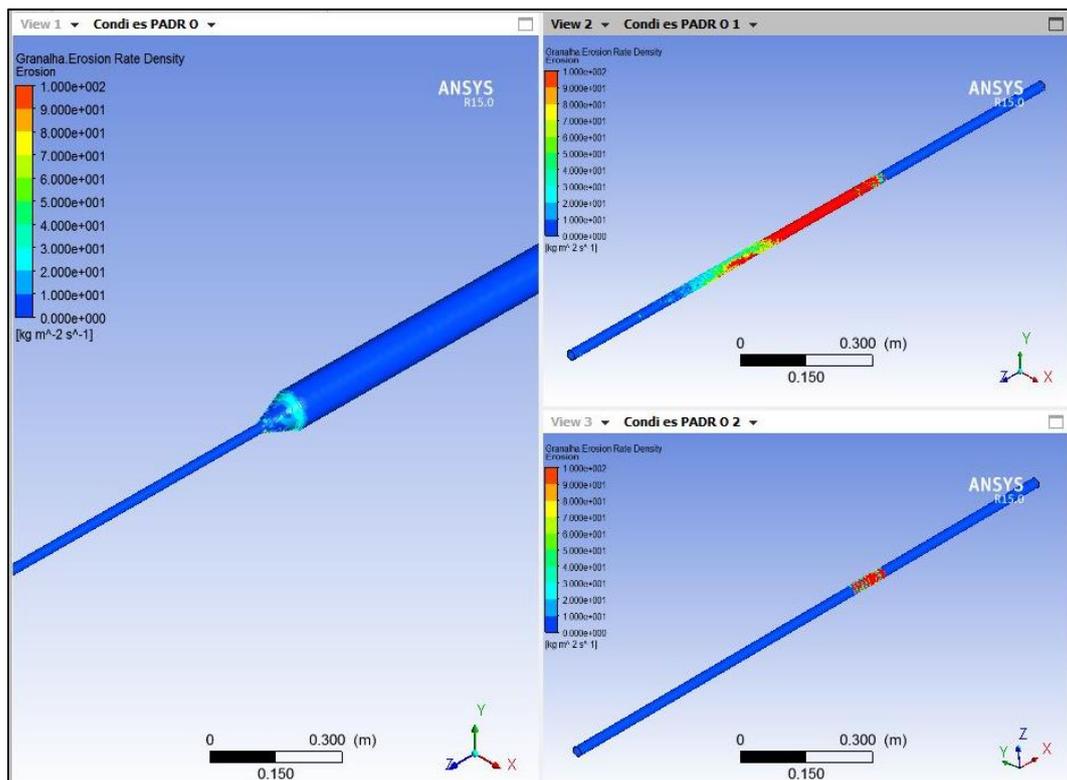


Figura 5. Comparação das geometrias testadas. Tubo com redução à esquerda, tubo com inserção helicoidal acima e tubo com defletores abaixo

Nota-se que a geometria que apresenta viabilidade na limpeza homogênea de trocadores de calor com base no efeito de erosão por granalha, é a que apresenta uma inserção helicoidal. Para que o efeito seja satisfatório, o projeto do trocador deve prever sua geometria com a presença de 100mm de inserção helicoidal a cada 500mm de tubo.

4. ESTUDOS PARAMÉTRICOS

Como já dito anteriormente, o efeito de erosão da superfície do tubo se dá pela transferência de energia proveniente das colisões da granalha com a parede do tubo. A energia cinética média de cada uma das partículas é dada pela equação:

$$E_c = \frac{mV^2}{2} \quad (5.1)$$

Considerando a granalha perfeitamente esférica, temos que sua massa média é determinada pelo produto da densidade do aço pelo volume médio das partículas, conforme abaixo:

$$m = \rho \left(\frac{4\pi r^3}{3} \right) \quad (5.2)$$

Podemos então expressar a energia cinética por uma combinação das duas equações anteriores, deixando-a em função apenas da velocidade e do raio da partícula, a equação fica:

$$E_c = \frac{2}{3} \pi \rho V^2 r^3 \quad (5.3)$$

Concluimos então, que a energia cinética das partículas varia em função do quadrado da velocidade e do cubo do raio. Dessa forma, realizou-se um estudo paramétrico variando a granulometria da granalha e velocidade do escoamento, analisando os seus efeitos sobre a erosão no tubo.

Para esses estudos, a geometria utilizada é a de um trocador de 1m de comprimento, com uma inserção helicoidal a cada 500mm, além de prolongamentos de 500mm na entrada e na saída

4.1. Estudo da granalha

As granalhas utilizadas no estudo (ver Figura 7) seguem o padrão comercial SAE, e possuem dimensões conforme apresentado abaixo (ver Tabela 2). Todos os demais parâmetros usados anteriormente foram mantidos constantes.



