



**Escoamento de Dispersões Óleo-Água
em Colunas Recheadas - Avaliação da
Unidade DOX**

Estudo de caso: BRASKEM

Aline de Oliveira Martins

Projeto de Final de Curso

Orientador

Ricardo Pires Peçanha, Ph.D.

Co-Orientador

Flavia Mancopes, M. Sc.

Novembro de 2013

ESCOAMENTO DE DISPERSÕES ÓLEO-ÁGUA EM COLUNAS RECHEADAS – AVALIAÇÃO DA UNIDADE DOX. ESTUDO DE CASO: BRASKEM

Aline de Oliveira Martins

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

Juacyara Carbonelli Campos, D.Sc. – DPI/EQ/UFRJ

Heloísa Lajas Sanches - D.Sc. – DEQ/EQ/UFRJ

Daniel Proaze Paes, Engenheiro - BRASKEM

Orientado por:

Ricardo Pires Peçanha, Ph. D – DEQ/EQ/UFRJ

Flavia Mancopes, M.Sc. –BRASKEM

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Novembro de 2013

Martins, Aline de Oliveira

Escoamento de Dispersões Óleo-Água em Colunas Recheadas – Avaliação da Unidade DOX. Estudo de caso: BRASKEM. Aline de Oliveira Martins. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2013.

xv, 64 p.; il.

Monografia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2013.

Orientador: Ricardo Pires Peçanha

Co-Orientador: Flavia Mancopes.

1. Escoamento em meios porosos 2. Colmatação 3. Campanha de operação 4. Monografia (Graduação- UFRJ/EQ). 5. Ricardo Pires Peçanha I. Escoamento de Dispersões Óleo-Água em Colunas Recheadas – Avaliação da Unidade DOX. Estudo de caso: BRASKEM.

Dedico este trabalho especialmente aos meus pais, Mirtes e Guaraci, pelo apoio, compreensão, encorajamento, amor e dedicação. Aos meus irmãos, Rodrigo e Adriano, pela amizade e por sempre estarem ao meu lado em todos os momentos da minha vida, principalmente por me incentivarem nas horas difíceis.

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, por iluminar meus passos e permitir essa conquista.

A minha **família**, pelo amor, dedicação e apoio.

Aos **amigos**, pela compreensão, incentivo e companheirismo.

Ao orientador **Ricardo Pires Peçanha**, por ter me confiado à realização deste projeto

À co-orientadora **Flavia Mancopes**, pela disponibilidade em me instruir no desenvolvimento deste.

Aos **operadores** da Empresa BRASKEM, por dedicarem parte dos seus tempos e horas de trabalho a me auxiliarem no aprendizado técnico e prático em visitas à área da produção industrial.

Aos engenheiros **Daniel Proaze e Aline Prata**, pela paciência, apoio e parceria em todos os momentos difíceis da elaboração deste projeto.

À **banca examinadora**, pela disponibilidade, interesse e presença na apresentação deste trabalho.

Muito obrigada!

RESUMO

Resumo do projeto final do curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção de grau de Engenheiro Químico.

ESCOAMENTO DE DISPERSÕES ÓLEO-ÁGUA EM COLUNAS RECHEADAS – AVALIAÇÃO DA UNIDADE DOX ESTUDO DE CASO: BRASKEM

Aline de Oliveira Martins

November, 2013

Orientador: Prof^o Ricardo Pires Peçanha, Ph.D.

Co- Orientador: Flavia Mancopes, M. Sc.

Com o advento das atividades industriais e a crescente preocupação no âmbito da sustentabilidade no processo produtivo, a viabilização de integração de processos, objetivando principalmente a redução de perdas físicas e/ou econômicas, alavancaram os estudos relacionados principalmente a unidades de recuperação/tratamento de co-produtos gerados durante as etapas produtivas. A Empresa BRASKEM, de produção de derivados petroquímicos e resinas termoplásticas, possui como exemplo de sistema integrado a Unidade DOX de coalescimento de dispersões óleo-água (hidrocarbonetos dispersos), formada durante a cadeia produtiva, cuja finalidade consiste na recuperação dos parâmetros de qualidade da água a ser reutilizada no processo para geração de vapor. Conforme o conhecimento histórico de operação da DOX, permitido pelo levantamento de dados das relevantes variáveis diretamente relacionadas à Unidade, observou-se uma perda efetiva de eficiência no processo de coalescência. Desta maneira, o perfil de colmatação do meio poroso, foi correlacionado com as concentrações médias de óleo na alimentação aquosa em cada campanha, ou seja, ao longo do tempo de operação das colunas recheadas, de forma a compreender a operação da unidade e obter fundamentação suficiente para saber o momento em que a DOX passaria a apresentar perda de eficiência na operação. Com isso, observou-se através dos resultados a não influência direta da concentração de óleos no tempo de operação das colunas recheadas, e por conseguinte, na colmatação do meio de partículas constituintes do recheio das colunas verticais.

ABSTRACT

DISPOSAL OF OIL-WATER DISPERSIONS IN STUFFED COLUMNS – EVALUATION DOXUNIT

CASE STUDY: BRASKEM

Aline de Oliveira Martins

November, 2013

Advisors: Ricardo Pires Peçanha, Ph.D.

Flavia Mancopes, M. Sc.

With the advent of industrial activities and the growing concern about sustainability in the production process, the feasibility of process integration, intending to reduce physical and/or economical losses improved the studies primarily related to recovery/treatment units of co-products generated during production stages. The Braskem Company, that produces petrochemicals and thermoplastic resins, has as an example of integrated unit, the DOX coalescing mixture of water and oil (hydrocarbons dispersed), formed during the production chain, which aims the recovery of the quality parameters of the water to be reused in the process for steam generation. This project will evaluate the profile of operation efficiency in function of the intrinsic parameters of the production process. As the historical knowledge of the DOX operation, permitted by the data survey of relevant variables directly related to the Unit, noticed that was a efficiency loss in the effective coalescence process. In this way, the profile of filling of the porous medium, was correlated with the average concentrations of oil in the water supply in each campaign, over time of operation of the columns filled, in order to understand the operation of the unit and obtain justification enough to know the moment the DOX would present loss of efficiency in operation. With this, it has been observed through the results to direct influence of the concentration of oil in the operation time of the columns filled, and therefore, in the middle of constituent particles filling the stuffing of the vertical columns.

Lista de Figuras

Figura 1: Etapas do processo produtivo.....	6
Figura 2: Unidade DOX – Coalescedores primário e secundário em operação. 7	
Figura 3: Coalescedor vertical e camadas de recheio.....	8
Figura 4: Coalescência de gotículas de óleo e efeito de colmatação.	10
Figura 5: Unidade DOX – Coalescedor primário em operação, coalescedor secundário sob retrolavagem.....	12
Figura 6: Escoamento do fluido no meio poroso.	28
Figura 7: Escoamento em meio poroso horizontal.	32
Figura 8: Referenciais adotados para cálculo.	35
Figura 9: Dias de campanha x teor médio de óleo (Coluna A).	46
Figura 10: Dias de campanha x teor médio de óleo(Coluna B).	47
Figura 11: Aumento do diferencial de pressão nas campanhas - Coluna A.	48
Figura 12: Aumento do diferencial de pressão nas campanhas - Coluna B.	48
Figura 13: Médias de campanhas por faixas de concentração de óleos - Coluna A.....	50
Figura 14: Médias de campanhas por faixa de concentração de óleos - Coluna B.....	51

Figura 15: Médias de campanhas por faixa de concentração de óleos (corrigida) - Coluna B.	52
Figura 16: Perfil de colmatação das campanhas em função da concentração de óleo – ColunaA.	53
Figura 17: Perfil de colmatação das campanhas em função da concentração de óleo –Coluna B.	53
Figura 18: Colmatação média por faixa de concentração de óleo- Coluna A...55	
Figura 19: Colmatação média por faixa de concentração de óleo - Coluna B. 55	
Figura 20: Turbidez x concentração de óleos.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de projeto das variáveis de processo.	144
Tabela 2: Características das partículas - Diâmetros.....	40
Tabela 3: Características dos recheios - Massa	41
Tabela 4: Característica dos recheios - Fração Mássica.....	41
Tabela 5: Formato dos cálculos	45

NOMENCLATURA

VARIÁVEL	NOME	DIMENSÃO FÍSICA
ρ	densidade do fluido	$M L^{-3}$
ρ_s	densidade do sólido	$M L^{-3}$
g	aceleração da gravidade	$L T^{-2}$
μ	viscosidade do fluido	$M L^{-1} T^{-1}$
H_s	perda de carga de eixo	L
H_L	perda de carga em tubos, acidenres e meio poroso	L
q	velocidade superficial do fluido	$L T^{-1}$
p	pressão estática do fluido	$M L^{-1} T^{-2}$
p_1	pressão estática do fluido no ponto 1	$M L^{-1} T^{-2}$
p_2	pressão estática do fluido no ponto 2	$M L^{-1} T^{-2}$
L	altura do meio poroso	L
m	força resistiva	$M L^{-2} T^{-2}$
k	permeabilidade do meio poroso	L^2

