



UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA ACADÊMICA
COORDENAÇÃO GERAL DE PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS AMBIENTAIS

RENATA KELLY DE LIMA SANTANA

**TRATAMENTO DE ÁGUAS OLEOSAS COM ALTO
GRAU DE EMULSIFICAÇÃO E PRESENÇA DE
SÓLIDOS DE BAIXA DENSIDADE UTILIZANDO FAD**

Recife

2017

RENATA KELLY DE LIMA SANTANA

**TRATAMENTO DE ÁGUAS OLEOSAS COM ALTO
GRAU DE EMULSIFICAÇÃO E PRESENÇA DE
SÓLIDOS DE BAIXA DENSIDADE UTILIZANDO FAD**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento em Processos Ambientais Universidade Católica de Pernambuco como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em **Desenvolvimento de Processos Ambientais**.

Área de Concentração: Desenvolvimento em Processos Ambientais

Linha de Pesquisa: Biotecnologia e Meio Ambiente/ Modelagem, Simulação.

Orientador: Valdemir Alexandre dos Santos

Co-orientador: Leonie Asfora Sarubbo

Recife

2017

Santana, R. K. L. Tratamento de Águas Oleosas com Alto Grau de Emulsificação e Presença de Sólidos de Baixa Densidade Utilizando FAD

Santana, RenataKelly de L.

Tratamento de Águas Oleosas com Alto Grau de Emulsificação e Presença de Sólidos de Baixa Densidade Utilizando FAD, 2017, xp 83

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Pró-reitoria Acadêmica. Curso de Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, 2009.

1. Separação sólido-líquido. 2. Indústria metalomecânica. 3. Reaproveitamento de água.
Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais. Centro de Ciências e Tecnologia.

TRATAMENTO DE ÁGUAS OLEOSAS COM ALTO GRAU DE EMULSIFICAÇÃO E PRESENÇA DE SÓLIDOS DE BAIXA DENSIDADE UTILIZANDO FAD

Renata Kelly de Lima Santana

Examinadores:

Prof. Dr Valdemir Alexandre dos Santos
Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP

Prof Dr Francisco Madeiro Bernardino Junior
Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP

Prof Dr Yana Batista Brandão
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Agradeço a Deus por me conduzir pelo deserto suprimindo todas as minhas necessidades, pela oportunidade de ser útil a sociedade civil. Aos meus pais que sem eles não teria chegado até aqui. Ao meu Marido por sempre estar ao meu lado. Ao meu filho KAUÊ que é minha razão de viver, meu apoio e ensinamentos de honestidade, fé e perseverança, a materialização do cuidado de Deus comigo e que foi tão compreensivo diante dos momentos de ausência, sem os quais não teria concluído com sucesso essa preciosa etapa.

“Porque dele e por ele, e para ele, são todas as coisas; glória, pois, a ele eternamente. Amém.”

Romanos 11:36

AGRADECIMENTOS

Sou Grata a **Deus** pela oportunidade de me sentir útil a essa sociedade civil, mesmo diante de todas as dificuldades. Deus abriu uma porta com uma luz (o mestrado) afim de honrar sua humilde serva. Porque o Senhor é fiel aos seus.

'Porque sou eu que conheço os planos que tenho para vocês', diz o Senhor, 'planos de fazê-los prosperar e não de causar dano, planos de dar a vocês esperança e um futuro.

Então vocês clamarão a mim, virão orar a mim, e eu os ouvirei.'

Jeremias 29:11

Sou grata a Deus pelo meu filho. E dedico meu titulo ao mesmo **KAUÊ JOSÉ DE LIMA SANTANA VITAL**, que veio como anjo de rodinhas trazer o real sentido a minha vida, e eu fui capaz de chegar a mais profunda maturidade espiritual.

Agradeço aos meus pais Antônio de Lima Santana e Grisquiele Ferreira da Silva pelos ensinamentos de honestidade, fé e perseverança, assim como pelo apoio e incentivo sem os quais não teria sido bem sucedida em meus sonhos.

Ao meu marido, Quariterê vital de Andrade , pelo apoio, incentivo e compreensão, sem os quais esta caminhada acadêmica teria sido difícil.

A meu Orientador, Prof. Dr. Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos pelo apoio técnico científico, pedagógico e profissional, além das palavras de apoio e compreensão em momentos difíceis, incentivo, me valorizando como pessoa e profissional.

A minha Co-orientadorao, Profa. Dra Leonie Asfora Sarubbo, pelo seu apoio técnico, científico, profissional e pedagógico.

À Coordenadora do Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais e amiga, Prof. Dra. Clarissa Dayse da Costa Albuquerque, pelo seu apoio técnico,

científico e pedagógico, suas palavras de sabedoria, com as quais esta jornada acadêmica tornou-se um tempo de crescimento acadêmico e pessoal.

Ao Magnífico Reitor da Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP, Pe. Pedro Rubens Ferreira de Oliveira, pela oportunidade de desenvolver este trabalho nesta Universidade.

A todos os amigos da turma do MDPA 2014 pelo apoio e imprescindível interação durante toda esta jornada acadêmica, sem os quais não teria sido possível a conclusão de cada etapa com o adequado aprendizado científico e humano.

Agradecimentos Este estudo foi financiado pela Fundação de Apoio à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e Termelétrica Candeias Energia (Grupo Global), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Os autores agradecem aos laboratórios do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Católica de Pernambuco, Brasil.

A todos que direta e indiretamente contribuíram para o sucesso da realização deste trabalho científico.

SUMÁRIO

Agradecimentos	
Sumário	
Lista de siglas, abreviações e símbolos	
Lista de equações Cap I, II	
Lista de figuras	
Lista de tabelas Cap I, II	
Resumo	
Abstract	
Captitulo I	
1.1 Introdução	19
1.2 Objetivos	22
1.2.1 Objetivo Geral	22
1.2.2 Objetivos Específicos	22
1.3 Revisão da literatura	23
1.3.1 A importancia da água no planeta	23
1.3.2 A usinagem	23
1.3.2.1 Agentes de melhoria da Usinagem	24
1.3.3 Efluentes da industria metalmeccânica	25
1.3.4 Grafite como agente lubrificante	26
1.3.5 Continua sedimentação Liquido- liquido	26
1.3.6 Estudo de sedimentação em campo gravitacional	29
1.3.6.1 Método de Kynch	30
1.3.6.2 Método de TALMADGE-FICH	34
1.3.7 Separação solido - liquido	36
1.3.8 Hidrociclones	36
1.3.9 Classificaçãodos hidrociclones	39
1.3.10 Flotação	41
1.3.11 FAD	41
1.3.11.1 Variáveis Relevantes no processo FAD	43
1.3.11.2 Distribuição do tamanho das bolhas	44
1.3.11.3 Taxa de recirculação	44
1.3.11.4 Cinética de FAD	44
1.3.12 Formulação do problema	51
1.3.12.1 Escolha do sistema de coordenadas	52
1.3.12.2 Modelagem de geometria de domínio do escoamento	53
1.3.12.3 Estabelecimento das condições iniciais e de contorno	53
1.3.13 Geração de Malhas	54
1.3.14.Estratégias de simulação estabilidade e condições de convergências	56

1.3.15 Pós- processamento	60
Referencias	67
Capitulo II	68
1. Introdução	69
2. Material e Método	70
2.1 Quebra ácida de Emulsão Química	70
Prototipo de Bancada para separação preliminares	71
Prototipo FAD de ?bancada	72
Resultados e discursões	73
Conclusões	76
Referências	77
Capitulo III	78
Conclusão Geral	79
Anexos	81

LISTA DE SIGLAS, ABREVIações E SÍMBOLOS

- C Concentração de sólidos
- C_P Concentração volumétrica
- Concentração volumétrica A
- C_{PI} Concentração volumétrica I
- C_{PL} Concentração volumétrica L
- D Diâmetro
- $\varepsilon_{S0} = C_0$ Concentração inicial de sólidos
- $\varepsilon_{SU} = C_E$ Concentração da lama
- H_1 Altura da região do líquido Clarificado
- H_2 Altura da região de espessamento
- H_3 Altura do fundo do decantador
- q_S Velocidade superficial de sólidos alimentados
- Q_A Vazão volumétrica da suspensão alimentada ao decantador
- Q_E Vazão volumétrica de extravasante
- S Área de sedimentação
- t Tempo

- t_E Tempo de espessamento
- v Velocidade de sedimentação
- v_{S0} Velocidade inicial de sedimentação (batelada)
- v_{PM} Volume de massa específica média
- z_0 Altura inicial da suspensão

LISTA DE EQUAÇÕES

CAPITULO I

Equação 1	29
Equação 2	31
Equação 3	31
Equação 4	33
Equação 5	33
Equação 6	45
Equação 7	45
Equação 8	45
Equação 9	45
Equação 10	45
Equação 11	46
Equação 12	46
Equação 13	46
Equação 14	46
Equação 15	55
Equação 16	55
Equação 17	56
Equação 18	56
Equação 19	57
Equação 20	57
Equação 21	58
Equação 22	58

CAPÍTULO II

Equação 1	29
-----------	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Geometrica para hidrociclone famili, Kles, Ritiema e Bradley**Erro!**
Indicador não definido.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	O processo de sedimentação em batelada segundo a teoria de Kynch	31
Figura 2	Ensaio de proveta segundo propostas de Kynch	32
Figura 3	Determinação gráfica de v e c pelo método de Kynch	33
Figura 4	Método gráfico de Talmadge-Fitch	34
Figura 5	Trajectoria da suspensão no interior do hidrociclone	37
Figura 6	Esquema com a disposição dos componentes de um hidrociclone	39
Figura 7	Avaliação dos parâmetros cinéticos da velocidade do processo por flotação por ar dissolvido	46

RESUMO

Foi desenvolvida uma metodologia para tratamento de um efluente da indústria metalmeccânica composto de água, fluido de corte e grafite. A recuperação de componentes de um efluente do processo de usinagem torna-se complexa devido à coexistência de sólidos como o grafite, misturado a uma emulsão do tipo água-óleo. Devido ao uso do grafite em partículas muito pequenas e emulsionado em água com auxílio de um emulsificante, distribuindo-se em ambas as fases (aquosa e orgânica), dificultando o processo de tratamento. De modo geral o tratamento de um efluente desse tipo exige, na etapa preliminar, a quebra da emulsão para que seja recuperado o grafite disperso no meio líquido. O tratamento foi inicialmente realizado em um protótipo de separação de fases em escala de laboratório, contando com tanques de recirculação, bombas, hidrociclones e decantador contínuo. Numa etapa inicial o efluente foi acidificado através da adição de ácido sulfúrico PA como forma de quebrar a emulsão sólido-líquido. Posteriormente, foi recuperada a fase sólida com auxílio de um hidrociclone, dando origem a uma descarga pelo overflow do equipamento de uma mistura de água e óleo de corte residual. A mistura de parte da água e do água-fluido de corte, após a desestabilização ácida da emulsão, foi separada no decantador contínuo, dando origem a uma corrente de fluido de corte e uma fase aquosa contendo óleo residual, contaminada por cerca de 130 ppm de fase orgânica. A fase aquosa foi então submetida a um processo de flotação por ar dissolvido (FAD), auxiliada por biossurfactante desemulsificante em um protótipo FAD, também em escala de laboratório. Para definir condições adequadas à obtenção de uma fase aquosa com nível de contaminação que permitisse seu retorno ao processo, as condições operacionais de aplicação da técnica de FAD foram determinadas com auxílio de um planejamento experimental do tipo Delineamento Compost Central Rotacional (DCCR). Ao final do processo de recuperação da fase aquosa foi obtido um teor óleo residual de 12 %, abaixo do exigido pelo órgão brasileiro de regulamentação ambiental (CONAMA) para descarte em corpos hídricos, que é de 20 ppm. As recuperações do grafite e do fluido de corte são estudos sugeridos para os próximos trabalhos.

Palavras-chave: Separação sólido-líquido; DCCR; Hidrociclone; Indústria metalmeccânica; FAD; Reaproveitamento de água.

ABSTRACT

A methodology was developed for the treatment of an effluent from the metalworking industry composed of water, cutting fluid and graphite. The recovery of components from an effluent from the machining process becomes complex due to the coexistence of solids such as graphite, mixed with a water-oil emulsion. Due to the use of graphite in very small particles and emulsified in water with the aid of an emulsifier, distributing in both phases (aqueous and organic), making the treatment process difficult. In general, treating such an effluent requires, in the preliminary step, the breaking of the emulsion so that the graphite dispersed in the liquid medium is recovered. The treatment was initially performed in a prototype phase separation in laboratory scale, counting on recirculation tanks, pumps, hydrocyclones and continuous decanter. In an initial stage the effluent was acidified by the addition of sulfuric acid PA as a way of breaking the solid-liquid emulsion. Subsequently, the solid phase was reered with the aid of a hydrocyclone, resulting in an overflow of the equipment of a mixture of water and residual oil. The mixture of part of the water and the water-cutting fluid, after acid destabilization of the emulsion, was separated into the continuous decanter, giving rise to a stream of cutting fluid and an aqueous phase containing residual oil, contaminated by about 130 ppm Of organic phase. The aqueous phase was then subjected to a dissolved air flotation (FAD) process, aided by a demulsifying biosurfactant in a FAD prototype, also on a laboratory scale. In order to define adequate conditions to obtain an aqueous phase with contamination level that allowed its return to the process, the operational conditions of application of the FAD technique were determined with the aid of an experimental design of the type rotational central compost (CDCR). At the end of the aqueous phase recovery process, a residual oil content of 12% was obtained, below that required by the Brazilian environmental regulatory agency (CONAMA) for discharge in water bodies, which is 20 ppm. The recoveries of graphite and cutting fluid are suggested studies for the next works.

Keywords: Solid-liquid separation; DCCR; Hydrocyclone; Metalworking industry; FAD; Water reuse.

CAPÍTULO I

1.1 Introdução

Entende-se como operação de usinagem aquela que confere a uma peça metálica uma forma, as dimensões, o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produzindo cavaco (FERRARESI, 1977). Define-se cavaco como a porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular. Além desta característica, estão envolvidos no mecanismo da formação do cavaco alguns fenômenos particulares, tais como o recalque, a aresta postiça de corte, a caracterização na superfície de saída da ferramenta e a formação periódica do cavaco.

Na usinagem, o uso de fluidos de corte, meios de lubrificação e arrefecimento, quando escolhidos e aplicados apropriadamente, traz benefícios. O fluido deve ser aplicado de modo que permita a sua ação o mais próximo possível da aresta de corte nas interfaces peça/ferramenta/cavaco, de modo a assegurar que suas funções sejam adequadamente exercidas. Contudo, apesar dos benefícios apresentados, a utilização do fluido de corte em processos de usinagem gera custos associados à aquisição, ao armazenamento, ao preparo, ao controle em serviço e ao descarte. Dentro da indústria, as questões ambientais envolvem danos à saúde do operador devido ao contato do referido fluido com a pele e a respiração e/ou ingestão de poluentes derivados dos mesmos. Fora da indústria, quando descartado, deve-se ter cuidados para não afetar o solo, a água e algumas vezes o próprio ar (Groover, 2010).

O processo mecânico de usinagem destina-se à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo. A temperatura é então o principal fator limitante da utilização de ferramentas de corte em regimes de trabalho elevados, fixando as condições máximas de produtividade e duração das ferramentas. Como as deformações e forças de atrito se distribuem irregularmente, o calor produzido também se distribui de forma irregular. Para aumentar a produtividade da ferramenta deve-se aumentar a velocidade, o avanço e a profundidade de corte mas, todos estes fatores contribuem para um aumento da temperatura (BARTARYA; CHOUDHURY, 2012). Dessa forma, deve-se procurar diminuir essa temperatura além de empregar materiais de corte resistentes a altas temperaturas e ao desgaste e, o

meio mais barato para a diminuição da temperatura de corte é o emprego dos conhecidos fluidos de corte (CETIN et al., 2011).

Um fluido de corte deve reduzir custos de produção pela redução do desgaste da ferramenta e pela melhoria da superfície do componente usinado. Como funções secundárias têm-se o transporte do cavaco para fora da região de trabalho, a refrigeração da região de corte e da peça, uma vez que para uma exigência maior de tolerância dimensional, um aquecimento demasiado leva a uma dilatação térmica do componente, e isso deve ser evitado (Birat, 2016).

O emprego de fluidos de corte, além da refrigeração e lubrificação do processo de usinagem, tem por finalidades (DEBNATH; REDDY; YI, 2014): A redução do atrito é um dos fatores que propiciam um aumento da vida útil de uma ferramenta de corte em usinagem, pois os efeitos dos desgastes sobre a ferramenta diminuem. Uma das formas de diminuir tais efeitos é a introdução de uma camada lubrificante sólida com baixa taxa de cisalhamento entre as superfícies da ferramenta e da peça a ser trabalhada.

Dependendo da aplicação, a lubrificação sólida é a que apresenta maiores vantagens em relação à diminuição do atrito, pois uma vez formada a camada de lubrificante, este poderá permanecer entre as partes em contato. Outra vantagem do lubrificante sólido em relação ao líquido é a temperatura de operação que pode estender a faixa de 1000°C, mantendo o coeficiente de atrito relativamente baixo. Dentre os lubrificantes sólidos, os mais conhecidos são a grafita, o bissulfeto de molibdênio (MoS_2) e o politetrafluoretileno (Chelgani, et al., 2015). Contudo, o uso de fluidos de corte emulsionado em água, com a presença de lubrificante sólido (grafita, por exemplo), dificulta o descarte desse efluente para o meio ambiente, uma vez que todos esses componentes são passíveis de reúso (Karhu, Leiviskä and Tanskanen, 2014).