Figura 7. Geometria usada nos estudos paramétricos

	SAE 280	SAE 390	SAE 550	SAE 660
Dmax	1,00 [mm]	1,41 [mm]	2,00 [mm]	2,38 [mm]
Dmin	0,71[mm]	1,00[mm]	1,41 [mm]	1,68 [mm]
Dmed	0,90 [mm]	1,20 [mm]	1,70 [mm]	2,00 [mm]
σ (desvio padrão)	0,10 [mm]	0,10 [mm]	0,10 [mm]	0,10 [mm]

Tabela 2. Dimensões de granalhas padrão SAE utilizadas no estudo paramétrico

Ao final dos cálculos, foi realizada uma comparação do efeito de erosão sobre o tubo com mesma faixa de escala (ver Figura 8).

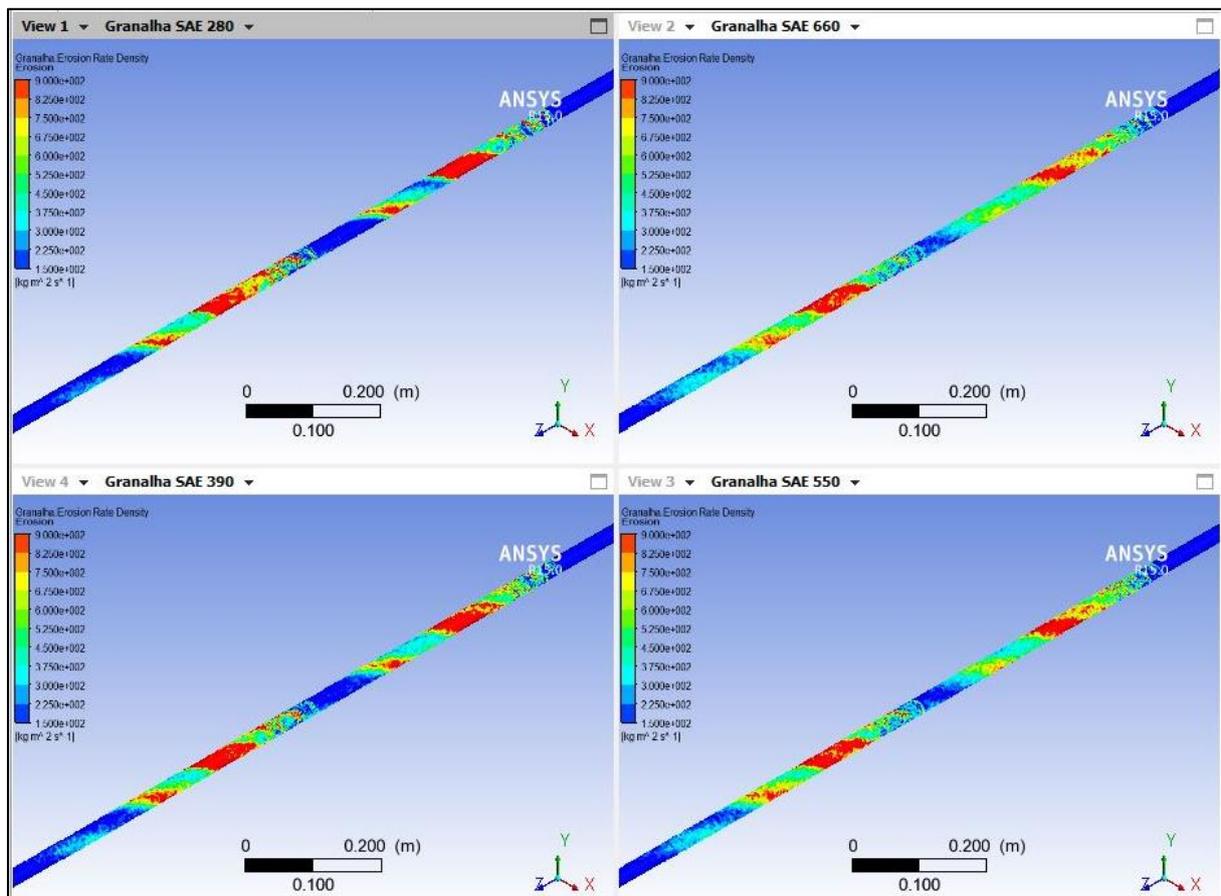


Figura 8. Comparação do efeito de limpeza de diferentes granalhas SAE. SAE 280 (acima na esquerda), SAE 390 (abaixo na esquerda), SAE 550 (abaixo na direita) e SAE 660 (acima na direita)

Pode-se notar o aumento no efeito de limpeza, à medida que a granulometria da granalha de aço aumenta. O uso de granalhas SAE 550 ou SAE 660 apresenta resultados mais próximos da limpeza homogênea do tubo, sendo considerados satisfatórios.

4.2. Estudo da velocidade

Aqui, foram estudados os efeitos de três velocidades diferentes (5, 10 e 15 m/s) na entrada do trocador, utilizando-se a granalha padrão do estudo do modelo e os demais parâmetros anteriormente usados.