C	constante empírica do meio poroso	-
Re_{MP}	Número de Reynolds para meio poroso	-
ϕ	esfericidade de partículas	-
ε	porosidade do meio poroso	-
d_p	diâmetro de partícula	L
$d_{p,i}$	diâmetro médio de partículas no recheio i	L
β	constante característica do meio poroso	-
\overline{D}_p	diâmetro médio de Sauter	L
x_i	fração mássica das camadas do recheio i	-
$\overline{D}_\#$	diâmetro médio de abertura de peneiras	L
$d_\#^-$	diâmetro da abertura da peneira que passa todo o material	L
$d_\#^+$	diâmetro da abertura da peneira que retém todo o material	L
t	tempo	T
u	velocidade intersticial do fluido	$L T^{-1}$
τ	tensor tensão do fluido	-
Q	vazão volumétrica do fluido	$L^3 T^{-1}$
D	diâmetro da coluna recheada	L

p_1	pressão estática do fluido no ponto 1	$M L^{-1} T^{-2}$
p_2	pressão estática do fluido no ponto 2	$M L^{-1} T^{-2}$
q_1	velocidade superficial do fluido no ponto 1	$L T^{-1}$
q_2	velocidade superficial do fluido no ponto 2	$L T^{-1}$

SUMÁRIO

Capítulo 1. Introdução	1
Capítulo 2. Objetivos	4
2.1. Objetivo Geral	4
2.2. Objetivo Específico	4
Capítulo 3. Descrição da Unidade DOX	5
3.1. Operação da Unidade DOX	5
2.2. Retrolavagem das Colunas Recheadas.....	9
2.3. Variáveis e Condições Operacionais.....	12
2.4. Motivação e Objetivo	125
Capítulo 3. Fundamentos Teóricos	18
3.1. Escoamento em Meios Porosos	18
3.2. Perda de Carga no Escoamento em Meios Porosos	19
3.3. Modelos Semi-Empíricos para a Força Resistiva m	22
a. Modelo de Darcy.....	22
b. Modelo de Forchheimer.....	23
3.4. Correlações e Modelos para k e	
C.....	244
a. Modelos para k	25
▪ Capilar.....	25
▪ Correlações de Massarani	26

b. Estimativas para C.....	27
▪ Correlação de Ergun	27
▪ Correlação Costa-Massarani	27
3.5. Modelagem via Balanço de Mecânica dos Fluidos.....	248
3.6. Modelagem via Mecânica do Contínuo.....	30
Capítulo 4. Modelagem e Previsões.....	344
4.1. Modelagem do Escoamento	34
4.2. Parâmetros dos Recheios	40
4.3. Parâmetros das Colunas Recheadas	42
4.4. Análises.....	43
a. Cálculos	43
b. Resultados, Gráficos e Discussões	45
▪ Diferencial de Pressão.....	47
▪ Porosidade e Colmatação	53
▪ Turbidez.....	56
Capítulo 5. Conclusões.....	58
Capítulo 6. Trabalhos Futuros	59
Capítulo 7. Revisão Bibliográfica	600
Anexos	62

Capítulo 1. Introdução

Na década dos anos 50, a petroquímica no Brasil iniciou sua história quando um novo produto passou a ter uma demanda intensiva no país: o plástico. Em meio ao clima desenvolvimentista e modernizador do período, o consumo crescia rapidamente, sinalizando a necessidade de estabelecer uma indústria nacional capaz de atendê-lo, pois até então, o país supria suas demandas com importações.

A cadeia petroquímica é organizada em produtores de primeira, segunda e terceira geração, com base na fase de transformação de várias matérias-primas ou insumos petroquímicos. Representa, portanto, a transformação de subprodutos do refino do petróleo bruto, principalmente nafta ou gás natural, em bens de consumo e bens industriais utilizados para diversas finalidades.

As matérias-primas passam inicialmente por um processo chamado craqueamento, que resulta nos petroquímicos básicos, tais como eteno, propeno e aromáticos.

A BRASKEM, com a aquisição da Quattor, tornou-se a única empresa brasileira de primeira geração, com quatro unidades de craqueamento. Os petroquímicos básicos, que apresentam forma gasosa ou líquida, são vendidos, e transportados por meio de dutos, a produtores de segunda geração, em geral próximo às unidades de craqueamento, promovendo desta forma a integração da cadeia.

Atualmente, os principais pólos petroquímicos da BRASKEM, integrados às centrais de matérias-primas são: Pólo de Capuava (SP), Pólo de Camaçari

(BA), Pólo de Triunfo (RS) e Pólo de Duque de Caxias (RJ).A BRASKEM Duque de Caxias-DCX/RJteve suas operações iniciadas em 2005, sendo o primeiro complexo industrial gás-químico integrado, com as atividades industriais de primeira e segunda geração, com capacidade de produção anual de 520 mil toneladas de eteno e 540 mil toneladas de polietileno.

Nesta unidade de produção de petroquímicos básicos, a principal atividade industrial desenvolvida é a conversão da matéria-prima proveniente do gás natural, etano e propano, em petroquímicos básicos, eteno e propeno, por meio do craqueamento térmico. Por ser uma planta industrial integrada, o eteno gerado na conversão é destinado à unidade de polimerização, de produção de segunda geração, onde o polietileno é produzido. Dentre as etapas e processos industriais constituintes da cadeia produtiva para obter tais produtos desejados, pode-se destacar a relevância de algumas unidades na garantia da qualidade, integridade e continuidade operacional.

Nesta atividade de produção industrial, a carga efluente da etapa de craqueamento térmico da matéria-prima bruta nos fornos de pirólise é resfriada. Os hidrocarbonetos condensados são separados da água, usada no contato direto para resfriamento da carga craqueada, e do vapor de diluição condensado, o qual é bombeado para a Unidade DOX.

A Unidade DOX é composta por duas colunas recheadas e um vaso horizontal que operam com a finalidade de remover gotículas de óleo dispersas e sólidos suspensos de um fluxo aquoso de alimentação, denominado água de processo.

Tendo em vista o enquadramento de recuperação dos parâmetros requeridos da qualidade da água de processo para sua recirculação nas etapas industriais da unidade petroquímica, ou seja, na geração de vapor para a diluição da carga alimentada nos fornos, tornou-se necessário um aprimoramento do conhecimento das condições normais de operação da Unidade a fim de garantir a qualidade da água efluente do tratamento.

Utilizando como base os valores reais de processo das variáveis relacionadas à DOX, obtidos por meio da instrumentação industrial, e os valores de projeto segundo as recomendações operacionais do fabricante, preliminarmente foi possível identificar, através do gradativo aumento da concentração de óleos na corrente efluente do tratamento, perda de eficiência de operação da Unidade. Estudos preliminares foram realizados e identificou-se a possível causa.

Ajustados os parâmetros identificados como causadores dos desvios inicialmente observados, verificou-se o retorno da operação da Unidade dentro das especificações recomendadas, seguindo referências de projeto do *datasheet*.

Considerando que o desempenho da DOX é dependente da qualidade da água de processo e com o conhecimento das campanhas de operação dos equipamentos da Unidade, motivou-se estabelecer um estudo de forma a quantificar o perfil temporal de campanhas do processo de tratamento.

Capítulo 2. Objetivos

2.1. Objetivo Geral

Com base nos dados reais de operação e em equações de conservação (momento linear e energia mecânica) para o fluido em escoamento, objetiva-se estabelecer parâmetros para identificar a redução de eficiência das colunas recheadas relacionada diretamente à progressiva colmatação do meio poroso, através do qual a água de processo escoar.

2.2. Objetivo Específico

Desta forma, conhecendo-se o perfil de redução da porosidade do recheio pelo acréscimo de óleo e de acordo com a concentração média da água de processo alimentada às colunas recheadas da DOX, busca-se a determinação do tempo ótimo da realização de retrolavagem para regeneração dos coalescedores verticais, de forma a otimizar as campanhas de operação da Unidade sem que a eficiência do processo seja comprometida.

Capítulo 3. Descrição da Unidade DOX

3.1. Operação da Unidade DOX

Na unidade BRASKEM de produção de petroquímicos básicos instalada na cidade do Rio de Janeiro, Duque de Caxias, a conversão da matéria-prima, etano e propano em petroquímicos básicos, eteno e propeno, ocorre por craqueamento. Dentre as etapas e processos industriais para obter tais produtos, destacam-se algumas unidades funcionalizadas para a garantia da qualidade, integridade e continuidade operacional.

A Unidade DOX é composta por vasos de processo que são combinados com a finalidade de remover hidrocarbonetos dispersos (gotículas de óleo) e sólidos em suspensão de um fluxo aquoso de alimentação, por coalescência e retenção física através do meio poroso (segundo *datobook* da Unidade DOX). Conforme pode ser visto na figura 1, este fluxo de alimentação, água de processo (*PW – Process Water*), é proveniente do vaso separador de águas, denominado *SETTLER*, onde hidrocarbonetos condensados na torre de *QUENCH* (resfriamento do gás craqueado efluente dos fornos pelo contato direto, em contracorrente, com água) são separados da água de resfriamento recirculante (*QW – Quench Water*) e do vapor de diluição condensado (bombeado para a DOX).