A complexidade e variedade da constituição dos efluentes das indústrias metalmeccânicas deram origens a dificuldades imensas para o tratamento adequado do mesmo. A geração anual mundial desse tipo de efluente é estimado em $2 \cdot 10^9$ litros e o seu desperdício pode ultrapassar dez vezes esta proporção, já que esses são diluídos antes do uso (SANTOS, 2014). Por isso a busca de novos tratamentos ou a otimização desses novos ou dos já existentes é imprescindível. Geralmente, estes efluentes são

tipicamente tratados com processos físico-químicos (TRAJANO, 2013). Muitas vezes, estes tratamentos não são suficientes para remover todos os poluentes existentes nesses efluentes.

A presença de Grafite para melhorar na lubrificação em operações de usinagem, também dá origem a dificuldades de separação pela forma como as partículas de Grafite são confinadas. O formato das lâminas dados a essas partículas dão às mesmas uma área superficial bem extensa comparada com suas dimensões. Dessa forma as partículas de Grafite, de massa específica da ordem de $1,8 \text{ g/m}^3$, comportam-se como se possuíssem massa específica igual ou menor a que a da água (*I. R. de Oliveira, A. R. Studart, F. A. e Silva Júnior, V. C. Pandolfelli, 2000*)

Os sistemas de tratamentos de efluentes industriais, em sua maioria, são constituídos de processos físico-químicos seguidos de outros tipos de tratamentos denominados por polimentos. Essa integração de processos, geralmente, aperfeiçoa o sistema de tratamento de forma geral. Porém, para isso, é importante que a etapa físico-química seja responsável pela retirada da maioria das substâncias poluentes.

A maioria dos processos de usinagem é realizada utilizando-se os fluidos de corte como emulsões (proporções de fluido de corte e água, de acordo com a necessidade do processo). Esses fluidos são intimamente misturados com a água promovendo uma intensa emulsificação dificultando a etapa de separação água/ óleo (COUTINHO,2005).Conforme Borsa (2014), para separar o grafite sem auxílio de técnicas eletroquímicas, o efluente deve ser tratado por métodos físico-químicos tradicionais, utilizando-se a acidificação do meio através da adição de H_2SO_4 e H_2O_2 , como forma de quebrar a emulsão. Após esta reação, o grafite pode ser retirado parcialmente por decantação. O efluente restante deve passar pelos processos de coagulação e neutralização, pelas adições de polímeros iônicos e NaOH e, após filtragem em filtro prensa, o efluente deve ser disposto em uma lagoa de aeração.

O presente trabalho desenvolveu uma metodologia para separação desses componentes e recuperação do efluente aquoso, esta última com auxílio da técnica de Flotação por Ar Dissolvido (FAD) auxiliada por biossurfactante.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Definir experimentalmente as condições otimizadas para separar a mistura água-óleo-sólidos de baixa densidade em uma câmara de Flotação por Ar Dissolvido (FAD).

1.2.2 Objetivos Específicos

- Planejar experimentos para analisar variáveis relevantes em uma separação líquido-líquido-sólido de baixa densidade;
- Analisar os resultados com auxílio de métodos estatísticos adequados ao tipo de planejamento fatorial;
- Propor modelos de previsão para as condições otimizadas relativas a esse tipo de separação.

1.3 REVISÃO DA LITERATURA

1.3.1 Importância da água no planeta

A água é indispensável para a vida no planeta, e essencial para a atividade humana e por isso agrega-se um valor econômico, sociais e culturais. Com vasto uso, a água sendo utilizada como por exemplo, no transporte de pessoas e mercadorias, na geração de energia, na produção e processo de alimentos, recreação e paisagismo, além de assimilação de poluentes, também nos processos industriais diversos, como no processo de usinagem (FREITAS, 2015)

A água do planeta, 97,3% está na forma salgada, em torno de 2,7%, considerando doce, na forma de neve e gelo, águas subterrâneas de difícil acesso e somente 0,33% são águas superficiais. Destas, 53%, encontram-se em rios e lagos, 38% na umidade do solo, 8% na forma de vapor atmosférico e 1% encontra-se nos organismos vivos (BORBA, 2015). A utilização da cobrança pelo uso dos recursos hídricos é uma das formas de se aplicar o Princípio 16 da Declaração do Rio de Janeiro da Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente de 1992: "As autoridades nacionais devem esforçar-se para promover a internalização dos custos de proteção do meio ambiente e o uso dos instrumentos econômicos, levando-se em conta o conceito de que o poluidor deve, em princípio, assumir o custo da poluição, tendo em vista o interesse do público, sem desvirtuar o comércio e os investimentos internacionais" (MACHADO, 2002).

1.3.2 A usinagem

A usinagem de um metal, no início do corte, a ferramenta penetra no material da peça, e cisalhamento do material, este começa a escoar. Em dependência da geometria da cunha de corte, o material deformado passa a formar um cavaco que desliza sobre a face da cunha de corte. O desempenho do material frente a esse trabalho de usinagem é que vai caracterizar a usabilidade do mesmo (BORBA,2016).

A usinabilidade dos materiais é uma propriedade difícil de ser determinada, pois depende de diversos fatores dos próprios processos de usinagem, ou seja: velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e tipos das ferramentas, das máquinas operatrizes e dos fluidos de corte. Cada material apresenta condições particulares que ditam as normas mais adequadas de usinagem (REIS, 2015).

As principais funções do fluido de corte são: lubrificação, refrigeração do conjunto peça/ferramenta, e retirada do cavaco da zona de corte. A lubrificação pelo fluido de corte reduz as forças envolvidas no processo evitando assim a geração de calor na zona de corte. (PAULA, 2016)

1.3.2.1 Agentes de melhoria da usinagem

A constante orientação por melhores resultados da indústria metal mecânica, norteadada pela busca da sobrevivência em um ambiente sob o imperativo da competitividade, induz as companhias a buscarem uma maior produtividade. Sabemos que o atrito gera calor e não existe corte sem atrito. Denomina-se usinagem como corte de material com uma ferramenta. Assim, quanto maior a velocidade de produção, e maior atrito, maior a produção e menor será o custo (NEUMANN, 2016)

Durante o processo de produção de petróleo, a emulsificação do óleo pode se dar através do cisalhamento imposto por bombas, válvulas, restrições hidráulicas e outros equipamentos do processo (Fordedal *et al.*, 1995). As partículas sólidas finamente divididas oriundas da própria formação produtora, assim como os produtos químicos residuais utilizados na desestabilização de emulsões água/óleo, e as moléculas surfactantes naturais do petróleo podem aumentar a proporção e a estabilidade do óleo emulsificado nas águas oleosas (COSTA, 2016).

1.3.3 Efluente da indústria metalmeccânica

A indústria metalmeccânica é responsável pela síntese de um efluente oleoso mais complexo e difícil de tratamento e reuso. Esses efluentes são constituídos, entre outros poluentes, por fluidos de corte, que servem para refrigerar e lubrificar peças metálicas no sistema de usinagem. Os fluidos de corte são amplamente utilizados como refrigerantes e lubrificantes durante os processos de usinagem. O uso anual mundial é estimado em 2.10^9 litros e o seu desperdício pode ultrapassar dez vezes esta proporção, já que esses são diluídos antes do uso (MONTEIRO, 2006).

A complexidade e variedade da constituição dos efluentes metais mecânicos criaram dificuldades imensas para o tratamento adequado do mesmo, por isso a busca de novos tratamentos e alternativas para os tratamentos já existentes é imprescindível. Geralmente, estes efluentes são tipicamente tratados com processos físico-químicos (QUEISSADA, 2011).

1.3.3 A poluição de efluentes industriais

A poluição pelos efluentes líquidos industriais deve ser controlada inicialmente pela redução de perdas nos processos, incluindo a utilização de tecnologias mais modernas, arranjo geral otimizado, redução do consumo de água incluindo as lavagens de equipamentos e pisos industriais, redução de perdas de produtos ou descarregamentos desses ou de matérias primas na rede coletora. A manutenção também é fundamental para a redução de perdas por vazamentos e desperdício de energia. Além da verificação da eficiência do processo deve-se questionar se este é o mais moderno, considerando-se a viabilidade técnica e econômica (BELISÁRIO, 2015).

Assim, com o aumento da contaminação dos rios, as iniciativas de racionalização do uso e de reuso da água constituem elementos fundamentais para as iniciativas de conservação e já têm sido empregadas nas indústrias devido à grande demanda deste recurso em alguns setores industriais. Essas águas produzidas (após tratamento) são, comumente, lançadas no meio do oceano e podem causar

contaminação ambiental grave, especialmente quando atingem solos e cursos de água (DURANTE, 2015).

1.3.4 Grafite como agente lubrificante

Em algumas dessas práticas industriais, o grafite também é utilizado como auxiliar na lubrificação de peças usinadas. A combinação de grafite com uma segunda fase tem resultado em compósitos singulares, nos quais o grafite contribui para a redução da expansão térmica, aumento da resistência ao choque térmico, da energia de fratura e da resistência ao ataque por escória (em decorrência da sua reduzida molhabilidade por óxidos fundidos). Por outro lado, em aplicações siderúrgicas, a fase óxida nesses compósitos é insolúvel em metais, resultando numa proteção em meio aquoso, o grafite apresenta uma baixa dispersibilidade. No processo de dispersão, a fase líquida deve inicialmente molhar a superfície externa do material e também substituir o ar contido no interior dos aglomerados de partículas. Essa reduzida molhabilidade do grafite impede que haja uma adequada dispersão e homogeneização das partículas desse material e pode comprometer o comportamento reológico de suspensões contendo essa matéria-prima. Tais aglomerados podem ser quebrados com auxílio de agitação mecânica, expondo a superfície de cada partícula ao líquido (MURARU, 1980).

Na indústria mecânica, suspensões do tipo água-grafite-fluido de corte aparecem como um dos principais agentes poluidores nos processos de usinagem, o que requer cuidados especiais para o seu gerenciamento ambiental (KYERS, 2013). Dessa forma, é nítida e urgente a busca por soluções que atendam às necessidades ambientais, governamentais, empresariais e comunitárias, para que sejam viáveis na prática. Não é possível apenas pensar no meio ambiente, pois se assim fosse feito as ideias nunca sairiam do papel. É preciso buscar soluções sustentáveis, que atendam aos diversos interesses.

O óleo livre encontra-se completamente estratificado na água, podendo ser removido com relativa facilidade, bastando para tal um decantador, um hidrociclone, uma centrífuga ou um flutador (CREMASCO, 2014), que seja capaz de proporcionar as

condições necessárias para que as menores gotículas de óleo em suspensão na água oleosa sejam separadas por diferença de densidade e formem uma fase contínua e independente. Com frequência, para a separação do óleo livre são empregados decantadores. A separação do óleo livre é, em geral, um processo exclusivamente físico, e não apresenta maiores complexidades.

Na flotação adiciona-se à água oleosa uma grande quantidade de microbolhas de um gás (geralmente ar), as quais, pela natureza hidrofóbica do óleo, aderem-se às gotículas de óleo de forma firme e estável. Com isso, há a formação de um sistema óleo-gás, mais precisamente “flocos”, com densidade muito inferior à da água onde ele se encontra, independente de ter havido a adição de um agente químico para desestabilizar a emulsão (SILVA et al., 2015). Como a velocidade de separação também é diretamente proporcional à diferença entre as densidades das fases, flocos formados tendem a se deslocar para a superfície do líquido com muito mais rapidez e eficiência, onde se acumulam e de onde podem ser removidos com facilidade.

A separação do óleo por Flotação a Ar Dissolvido (FAD) consiste na melhor alternativa para o tratamento de águas oleosas, esteja o óleo livre ou emulsionado, pois é de baixo custo (equipamentos compactos), fácil operação e muito eficiente, garantindo o cumprimento das exigências ambientais e, muitas vezes, permitindo o reúso da água (VASCONCELOS et al., 2015). Entretanto, a existência de fatores como alta concentração de óleo e presença do grafite no meio, indica a necessidade de um processo muito complexo de separação, levando-se à elaboração de uma etapa de pré-tratamento para adaptação do efluente a condições adequadas em direção a uma etapa principal de tratamento com FAD.

1.3.5 Contínua sedimentação Líquido- Líquido

A sedimentação é uma operação de separação sólido-líquido baseada na diferença entre as concentrações das fases presentes na suspensão a ser processada, sujeita à ação do campo gravitacional. A decantação (sedimentação ou espessamento) da fase particulada ocorre normalmente em tanques cilíndricos, conhecidos como sedimentadores (CREMASCO, 2012).

Tais equipamentos são muito utilizados em indústrias químicas, de tratamento de água e efluentes, em indústrias de beneficiamentos de minério, seja para descarte ou para aproveitamento do sólido (GONÇALVES, 2009).

Nas indústrias químicas, os processos de separação por sedimentação são feitos continuamente ou descontinuamente em equipamentos denominados de decantação ou decantadores.

1. Descontínuos: tanques cilíndricos com a solução em repouso por um certo tempo
2. Contínuos: tanques rasos de grande diâmetro, em que operam grades em função da remoção de lama. A alimentação é feita pelo centro do tanque (PEDRO 2016).

Quanto a finalidades, as operações de sedimentação são divididas didaticamente em duas classes, espessamento e clarificação. No espessamento o produto de interesse são os sólidos e na clarificação, o produto de interesse é o líquido clarificado (FERREIRA, 2008)

Denomina-se clarificação ao processo de separação sólido-líquido quando o líquido é o produto desejado. Esse tipo de técnica de tratamento é geralmente utilizado em (KUNZ, 2010):

1. tratamento de água potável ou para caldeiras;
2. clarificação de salmouras na indústria de NaOH; e
3. remoção da lama de soluções quentes de açúcar tratado com cal e carbonatadas; antes da filtração, evaporação ou cristalização.

Num processo de tratamento do tipo espessamento, os sólidos são os produtos desejados. Conhece-se aplicações desse tipo de processo de separação em (MASSI, 2008):

1. desaguamento de lamas de cimento antes de alimentá-lo no forno;
2. espessamento de concentrados da flotação antes da filtração;
3. desaguamento de litopônio fino, classificado.

Na prática, a nomenclatura, segundo o diâmetro dos sólidos, para indústrias metalúrgica e química é:

- Areia > 200 mesh
- Lama < 200 mesh

Na sedimentação as polpas usualmente contem muita lama, pouca areia e pouco matéria coloidal (0,1- 0,001 μ).

1.3.6 Estudo de Sedimentação em campo gravitacional

Existem inúmeros trabalhos que contribuem para o estudo da sedimentação de partículas sólidas em meio aquoso.

Hazem(1904) *apud* Damasceno(1992), mostrou que o tempo de residência não é um fator importante no projeto de sedimentadores e que a quantidade de sólidos removidos depende da área da seção transversal do tanque, das propriedades do material sólido e é inversamente proporcional ao fluxo do tanque.

De acordo com Aroura (2007), um grande avanço no projeto de sedimentadores foi elaborado a partir de bases científicas desenvolvidas por Mishler (1992), onde propôs que a área de seção transversal do equipamento fosse calculada a partir da velocidade ascensional do líquido, suposta igual à velocidade de sedimentação das partículas.

Segundo Cremasco (2012) *apud* Damasceno (1998), o método de Coe e Clevenger (1916) foi o primeiro procedimento proposto para o projeto de sedimentadores, tendo sido utilizado por mais de meio século.

A partir de testes de sedimentação em batelada, os autores propuseram uma expressão para calcular a capacidade de sedimentadores contínuos a partir de resultados obtidos em diversos ensaios de sedimentação em proveta para concentrações que compreendiam uma faixa que variava da concentração de alimentação à retirada na lama. Desta forma, a velocidade superficial de sólidos alimentados em um sedimentador, q_s , pode ser obtida através da Equação 1:

$$q_s = \frac{v_{s0}}{\frac{1}{\varepsilon_{s0}} - \frac{1}{\varepsilon_{su}}} \quad (1)$$

no qual v_{s0} é a velocidade inicial de sedimentação em um ensaio de sedimentação em batelada, ε_{s0} é a concentração inicial no ensaio e ε_{su} é a concentração da lama. Foram realizados diversos ensaios em proveta nos quais foram medidas de concentração e velocidade inicial de sedimentação (AROUCA, 2007).

Esse procedimento desenvolvido por Coe e Cleverger (1916) perdurou até meados do século XX sem que nenhuma metodologia tivesse uma fórmula consistente para a sedimentação até então.