Ao final dos cálculos, foi realizada uma comparação do efeito de erosão sobre o tubo com mesma faixa de escala (ver Figura 9).

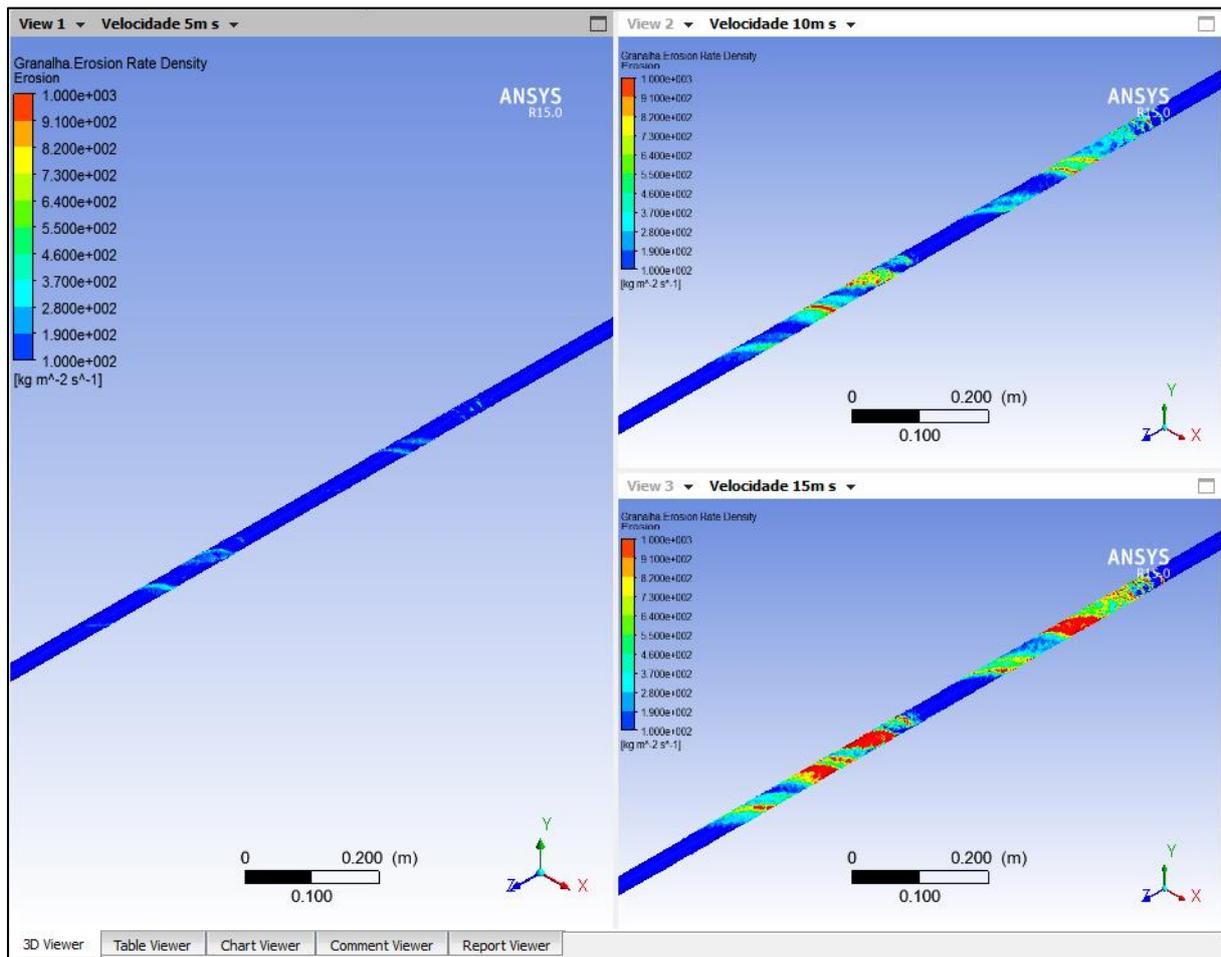


Figura 9. Comparação do efeito de limpeza produzido com escoamento a 5m/s (esquerda), 10m/s (acima) e 15m/s (abaixo)

Os resultados apresentam uma notável melhora no efeito de limpeza com o aumento da velocidade. Deve-se notar que, níveis muito altos de velocidade levariam a custos de instalação com bombas muito elevados, de modo que optou-se por adotar uma velocidade de trabalho de 15m/s, que já apresenta níveis de limpeza bastante razoáveis, e com boa homogeneidade.

REFERÊNCIAS

- [1] U. B. Deshannavar, M. S. Rafeen, M. Ramasamy, D. Subbarao, *Crude oil fouling: A Review* (2010).
- [2] F. J. da Silva, *Erosão, corrosão, erosão-corrosão e cavitação do aço ABNT 8550 nitretado a plasma* (2008).
- [3] M. A. Mostafa, *Fouling of Heat Transfer Surfaces* (2011).