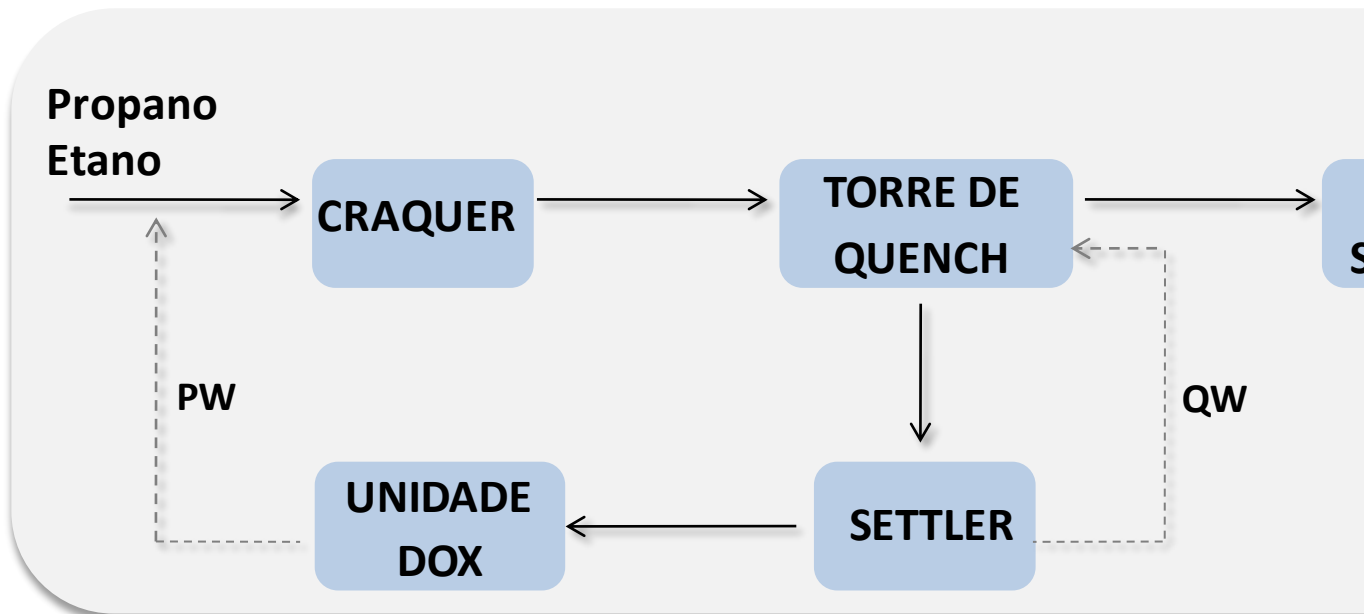
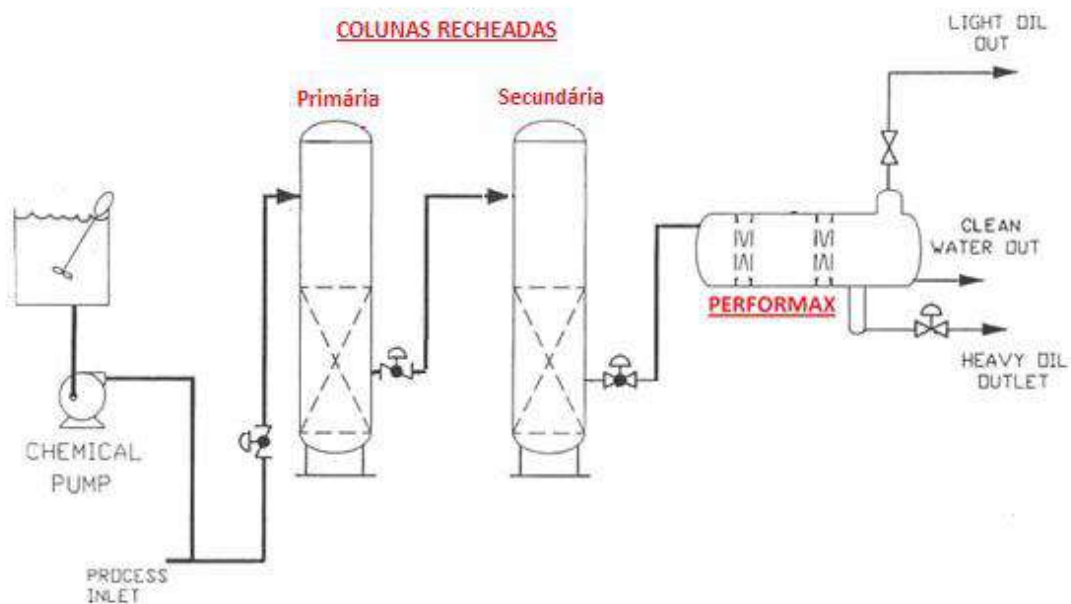


Figura 1: Etapas do processo produtivo.

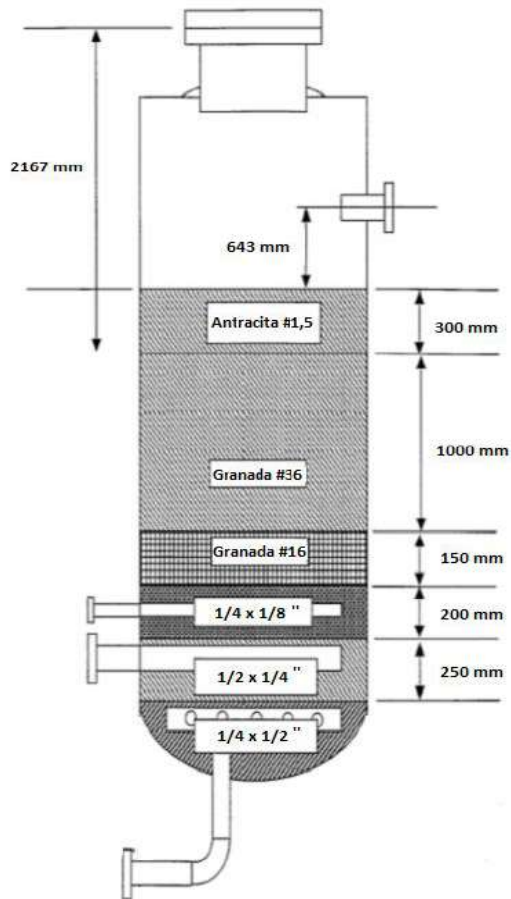
A Unidade possui duas colunas recheadas (coalescedores verticais) e um vaso horizontal coalescedor Performax (Figura 2). O fluxo de processo é alimentado, em série, nas colunas onde é obtida a coalescência preliminar. Em condições normais de operação, a vazão de água de processo é alimentada no coalescedor primário e, em seguida, escoam para o secundário, que aprimora o processo de coalescimento dos hidrocarbonetos. O coalescedor secundário continua a coalescência goticular, de forma que as gotículas de óleo se aglutinem até ficarem suficientemente grandes para serem removidas por decantação gravitacional no Performax. Finalmente, o fluxo aquoso escoam através do coalescedor horizontal para completar o processo de coalescência e separar as frações de óleo leve e pesado da água de processo.



Fonte: *Databook*, modificado, da Empresa.

Figura 2: Unidade DOX – Coalescedores primário e secundário em operação.

De acordo com as informações obtidas do material da Unidade, o meio granular cuidadosamente selecionado das colunas recheadas consiste de três materiais: antracita, granada e cascalho, conforme ilustrado na Figura 3, cuja finalidade é garantir uma boa distribuição, sedimentação mínima, distribuição correta das camadas do recheio e a rápida coalescência de hidrocarbonetos. O Performax contém meio grosso (matriz Performax) e fino (tela lipofílica) no recheio, que efetivamente remove as gotículas de óleo dispersas. Os hidrocarbonetos leves flutuam na água, enquanto o óleo pesado sedimenta no fundo e é removido através da descarga de dreno.



Fonte: *DataBook* da Unidade DOX.

Figura 3: Coalescedor vertical e camadas de recheio.

Quando propriamente operada, a Unidade DOX produz como efluente uma água de processo livre de sólidos e hidrocarbonetos em dispersão e com teor normal de hidrocarbonetos solúveis na água. Desta maneira a água pode ser recirculada no processo para a geração de vapor (diluição), a ser incorporado nas correntes de etano e propano destinadas ao craqueamento térmico. Neste, a função do vapor é reduzir a pressão parcial para aumentar a seletividade de conversão da matéria prima em produto desejado, ou seja, eteno e propeno.

Sendo assim, a requisição da qualidade da água efluente da DOX a recircular no processo está diretamente associada aos equipamentos que são usuários dessa água, buscando evitar a incrustação de sólidos ou óleo nos mesmos.

3.2. Retrolavagem das Colunas Recheadas

A retrolavagem ocorre quando o recheio da coluna está colmatado pela presença de sólidos e óleo, que acontece na campanha de operação normal da Unidade DOX (Figura 4). As gotículas de óleo, após a coalescência preliminar sobre a superfície das partículas do recheio das colunas, são aglutinadas e formam gotas maiores de óleo que se desprendem das partículas sob a influência do fluxo aquoso que escoar pelo meio. Entretanto, poderá haver momentos em que essas gotas de óleo coalescido ficam retidas entre as partículas do meio poroso, reduzindo por contingência a porosidade do recheio e conferindo o efeito de colmatação. Desta maneira, a retrolavagem busca recuperar a capacidade e a eficiência das colunas recheadas na operação de tratamento da água de processo.