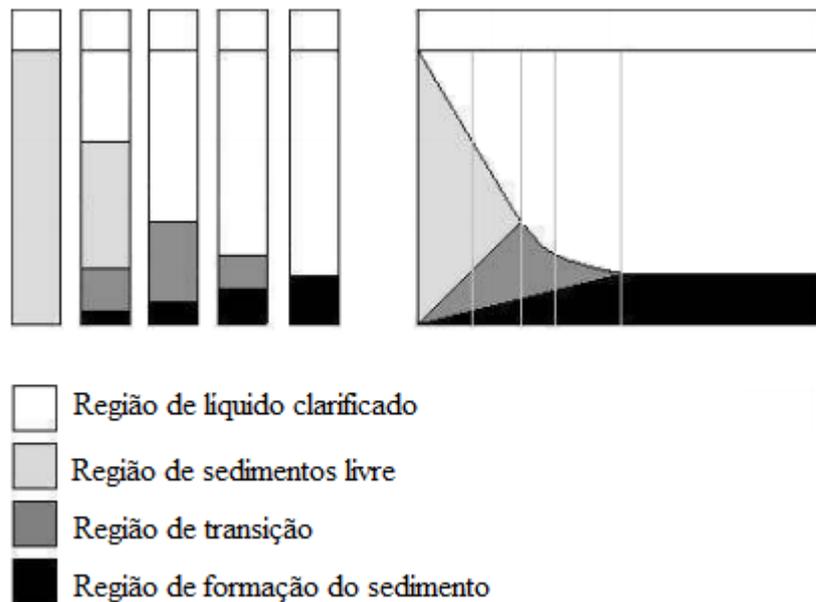
1.3.6.1 Método de Kynch

Segundo Nunes (2008), uma teoria bastante simplificada para descrever o fenômeno da sedimentação em batelada foi desenvolvida por Kynch (1952), que propôs um modelo matemático, com base na equação da continuidade para os sólidos, o que reduziu o número de ensaios em proveta. Sua teoria se baseia na hipótese de formação de sedimentos incompressíveis, e a sua utilização para projeto de sedimentadores, que devem operar com suspensões que produzem sedimentos com pequenos graus de compressibilidade pode produzir resultados aceitáveis. Para isso, admitiu-se as seguintes hipóteses:

- A sedimentação é unidimensional;
- A concentração aumenta no sentido do fundo do recipiente;
- A velocidade de sedimentação tende a zero quando a concentração atinge um valor máximo;
- A velocidade de sedimentação depende apenas da concentração local de sólidos;
- Os efeitos de parede não são considerados.

A teoria de Kynch (1952) determina quatro regiões distintas na sedimentação em batelada:

Figura 1. O processo de sedimentação em batelada segundo a teoria de Kynch

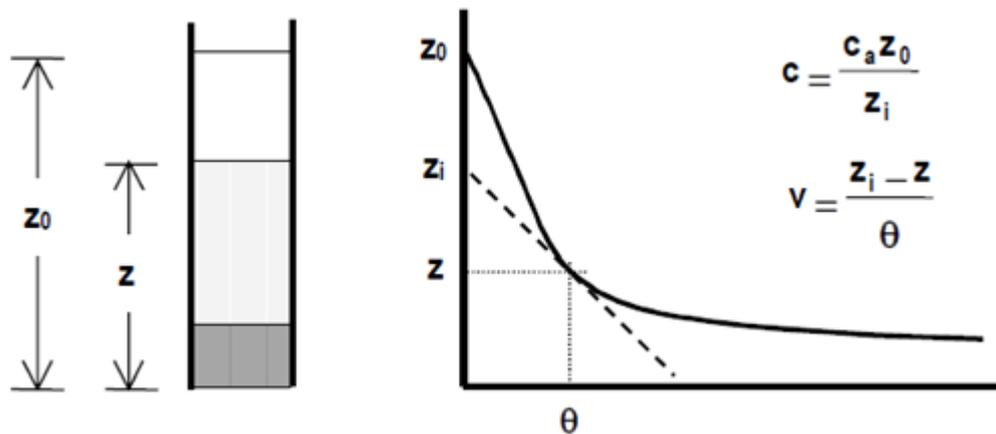


Fonte: Arouca (2007)

- **Região de líquido clarificado:** não há presença de sólidos;
- **Região de sedimentação livre:** a concentração de sólidos é muito próxima da concentração inicial e a velocidade de sedimentação é constante;
- **Região de transição:** ocorre um aumento na concentração de sólidos e um decréscimo na velocidade de sedimentação;
- **Região de formação de sedimentos** a concentração de sólidos é máxima e a velocidade de sedimentação é considerada nula.

A Figura 2 ilustra a interpretação de parâmetros da sedimentação a partir de testes de proveta realizado em laboratório.

Figura 2. Ensaio de proveta segundo propostas de Kynch



Fonte: Arouca (2007)

Observa-se pela Figura 2 que tanto c (concentração de sólidos) como v (velocidade de sedimentação dos sólidos) podem ser retirados diretamente da curva. De acordo com Nunes (2008), foi apresentada uma forma de calcular a concentração da interface superior em função do tempo de análise, em um ensaio de teste de proveta, que está apresentada na Equação 2 a seguir:

$$C = \frac{C_a z_0}{z_i} \quad (2)$$

Onde:

C = Concentração de sólidos (g/cm^3)

C_a = Concentração volumétrica A

z_0 = Altura inicial da suspensão

z_i = Altura final da suspensão final

A velocidade de sedimentação dos sólidos na interface superior pode ser calculada a partir da:Equação 2:

$$v_s = -\frac{dz}{dt} = \frac{z_i - z}{t} \quad (3)$$

Onde:

$$V_i = (\text{g/cm}^3)$$

d_z = Concentração da lama espessada (g/cm^3)

d_t = tempo de escoamento

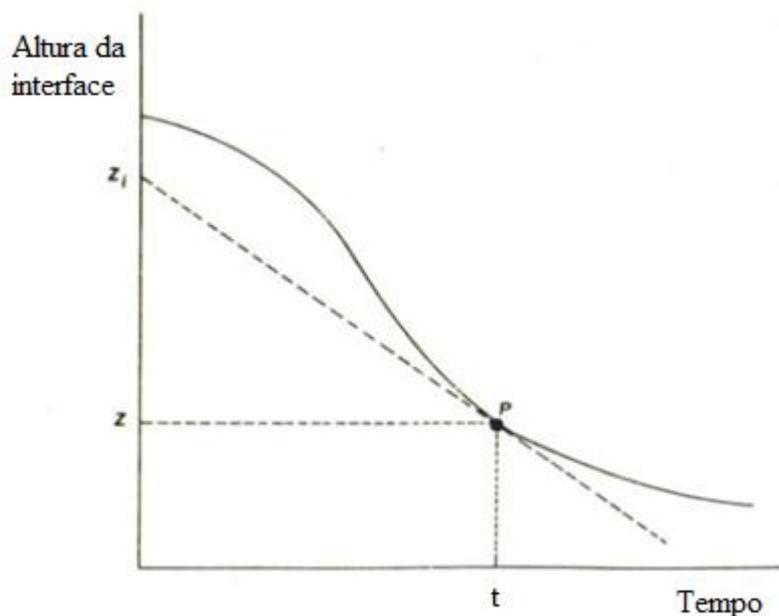
z_i = Altura inicial da suspensão final

z = Altura inicial da suspensão

T = tempo

Traçam-se tangentes em diversos pontos da curva e determinam os valores de t , Z e Z_i , conforme Kynch (Figura 3).

Figura 3. Determinação gráfica de v e c pelo método de Kynch



Fonte: Souza (2013)

Com a construção gráfica descrita na Figura 3, calculam-se os diversos pares de valores da concentração e da velocidade de decantação, com os quais são calculados

os valores correspondentes da seção transversal. O valor máximo obtido corresponde à área mínima do decantador.

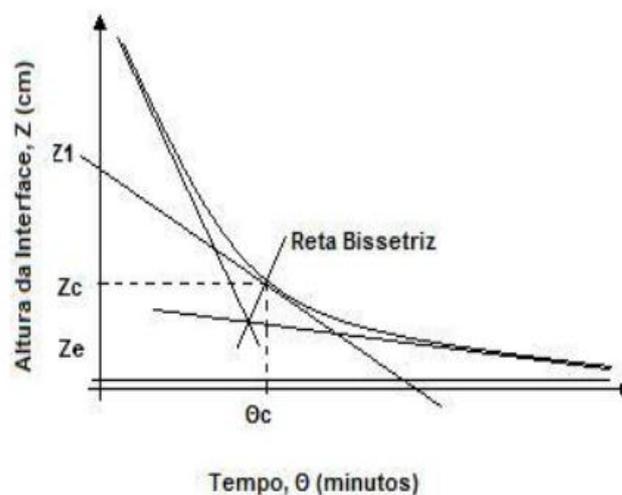
1.3.6.2 Método de TALMADGE-FITCH

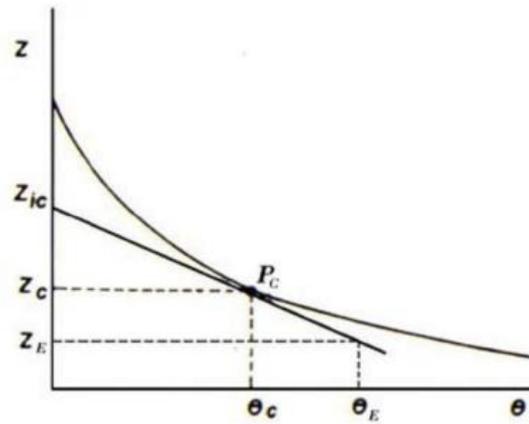
O método de Talmadge-Fitch (1955) fundamenta-se na determinação do ponto crítico (z_c, θ_c) através de análise da curva de sedimentação, diferente do trabalho de Kynch, Talmadge e Fitch baseiam-se em um único ensaio de sedimentação para as condições desejadas e definem alguns parâmetros importantes com a curva de sedimentação.

De acordo com Souza *et al* (2013), são necessárias algumas etapas para encontrar a altura da interface e o tempo necessário

- Traçar a tangente à curva de sedimentação na zona de clarificação;
- Traçar a tangente à curva de sedimentação na zona de espessamento;
- Traçar a bissetriz entre as 2 retas;
- Localizar o ponto crítico;
- Traçar a tangente à curva de sedimentação passando pelo ponto crítico.
- Identificar z_i, z_c e θ_c .

Figura 4. Método gráfico de Talmadge-Fitch





Fonte: Souza (2013)

Em que:

z_c = Altura da interface no ponto crítico.

θ_c = Tempo necessário para atingir o ponto crítico.

Localiza-se a altura de compressão através da fórmula Equação 4

$$z_E = \frac{z_0 * C_0}{C_E} \quad (4)$$

Em que:

$C_A = C_0$ = Concentração de sólidos na suspensão alimentada A)

a (g.cm^{-3});

C_E = Concentração da lama espessada (g.cm^{-3});

z_E = Altura do espessamento;

z_0 = Altura inicial.

De posse dos gráficos construídos e do ponto crítico definido, identifica-se θ_E e, através da Equação 4 deduzida das equações descritas no método de Roberts, calcula-se a área Equação 3:

$$S = \frac{Q_A * C_A * \theta_E}{z_0 * C_0} \quad (5)$$

Em que:

S = Área de decantação ou seção transversal do decantador (cm²);

Q_A = vazão volumétrica da suspensão alimentada ao decantador (cm³/min⁻¹);

C_A = C₀ = Concentração de sólidos na suspensão alimentada (g.cm⁻³);

θ_E = tempo do ponto de espessamento.

1.3.7 Separação Sólido/ Líquido:

Nos sistemas de tratamento de água e efluentes, os processos de separação sólido/líquido incluem as operações de sedimentação, flotação peneiramento e filtração. A seleção do processo mais indicado em cada tipo de sistema, ou de combinação destes, depende das características dos sólidos a ser separados, da concentração dos mesmo e da qualidade final requerida para o clarificado (CASSINI, 2008).

O pré-tratamento é muito importante e muito discutido os critérios para o dimensionamento (TOMAZ, 2008). Muitas operações podem ser utilizadas no tratamento de efluentes antes deste ser descartado nos corpos receptores. Os compostos poluidores do efluente podem ser removidos por meios físicos e químicos.

De acordo com Cassini (2008), pode-se definir os princípios mais utilizados de cada meio da seguinte forma:

- Métodos Físicos: gradeamento, agitação, floculação, sedimentação, flotação e filtração.
- Métodos Químicos: coagulação, precipitação, desinfecção e a adsorção.

Esses processos ainda podem ser classificados em quatro categorias: tratamento preliminar, primário, secundário e terciário.

A sedimentação é um processo físico que se encaixa no tratamento primário, pois visa a remoção de parte dos sólidos suspensos e da matéria orgânica no efluente.

A principal função do tratamento primário é, portanto, preparar o efluente para o tratamento posterior (ou secundário), a fim de otimizar a eficiência deste.

1.3.8 Hidrociclones

Os ciclones estão entre os mais antigos tipos de equipamento da indústria de particulados. Patentados e conhecidos desde o final do século XIX, quando eram apenas empregados na remoção de areia de águas, estes têm sido bastante utilizados em diferentes processos industriais, tais como separação no processo físico e reações químicas. Os hidrociclones são dispositivos cônicos, cilíndricos, utilizados nas separações dos tipos sólido-líquido e líquido-líquido (SAMPAIO, 2007)

Os hidrociclones, também conhecidos pelos nomes de ciclone hidráulico, ciclone de líquido e hidroclone, constituem uma classe importante de equipamentos destinados principalmente à separação de suspensões sólido, porém hoje estes são usados para a separação sólido-sólido, líquido-líquido e gás-líquido (MARTE, 1996), onde o mesmo vêm sendo usado de maneira diversificada na indústria química, de alimentos, petroquímica, etc (MARTINS, 2007).

O princípio de funcionamento dos hidrociclones deve-se à alimentação tangencial de suspensão sólido-líquido na região cilíndrica do equipamento, o que provoca a formação de um vórtex (Figura 5), fazendo com que as partículas maiores e mais densas sejam projetadas contra a parede, sendo então arrastadas até a saída inferior (underflow). As partículas menores e de menor densidade são arrastadas para o centro de equipamento formando um vórtex ascendente, saindo por um orifício superior (overflow).

A separação por hidrociclones apresenta o mesmo princípio utilizado pelas centrífugas, isto é, a sedimentação centrífuga, em que as partículas em suspensão são

submetidas a um campo centrífugo que provoca a separação do fluido (OLIVEIRA JR 2009) .

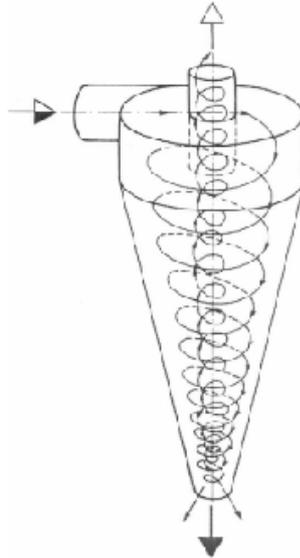


Figura 5 Trajetória da suspensão no interior do hidrociclone

Quando a suspensão entra na câmara cilíndrica através do duto de alimentação, inicia-se uma rotação da suspensão no interior dessa câmara, causada por uma força centrífuga que acelera o movimento das partículas na direção as paredes. As partículas do componente da suspensão mais denso migram para baixo, percorrendo uma espiral que tem início na parte cilíndrica e continua na parte cônica. No caso de partículas sólidas, as menores são arrastadas por um movimento ascendente, saindo junto com um fluxo de líquido consideravelmente maior pelo duto da suspensão diluída. As partículas maiores e em maior quantidade são descarregadas pela base da parte cônica, juntamente com uma parte consideravelmente menor do líquido, numa suspensão concentrada (Figura 6).

Os hidrociclones são equipamentos que vêm reencontrando um grande campo de aplicação na indústria, principalmente na indústria petrolífera e petroquímica, em função do grande interesse pelo domínio de sua tecnologia (SILVA, 2014). Dentre suas vantagens incluem-se os fatos de serem simples, baratos, fáceis de instalar, baixo custo de manutenção e baixo custo operacional. Adicione-se o fato de serem pequenos em relação a outros separadores. A suspensão sólido-líquido ou líquido-líquido entra tangencialmente no corpo superior e cilíndrico do equipamento, onde a separação das fases é iniciada com auxílio dos efeitos centrífugos e da gravidade (SANTOS; ANDRADE, 2005). Em função de seu baixo custo, várias unidades de equipamentos podem ser projetadas para obtenção de uma separação tão eficiente quanto seja necessário.

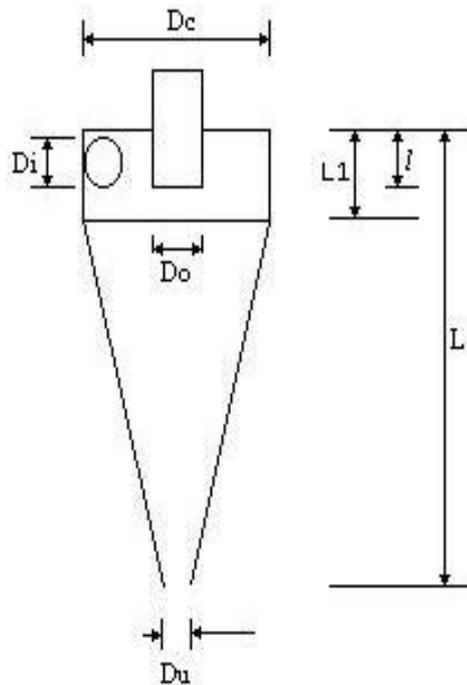


Figura 6. Esquema com a disposição dos componentes de um hidrociclone

Onde:

Dc- diâmetro do hidrociclone

Di- diâmetro interno do duto de alimentação

Do- diâmetro interno do duto da suspensão diluída

Du- diâmetro interno do duto de suspensão concentrada

L- altura do hidrociclone

I altura interna do duto de suspensão diluída

LI- altura do corpo cilíndrico

1.3.9 Classificação dos hidrociclones

De acordo com Savarovsky (1981), os hidrociclones estão agrupados em famílias, onde cada uma foi otimizada para determinadas tarefas, possuindo como característica principal a relação constante entre suas medidas geométricas, associadas com o diâmetro da parte cilíndrica, sendo bastante estudadas as famílias de Rietema e de Bradley.

Segundo Castilho e Medronho (2000), existem três grupos bem conhecidos de hidrociclones, são as de Krebs, Rietema e de Bradley. Os de Rietema e de Bradley são hidrociclones geometricamente semelhantes. A Tabela 1 apresenta as principais relações geométricas de cada grupo.