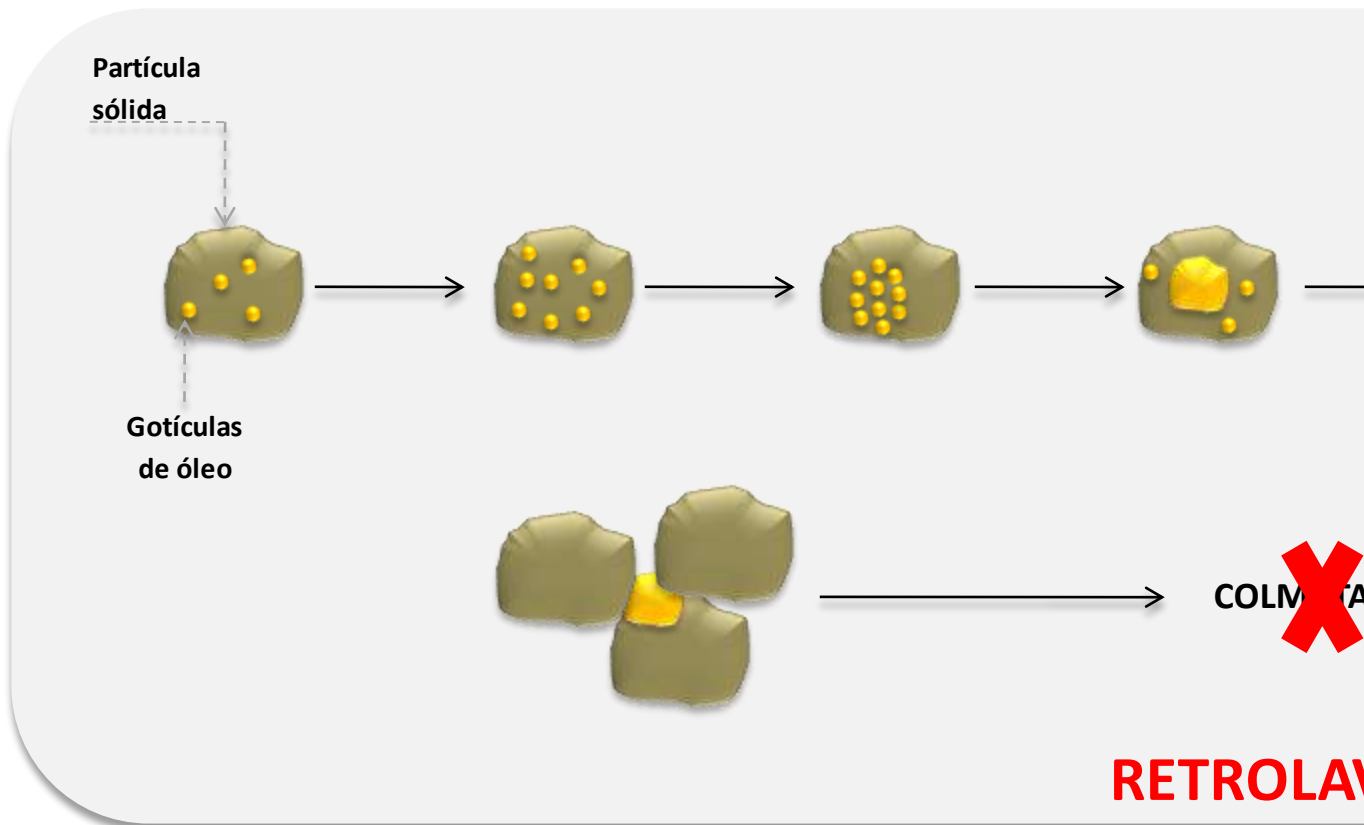


Figura 4: Coalescência de gotículas de óleo e efeito de colmatação.

Nesta etapa, a direção do fluxo é invertida. A água utilizada na retrolavagem deve ser relativamente livre de óleo e sólidos em suspensão e aquecida, para evitar deposição no meio granular e o alagamento indevido da coluna. Durante a operação de retrolavagem, o recheio é inicialmente expandido hidráulicamente (fluidizado) com a passagem de N_2 , e os sólidos em suspensão e óleos aderidos ao mesmo são em seguida removidos pela passagem da água. O ciclo se inicia pelo bloqueio e remoção do coalescedor primário de operação e a colocação do secundário em serviço do primário (Figura 5). Vale ressaltar que para obter uma regeneração completa são realizados três ciclos, onde as etapas de injeção de N_2 , para fluidização do

meio, e de água, para remoção de óleos do meio filtrante, são respeitadas em cada etapa do ciclo.

O efluente da retrolavagem (água carregada de óleos e sólidos) é destinado à unidade de tratamento de água contaminada, que consiste num vaso (3-FA-1809) com aquecimento por serpentina a vapor, de forma a propiciar a continuidade da temperatura elevada deste efluente, para auxiliar no processo de separação (decantação) de óleos da água, devido à redução da viscosidade do óleo, aumento do movimento das gotas da fase dispersa e ao aumento da diferença de densidade entre os componentes.

Sendo assim a água de retrolavagem, utilizada nas colunas recheadas da DOX, após o tratamento é enviada a um tanque (1-FB-1201), armazenando-a até a realização da próxima regeneração do recheio.

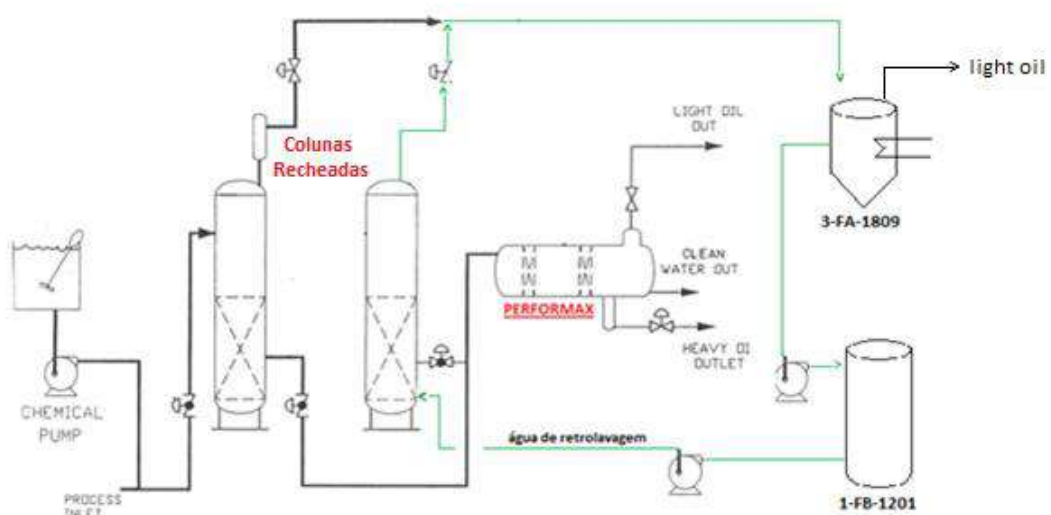


Figura 5: Unidade DOX – Coalescedor primário em operação, coalescedor secundário sob retrolavagem.

3.3. Variáveis e Condições Operacionais

A Unidade DOX de recuperação e enquadramento dos parâmetros acompanhados da água de processo apresenta especificações de operação recomendadas, com bases em valores de projeto, para garantir a funcionalidade adequada, com preservação da integridade dos equipamentos e a eficiência operacional.

Sabendo da importância operacional do tratamento, recuperação e qualidade da água de processo para sua recirculação nas etapas industriais do processo produtivo da unidade petroquímica, torna-se necessário o conhecimento das variáveis e condições operacionais da Unidade. Vale ressaltar que todos os parâmetros identificados e especificados neste capítulo foram baseados em informações obtidas do material teórico *databook* da Unidade DOX, que contém informações do fabricante da mesma.

De maneira objetiva, a eficiência de projeto da DOX, é recuperar 90% dos hidrocarbonetos dispersos na água de processo. Para atingir tal eficiência, o teor de óleo na corrente que alimenta a Unidade deverá ser inferior ao limite de 200mg/L. Para garantir a integridade das operações que utilizam a água recirculada e recuperada na DOX, o teor de óleo nesta não deverá exceder o valor recomendado de 20mg/L.

As variáveis intrínsecas do processo que influenciam no perfil de eficiências da Unidade DOX são acompanhadas com base no seu potencial de relevância. Operacionalmente, como identificação inicial, a vazão da corrente de entrada define o tempo de residência desta nas colunas da Unidade e, por sua vez, afeta o processo de coalescência. Pode influenciar na ocorrência de turbulência promovida por altas vazões que, além de prejudicar a separação, poderá promover o arraste da fase oleosa retida no recheio das colunas.

Em adição, a qualidade da água de processo é determinada pela quantidade de sólidos e óleo, na forma de gota ou emulsão. A concentração alta destes componentes poderá reduzir o desempenho de separação, além de dificultar a atingir a condição de especificação desejada para a corrente efluente.

Continuamente, o diferencial de pressão dos coalescedores primários deve aumentar linearmente com o tempo de operação. Para os casos onde haja um aumento brusco em um período curto de tempo, pode significar que o teor de sólidos ou óleo da corrente de entrada aumentou acima do normal, que a retrolavagem não foi realizada adequadamente ou que o ciclo de operação está longo demais. De forma contrária, a redução brusca do diferencial de pressão após regeneração poderá significar perda de recheio ou uma indicação incorreta do instrumento, o qual deverá ser verificado adequadamente.

Os valores de projeto das variáveis acima explicitadas podem ser verificados na tabela 1:

Tabela 1: Valores de projeto das variáveis de processo.

Recomendações de projeto das variáveis do processo			
	Unidade	Valor de projeto	Valor limite
Condição de entrada			
Vazão	t/h	44,7	70,14
Teor de óleos e graxas	mg/L	< 200	200
Teor de sólidos em suspensão	mg/L	50	200
Temperatura	°C	82,8 - 83,9	-
Condição de processo			
Diferencial de pressão	Kgf/cm ²	-	0,91
Condição do efluente			
Teor de óleos e graxas	mg/L	<20	20
Teor de sólidos em suspensão	mg/L	<20	20

Desta maneira, objetivamente e com base nas variáveis de processo, o procedimento de retrolavagem deverá ocorrer de forma eficiente para a garantia da integridade do recheio e retorno do mesmo à operação em condições favoráveis à continuidade de sua eficiência operacional. Os parâmetros utilizados como indicativos para a realização da retrolavagem são fundamentados nos tempos de operação das colunas com atividade primária, atualmente em 60 horas, ou no diferencial de pressão de operação das colunas de 0,91kg_f/cm².

Conceitualmente, os parâmetros de projeto relacionados ao processo de retrolavagem das colunas eram baseados na recomendação de ciclos em intervalos de 12 horas, e com tempo de decantação no vaso 3-FA-1809, com aquecimento à vapor, de 4 horas. Torna-se necessário ressaltar que o intervalo entre ciclos de retrolavagem, em horas, é traduzido diretamente pelo tempo de campanha da coluna com operação primária. Conclui-se, portanto, que o ciclo total de operação do coalescedor é o dobro do período da operação primária,

ou seja, metade do período operando como secundário (após o retorno da etapa de regeneração do recheio) e a outra metade como primário.

Conforme visto acima, os ciclos de retrolavagem foram aumentados para intervalos de 60 horas. Entretanto, o tempo de decantação no vaso com aquecimento, que promove a separação água e óleo por diferença de densidade não foi alterado.

Seguindo o entendimento que esta unidade é dependente de uma condição variável do perfil da água de processo que alimenta os equipamentos (Coalescedores verticais e horizontal Performax) em função das matérias primas do processo e da funcionalidade das etapas anteriores, observou-se preliminarmente uma alteração na eficiência operacional da Unidade com base no parâmetro da qualidade da água de processo efluente do tratamento, onde a mesma passou a apresentar teor de óleo próximo ao limite estabelecido por projeto (20 mg/l).

3.4. Motivação

Frente à importância de processo da DOX, decidiu-se estruturar o estudo preliminar da Unidade ao analisar a eficiência operacional. A identificação inicial foi relativa ao tempo de decantação da água efluente da retrolavagem. Após identificar que o tempo de decantação no vaso ainda continuava fixado no valor de projeto, 4 horas, realizou-se um estudo para determinação do tempo então necessário para ciclos de retrolavagem em intervalos de 60 horas.

Para tal estudo, foram realizadas 5 amostras, em tempos de 0, 4, 8, 12 e 24 horas, diretamente no vaso com aquecimento à vapor (3-FA-1809) após a retrolavagem do coalescedor primário. As amostragens foram analisadas, pelo laboratório da unidade petroquímica, pelo método descontínuo por extração com solvente Soxhlet (óleo é mais solúvel no solvente orgânico do que na água). Após evaporação do solvente utilizado, o óleo extraído é então pesado e desta forma determina-se a massa de óleo presente na amostra coletada e analisada. Com o conhecimento do volume e a determinação da concentração de óleo em cada amostra, pode-se verificar o perfil de desconcentração da água de retrolavagem em função do tempo de permanência da mesma no vaso com aquecimento. Após os resultados e as análises, foi estabelecido o novo tempo de decantação de 20 horas necessário para ciclos de retrolavagem com intervalos de 60 horas.

Com base nesta nova determinação implementou-se a alteração necessária no sistema. Após essa modificação, observou-se uma melhoria significativa da qualidade da água de processo efluente da DOX, passando a apresentar concentração de óleo bem inferior ao limite recomendado de projeto. Pode-se concluir, portanto, que a retrolavagem não estava sendo realizada dentro dos parâmetros recomendados para sua efetividade, uma vez que a água utilizada neste processo apresentava teor de óleo superior à recomendada, devido à separação ineficiente. Dessa maneira, as colunas recheadas da Unidade não estavam sendo regeneradas de forma adequada.

Após o retorno da operação da DOX às condições verificadas em períodos anteriores do histórico da Unidade, busca-se agora aprofundar os

estudos e obter melhor compreensão sobre outros fatores que também podem influenciar nas campanhas de operação das colunas verticais recheadas.

Capítulo 4. Fundamentos Teóricos

4.1. Escoamento em Meios Porosos

Este item é inteiramente baseado em Peçanha (2012/2).

Em muitas operações industriais, a fase fluida escoar através de uma fase sólida particulada, estacionária, denominada meio poroso. As colunas recheadas promovem o contato íntimo entre as fases envolvidas no processo (fase gasosa ou líquida com a fase estacionária), podendo ser usadas, por exemplo, para a adsorção seletiva de componentes de misturas de gases ou de soluções líquidas. Neste caso, o líquido escoar recobrir a superfície do recheio de partículas constituintes do meio poroso. Posteriormente, regenera-se o adsorvente com outro gás ou líquido, introduzido no leito através de orifícios do distribuidor (chapa horizontal com múltiplas perfurações) com velocidade suficiente para o leito tornar-se fluidizado e permitir a regeneração do mesmo. Na fluidização ocorre a expansão do recheio, onde o mesmo mantém a integridade da sua superfície horizontal superior, da mesma forma que a mantinha quando estava estacionário (Foust, 1980).

Em algumas unidades são utilizadas mais de uma coluna. Por análise, esta combinação permite operações mais prolongadas, antes de ser necessária lavagem em corrente reversa para remoção de partículas ou flocos que ficam retidos na matriz do leito original.

Durante o ciclo de operação, chega-se um ponto em que a vazão da coluna cai ou em que o diferencial de pressão torna-se excessivo. Neste instante, o acúmulo de componentes da mistura, que alimenta a coluna e que

são adsorvidos pelas partículas constituintes do leito devido à transferência de massa entre as fases em contato, promove a redução da porosidade do leito conferindo o efeito conhecido de colmatação. O escoamento de operação cessa e o leito deverá ser limpo.

Os leitos granulados das colunas recheadas são constituídos por uma ou mais camada de sólidos particulados, geralmente suportados por um leito de cascalho (Foust, 1980).

4.2. Perda de Carga no Escoamento em Meios Porosos

Meios porosos podem ser considerados “acidentes” análogos a curvas (ou “joelhos”) e válvulas, comumente presentes em tubulações, entendendo-se dessa maneira o conceito de “perda de carga acidental” (ou localizada) associada ao meio poroso.

A perda de carga associada ao escoamento de fluidos em meios porosos pode ser calculada combinando-se a equação da energia mecânica (mais conhecida como equação de Bernoulli modificada ou corrigida) e a equação do movimento para o fluido. É fundamental ressaltar que o conceito de perda de carga está associado a uma queda de pressão estática oriunda exclusivamente do atrito fluido – sólido, excluindo-se, portanto, as quedas de pressão estática relacionadas a variações de energia potencial gravitacional e energia cinética do fluido, eventualmente presentes no sistema.

Respeitando as seguintes considerações:

- ✓ escoamento isotérmico;
- ✓ regime permanente;
- ✓ fluido incompressível;
- ✓ operador Δ : valor na saída– valor na entrada;
- ✓ eixo z paralelo e de sentido oposto a gravidade;

A conservação da energia mecânica do escoamento de fluidos é descrita pela equação:

$$\frac{\Delta p}{\rho g} + \frac{\Delta q^2}{2g} + \Delta z = -H_L - H_s \quad (4.2.1)$$

onde $\Delta p/\rho g$ é a variação da carga de pressão, $\Delta q^2/2g$ é a variação da carga de velocidade superficial, Δz variação de carga de altura, H_L é a perda de carga em tubos, acidentes e em meio poroso e H_s a carga de eixo responsável pela presença de máquinas/eixos (p.ex., bombas e turbinas) no sistema.

Para um meio poroso vertical, como no caso da unidade DOX, onde o fluido escoar no interior de um tubo de diâmetro uniforme D , considera-se a variação de velocidade superficial nula ($\Delta q^2 = 0$). Neste caso, a equação da energia mecânica para o fluido em escoamento vertical fornece:

$$\frac{\Delta p}{\rho g} + \Delta z = -H_L \quad (4.2.2)$$

onde:

$$H_L = H_{L,tubos} + H_{L,acidentes} + H_{L,MP} \quad (4.2.3)$$

Para meios porosos, a perda de carga $H_{L,MP}$ associada é descrita pela equação:

$$H_{L,MP} = \frac{|\mathbf{m}| * L}{\rho g} \quad (4.2.4)$$

Onde \mathbf{m} é a força resistiva por volume de mistura que o fluido exerce sobre o sólido contido neste volume, a ser detalhada no próximo tópico, e L é o comprimento (altura) do meio poroso, ρ é a densidade do fluido e g é a aceleração da gravidade local.