Tabela 1. Geométricas para Hidrociclones das famílias Krebs, Rietema e Bradley

Relações Geométricas	Krebs	Rietema	Bradley
D_i/D_c	0,3	0,28000	1/7
D_0/D_c	015924	0,34000	1/5
L/D_c	587414	5,00000	6,8
L_1/D_c	-	-	1/2
I/D	0,9	0,40000	1/2
$\theta (^{\circ})$	12,7	20,0	9,0

Estudos mostram que um hidrociclone filtrante pertencente à família Bradley proporcionou nas mesmas condições operacionais do equipamento convencional,

acréscimos na vazão de alimentação e decréscimo nos números de Euler (ALVES,2012), usando um hidrociclone filtrante da família Rietema, constatou um comportamento oposto dessa família quando comparada com a família Bradley.

Os pré filtros, como os hidrociclones também são chamados, desempenham importante papel, pois se caracterizam por significativo poder de separação de partículas presentes na água, mantendo constante a perda de carga ao longo do tempo, o que ocorre com os outros tipos de filtros normalmente utilizados em diversos modelos de sistemas que fazem uso do hidrociclone (ALMEIRA,2008).

A literatura também nos relata segundo Savarovsky, 1984, sobre os hidrociclones cilíndricos, como sendo equipamentos que apresentam como função principal a classificação de partículas. E está classificação depende do tamanho, da densidade e do formato das partículas.

Segundo pesquisas realizadas por Yuan et al., 1996; Medronho, Matta et al. Cilliers e Harrison, 2000 e 2003 ; Medronho et al., 2005), algumas alternativas de aplicações do hidrociclones com pequenos diâmetros para separação de microorganismos estão sendo desenvolvidas.

1.3.10 Flotação

A flotação é um dos processos de concentração mais utilizados na indústria mineral, possibilitando o aproveitamento de minérios complexos e/ou de baixo teor de forma econômica e com rendimentos satisfatórios. A importância desse processo tem motivado o desenvolvimento de novos equipamentos dentre os quais se destaca a coluna de flotação. As melhorias substanciais das características dos concentrados obtidos nas colunas em diversas unidades industriais, operando com diferentes tipos de minérios, somadas ao melhor desempenho metalúrgico e à economia nos custos de capital e de operação, demonstram a importância desse equipamento para a indústria mineral. Tais fatores têm sido decisivos para a aplicação das colunas em processos de

flotação, tanto para novos projetos, como para expansões industriais (De OLIVEIRA, 2007).

1.3.11 Flotação Por Ar Dissolvido

A dificuldade de separar óleo da água depende da natureza do mesmo. O Óleo derramado em águas residuárias pode ser separado por gravidade, enquanto que o óleo dissolvido pode ser removido por tratamento biológico. No entanto, o óleo disperso e emulsionado ocorrendo em suspensões coloidais são difíceis de separar, por causa do tamanho pequeno das gotas e da estabilização química (KELLAND, 2014).

Atualmente, o processo de flotação vem atraindo atenção dos estudiosos devido à sua alta eficiência de separação, o baixo investimento de capital e baixo custo operacional. Alguns novos tipos de equipamentos para processos de separação água-óleo têm sido desenvolvidos para a rápida e elevada eficiência de tratamento de águas residuais oleosas (BENJAMIN; LAWLER, 2013).

O processo de flotação é adequado para o tratamento de águas residuárias que contêm sólidos em suspensão, como óleos, tanto em emulsão e formas dissolvidas. Por causa de várias vantagens, incluindo a operação rápida, necessidade de pequeno espaço para equipamentos, flexibilidade de aplicação para vários poluentes em diferentes escalas (WANG, 2016).

A flotação surgiu como um eficiente processo de tratamento de efluentes oleosos, pois é uma operação unitária utilizada para a separação de uma fase sólida ou líquida emulsionada em uma fase líquida, através da introdução de pequenas bolhas de gás, as quais aderindo à superfície das partículas aumentam seu empuxo, provocando assim, a ascensão das mesmas, em direção a superfície da fase líquida, podendo então ser devidamente coletadas. Essa combinação de técnicas deverá reduzir ao máximo o tempo de recuperação do elemento impactado e, sobretudo, não interferir no estado estacionário que deve reger o funcionamento do sistema afetado. Para isso, fazem-se necessárias realizações de testes em escala intermediária (escala piloto), uma vez que grande parte dos processos elaborados em escala de laboratório não garante a reprodutibilidade em escala comercial (ROCHA e SILVA *et al.*, 2015). Dessa

forma, existe a necessidade de analisar o processo e suas variáveis levando em consideração a escala de trabalho adotada.

O processo de Flotação por Ar Dissolvido (FAD) refere-se à flotação realizada na presença de um gás, como fonte geradora de bolhas. Na prática, qualquer gás pode ser usado, mas devido ao custo, o ar é comumente empregado na maioria das aplicações industriais (PARK, 2015).

A técnica FAD é definida por Hui *et al.* (2012), como um processo de separação sólido-líquido baseado na diferença de densidade, que ganhou ampla aceitação na indústria de tratamento de água potável desde a década de 1970. A FAD constitui técnica eficiente em termos de separação líquido-líquido e, viável economicamente. Para separar as fases, água e óleo, diversas indústrias utilizam o sistema FAD, como por exemplo, a petroquímica, a alimentícia, a de tintas, a de papel e celulose, entre muitas outras. Assim, um grande número de aplicações dessa técnica, em tratamentos de efluentes líquidos, tem sido utilizada e recomendada (BENJAMIN; LAWLER, 2013).

A flotação ou flutuação de partículas por ar dissolvido ocorre por conta da saturação que surgirá em forma de microbolhas que podem variar de 50 a 100 μm , sendo que essas partículas em suspensão irão se aderir às bolhas e flutuarão até a superfície para serem removidas por escoamento superficial ou raspagem superficial. O sucesso da FAD depende de um número de processos físicos relativos ao movimento das microbolhas e partículas através da água, além da dissolução e precipitação de ar. Estes processos têm sido estudados com mais detalhes em relação à clarificação de água doce e o desenvolvimento de um equipamento com projeto robusto (EDZWALD; HAARHOFF, 2012).

Os princípios básicos de funcionamento da FAD são bastante simples, pois se resumem ao contato das partículas sólidas com as bolhas de ar dissolvidas no líquido e no seu conseqüente arraste para a superfície do líquido, contudo é necessário observar alguns parâmetros essenciais para o êxito do processo.

1.3.11.1 Variáveis Relevantes no Processo de Flotação por Ar Dissolvido

Dentre as variáveis relevantes no processo da FAD destacam-se: o tamanho das bolhas, a taxa de recirculação do líquido saturado com ar, a taxa de aplicação superficial de flotação, o tempo de retenção no tanque ou torre de saturação, a pressão

na câmara de saturação e, conseqüentemente, a quantidade de ar fornecida em relação à massa de sólidos em suspensão no líquido. Dentre os fatores que podem auxiliar o processo de flotação estão a otimização da coagulação, a adequação do tempo e do grau de agitação da floculação e a quantidade de ar na água saturada, cujo valor deve levar em consideração a concentração de sólidos/bolhas na água bruta (REAY; RATCLIFF, 1973; FUKUI; YUU, 1980; RAMIREZ *et al.*, 1999; STEARNES, 2001, NGUYEN; GEORGE; JAMESON, 2006; MIETTINEN, RALSTON, FORNASIERO, 2010; KIM *et al.*, 2015).

Tendo em vista, as inúmeras pesquisas realizadas, bem como o grande número de unidades de flotação por ar dissolvido atualmente em operação, com aplicação nos mais diversos campos, as faixas de variação desses parâmetros operacionais são bastante conhecidas e divulgadas em publicações técnicas especializadas (HUI *et al.*, 2012).

1.3.11.2 Distribuição do tamanho das bolhas

A distribuição das bolhas em uma unidade de FAD depende fundamentalmente da taxa de aglutinação das microbolhas formadas devido à liberação dos gases dissolvidos no líquido da recirculação. Diversos fatores influem nesse processo, com destaque para a pressão no interior da câmara de pressurização que pode variar entre 2 a 5 atm. Normalmente, a distribuição de tamanhos das gotículas variam em função da pressão (KIM *et al.* 2015).

A literatura reporta que a faixa usual de tamanho de microbolhas para a FAD é de 10 a 120 μm , sendo o tamanho médio na faixa de 40 a 60 μm (MORUZZI; REALI, 2007). Da mesma maneira, Etcheapare (2016) recomenda que o tamanho das bolhas esteja na faixa de 10 a 100 μm , sendo desejável que a maior parte seja em torno de 50 μm .

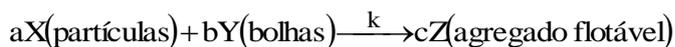
1.3.11.3 Taxa de recirculação

A taxa de aplicação superficial também pode ser considerada um parâmetro fundamental para o bom desempenho do processo de flotação, pois está diretamente relacionada com a velocidade ascensional das bolhas de ar. Experiências realizadas na

Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, para aplicação da FAD no tratamento de efluentes de reatores anaeróbios, citadas por Aisse *et al.* (2001) e Reali *et al.* (2000), foram realizadas com taxas de aplicação superficial variando de 70 a 375 m³.m².dia, apresentando velocidades de flotação entre 5 e 25 cm.min.

1.3.11.4 Cinética de Flotação por Ar Dissolvido

O conhecimento da lei cinética no processo de flotação é outra característica importante, uma vez que pode ajudar a determinar a eficiência do mesmo, bem como auxilia a estabelecer as equações de projeto. Na literatura especializada no assunto, pode-se encontrar algumas aproximações para a cinética de flotação. Numa abordagem mais simples e, frequentemente mais utilizada, a flotação é comparada a uma reação química do seguinte tipo (FOGLER, 2016; BU *et al.*, 2016):



Em que a velocidade de flotação de partículas (ou gotas de óleo) pela flotação, para uma reação de ordem n é dada pela seguinte Equação 7:

$$(-r_A) = k \cdot C_A^n \quad (7)$$

Onde: C_A é a concentração de partículas de óleo a serem flotadas, k é a constante cinética do processo de flotação, n é a ordem da reação que caracteriza o processo de flotação, e $(-r_A)$ é a velocidade da reação, *massa/(volume x tempo)* (FOGLER, 2016; BU *et al.*, 2016).

Um balanço de massa para a água oleosa flotada em um tanque contínuo pode ser abordada sob a suposição de uma mistura perfeita. A câmara de flotação pode ser apresentada a partir do seguinte balanço de massa (FOGLER, 2016) na Equação 8:

$$\text{Entrada} - \text{Saída} - \text{Reage} = \text{Acúmulo} \quad (8)$$

Como a câmara de flotação opera em regime permanente, desse modo não há acúmulo. Então a Equação 8 toma a seguinte forma, conforme as Equações 9 e 10:

$$\text{Entrada} - \text{Saída} = R_{\text{reage}} \quad (9)$$

$$F_{AO} - F_A = (-r_A) \cdot V \quad (10)$$

Sendo:

F_{AO} – Fluxo de óleo que entra na câmara, massa/tempo;

F_A – Fluxo de óleo que sai na câmara, massa/tempo;

V – volume da câmara, volume.

Como o regime é permanente, Q_A (Vazão de entrada) = Q_S (vazão de Saída) = Q então a Equação 11:

$$Q_A \cdot C_{AO} - Q_S \cdot C_A = K \quad (11)$$

$$Q (C_{AO} - C_A) = k \cdot C_A^n \cdot V \quad (12)$$

Sendo:

Q_A - vazão de alimentação do efluente, *volume/tempo*.

Q_S - vazão de saída do efluente, *volume/tempo*.

C_{AO} - concentração de entrada do óleo, *massa/volume*.

Para a análise da ordem de reação no processo de flotação expressando a equação 6 na forma logarítmica, tem-se as seguintes Eq.13 e14:

$$\ln \left[\frac{C_{AO} - C_A}{C_A^n} \right] = \ln k + n \ln C_A \quad (13)$$

$$\ln \left[\frac{C_{AO} - C_A}{\tau} \right] = \ln k + n \ln C_A \quad (14)$$

Sendo:

τ – Tempo espacial, tempo.

Plotando o gráfico proveniente da Equação 7, obtém-se a seguinte configuração em gráfico, de acordo com a Figura 7:

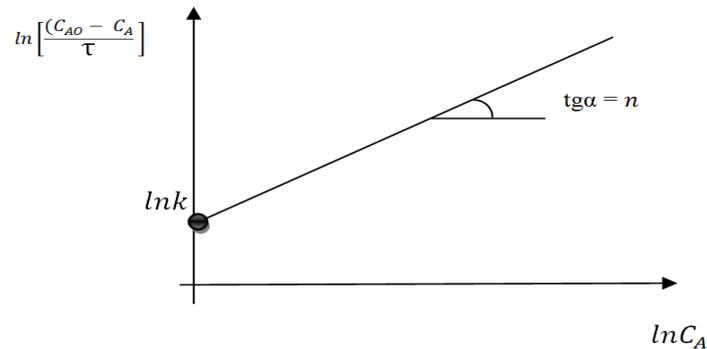


Figura 7 – Avaliação dos parâmetros cinéticos da velocidade do processo por flotação por ar dissolvido

Em que a tangente da reta (coeficiente angular $\text{tg } \alpha$) fornece o valor da ordem de reação do processo de flotação estudado (n) e a constante de velocidade (k) é obtida a partir do coeficiente linear da reta ($\ln k$).

Os custos elevados da água industrial no Brasil, particularmente nas regiões metropolitanas, têm estimulado as indústrias nacionais a avaliar as possibilidades internas de reúso. Essa situação tende a se ampliar ante às novas legislações associadas aos instrumentos de outorga e cobrança pela utilização dos recursos hídricos, tanto na tomada de água como nos despejos de efluentes, que serão efetivamente implantados pela Agência Nacional de Águas em todo o Brasil (ESTENDER; PINHEIRO, 2016).

Dependendo da disponibilidade hídrica, além de iniciativas para a redução do consumo de água, qualquer instalação industrial fica presa às questões ambientais e as recentes condicionantes legais de gestão de recursos associados à cobrança pelo uso da água. A instalação industrial fica então condicionada a reusar, na medida do possível, os seus próprios efluentes, após tratamento adequado, uma vez que os referidos custos de implantação e de operação são inferiores aos associados à captação e ao tratamento de águas de mananciais ou à compra de água oferecida por empresas de saneamento, tanto de sistemas potáveis como de sistemas de água de reúso. Dessa forma, as águas oleosas produzidas por instalações industriais deverão passar por um tratamento adequado para posterior reúso (ZAFFARONNI *et al.*, 2016).

No estado de Pernambuco, com a implantação do Complexo Industrial Portuário de Suape, ocorreu a vinda de termelétricas e indústrias que promovem assistência e auxílio para o bom funcionamento da Refinaria Abreu e Lima. Todas essas indústrias, assim como a própria Refinaria Abreu e Lima, necessitam de grandes volumes de água para o seu funcionamento, o que torna o tratamento dessas águas inevitável para suprir as necessidades da Refinaria e das empresas ao entorno, evitando a escassez de água na região de SUAPE, protegendo o meio ambiente e suas características turísticas, com proteção do emprego e renda da população do município de Ipojuca.

No início do século XX, a técnica de flotação como processo de separação obteve aplicação na área de processamento de minérios, sendo depois expandida para a área de papel e celulose (SILVA *et al.*, 2013). Com o desenvolvimento do setor industrial, a aplicação do processo de flotação começou a ser difundida em refinarias, indústrias de curtumes, mecânicas, petroquímicas, no tratamento de águas para abastecimento, entre outros (TANSEL; PASCUAL, 2011). Neste contexto, se fez necessário o aperfeiçoamento da técnica inicial ocasionando a criação do processo de Flotação por Ar Dissolvido (FAD). Atualmente, no setor industrial o processo FAD vem sendo bastante usado como pré-tratamento de efluentes industriais com grande concentração de substâncias insolúveis como gorduras, óleos e graxas (BERRÍO *et al.*, 2014).

Em função de sua elevada eficiência, a técnica de saturação com microbolhas de ar induzido tem sido requerida por diferentes tipos de tratamentos de efluentes, em especial de água oleosas, principalmente quando comparada com técnicas de flotação por ar dissolvido (FAD) em torre. A operação cuidadosa dessas torres pode levar a uma manipulação mais racional dos fluxos dos fluidos tratados, permitindo que se aproveite a energia potencial do líquido, alimentado no topo de uma torre, para promover vários pontos de mistura gás-líquido. Essa configuração permite que se tenha algumas vantagens adicionais, tais como: menor espaço físico horizontal, maior contato entre as fases, aproveitamento integral da energia cedida pela bomba de alimentação e possibilidades de implantações de estratégias eficientes de controle (BOUCHARD; DESBIENS; del VILLAR, 2014; SANTOS *et al.*, 2014).

A necessidade do conhecimento detalhado da fluidodinâmica abordada anteriormente, em certos tipos de sistemas da engenharia química, pode ser

fundamentada na seguinte premissa: a partir do ponto de vista da engenharia química, modelos fluidodinâmicos são exigidos para uma apropriada descrição da mistura dos fluidos e formas de contato. Dessa forma, modelam o caminho pelo qual os materiais escoam através da sessão de mistura e entram em contato de modo necessário para que possa ocorrer uma separação efetiva (BENIN; BAHRAMI, 2012).