Assim, no escoamento em meios porosos com seções transversais de área constante ($\Delta q^2 = 0$) e em ausência de cargas de eixo ($H_S = 0$), pode-se substituir H_L na equação 4.2.2 pelo $H_{L,MP}$ (equação 4.2.4), resultando a seguinte equação da energia mecânica:

$$\frac{\Delta p}{\rho g} + \Delta z = - \frac{\mathbf{m} * L}{\rho g} \quad (4.2.5)$$

Note que a equação da energia mecânica (escalar) é fácil de ser usada uma vez que é desnecessário escolher um sistema de coordenadas, especificar a orientação espacial de seus eixos bem como fixar sua origem. Além disso, não há a necessidade de se compatibilizar os sinais algébricos da velocidade superficial do fluido (q) e da aceleração da gravidade (g) face ao

referencial escolhido. É necessário apenas lembrar a definição do operador Δ (valor na saída – valor na entrada) e que o eixo z tem sentido oposto a g.

4.3. Modelos semi-empíricos para a força resistiva \underline{m}

a. Modelo de Darcy

Engenheiro civil que trabalhava para a prefeitura da cidade de Dijon, França, Darcy (1856), realizou uma série de experimentos sobre o escoamento de água, por gravidade, através de colunas recheadas de areia. Os dados obtidos foram correlacionados resultando na conhecida lei de Darcy para o escoamento de fluidos em meios porosos, e que equivale a:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{\mu}{k} q \quad (4.3.1)$$

onde Δp é a queda de pressão através do leito, μ é a viscosidade da água e k é uma constante de proporcionalidade empírica denominada permeabilidade do meio poroso e relacionada à sua conformação geométrica.

Observe que atribuir a k o nome permeabilidade tem a ver com o fato de k ter sido arbitrariamente introduzido no denominador da fração. Se, para dado q , k aumenta, resulta que $\Delta p/L$ diminui. Daí o nome permeabilidade, pois quanto mais permeável (isto é, maior k) for o meio poroso, menor é queda de pressão associada ao escoamento para um dado q .

Pela lei de Darcy, é possível escrever a equação da força resistiva \underline{m} :

$$\underline{m} = \frac{\mu}{k} \underline{q} \quad (4.3.2)$$

A dependência linear de \mathbf{m} com \mathbf{q} prevista na equação da força resistiva pela lei de Darcy só é correta para os casos de escoamentos em baixas velocidades e meios porosos onde k não depende da direção espacial considerada.

Em homenagem a Darcy, foi definida uma unidade de permeabilidade para meios porosos conforme segue:

$$1 \text{ Darcy (D)} \equiv 10^{-8} \text{ cm}^2 \quad (4.3.3)$$

b. Modelo de Forchheimer

O modelo semi-empírico para força resistiva \mathbf{m} de Forchheimer é baseado em escoamentos em altas velocidades.

Forchheimer (1901), um engenheiro civil que lecionava na Universidade Técnica de Graz, Austria, estudou o escoamento de água em meios porosos. Ele verificou que para altas velocidades os efeitos de inércia, isto é, proporcionais à densidade da água, dominavam o escoamento. A lei de Darcy foi então modificada mediante a introdução de um segundo termo, levando em consideração as variações de energia cinética do fluido no meio poroso, que são proporcionais à sua densidade e ao quadrado de sua velocidade. Assim, a força resistiva passa a ser expressa como:

$$\mathbf{m} = \frac{\mu}{k} \left(1 + \frac{C \sqrt{k} \rho \|\mathbf{q}\|}{\mu} \right) \mathbf{q} \quad (4.3.4)$$

onde **C** é uma constante empírica e adimensional relacionada à conformação geométrica do meio poroso, mas que não tem qualquer denominação. Observe que o modelo de Forchheimer possui um termo linear em q e outro quadrático em q .

Para classificar um escoamento em meios porosos em relação à velocidade avalia-se o grupo adimensional do tipo Reynolds para este tipo de escoamento, conforme identificado no segundo termo no interior dos parênteses da equação 4.3.4:

$$Re_{MP} = \frac{C \sqrt{k} \rho \|\mathbf{q}\|}{\mu} \quad (4.3.5)$$

Note que quando Re_{MP} é muito menor que 1, o valor da expressão entre parênteses na equação 4.4.4 tende para 1 e recai-se na lei de Darcy, ou seja, $Re_{MP} \ll 1$ é o critério para classificar um escoamento em meio poroso como sendo de baixas velocidades.

4.4. Correlações e Modelos para k e C

Os modelos e correlações para estimativas dos valores de k e C de meios porosos são utilizados quando não se dispõe de infraestrutura laboratorial para a realização de ensaios de permeamtria, técnica experimental de medidas de vazão e queda de pressão no escoamento de fluidos através do meio poroso.

Conhecendo-se informações sobre o meio poroso, como diâmetro médio de partículas e porosidade, torna-se possível obter boas estimativas de k e C com a utilização dos modelos e correlações.

a. Modelos para k

▪ Modelo Capilar

Comumente citado como modelo de Kozeny-Carman, este modelo está intimamente associado a trabalhos de Blake (1922), Kozeny (1927) e Carman (1937).

Este modelo baseia-se em um meio poroso formado por um feixe de tubos capilares retos, razão pela qual ele é comumente referido como “modelo capilar”. O modelo impõe a igualdade das áreas superficiais e porosidades do meio poroso de tubos capilares e do meio poroso real. A lei de Darcy (4.3.2) e a equação de Hagen - Poiseuille, que relaciona queda de pressão e vazão no escoamento de fluidos newtonianos em tubos capilares, são usadas no desenvolvimento do modelo. Sua dedução é relativamente simples e pode ser vista passo-a-passo em Massarani (2002), onde o modelo é colocado sob a forma:

$$k = \frac{(\phi d_p)^2 \varepsilon^3}{36 \beta (1 - \varepsilon)^2} \quad (4.4.1)$$

onde β é uma constante adimensional característica do meio poroso e ϕ a esfericidade característica das partículas.

A equação 4.4.1 indica que a constante de permeabilidade do meio, k , depende tanto da forma quanto da distribuição de tamanhos das partículas bem como da porosidade do meio poroso. Para meios porosos não consolidados formados com partículas idênticas e de geometria simples tem-se $3,5 < \beta < 5,5$ (Coulson and Richardson, 1978). Para meios formados com esferas idênticas de diâmetro D , Massarani (1971) mostrou que $\beta \cong 4,167$. Meios porosos constituída a partir de grãos, isto é, partículas com esfericidade na faixa 0,6 – 0,8, tem-se $\beta \cong 5,0$.

Para recheios formados com partículas de tamanhos diversificados, usa-se o diâmetro médio de Sauter em termos de d_p :

$$k = \frac{(\phi \bar{D}_p)^2 \varepsilon^3}{36 \beta (1 - \varepsilon)^2} \quad (4.4.2)$$

O diâmetro médio de Sauter é calculado levando-se, também em consideração, a fração mássica x_i do recheio de partículas do meio poroso:

$$\bar{D}_p = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{x_i}{d_{p,i}}} \quad (4.4.3)$$

- **Correlações de Massarani (1971)**

Para grãos com esfericidade ϕ com valor entre 0,6 – 0,8, tem-se:

$$k = \frac{\bar{D}_\#^2}{961} \quad (4.4.4)$$

Para recheios industriais (selas de Berl® e anéis de Raschig®)

$$k = \frac{d_p^2}{1030} \quad (4.4.5)$$

b. Estimativas de C

▪ **Correlação de Ergun (1952)**

$$C = \frac{0,143}{\varepsilon^{3/2}} \quad (4.4.6)$$

Restrições: $10^{-6} \leq k \text{ (cm}^2\text{)} \leq 10^{-4}$; $0,35 \leq \varepsilon \leq 0,45$

▪ **Correlação de Costa - Massarani (1982)**

$$C = \varepsilon^{-3/2} \left[0,13 \left(\frac{k_0}{k} \right)^{0,37} + 0,10 \left(\frac{k_0}{k} \right)^{0,01} \right]^{0,98} \quad (4.4.7)$$

onde $k_0 = 10^{-6} \text{ cm}^2$

Restrições: $10^{-9} \leq k \leq 10^{-3}$; $0,10 \leq \varepsilon \leq 0,75$

Vale destacar que as faixas de **k** e **ε** da correlação de Costa - Massarani (1982) são muito mais amplas que as da correlação de Ergun (1952).

4.5. Modelagem via Balanço de Mecânica dos Fluidos

Ressalta-se que essa modelagem que se segue é puramente hidrodinâmica, isto é, assume que não há transferência de massa entre as fases fluida e particulada, e que as interações entre fluido e meio poroso são exclusivamente de natureza mecânica.

O fluido escoar através dos espaços livres do meio poroso, denominados poros. Nota-se que, analogamente ao escoamento em tubos, sobre as seções transversais dos poros existem perfis de velocidades intersticiais (velocidade do fluido nos poros – u). Devido à diversidade aparente na geometria dos poros, a velocidade do fluido num dado instante, varia ponto - a - ponto, tanto em módulo quanto em direção (Figura 6).

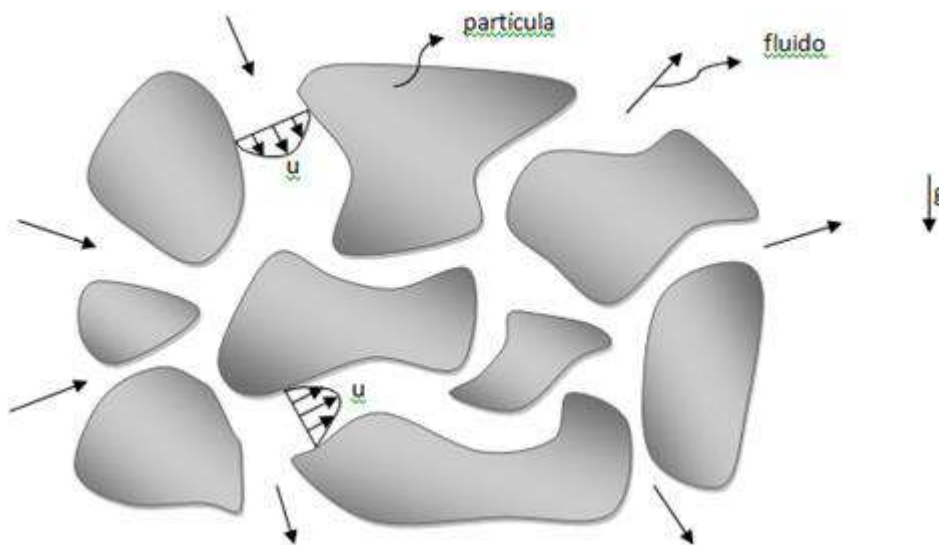


Figura 6: Escoamento do fluido no meio poroso.

Para descrever o escoamento nos meios porosos utilizam-se as equações clássicas de balanço de Mecânica dos Fluidos:

- ✓ Equação da continuidade (conservação de massa do fluido):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (4.5.1)$$

- ✓ Equação do Movimento (conservação do momento linear do fluido):

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\text{grad } \mathbf{u}) \mathbf{u} \right] = - \text{grad } p + \text{div } \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} \quad (4.5.2)$$

onde t é tempo, \mathbf{u} é a velocidade intersticial do fluido, p é a pressão estática do fluido, $\boldsymbol{\tau}$ é o tensor tensão no fluido. Essas equações de balanço dizem respeito a um volume de controle infinitesimal (dV), cartesiano no caso, localizado no interior de um poro e através do qual o fluido escoar.

Os termos que fazem parte da equação da continuidade do movimento apresentam unidade de força por volume e seguem abaixo com a identificação de seus significados físicos:

$\partial \mathbf{u} / \partial t$ - aceleração local; leva em conta variações de \mathbf{u} em dada posição espacial do campo de escoamento.

$(\text{grad } \mathbf{u}) \mathbf{u}$ - aceleração convectiva; leva em conta variações de \mathbf{u} associadas ao próprio escoamento do fluido ao transitar entre seções transversais do campo de escoamento com perfis de velocidades e pressões distintas.

$\text{grad } p$ - forças de pressão (normais) por unidade de volume de fluido.

$\text{div } \boldsymbol{\tau}$ – forças viscosas (normais e cisalhantes) por unidade de volume de fluido, oriundas da permuta (térmica e aleatória) de moléculas de camadas fluidas contíguas que escoam com velocidades distintas.

$\rho \mathbf{g}$ – peso do fluido por unidade de volume de fluido.

Em um tubo cilíndrico a condição de contorno conhecida como condição de aderência (ou de não-deslizamento), necessária à integração das equações da continuidade e do movimento para o fluido em escoamento, é expressa matematicamente de maneira muito simples. Entretanto, já no caso do escoamento em meios porosos, a condição de aderência ocorre sobre a superfície de cada partícula em contato com o fluido. Para expressá-la matematicamente seria necessário estabelecer uma função geométrica que descrevesse a totalidade dessa superfície de partículas, o que na prática é totalmente inviável.

4.6. Modelagem via Mecânica do Contínuo

O modelo de meio contínuo nega a estrutura atômico-molecular da matéria, segundo a qual existe espaçamento entre os átomos de uma molécula bem como espaçamento ainda maior entre as próprias moléculas. Segundo o modelo, propriedades físicas (p. ex., densidade e viscosidade) e propriedades de escoamento (p. ex., velocidade e pressão) são definidas nos pontos do espaço ocupado pela mistura sólido-fluido.

Pela Teoria de Misturas (Truesdell, 1957), as fases que constituem a mistura coexistem no volume infinitesimal, temos:

✓ Equação da continuidade (conservação de massa do fluido):

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \operatorname{div}(\varepsilon \rho \mathbf{u}) = 0 \quad (4.5.3)$$

✓ Equação do movimento (Conservação do momento linear do fluido):

$$\varepsilon \rho \left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\text{grad } \mathbf{u}) \mathbf{u} \right] = - \text{grad } p + \text{div } \boldsymbol{\tau} - \mathbf{m} + \rho \mathbf{g} \quad (4.5.4)$$

onde ε é a porosidade do meio poroso e ρ_s é a densidade do sólido. Pela definição da força resistiva \mathbf{m} estar relacionada à ação do fluido sobre o sólido, na equação 3.5.4 ela é antecedida de sinal negativo, uma vez que a força que o sólido faz sobre o fluido tem mesmo módulo, mesma direção e sentido oposto (3ª lei de Newton ou Princípio da ação e reação).

Adotam-se as hipóteses simplificadoras:

- ✓ fluido newtoniano (caso em que $\text{div } \boldsymbol{\tau} = \mu \nabla^2 \mathbf{u}$);
- ✓ meio poroso rígido (caso em que ε não varia com o tempo);
- ✓ meio poroso estacionário;
- ✓ escoamento isotérmico (caso em que a temperatura é constante).

Define-se então:

$$\mathbf{q} \equiv \varepsilon \mathbf{u} \quad (4.5.5)$$

onde \mathbf{q} é a velocidade superficial do fluido, conceito introduzido anteriormente.

A Figura 7 mostra um meio poroso contido no interior de tubo cilíndrico horizontal de diâmetro interno D , através do qual escoam um fluido incompressível e newtoniano com vazão volumétrica constante Q , conforme indicado.

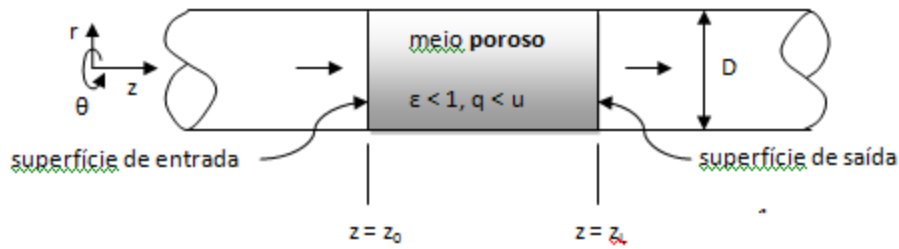


Figura 7: Escoamento em meio poroso horizontal.

A velocidade superficial média do fluido antes e depois do meio poroso, e, também sobre suas superfícies de entrada e saída, é $4 Q/\pi D^2$.

O escoamento de fluidos newtonianos em meios porosos, especialmente o de água e ar, já estudado do ponto de vista experimental, indicam que o termo $\text{div } \boldsymbol{\tau}$, representativo das interações fluido – fluido de natureza viscosa, geralmente tem contribuição desprezível quando comparada aos demais termos da equação 4.5.4. Desta forma a quinta hipótese simplificada adotada é:

- ✓ $\text{div } \boldsymbol{\tau} = \mathbf{0}$ (caso em que as interações viscosas fluido – fluido são desprezíveis).

A aplicação das hipóteses simplificadas e o rearranjo da equação 4.5.4 traduzem a nova formulação da Equação do Movimento do momento linear do fluido:

$$0 = -\text{grad } p - \mathbf{m} + \rho \mathbf{g} \quad (4.5.5)$$

Tornam-se necessárias as etapas essenciais de definição do eixo de coordenadas, orientação da velocidade superficial \mathbf{q} paralelo à direção do

escoamento e a direção **g** (perpendicular em escoamento horizontal ou paralelo em escoamento vertical em relação à direção do escoamento).

Para escoamentos verticais orientados paralelamente à aceleração da gravidade, e na mesma direção, tem-se:

$$\frac{p_2 - p_1}{L} = \mathbf{m} + \rho g \quad (4.5.6)$$

onde p_1 é a pressão do fluido no início do meio poroso e p_2 é a pressão do fluido no final do escoamento, ao passar pelo meio poroso. A força resistiva **m** será adotada seguindo os modelos empíricos expostos no próximo item, neste capítulo.

Capítulo 5. Modelagem e Previsões

5.1. Modelagem do Escoamento

Conforme visto anteriormente, a funcionalidade da Unidade DOX aplica-se ao tratamento/recuperação dos parâmetros acompanhados da qualidade da água de processo para que sua recirculação no processo industrial, como vapor de diluição, seja viabilizada.

Baseando-se nos parâmetros diretos que influenciam no processo da Unidade, sabe-se que o teor de óleo disperso e sólidos suspensos na água de processo apresentam significativa relevância. Limitado à tecnologia disponível na Empresa e à realização de análises, o único desses parâmetros que é analisado é o de concentração, em mg/l, de óleo na água de alimentação. Historicamente, por acompanhamento visual, não identifica-se presença de sólidos em suspensão na água de processo. Utilizando esta informação, será avaliado o perfil de colmatação do meio poroso considerando-se apenas a existência de óleo na corrente de entrada da DOX.

Posto isto, sabendo-se da condição de aplicação das equações da fundamentação teórica, de movimento e energia mecânica, estar diretamente associada a escoamentos monofásicos, será admitido que a mistura água-óleo a ser tratada na Unidade assume propriedades físicas e químicas semelhantes à da água, uma vez que a concentração de óleos dispersos na água apresenta valores baixos, onde o limite operacional de projeto, não relatado nos dados coletados no histórico, é de 200mg/l.