O escoamento gás-óleo é muito comum na indústria, principalmente após a formação de efluentes oleosos. Entretanto, detalhes do comportamento do escoamento não são totalmente conhecidos. Dentre estes pode-se salientar a influência da geometria sobre o escoamento multifásico. Para isso, o pesquisador tem fundamentalmente a sua disposição três ferramentas para desenvolver, ou analisar esse tipo de problema: métodos analíticos, métodos numéricos e experimentação laboratorial. Os métodos analíticos e os métodos numéricos formam a classe de métodos teóricos, pois ambos têm o objetivo de resolver as equações diferenciais que compõem o modelo matemático abordado. A diferença entre esses métodos encontra-se na complexidade dos modelos para os quais cada método pode ser empregado (BERRÍO, *et al.*, 2014).

Os métodos da AFD (*Analytical Fluid Dynamics*) são aplicáveis apenas a geometrias e condições de contorno simples, ou situações em que as hipóteses simplificativas requeridas não se desviam demasiadamente do fenômeno físico real. Algumas de suas mais importantes aplicações tornam-se então o auxílio na validação de casos limites de métodos numéricos e o desenvolvimento de métodos numéricos mais robustos. A simulação numérica, ou experimentação numérica, praticamente não apresenta restrições, podendo ser utilizada para solução de modelos complexos, definidos para geometrias também complexas e apresentando resultados dentro de intervalos de tempo muito pequenos. O tempo e o custo de um novo projeto, ou a otimização de sistemas já existentes, podem ser sensivelmente reduzidos com o uso da simulação numérica (EMANUEL, 2016).

A grande vantagem da experimentação em laboratório, ou da EFD (*Experimental Fluid Dynamics*) é lidar com a configuração real. É, entretanto, de altíssimo custo e muitas vezes não pode ser posta em prática por questões de segurança ou pelas dificuldades de reprodução das condições reais. Entretanto, na ausência de modelos matemáticos para geometrias muito complexas, essa é, atualmente, a única ferramenta

disponível. O que deve ser praticado na Engenharia é, portanto, uma associação adequada de simulação numérica com experimentos selecionados em laboratório. Essa união resulta geralmente em projetos melhores e mais baratos (BLAZEK, 2015).

Pode-se definir a sigla CFD (*Computational Fluid Dynamics*) como um conjunto de técnicas matemáticas, numéricas e computacionais usadas para o estudo preditivo (qualitativo e quantitativo) de fenômenos que envolvem o escoamento de fluidos. Para que esse escoamento possa ser representado numericamente através de uma simulação computacional, o usuário deve fornecer informações do tipo (KUZMIN; HÄMÄLÄINEN, 2015):

- Geometria: forma e tamanho do domínio, entradas e saídas de massa do sistema, presença de obstáculos;
- Propriedades dos fluidos: temperatura, densidade, viscosidade, condutividade térmica;
- Condições iniciais (muito importante para um fenômeno dependente do tempo);
- Condições de contorno (essencial para a resolução das equações que regem a fluidodinâmica computacional – o usuário deve fornecer as especificações de entrada e saída de massa, momento e energia em uma simulação).

O CFD, mais especificamente consiste na resolução da Equação Geral de Fenômeno de Transporte empregando métodos numéricos, primordialmente o Método dos Volumes Finitos e o Método dos Elementos Finitos, visando obter campos de velocidades, temperatura, entre outros, possibilitando avaliar o transporte de uma propriedade de interesse. Tal ferramenta apresenta grande interesse do ponto de vista da indústria do petróleo, pois em muitos de seus equipamentos a fluidodinâmica influencia significativamente. Por isso, modelos mais simples (1D e 2D) não são capazes de fornecer o grau de detalhamento necessário. Tal fato é justificado pela dependência da transferência de massa e reação química com a concentração local e as superfícies de transferência locais, interfaces gás/óleo, as quais são resultados da fração volumétrica e da distribuição do tamanho das gotículas de óleo (RUKTHONG *et al.*, 2016).

As equações governantes para a dinâmica dos fluidos Newtonianos e as equações de Navier-Stokes não-estacionárias têm sido investigadas por cerca de um século. Contudo, as soluções analíticas das formas reduzidas dessas equações são, ainda, uma área em exploração em plena atividade. Para a dinâmica dos fluidos não-Newtonianos, escoamento de fluidos envolvendo reações químicas e escoamentos multicomponentes, os desenvolvimentos teóricos encontram-se, ainda, em um estágio de menor desenvolvimento (IRGENS, 2014).

Existem atualmente os seguintes códigos de CFD, ou *softwares* comercialmente disponíveis: ANSYS CFX (<http://www.ansys.com>), FLUENT (<http://www.fluent.com>), STAR-CD (<http://www.cd-adapco.com>) e FEMLAB (<http://www.comsol.com>). Encontram-se disponíveis também softwares geradores de malha (Gambit, Gridgen) e de visualização de fluxo (Tecplot, FieldView). Independente das particularidades de manuseio, a metodologia utilizada no roteiro para soluções dos problemas de escoamento por cada um desses *softwares* pode ser sintetizada nas seguintes etapas: escolha da geometria de trabalho, identificação das condições físicas, geração de malha, utilização do solver, interpretação das soluções obtidas a partir da visualização dos resultados e apresentação desses últimos.

Após ser escolhido o código de CFD que se deseja trabalhar, os procedimentos gerais para aplicação e análise do tipo CFD na simulação numérica de escoamentos são comentados a seguir:

1.3.12 Formulação do problema

A primeira etapa do processo de análise para formular o problema pode ser auxiliada pelas respostas às seguintes questões:

- Qual é o objetivo da análise?
- Qual a maneira mais fácil de atingir esse objetivo?
- Que tipo de geometria dever-se utilizar para facilitar o processo de análise?
- Quais as condições operacionais em que o fenômeno ocorre?
- Que condição espacial o problema requer (1D, 2D, assimétrica, 3D)?
- Qual o regime temporal apropriado (estacionário, não-estacionário)?

- Qual a natureza viscosa do escoamento (invíscido, laminar, turbulento)?

1.3.12.1 Escolha do sistema de coordenadas

Em CFD, a utilização de sistemas de coordenadas ortogonais, como o cartesiano, apresenta grandes limitações, pois são adequados apenas para geometrias cujas fronteiras coincidem com as do sistema coordenado. Caso interpolações sejam empregadas nas fronteiras, isto pode levar a soluções imprecisas perto delas, nas regiões onde os parâmetros de interesse sofrem mais variações. Dessa forma, o código computacional utilizado torna-se extremamente dependente da geometria do problema (SHARMA, 2016).

As principais razões que motivam o emprego de coordenadas generalizadas (coincidentes com as fronteiras) são então as seguintes (SHARMA, 2016):

- a) necessidade de resolver problemas cada vez mais complexos sobre geometrias arbitrárias;
- b) dificuldades de resolver problemas quaisquer empregando sistemas de coordenadas convencionais (cartesianos, cilíndricos, esférico);
- c) possibilidades de concentração das linhas, apenas onde as mesmas são necessárias, reduzindo o número de pontos necessários e;
- d) possibilidade de desenvolvimento de métodos que buscam a generalidade.

1.3.12.2 Modelagem da geometria e domínio do escoamento

O corpo através do qual, ou em torno do qual o escoamento foi estabelecido requer modelagem. Isto geralmente envolve a modelagem da geometria com auxílio de um pacote computacional do tipo CAD. Ao mesmo tempo podem ser requeridas aproximações e simplificações dessa geometria para permitir uma análise precisa do fenômeno. Simultaneamente existem decisões a serem tomadas para extrapolação do domínio finito do escoamento a ser simulado. As vizinhanças do escoamento podem coincidir com a superfície geométrica do corpo. Outras superfícies sobre as quais o

fluido entra e sai são livres. A geometria e o domínio do escoamento são então modelados de modo a permitir a geração de uma malha. Assim, a modelagem deve sempre levar em conta a estrutura e a topologia na geração dessa malha (BLAZEK, 2015).

1.3.12.3 Estabelecimento das condições iniciais e de contorno

O sistema de equações diferenciais obtido necessita de condições iniciais e de contorno para ser resolvido. Uma vez que um domínio finito para o escoamento é especificado, as condições físicas são requeridas nas vizinhanças do domínio do escoamento. A simulação geralmente é iniciada com ajuda da solução inicial e usa-se um método iterativo para alcançar a solução final do campo de escoamento. No estudo de problemas envolvendo volumes finitos, o correto e fisicamente consistente é a realização do balanço de propriedades para os volumes de fronteira. Dessa forma, volumes fictícios normalmente são usados com o objetivo de facilitar a aplicação das condições de contorno e estabelecer apenas uma equação para representar todos os volumes do domínio (BLAZEK, 2015; KUZMIN, HAMALAINEN, 2015; SHAMA, 2016).

1.3.13. Geração de Malha

O domínio do fluxo é geralmente discretizado em forma de malha. Esse processo de geração de malha determina o mapeamento que transforma os pontos da malha do domínio físico no domínio transformado. Na discretização de geometrias complexas a dificuldade encontra-se associada à necessidade de aplicação das condições de contorno. Por conveniência procura-se coincidir as linhas do domínio discretizado com as linhas da fronteira do mesmo. Neste caso, aconselha-se a adoção de um sistema generalizado de coordenadas (BLAZEK, 2015; KUZMIN, HAMALAINEN, 2015; SHAMA, 2016).

Outra decisão importante a ser tomada no desenvolvimento de um modelo numérico em coordenadas generalizadas é a natureza da malha. As malhas podem ser dos tipos estruturada e não estruturada. A malha não estruturada é aquela para a qual não há uma regra aparente de formação. Dentre as vantagens dessa última encontra-se a facilidade de concentração nas regiões desejadas e o menor número de volumes

no domínio. Por sua vez, as vantagens das malhas estruturadas são: conexão entre os pontos estabelecidas por uma regra, facilidade de interpretação computacional e facilidade na solução de sistemas lineares (KUZMIN, HAMALAINEN, 2015).

1.3.14 Estratégias de simulação, estabilidade e condições de convergência

Um resultado de uma simulação CFD não deve ser assumido como uma verdade absoluta. Simuladores fluidodinâmicos processam cálculos baseados nos dados de entrada. Caso o usuário entre com lixo no sistema (condições de contorno e modelos que não correspondem ao seu sistema), o simulador mostrará lixo como resultado (do tipo quantitativos irreais). As razões pelas quais um usuário não deve confiar cegamente em uma modelagem CFD são (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2015):

- Por questões econômicas, não se utiliza uma malha extremamente refinada com pequeníssimos instantes de tempo, o que gera resultados com valores aproximados em relação ao fenômeno real;
- Alguns dados de entrada (geometria, propriedades dos fluidos) são assumidos como constantes ou médios, o que às vezes não corresponde à realidade;
- As condições iniciais e de contorno podem representar a situação real muito cruamente;
- O escoamento pode envolver fenômenos como turbulência, radiação ou escoamento multifásico, cuja modelagem é empírica ou semi-empírica e não perfeitamente representados ou entendidos pelas atuais teorias científicas;
- Os métodos numéricos possuem limitações.

A estratégia de simulação envolve determinar condições semelhantes ao uso do espaço ou tempo como variável independente, a escolha de modelos de turbulência ou químico e a escolha do algoritmo. São inúmeros os métodos (*Solvers*) que podem ser empregados para resoluções de problemas de escoamento. Entre esses métodos mais comuns existem os denominados métodos diretos, tais como, Regra de Cramer, Eliminação de Gauss e Decomposição LU (MatLAB). Também existem os classificados

como interativos, ou seja, Jacobi, Gauss-Seidel, Runge-Kutta e SOR (Sobre/Sub-relações). Nem sempre a escolha de um *solver* apropriado é tarefa fácil. Entretanto, a literatura tem demonstrado que os métodos SOR e Runge-Kutta têm sido os mais utilizados pela facilidade de aplicação e eficiência (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2015).

Durante o desenvolvimento do processo de simulação a solução numérica é monitorada para constatação de que a solução obtida convergiu. Isto ocorre porque a solução numérica de problemas de escoamento contém imprecisões, as quais são limitadas por esse critério de convergência. Na prática é comum a escolha de um critério pequeno o suficiente, de forma a se poder desprezar tais imprecisões (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2015).

O critério de convergência normalmente utilizado para resolver problemas envolvendo fluidos compressíveis (OOSTHUIZEN; CARSCALLEN, 2014) é da forma de acordo com as Equações 15 e 16:

$$\varepsilon \leq \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{\sum \Delta_0^2}} \quad (15)$$

em que

$$\Delta = \frac{\rho - \rho_0}{\Delta t} \quad (16)$$

Como a pressão varia tanto para problemas envolvendo fluidos compressíveis como incompressíveis, este parâmetro pode ser utilizado como critério de convergência para escoamentos a qualquer tipo e velocidade. Neste caso o valor de delta é reescrito(OOSTHUIZEN; CARSCALLEN, 2014): como mostra a Equação 17:

$$\Delta = \frac{p - p_0}{\Delta t} \quad (17)$$

A análise de sensibilidade serve como uma indicação do comportamento da convergência do processo de simulação. Entre os tipos de análise de estabilidade na literatura encontram-se as de Fourier ou Von Neumann, a espectral e a do método de Runge-Kutta (KUZMIN, HAMALAINEN, 2015).

Pós-processamento

As etapas de pós-processamento à aplicação do CFD constam basicamente de visualização e análises dos resultados. A visualização dos resultados é normalmente representada por curvas de níveis, superfícies de respostas, vetores, linhas de corrente e animações. As análises são realizadas por técnicas que têm como objetivo a avaliações das incertezas (SHARMA, 2016). São geralmente:

Erro de simulação – é a diferença entre o resultado da simulação S e o verdadeiro valor T , assumindo-se que esse tipo de erro compõe-se da soma do erro da parte de modelagem, δ_{SM} , e do erro da parte numérica, δ_{SN} conforme apresentado na Equação 18:

$$\delta_o = S - T = \delta_{SM} - \delta_{SN} \quad (18)$$

Verificação – é o processo para avaliação das incertezas da simulação numérica U_{SN} e, quando as condições permitem, a estimativa do sinal e da grandeza do erro associado, δ_{SN} e de suas próprias incertezas conforme mostra a Equação 19 (SHAMA, 2016):

$$U_o^2 = U_{SM}^2 + U_{SN}^2 \quad (19)$$

Validação – é o processo para avaliação da incerteza na modelagem, U_{SM} , usando-se comparação com dados experimentais e, quando as condições permitem, estimativa do sinal e da magnitude do próprio erro da modelagem, δ_{SM} (SHAMA, 2016). Dessa forma, a Equação 20 é representada por :

$$E = D - S = \delta_D - (\delta_{SM} - \delta_{SN}) \quad (20)$$

Sendo assim, pode-se observar na Equação 21:

$$U_V^2 = U_D^2 + U_{SN}^2 \quad (21)$$

Caso se obtenha $|E| < U_V$, a validação foi atingida.

A Parte importante e fundamental dentro do estudo da fluidodinâmica de sistemas multifásicos gás-óleo é o conhecimento da distribuição de tamanhos das gotículas de óleo durante a operação da torre de saturação, visto que esta influencia diretamente o comportamento do sistema em termos de queda de pressão, vazão de gás e a eficiência de coleta (BENIN; BAHRAMI, 2012; LI *et al.*, 2016).

As distribuições estatísticas têm por base definir as características das gotículas de óleo (número, massa, fração ponderal, volume, fração volumétrica) associadas a uma determinada propriedade (massa, volume, área superficial, diâmetro) de seu conjunto, ou de uma amostra. A distribuição mais frequentemente utilizada na descrição de sistemas particulados é aquela que representa a fração ponderal de partícula com diâmetros menores que D, denominada distribuição granulométrica ou distribuição de tamanhos de partículas (PEÇANHA, 2014).

A fração ponderal de partículas com diâmetro menor que D pode ser expressa como a variável X(D) (PEÇANHA, 2014):

$$X(D) = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} x(D) dD \quad (22)$$

Esta expressão, denominada de distribuição de frequência acumulada $X(D)$, pode ser apresentada pela distribuição de frequência $x(D)$, dada pela Equação 23 (PEÇANHA, 2014):

$$X(D) = \frac{dX(D)}{dD} \quad (22)$$

A área sob a curva de distribuição de frequência é igual a 1, de forma que a função $X(D)$ varia entre 0 a 1 ou 100%.

Analísadores da distribuição de tamanhos de gotículas por difração de laser são empregados para o controle na produção de pós em todas as situações onde o estado da distribuição é determinante da qualidade do produto. Produzem resultados rápidos, seguros e precisos sobre a distribuição de tamanhos numa larga faixa de 0,04 μm até 2 mm (LOGAN, 2012).

No estudo dos escoamentos gás-óleo nos processos industriais, há necessidade de otimização dos sistemas de transporte destes materiais e de segurança. Modelos experimentais de Flotação por Ar Dissolvido (FAD) permitem que sejam feitas medições dos parâmetros fluidodinâmicos nos escoamentos (LAKGHOMI; LAWRYSHYN; HOFMANN, 2015). Neste trabalho será utilizado um modelo matemático constituído por quatro equações básicas que descrevem a fluidodinâmica de uma torre de saturação para separação da mistura água-óleo.

Ao ser observado este modelo matemático, vê-se o grande número de fenômenos envolvidos na modelagem, o que nos leva à necessidade de usar uma metodologia para os cálculos de sensibilidade. Deste modo, faz-se necessário construir uma superfície de resposta em função de parâmetros de entrada. Devido ao grande número de parâmetros que podem provocar variações na resposta de interesse, das inúmeras vezes que o equacionamento do código computacional precisa ser repetido, das incertezas destes parâmetros, da dificuldade de realização de algumas medições e da divergência que pode ocorrer em relação a dados tabelados, sendo que o estudo da sensibilidade hoje é feito, em boa parte das situações, pelos métodos perturbativos.

Referencias Bibliograficas

- FREITAS, Sérgio Henrique de Almeida, VD MATOS, and HNO COSTA. "Água, Sustentabilidade e Meio Ambiente: importância, problemas, conceitos, determinações e valorização-uma simples reflexão." (2015): 1-17.
- Borba, Natacha Zanghelini, and Diego Augusto Bayer. "A água como bem jurídico econômico." *Temiminós Revista Científica* 5.1 (2015): 96-110.
- MACHADO, Paulo Affonso Leme. *Direito Ambiental Brasileiro*. 17 ed. rev., atual. e ampl. São Paulo: Malheiros, 2009
- CHENG, C.; PHIPPS, D.; ALKHADDAR, R.M. Thermophilic aerobic wastewater treatment of waste metalworking fluids, *Water and Environment Journal*, v. 20, p. 227-232, 2006.
- VAN DER GAST, C.J.; THOMPSON, I.P. Effects of ph amendment on metal working fluid wastewater biological treatment using a defined bacterial consortium, *Biotechnology and Bioengineering*, v. 89, p. 357-366, 2004.
- Belisário, Marciela, et al. "O emprego de resíduos naturais no tratamento de efluentes contaminados com fármacos poluentes." *InterSciencePlace* 1.10 (2015).
- DURANTE, LV, et al. "Reuso de Efluentes em Torres de Resfriamento." *Blucher Chemical Engineering Proceedings* 1.2 (2015): 11701-11708.
- BORBA, Vinícius Rodrigues. **Análise da força de usinagem e da rugosidade no torneamento de aços endurecidos com ferramentas de PCBN e de metal-duro**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina.
- REIS, Roberto et al. Estudo da influência da geometria da cunha da ferramenta de aço rápido na usinagem do aço ABNT 1045 em diferentes condições lubri-refrigerantes. 2015.
- PAULA, Marcelo Antunes de. Avaliação da aplicação de fluido de corte no torneamento do aço inoxidável martensítico AISI 410 tratado termicamente. 2016.
- NEUMANN, Alessandro Diego. Efeitos da influência dos fluidos lubri-refrigerantes sobre os desgastes das ferramentas de corte. 2016.
- COSTA, Patricia Darolt de. Tratamento de águas oleosas por meio da flotação por ar dissolvido (FAD) com o uso de biossurfactantes e adsorção utilizando bioadsorventes. 2016.
- COUTINHO, Raquel Campos Cauby., *Estudo da Estabilidade de Emulsões de Água em Petróleo*, Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- MONTEIRO, MARIA ILISI. Tratamento de efluentes oleosos provenientes da indústria metal-mecânica e seu reuso. **Lorena, Brasil**, p. 148, 2006.
- QUEISSADA, Daniel Delgado; SILVA, Flávio Teixeira da; PAIVA, Teresa Cristina Brazil de. Integrated treatments for metalworking effluent: chemistry precipitation and biotreatment in air-lift reactor type. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 16, n. 2
- BARTARYA, G.; CHOUDHURY, S.K., **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. Volume 53, Issue 1, February 2012, 1–14.
- BORSA, M.B.N.O., **Remoção de grafite de um efluente oleoso através de técnicas eletroquímicas**. Dissertação de Mestrado. 102 p., Programa de Pós-Graduação em Engenharias de Minas, Metalúrgica e de Materiais de Universidade federal do Rio grande do Sul. Porto Alegre – RS, 2014.
- CETIN, M.H.; OZCELIK, B.; KURAM, E.; DEMIRBAS, E., Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method. **Journal of Cleaner Production**. Volume 19, Issues 17–18, November–December 2011, 2049–2056.
- DEBNATH, S.; REDDY, M.M.; YI, Q.S., Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. **Journal of Cleaner Production**. Volume 83, 15 November 2014, 33–47.

FERRARESI, D., **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 4 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 751p.

SANTOS, E.S. **Desenvolvimento e avaliação tribológica de emulsão a partir de óleo vegetal epoxado para aplicação de fluido de corte**. Dissertação de Mestrado, 83 f., Programa de Pós-Graduação em engenharia Mecânica de Universidade do Rio grande do Norte, Natal agosto, 2014.

TRAJANO, M. F. Estudo Tribológico de Biolubrificantes com Adição de Nanopartículas de Óxidos (Zinco e Cobre). 2013. 67f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

de OLIVEIRA, I. R., et al. "Review article: stabilization of graphite-containing aqueous suspensions." *Ceramica* 46.300 (2000): 186-195.

AROUCA, F.O., **Uma contribuição ao estudo da sedimentação gravitacional em batelada**. Tese de Doutorado, 162 p., Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade de Uberlândia. Uberlândia, Minas Gerais, 2007.

-ÇAKİR, O.; YARDIMEDEN, A.; OZBEN, T.; KILICKAP, E., Selection of cutting fluids in machining processes. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, Vol. 25 2, 99-102, December 2007.

-COOPER, C.C., Graphite, nature's unique raw material, **J. Can. Ceram. Soc.** 63, 3 (1994) 197-208.

-CREMASCO, M.A. **Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidomecânicos**. 2 Ed., São Paulo: Blucher, 2014.

-DIXIT, U.S.; SARMA, D.K.; DAVIM, J.P., **Environmentally Friendly Machining**, USA: Springer, 2012. 190 p.

-ENGLERT, A. H. **Flotação por Ar dissolvido (FAD) de micropartículas, caracterização de microbolhas e medidas de força de interação bolha-partícula**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Minas. Rio grande do Sul. 2008

-KENAN, W., Why graphite, **Ceram. Eng. Sci. Proc.** 16, 1 (1995) 178-180.

-MORARU, V.N., Effects of pH and ionic strength of electrolyte solutions on the ζ -potential, stability, and rheological properties of aqueous graphite dispersions, **Colloid J. USSR** 42, 5 (1980) 738-743.

-KURAM, E.; OZCELIK, B.; DEMIRBAS, E.; SIK, E. Effects of the Cutting Fluid Types and Cutting Parameters on Surface Roughness and Thrust Force. Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 Vol II WCE 2010, June 30 - July 2, 2010, London, U.K.

-KYERS, J.P., **Metalworking Fluids**, 2 Ed. New York: Taylor & Francis, 2013

-MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em Sistemas Particulados**. 1º Edição. UFRJ, 1997.

-MAMIDI, V.K.; XAVIOR, M.K., A review on selection of cutting fluids, **ABHINAV Journal**, Vol 1, 5 (3-19) 2012.

-OKIDA, J. R. Estudo para minimização e reaproveitamento de resíduos sólidos de fundição. Ponta Grossa, 2006. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

-RUBIM, C. O trabalho da flotação e da aeração. Revista TAE, São Paulo. Disponível em: <<http://www.revistatae.com.br/noticialnt.asp?id=5804>>. Acesso em 10 de abril 2016.

-**SEDIMENTAÇÃO**. Disponível em: <http://www.enq.ufsc.br/muller/operacoes_unitarias_qm/Sedimentacao.pdf>, acesso em 27 de abril de 2016.

-**SEDIMENTAÇÃO**. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2004-189-00.pdf>>, acesso em 27 de abril de 2013.

-SILVA, F.C.P.R.E.; SILVA, N.M.P.R., MOURA, A.E.; ALMEIDA, R.G.; LUNA, J.M.; RUFINO, D.R.; SANTOS, V.A.; SARUBBO, L.A., Effect of biosurfactant addition in a pilot scale dissolved air flotation system, **Separ. Sci. Technol.**, 2015, 50 (4) 618-625

-VASCONCELOS, R.S.; HENAUH, R.C.S.; MOURA, A.E.; SANTOS, V.A.; SARUBBO, L.A. Strategy of scale-up correlation in a dissolved air flotation chamber. **Chem. Eng. Technol.**, 2015 38 (5), 813-818.

CEIVAP, Deliberação nº 15, de 04 de novembro de 2002. Dispõe sobre medidas complementares para a implantação da cobrança pelo uso de recursos hídricos na Bacia do Rio Paraíba do Sul a partir de 2002, em atendimento a Deliberação CEIVAP nº 08/2001.

_____ CNRH, Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água.

AISSE, M. M.; JÜRGENSEN, D. ; REALI, M. A. P.; PENETRA, R.; FLORÊNCIO, L.; SOBRINHO, P. A. Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios por Sistemas de Aeração. In: CHERNICHARO, C. A. L.; **Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios**. FINEP/PROSAB, p.544, 2001.

BENIN J.; BAHRAMI, S. Modeling an industrial dissolved air flotation tank used for separating oil from wastewater. **Chemical Engineering and Processing**, v. 59, p. 1-8, 2012.

BENJAMIN, M. M.; LAWLER, D. F. **Water Quality Engineering: Physical / Chemical Treatment Processes**. New Jersey: John Wiley & Sons Ltda, 2013.

BERRÍO, J. C.; LÓPEZ, J.; CRISTANCHO, P.; GALLO, J.; GUERRERO, E.; RATKOVICH, N. Evaluation of a Dissolved air flotation system for different operating conditions. **Revista de Ingeniería**, n. 41, 46-52, 2014.

BLAZEK, J. **Computational fluid dynamics: principles and applications**. 3 ed. Massachusetts: Butterworth-Heinemann, 2015.

BOUCHARD, J.; DESBIENS, A.; del VILLAR, R. Column flotation simulation: A dynamic framework. **Minerals Engineering**, v. 55, p. 30–41, 2014.

ÇENCEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications**. 3 ed. New York: McGrawHill, 2013.

CONAMA **Conselho Nacional de Meio Ambiente**. Brasília, 2005. Resolução nº 357<www.mma.gov.br/port/conama/estr.cfm>. Acesso em: 28 de novembro de 2016.

EDZWALD, J. K.; HAARHOFF, J. **Dissolved Air Flotation for Water Clarification**. New York: McGraw-Hill, 2013.

EMANUEL, G. **Analytical Fluid Dynamics**. 3 ed. Florida: CRC Press, 2016.

ESTENDER, A. C.; PINHEIRO, A. A. Reutilização da água na indústria. **Revista de Administração da Fatea**, v. 11, n. 11, 2016.

ETCHEAPARE, R. G. **Geração, caracterização e aplicações das nanobolhas na remoção de poluentes aquosos e reúso de água por flotação**. Tese (Doutorado em Engenharia). Pós-

graduação em Engenharia de Minas Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016. 132 p.

FOGLER, H.S. **Elements of Chemical Reaction Engineering**. 5. ed. New York: Pearson Education, 2016. 992 p.

FUKUI, Y.; YUU, S. Collection of submicron particles in electro-flotation. **Chemical Engineering Science**, v. 35, n.5, p.1097-1105, 1980.

GALDINO, A. R. **Estratégia de controle de um processo de flotação por ar dissolvido de separação água-óleo**, 79 p., Programa de Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais. Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2015.

HENAUTH, R. C. S. **Produção de microbolhas utilizando a indução de ar atmosférico para melhoria do processo de produção de flotação por ar dissolvido**, 115 p., Programa de Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais. Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2015.

HUI, W.; XIAO-LEI, C.; YANG, B.; CHAO, G.; LI, Z. Application of dissolved air flotation on separation of waste plastics ABS And PS. **Waste Management**, v. 32, n. 7, p.1297 – 1305. 2012

IRGENS, F. **Rheology and non-Newtonian fluids**. New York: Springer International Publishing, 2014. 190p.

KELLAND, M. A. **Production Chemicals for the Oil and Gas Industry**. Florida: CRC Press, 2014.

KIM, S. J., CHOI, J., JEON, Y. T., LEE, I. C., WON, C. H., & CHUNG, J. Microbubble-inducing characteristics depending on various nozzle and pressure in dissolved air flotation process. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 19, n. 3, 558-563.

KNEESE, A. V. **The Economics of Regional Water Quality Management**. New York: RFF Press Water Policy Series, 2011.

KUZMIN, D.; HÄMÄLÄINEN, J. Finite Element Methods for Computational Fluid Dynamics: A Practical Guide. **SIAM Review**, v. 57, n. 4, p. 642, 2015.

LAKGHOMI, B.; LAWRYSHYN, Y.; HOFMANN, R. A model of particle removal in a dissolved air flotation tank: Importance of stratified flow and bubble size. **Water Research**, v. 68, p. 262-272, 2015.

MIETTINEN, T.; RALSTON, J.; FORNASIERO, D. The limits of fine particle flotation. **Minerals Engineering**, v. 23, n. 5, p. 420-437, 2010.

MORUZZI, R. B.; RALI, M. A. P. Metodo para determinação de distribuição do tamanho de microbolhas (DTMB) em sistemas flotação (FAD) para tratamento de águas utilizando a análise de imagem digital. **Artigo Técnico**, Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2007.

MOUKALLED, F. MANGANI, L. DARWISH, M. **The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics**. New York: Springer International Publishing, 2015.

NASCIMENTO, L. A.; SARUBBO, L. A.; MOURA, A. E.; dos SANTOS, V. A. BENACHOUR, M. Dimensionamento de *Wetland* construído para separação água-derivados de petróleo. In: Rio Oil & Gas Expo and Conference 2014, Rio de Janeiro, 2014.

NGUYEN, A.V. GEORGE, P.; JAMESON, G. J. Demonstration of a minimum in the recovery of nanoparticles by flotation: Theory and experiment. **Chemical Engineering Science**, v.61, n. 8, p. 2494-2509, 2006.

OOSTHWIZEN, P. H.; CARSCALLEN, W. E. **Introduction to Compressible fluid flow**. 2 ed. Florida: CRC Press, 2014.

PARK, M. A.; LEE, K. H.; CHUNG, J. D.; SEO, S. H. A Comparative Study of Turbulence Models for Dissolved Air Flotation Flow Analysis. **Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers**, v. 39, n. 7, p.617-624, 2015.

PEÇANHA, R. P. **Sistemas Particulados: Operações Unitárias envolvendo partículas e fluidos**.1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2014. 424 p.

POTTER, M. C.; WIGGERT, D. C.; RAMADAN, B. H. **Mechanics of fluids**. 5 ed. Boston: Cengage Learning, 2015.

REAY, D.; RATCLIFF, G.A. Removal of fine particles from water by dispersed air flotation: effects of bubble size and particle size on collection efficiency. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 51, p.178-185, 1973.

RAMIREZ, J.A.; ZINCHENKO, A.; LOEWENBERG, M.; DAVIS, R.H. The flotation rates of fine spherical particles under Brownian and convective motion. **Chemical Engineering Science**, v. 54, n. 2, p.149-157, 1999.

ROCHA E SILVA, F. C. P.; ROCHA E SILVA, N. M. P.; MOURA, A. E.; GALDINO, R. A.; LUNA, J. M. RUFINO, R. D.; SANTOS, V. A.; SARUBBO, L. A. Effect of biosurfactant addition in a pilot scale dissolved air flotation system. **Separation Science and Technology**, v. 50, n. 4, p. 618-625, 2015.

RUKTHONG, P. W.; PIUMSOMBOON, P.; WEERAPAKKAROON, W.; CHALERMSINSUWAN, B. Computational Fluid Dynamics Simulation of a Crude Oil Transport Pipeline: Effect of Crude Oil Properties. **Engineering Journal**, v. 20, n. 3, p. 145-154, 2016.

STEARNS, J.V. **Fine particle flotation and the influence of dissolved gas on interparticle interactions**. 2001. 173p. Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia, Ian Wark Research Institute, University of South Australia, Austrália, 2001.

SANTOS, K. A. L.; MOURA, A. E.; BENACHOUR, M.; SARUBBO, L. A.; SANTOS, V. A. Concepção de uma Torre FAD de estágios para separação água óleo. In: Rio Oil & Gas Expo and Conference 2014, Rio de Janeiro, 2014.

SHARMA, A. **Introduction to Computational Fluid Dynamics: Development, application and analysis**. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltda, 2016.

SHUKLA, S. C.; KUNDU, G.; MUKHERJEE, D. Study of gas holdup and pressure characteristics in a column flotation cell using coal. **Minerals Engineering**, v. 23, p. 636 – 642, 2010.

SILVA, N. M. P. R.; SILVA, F. C. P. R.; MOURA, A. E.; SARUBBO, L. A.; SANTOS, V. A., Dimensionamento de câmara de FAD para tratamento de água Oleosas. In: 7º Encontro Internacional das Águas, Recife-PE, 15 a 19 de maio de 2013.

TANSEL, B.; PASCUAL, B. Removal of emulsified fuel oils from brackish and pond water by dissolved air flotation with and without polyelectrolyte use: Pilot-scale investigation for estuarine and near shore applications. **Chemosphere**, v. 85, p. 1182-1186, 2011.

TIENTENBERG, T.; LEWIS, L. **Environmental and Natural Resource Economics**. 10 ed. New York: Routledg, 2015.

TRUONG, H. S.; ISMAIL, I.; RAZALI, R. Fundamental Modeling and Simulation of a Binary Continuous Distillation Column. In: International Conference Intelligent and Advanced Systems (ICIAS), p. 1-5, 2010.

WAISI, B. I. H. **Produced water treatment for beneficial use: emulsified oil removal**. Tese (Doutorado). Enschede, the Netherlands: Universiteit Twente. 2016. 146 p.

WANG, D. **Flotation Reagents: Applied Surface Chemistry on Minerals Flotation and Energy Resources Beneficiation**. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2016.

WHITE, F. M. **Fluid Mechanics**. McGrawHill. 8 ed. New York - USA, 2016.

WILCOX, J.; NASIRI, F.; BELL, S.; RAHAMAN, M. S. (2016). Urban water reuse: A triple bottom line assessment framework and review. **Sustainable Cities and Society**, v. 27, 448-456.

ZAFFARONI, C.; DAIGGER, G.; NICOL, P.; LEE, T. W. (2016). Wastewater treatment challenges faced by the petrochemical and refinery industry, and opportunities for water reuse. **Water Practice and Technology**, v. 11, n. 1, 104-117, 2016.

ARRUDA, E.; KOBOLDT, C. A.; DAMASCENO J. J. R.; BARROZO, M. ^a S.; Estudo do Comportamento de um Hidrociclone Filtrante de Geometria Krebs. Revista Eletrônica, Ed. 2003.

Barbosa, A. B.; Silva, R. R.; **Química Nova na Escola** 1995, nº 2, 3.

BARROS, M.A.S.; VIEIRA, L. G. M. ; SOUZA, F. J.; DAMASCENO, J. J. R. (1998), Análise do DESEMPENHO DO Hidrociclone.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E.; *Planejamento e Otimização de Experimentos*; Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995, p. 14.

BLOCH, S. C. **Excel para engenheiros e cientistas**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 225 p.

CASTILHO, L. R.; MEDRONHO, R. A., A simple procedure for design and performance prediction of Bradley and rietema hydrocyclones. **Mineral Engineering**. V.13, n. 2, p. 183-191, 2000.

FREEDMAN, B.; PRYDE, E. H.; MOUNTS, T. L.; **J. Am. Oil Chem. Soc.** 1984, 61, 1638.

GAASEIDNESN, K; TURBEVILLE, J., Separation of oil and water in oil spill recovery operations. **Pure Appl. Chem.**, Vol. 71, No. 1, pp. 95–101, 1999.

GOLDRATT, E. M. **What is thing called the Theory of Constraints, and how should it be implemented.** Crotonon-Hudson: North River Press, 1990.

HANSELMAN, D.; LITTLEFIELD, B. **MATLAB 7: Guia do Usuário.** São Paulo: MAKRON Books, 2006.

JAFELICCI Jr., M.; Varanda, L. C.; **Química Nova na Escola** 1999, nº 9, 18.

KALNINS, M. C., Woodlands, Tex. CONOCO SPECIALTY PRODUCTS INC., Houston Tex. High efficienct liquid-liquid hydrocyclone, Cl.⁵ BO4C 5/081. US005110471A. May. 5, 1992.

KINAST, J. A.; Production of Biodiesels from Multiple Feedstocks and Propreities of Biodiesels and Biodiesels/Diesels Blends; Gas Technology Institute, National Renewable Energy Laboratory, Março de 2003.

KNOTHE, G.; van GERPEN, J.; KRAHL, J.; **The Biodiesel Handbook**, AOCS Press: Champaign, Illinois, 2005, cap. 2 e 4.

MENEGHETTI, S. M. P (2004) Obtenção de Biodiesel a partir do Óleo de Mamona: Estudo Comparativo, entre Diferentes Catalisadores, na Reação de Transesterificação Empregando-se Metanol e Etanol. In: Congresso Brasileiro de Mamona, 1: Energia e Sustentabilidade, Embrapa, Campina Grande.

Perlingeiro, C. A. G. **Engenharia de Processos.** São Paulo: Editora Edgard Blucher. São Paulo, 2005. 189 p.

RINALDI, R.; GARCIA, C.; MARCINIUK, L. L.; ROSSI, A. V.; SCHUCHARDT, U. Síntese do Biodiesel. **Química Nova**, Vol. 30, No. 5, 1374-1380, 2007

SANTOS, V. A.; ANDRADE, E. P., Dimensionamento computacional de equipamentos para a indústria sucroalcooleira. **Revista da STAB**, vol. 53, 14-21, 2005.

SAMPAIO, J. A.; OLIVEIRA, G. P.; SILVA, O. A. Ensaio de classificação em hidrociclone. **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT**, p. 139-54, 2007.

MARINS, Luiz Philipe Martinez. **Caracterização experimental do escoamento no interior de um hidrociclone sem núcleo gasoso.** 2007. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO.

OLIVEIRA JR, João Américo Aguirre. Simulação numérica da separação água-óleo em hidrociclones para baixas frações de óleo. 2009.

SILVA, Nathacha Kare Gonçalves et al. Estudo de otimização da configuração do hidrociclone filtrante. 2014.

ALMEIDA, Celso Augusto Koboldt et al. Comportamento do hidrociclone filtrante frente às modificações no diâmetro de underflow e no tubo de vortex finder. 2008.

ALVES, João Victor Barbosa; DE ANDRADE MEDRONHO, Ricardo. Hidrociclone para a Separação do Óleo Residual de Água em Refinarias. **Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro- RJ (dissertação de mestrado) 90p, 2012.**

CAPÍTULO II

***RECUPERAÇÃO DE ÀGUA DE PROCESSO DE
EFLUENTES DA INDÚSTRIA METALÚRGICA
POR ASSOCIAÇÃO DE FLOTAÇÃO DE AR
DISSOLVIDO E BIODEMULSIFICADOR***

Manuscrito a ser submetido para publicação na Revista
.....

Neste trabalho foi desenvolvido uma metodologia para tratamento de um efluente da indústria metalmeccânica composto de água, fluido de corte e grafite. A recuperação de componentes de um efluente do processo de usinagem torna-se complexo devido à coexistência de sólidos como o grafite, misturado a uma emulsão do tipo água-óleo. Devido ao uso do grafite em partículas muito pequenas e emulsionado em água com auxílio de um emulsificante, distribuindo-se em ambas as fases (aquosa e orgânica), dificultando o processo de tratamento, fez-se necessário um tratamento de um efluente desse tipo exige, na etapa preliminar, a quebra da emulsão para que seja recuperado o grafite disperso no meio líquido. O tratamento foi inicialmente realizado em um protótipo de separação de fases em escala de laboratório, contando com tanques de recirculação, bombas, hidrociclones e decantador contínuo. Em uma etapa inicial, o efluente foi acidificado através da adição de ácido sulfúrico PA como forma de quebrar a emulsão sólido-líquido. Posteriormente, foi recuperada a fase sólida com auxílio de um hidrociclone, dando origem a uma descarga pelo overflow do equipamento de uma mistura de água e óleo de corte residual. A mistura de parte da água e da água-fluido de corte, após a desestabilização ácida da emulsão, foi separada no decantador contínuo, dando origem a uma corrente de fluido de corte e uma fase aquosa contendo óleo residual, contaminada por cerca de 130 mg.L^{-1} de fase orgânica. A fase aquosa foi então submetida a um processo de Flotação por Ar Dissolvido (FAD), auxiliada por biossurfactante desemulsificante em um protótipo FAD, também em escala de laboratório. Para definir condições adequadas à obtenção de uma fase aquosa com nível de contaminação que permita o seu retorno ao processo, as condições operacionais de aplicação da técnica de FAD foram determinadas com auxílio de um planejamento experimental do tipo Delineamento Compost Central rotacional (DCCR). Ao final do processo de recuperação da fase aquosa foi obtido um teor óleo residual de 12 %, abaixo do exigido pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) para descarte em corpos hídricos, que é de 20 ppm. As recuperações do grafite e do fluido de corte são estudos sugeridos para os próximos trabalhos.

Palavras-chave: Separação sólido-líquido; DCCR; Hidrociclone; Indústria metalmeccânica; FAD; Reaproveitamento de água.

1. Introdução

Na técnica de usinagem, o uso de fluidos de corte, meios de lubrificação e arrefecimento, quando escolhidos e aplicados apropriadamente, traz benefícios. O fluido deve ser aplicado de modo que permita a sua ação o mais próximo possível da aresta de corte nas interfaces peça/ferramenta/cavaco, de modo a assegurar que suas funções sejam adequadamente exercidas. Contudo, apesar dos benefícios apresentados, a utilização do fluido de corte em processos de usinagem gera custos associados à aquisição, ao armazenamento, ao preparo, ao controle em serviço e ao descarte. Dentro da indústria, as questões ambientais envolvem danos à saúde do operador devido ao contato do referido fluido com a pele e a respiração e/ou ingestão de poluentes derivados dos mesmos. Fora da indústria, quando do descarte, deve-se ter cuidados para não efetar o solo, a água e algumas vezes o próprio ar (GROOVER, 2010).

Um fluido de corte deve reduzir custos de produção pela redução do desgaste da ferramenta e pela melhoria da superfície do componente usinado. Como funções secundárias têm-se o transporte do cavaco para fora da região de trabalho, a refrigeração da região de corte e da peça, uma vez que para uma exigência maior de tolerância dimensional, um aquecimento demasiado leva a uma dilatação térmica do componente, e isso deve ser evitado (BIRAT, 2016).

A redução do atrito é um dos fatores que propiciam um aumento da vida útil de uma ferramenta de corte em usinagem, pois os efeitos dos desgastes sobre a ferramenta diminuem. Uma das formas de diminuir tais efeitos é a introdução de uma camada lubrificante sólida com baixa taxa de cisalhamento entre as superfícies da ferramenta e da peça a ser trabalhada. Dependendo da aplicação, a lubrificação sólida é a que apresenta maiores vantagens em relação à diminuição do atrito, pois uma vez formada a camada de lubrificante, esta poderá permanecer entre as partes em contato. Outra vantagem do lubrificante sólido em relação ao líquido é em relação à temperatura de operação que pode estender a faixa de 1000°C, mantendo o coeficiente de atrito relativamente baixo. Dentre os lubrificantes sólidos, os mais conhecidos são a grafita, o bissulfeto de molibdênio (MoS_2) e o politetrafluoretileno (CHELGANI et al., 2015). Contudo, o uso de fluidos de corte emulsão em água, com a presença de lubrificante sólido (grafita, por exemplo), dificulta o descarte desse efluente para o meio ambiente, uma vez que todos esses componentes são passíveis de reúso (Karhu, Leiviskä and Tanskanen, 2014). O presente trabalho desenvolveu uma metodologia para separação desses componentes e recuperação do efluente aquoso, esta última com auxílio da técnica de flotação por ar dissolvido auxiliada por biossurfactante.

2. Material e Método

2.1 Quebra ácida da emulsão química

As emulsões químicas são criadas quando um produto químico tensoativo ou outros produtos químicos são utilizados, tais como, os líquidos de limpeza alcalinos que contêm tensoativos (surfactantes), sabões e detergentes com características iônicas e não iônicas. Estes produtos químicos interferem com coalescência natural das gotas do óleo e criam geralmente uma emulsão permanentemente estabilizada com pouca possibilidade de quebrar por si só (AKCIL and KOLDAS, 2006). No presente trabalho, a

grafita adicionada ao óleo de corte são misturadas à mistura na água-óleo de corte com auxílio de um emulsionificante.

O rompimento de uma emulsão do tipo grafite-água-óleo de corte pode ser facilitado através de alteração de pH (ácido / cáustico). O produto químico a ser usado depende da emulsão em particular. Esses produtos químicos alteram as cargas elétricas das partículas (gotas de óleo) pelo efeito de suas próprias cargas, geralmente com uma carga catiônica (positiva). Esta manipulação da carga permite que as gotas do óleo tornem-se livres e deixa-as flutuarem favorecendo assim a coalescência (Karhu, Leiviskä and Tanskanen, 2014).

2.2 Protótipo de bancada para separações iniciais

Esse tratamento inicial foi realizado em um protótipo de separação de fases, em escala de laboratório (Figura 1), contendo com tanques de recirculação, bombas, hidrociclone e decantador contínuo.

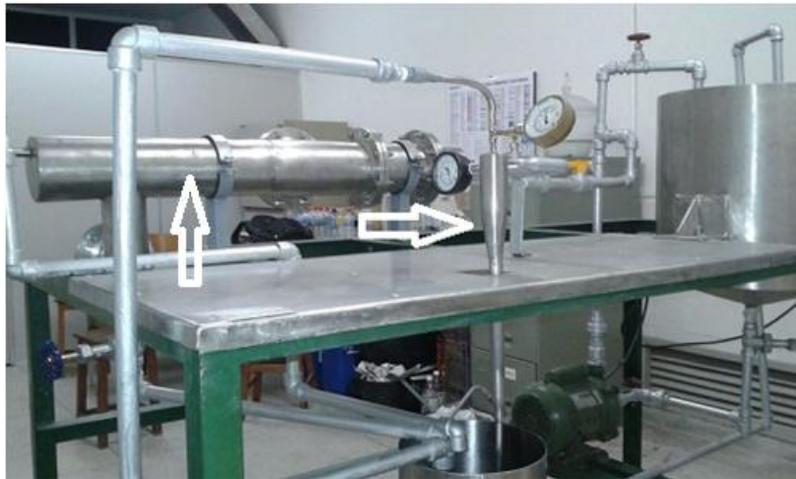


Figura 1: Arranjo experimental piloto utilizando um decantador contínuo e hidrociclone para separação da grafita e da mistura água-óleo livres no efluente de uma unidade de usinagem industrial

O grau de turbulência é um critério utilizado para avaliar a eficiência do processo de separação líquido-líquido, com base no valor do número de Reynolds da turbulência, conforme mostra as Equações (Schweitzer):

$$Re_t = \frac{v_C D_H \rho_C}{\mu_C} \quad (1)$$

Em que:

v_C - velocidade de sedimentação da fase contínua;

D_H - diâmetro hidráulico da fase contínua;

ρ_C - massa específica da fase contínua;

μ_C - viscosidade absoluta da fase contínua.

Para as condições ótimas de operação do equipamento têm-se para o Re_t : < 5000, condição recomendável; 5000 – 20000, alguns problemas poderão surgir; 20000 – 50000, alguns problemas deverão ocorrer e; > 50000, processo não recomendado.

2.3 Protótipo FAD de bancada

A água oleosa com 120mg.l^{-1} de óleo residual foi submetida ao tratamento em um protótipo de um Flotador a Ar Dissolvido (RODRIGUES and RUBIO, 2007) em escala de bancada, conforme mostra a Figura 2. O referido protótipo operou com auxílio de um biossurfactante do tipo deselmulsificante (*Candida lipolytica*). Conforme observa-se na referida Figura 2, uma bomba centrífuga (1) é responsável pela alimentação do afluente oleoso armazenado num tanque (2). O fluxo do afluente a ser tratado passa pela célula de flotação (3), com um valor de vazão volumétrica ajustado pela abertura de uma válvula (4). As variáveis de controle das condições operacionais do sistema, como níveis e vazões volumétricas do fluido são registradas com auxílio de um circuito eletrônico (5). Parte da água tratada é succionada por uma bomba centrífuga (6), a qual é saturada com microbolhas de ar. As gotículas de óleo dispersas, são envolvidas por microbolhas de ar e flutam, dando origem a uma espécie de espuma oleosa, a qual cai em um coletor de espuma (7). Uma Terceira bomba centrífuga (8) aspira a água tratada restante e envia para reúso. Um Sistema de controle com sensor de nível (9) mantém o protótipo operando em estado estacionário.

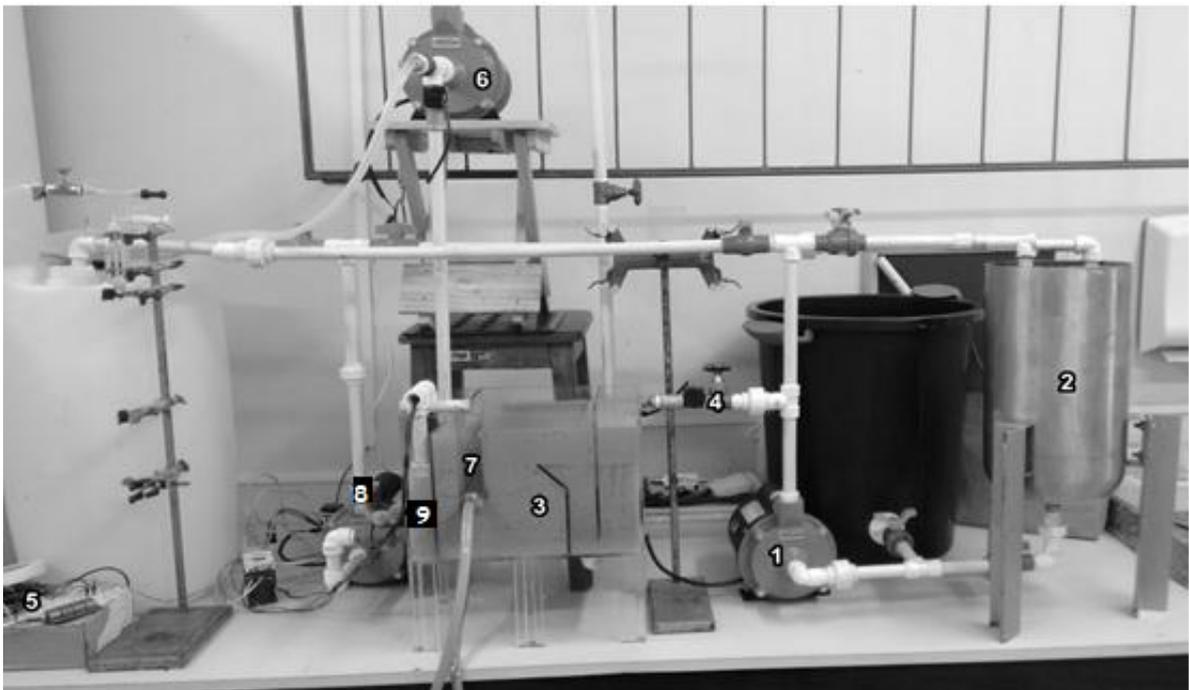


Figura 2: Protótipo de FAD em escala de laboratório utilizado para tratamento da água oleosa residual

3. Resultados e discussões

Neste trabalho, foi observado inicialmente que o efluente bruto contendo água, óleo de corte e grafite, apresentou pH em torno de 6,0, durante cerca de 10 horas para ser detectada a formação de uma interface entre água e óleo, com partículas de grafite distribuídas. Um litro deste efluente foi então levado a diferentes níveis de pH ácido e foram monitoradas as variações de altura da interface água-óleo, para que fossem acompanhados diferentes graus de desmulsificação em função dos diferentes valores de pH. A Figura 3 ilustra essa dependência para valores de pH de 2,8, 3,8, 4,8 e 5,8. Esses valores de pH foram monitorados por provocarem as maiores velocidades de deslocamento da interface água-óleo. Observa-se na referida Figura 3 que quanto mais ácido o pH do conteúdo da proveta maior a velocidade de variação da altura da coluna de água, sinalizada pela interface água-óleo. O tempo gasto para uma desestabilização total da emulsão grafite-água-óleo de corte foi de 650 segundos. Como resultado da separação dos constituintes da emulsão cedida pela indústria metalúrgica foi identificada uma constituição de 56,4 % v/v de água, 39,6 % v/v de óleo de corte e 4,1 % v/v de grafite particulado.

A presença de grafite no overflow do hidrociclone foi monitorada com auxílio de um analisador de partículas a laser. Para ilustrar a eficiência da recuperação de água oleosa foi utilizada uma simulação numérica, via CFD. O *software* FLUENT®, cujo pré-processador (Gambit) auxiliou a geração de uma malha não-estruturada e um modelo multifásico de mistura para a fase contínua (água oleosa – 130 mg.L^{-1}) e de turbulência, e um modelo denominado Reynolds Stress (RSM) foi utilizado para a fase dispersa (Nopens; Beheydt and Van Rollegem, 2005). A Figura 4 mostra a distribuição de concentração volumétrica da água oleosa ao longo dos comprimentos axial e radial do hidrociclone. A coloração vermelha representa uma fração volumétrica muito próxima da unidade, passando por amarelo, verde, azul claro e, finalmente, azul escuro, essa última de valor nulo. Detalhes com cortes horizontais na parte superior do hidrociclone ilustram que para uma velocidade de alimentação de 0,4 m/s da suspensão água oleosa-grafite. Observa-se que o líquido acumula-se no topo do corpo cilíndrico do equipamento.

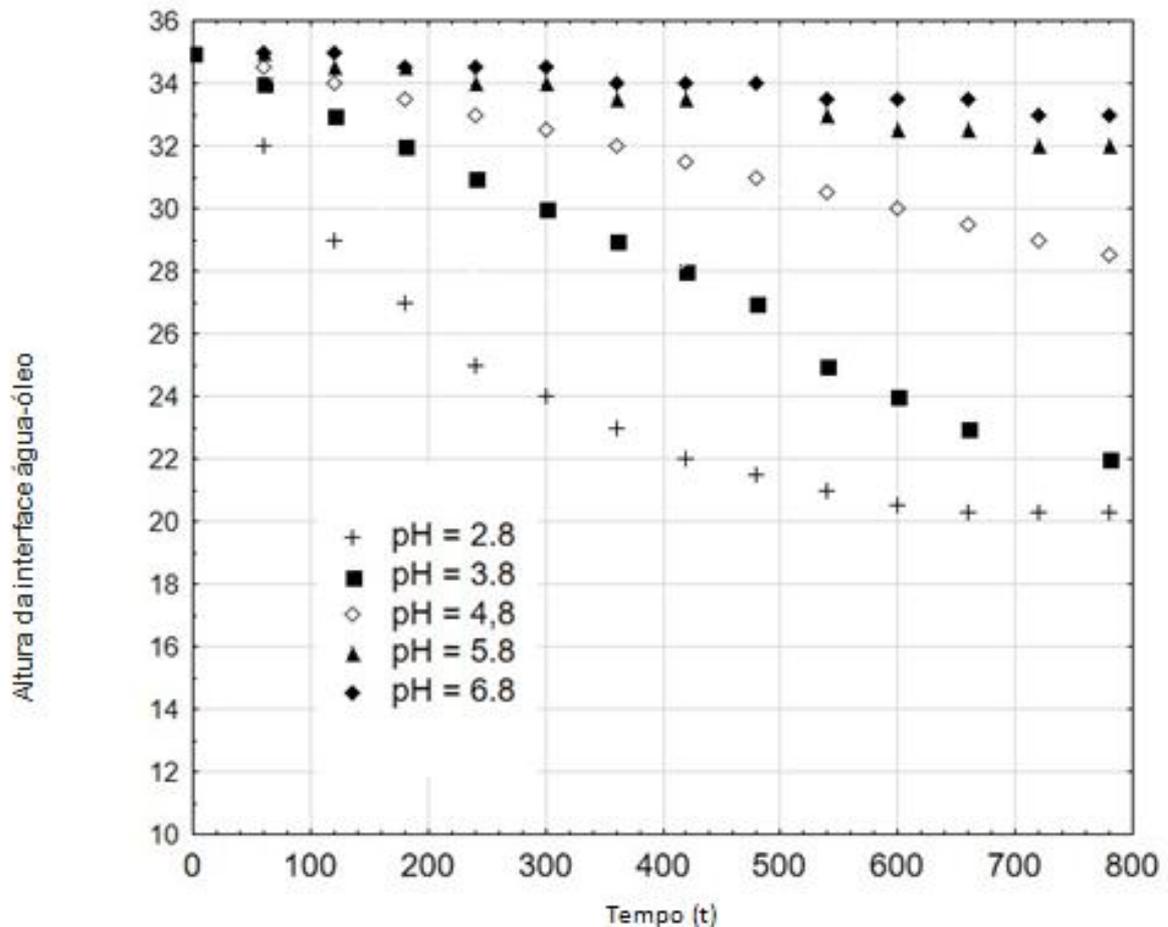


Figure 3: Altura da interface água-óleo em função do tempo para diferentes valores de pH na determinação das condições de desestabilização sólido-líquido

A operação do decantador contínuo do protótipo de bancada foi a em estado estacionário, com uma alimentação composta de 58,8 % de água e 41,2 % de fluido de corte. Um número de Reynolds de turbulência da ordem de 2200 foi mantido e como se pode observar na Figura 5 a eficiência de separação líquido-líquido foi da ordem de 96,0 %. Foi detectada água oleosa na saída superior do decantador com um teor de fluido de corte de 5,2 mg.^{L⁻¹}

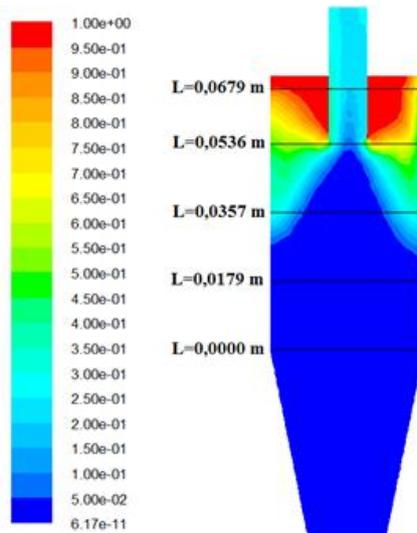


Figura 4: Distribuição de fração volumétrica da água oleosa simulada no hidrociclone com auxílio do software fluent em CFD

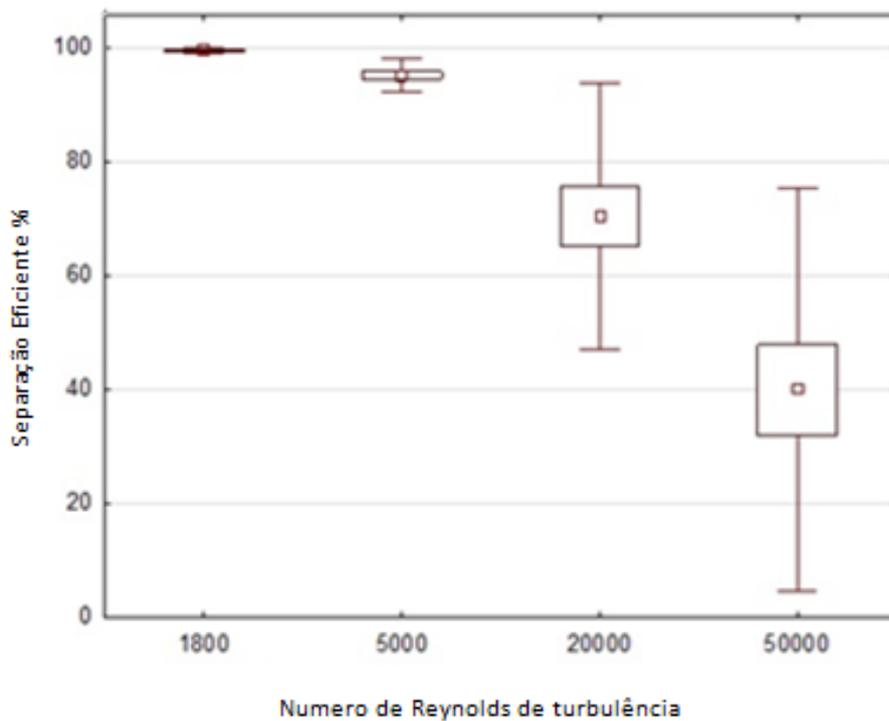


Figura 5. Box plot da influência do número de Reynolds da turbulência sobre a eficiência de separação da suspensão biodiesel-glicerol em um decantador horizontal contínuo

Para recuperação da água oleosa residual dos processos de hidrociclone e decantação contínua, esta mistura de líquido foi submetida a uma flotação na unidade de bancada apresentada (Figura 2). Foi avaliada a eficiência de separação água-óleo residual, com a adição de biossurfactante conforme Silva et al. (2015). Os fatores utilizados em um

planejamento do tipo Delineamento Compost Central Rotacional – DCCR (Montgomery, 2005), utilizado no processo de separação. As razões entre as vazões volumétricas do ar e da água para produção de microbolhas [X_1 : $(0.3 - 1.71) \cdot 10^3$] e a razão entre as vazões volumétricas de dosagem de biossurfactante e do afluente do protótipo de bancada [X_2 : $(1.71 - 2.21) \cdot 10^4$], foram os fatores considerados. A variável resposta para o DCCR foi a eficiência de separação água-óleo. A Figura 6 apresenta a superfície de resposta obtida com auxílio do software STATISTICA Versão 12 da Stateoft®, Eq(2), demonstrando as condições operacionais do protótipo de bancada responsável por uma eficiência de separação de cerca de 96,0 %.

$$Y = -216,84 + 210,43 \cdot X_1 - 95,25 \cdot X_1^2 + 258,65 \cdot X_2 - 78,25 \cdot X_2^2 - 9,99 \cdot X_1 \cdot X_2 \quad (2)$$

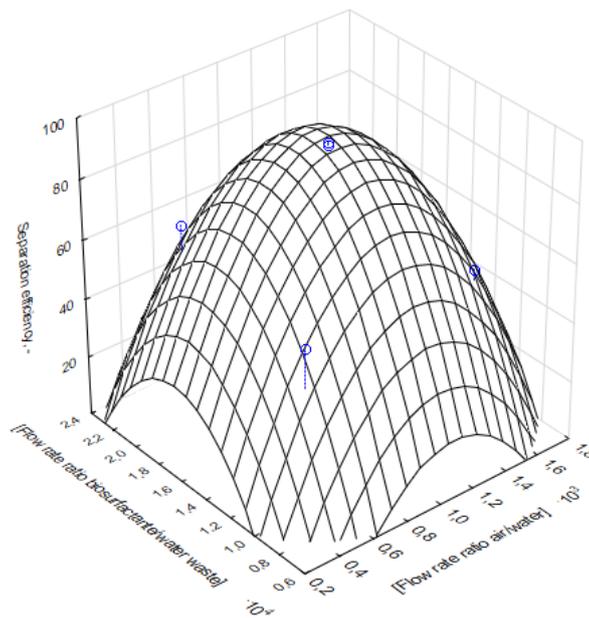


Figura 6: Superfície de resposta mostrando a separação de eficiência em função dos fatores no planejamento DCCR

4. Conclusão

A estratégia utilizada para separar e tratar água oleosa do efluente de uma indústria de usinagem de metais, reunindo diferentes etapas de processos físico-químicos simples, surtiu o efeito desejado. A desestabilização ácida, as separações das fases com hidrociclone, decantação contínua e FAD auxiliada, permite o reúso da fase aquosa dentro das especificações solicitadas pelo CONAMA.

Referência

- Akcil, A., Koldas, S., 2006. Acid mine drainage (AMD): causes, treatment and case studies. **J. Clean. Prod.** 14, 1139–1145. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.006>.
- Birat, J., 2016, Steel cleanliness and environmental metallurgy. **Metall. Res. Technol.** 113, 201 3-24.
- Chelgani, C.S., Rudolph, M., Kratzsch, R., Sandmann, D., Gutzmer, J., A Review of Graphite Beneficiation Techniques. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, 37:1, 58-68, DOI: 10.1080/08827508.2015.1115992.
- Groover, M.P., **Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems**. Fourth Edition, York: John Wiley & Sons, INC, 2010, 1011 pp., 978-0470-467002.
- Karhu, M., Leiviskä, T., Tanskanen, J., 2014. Enhanced DAF in breaking up oil-in-water emulsions. **Sep. Purif. Technol.** 122, 231–241. [DOI.org/10.1016/j.seppur.2013.11.007](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.11.007).
- Montgomery, D.C., 2005, Design and analysis of experiments. 6th edition. John Wiley & Sons, Inc., 656 p.
- Nopens, I.; Beheydt, D.; Van Rolleguem, P.A. Comparison of pitfalls of different discretized solution methods for population balance models: *a simulation study*. **Computers and Chemical Engineering**, 29, p. 367-377, 2005. doi:10.1016/j.compchemeng.2004.10.007.
- Rodrigues, R.T., Rubio, J., 2007. DAF-dissolved air flotation: potential applications in the mining and mineral processing industry. **Int. J. Miner. Process.** 82, 1–13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2006.07.019>.
- Schweitzer, P. A, Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineers, McGraw-Hill Book Co., 1979.

CAPÍTULO III

CONCLUSÕES GERAIS

1. Este protótipos em escala reduzida de equipamentos tem demonstrado ser excelente ferramentas no auxílio à solução de problemas nas diferentes etapas de um processo produtivo;
2. Operações simples como decantação, hidrociclonagem e flotação podem ser combinadas para solução de problemas complexos de processos de separação. Para isso, existe a necessidade de se conhecer as causas dos problemas para sequenciar essas operações de forma adequada.
3. Estabelecimento de critérios técnicos e científicos como acidificação do meio, número de Reynolds de turbulência, entre outros, pode auxiliar na obtenção de solução simples, mais eficientes;
4. Técnicas estatísticas associadas a técnicas gráficas, a exemplo dos gráficos “Box Plot” e de plotagem tipo DCCR apresentam-se como uma excelente ferramenta do trabalho para os analistas de processos produtivos;
5. A solução apresentada por este trabalho permite a recirculação da forma aquosa para outras etapas do processo produtivo, que originou, uma necessidade porém, da continuidade de estudar por recuperação todos os constituintes do efluente líquido- líquido- sólido.

ANEXOS

ACEITE DO ABSTRACT

COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO TRABALHO COMPLETO



<http://www.aidic.it/icheap13>

Re: Notification of abstract acceptance

TO THE CORRESPONDING AUTHOR

Valdemir Santos<valdemir.alexandre@hotmail.com>

PROMOTED AND ORGANIZED
BY



The Italian Association of
Chemical Engineering

VENUE

Hotel MICHELANGELO
Piazza Luigi di Savoia, 6;
Milano, Italy

SCIENTIFIC COMMITTEE

CO-CHAIRMEN
Sauro PIERUCCI
(AIDIC; Politecnico di Milano,
Italy)

Jiří Jaromír KLEMEŠ
(Pázmány Péter Catholic
University, Hungary)

ORGANIZING COMMITTEE CHAIRMAN

Domenico ELEFANTE
(AIDIC president; ENI)

On behalf of the ICheap13 ISC we are pleased to inform you that the abstract

(Reference # 17)

“RECOVERY OF PROCESS WATER OF EFFLUENT FROM METALLURGICAL INDUSTRY BY ASSOCIATION OF DISSOLVED AIR FLOTATION AND BIODERMULSIFIER”

by: Santana R.K., Sarubbo L., Santos V.

has successfully passed the first evaluation step

You are herewith invited to submit the full paper for final evaluation at
www.aidic.it/icheap13/fullpaper.htm

Please upload the paper as early as possible and no later than January 9th, 2017

Full papers will be evaluated by at least two reviewers for the technical content - according to the publication policy <http://www.aidic.it/icheap13/CETpublication.htm>

Final papers will be also evaluated for the format: as a consequence it is required to strictly respect the guidelines prescribed into the template www.aidic.it/icheap13/CET_template.docx

Before submitting your full paper, we invite you to check in advance the actual attendance at the conference of at least one of the co-authors.

Lecture-Speakers and Poster-Presenters have to pay the conference fee before March 15th, 2017:

one fee = one presentation = one paper publication

Full fee – Euro 680

PhD student fee – Euro 550

extra paper linked to the fee (max two) – Euro 250 each