Ressaltando-se o objetivo de determinar o tempo ótimo de realização da retrolavagem dos coalescedores verticais, colmatados devido a sua operação normal, serão modelados o perfil do aumento do diferencial de pressão e o perfil de porosidade do meio, ambos em função do tempo de operação de cada coalescedor em suas respectivas campanhas primárias.

Para realização de cada perfil acima exposto, torna-se necessário a aplicação da fundamentação teórica estudada no capítulo anterior. Adotando-se a modelagem de perda de carga via equação da mecânica do escoamento, item 4.2 do capítulo 4, faz-se destaque na Figura 8 aos referenciais que serão adotados em diante para realização dos cálculos.

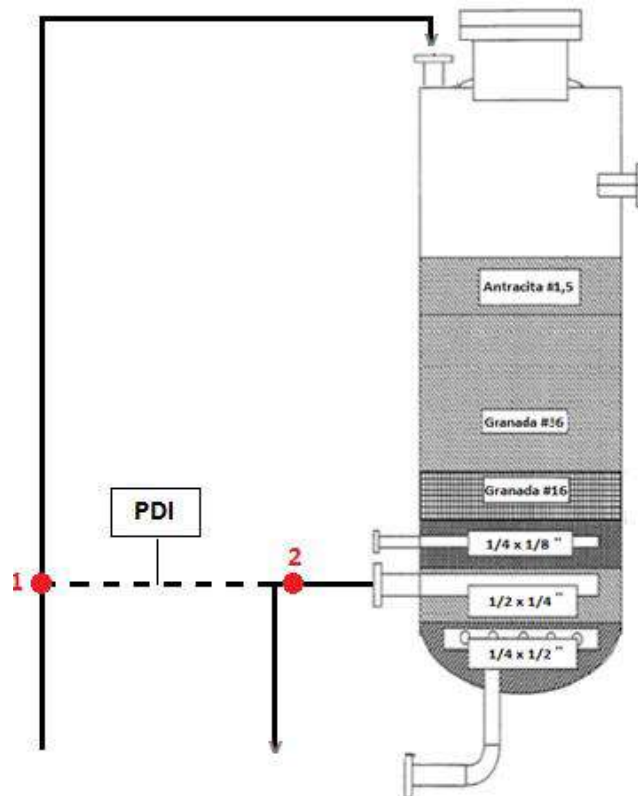


Figura 8: Referenciais adotados para cálculo.

A instrumentação real existente na Unidade é de diferencial de pressão entre os pontos 1 e 2, denominado instrumento PDI.

Para modelagem, as seguintes considerações foram adotadas entre os pontos 1 e 2, inicialmente estabelecidos:

- ✓ perdas de carga em tubos e por acidentes são consideradas desprezíveis quando comparadas à perda de carga do meio poroso de partículas ($H_{L,Tubos} = H_{L,acidentes} = 0$);
- ✓ Carga de eixo não aplicável ($H_s = 0$).

Desta forma, aplicando a equação da mecânica do escoamento do fluido, 4.2.1, entre os pontos 1 e 2, temos:

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{(q_2^2 - q_1^2)}{2g} + (z_2 - z_1) = -H_L \quad (5.1.1)$$

onde q_1 e q_2 são as velocidades superficiais e p_1 e p_2 são as pressões estáticas do fluido nos pontos 1 e 2, respectivamente.

Seguindo as considerações adotadas, reduz-se a equação 4.2.3 à:

$$H_L = H_{L,meio\ poroso} \quad (5.1.2)$$

Conhecendo a Unidade e utilizando como base os dados no anexo deste trabalho, obtém-seas seguintes informações:

$$z_1 = z_2 \quad (4.1.3)$$

$$q_1 = q_2 \quad (5.1.4)$$

Substituindo as equações 5.1.2, 5.1.3 e 5.1.4 na equação 5.1.1:

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho g} = - H_{L, \text{meio poroso}} \quad (5.1.5)$$

sendo:

$$H_{L, \text{meio poroso}} = \frac{m * L}{\rho g} \quad (5.1.6)$$

Conforme conhecido de operação:

$$p_1 - p_2 = PDI \quad (5.1.7)$$

Portanto, relacionando as equações 5.1.6, 5.1.7 e 5.1.5, é possível obter:

$$PDI = m * L \quad (5.1.8)$$

Identificado no material teórico da Unidade DOX, *data sheet*, e destacado em momento anterior neste trabalho, o diferencial de pressão do coalescedor vertical em operação primária assume a tendência temporal de crescimento linear. Para avaliar tal informação, utilizou-se o número de Reynolds para escoamento em meios porosos, 4.3.5, ilustrada no capítulo anterior. Os resultados obtidos com o uso desta equação apresentaram valores menores que um, traduzindo o escoamento da dispersão óleo-água neste caso com característica de baixas velocidades (Darcy), confirmando, portanto, a

informação obtida do material teórico da DOX. Vale ressaltar que para esta aplicação fez-se uso da correlação de Costa - Massarani (1982) para a constante C.

Desta maneira, de forma completa, a queda de pressão do escoamento na DOX será calculada pela seguinte equação:

$$PDI = \frac{\mu}{k} * q * L \quad (5.1.9)$$

Nesta, as variáveis PDI, q e L são conhecidas e/ou medidas por instrumentos de processo. A variável μ é obtida pela aproximação do valor da viscosidade da dispersão ao valor da viscosidade da água pura, na temperatura média de operação da água de processo, 80°C. A incógnita a ser calculada, porosidade, estará intrínseca no valor da constante de permeabilidade do meio poroso, **k**. Sendo assim, a determinação da porosidade do recheio das colunas verticais da Unidade será realizada pela utilização do modelo de Kozeny-Carman, que relaciona o valor de k a condições conhecidas do recheio, como esfericidade, diâmetro médio de Sauter das partículas e porosidade do meio (Equação 4.4.2).

Devido a limitações operacionais da DOX, será usada nesta modelagem de cálculos a porosidade média do recheio, visando entender de forma amplificada como o perfil de colmatação ocorre de forma geral no coalescedor vertical, não necessitando, de início, o entendimento mais específico do comportamento e funcionamento de cada camada de partículas.

Como visto, o uso da equação Kozeny-Carman baseia-se no diâmetro médio de Sauter de partículas. Graças ao armazenamento de amostras do material do recheio das colunas no almoxarifado da Empresa, determinou-se o diâmetro médio das partículas dos recheios deantracita e granada. A técnica utilizada foi o peneiramento com peneiras *mesh*. Para cada tipo de recheio, *i*, analisado foram usadas duas peneiras com aberturas próximas. Foram adotadas a peneira em que o material analisado passou totalmente pela abertura ($\#^-$) e a peneira na qual reteve todo o conteúdo de análise ($\#^+$). Os diâmetros de abertura de cada peneira, $d_{\#i}^-$ e $d_{\#i}^+$, foram utilizados para determinação do diâmetro médio de abertura das peneiras pela seguinte equação:

$$\overline{d_{\#i}} = \frac{d_{\#i}^- + d_{\#i}^+}{2} \quad (5.1.10)$$

Vale o destaque para as partículas de cascalhos maiores, as quais não foram analisadas com peneiração, uma vez que os dados fornecidos pelo fabricante na identificação do recheio já configuram os valores da abertura das peneiras provavelmente fundamentados pela mesma análise relatada no parágrafo acima.

Com o auxílio da relação empírica abaixo, obtém-se o valor dos diâmetros médios das partículas de cada camada de recheio.

$$d_{p,i} = \frac{\overline{d_{\#i}}}{0,94} \quad (5.1.11)$$

Então, com o valor das frações mássicas e os respectivos diâmetros médios de cada camada, determina-se o diâmetro médio de Sauter necessário ao uso da equação 4.4.2.

4.2. Parâmetros dos Recheios

Utilizando as equações relacionadas à determinação dos diâmetros das partículas $d_{p,i}$ das 3 camadas superiores do recheio das colunas da DOX, antracita e granada, e a conversão das unidades dos dados dos recheios de cascalhos de polegadas (") para mm, apresenta-se os resultados na Tabela 2:

Tabela 2: Características das partículas – Diâmetros.

CARACTERÍSTICA DAS PARTÍCULAS - DIÂMETROS (mm)				
RECHEIO	$d\#_i^-$	$d\#_i^+$	$\bar{d}\#_i$	$\bar{d}_{p,i}$
ANTRACITA	0,59	0,42	0,51	0,54
GRANADA #16	1,00	0,71	0,86	0,91
GRANADA #36	0,59	0,42	0,51	0,54
1/4" X 1/8"	6,35	3,18	4,77	5,07
1/2" X 1/4"	12,70	6,35	9,53	10,13
3/2" X 1/2"	19,05	12,70	15,88	16,89

As composições mássicas das camadas de partículas são identificadas na Tabela 3:

Tabela 3: Características dos recheios – Massa.

Composição mássica por recheio		
RECHEIO	Massa (lbm)	Massa (kg)
antracita #1,5	2.530,00	1.147,60
granada #16	22.500,00	10.205,93
granada #36	3.400,00	1.542,23
1/4" x 1/8"	3.400,00	1.542,23
1/2" x 1/4"	3.800,00	1.723,67
3/4" x 1/2"	6.800,00	3.084,46

Conforme pode ser visto no material 1 do anexo, a corrente de saída da água de processo que passa pelo recheio da DOX sai na tubulação indicada por N2. Pela figura 2 sabe-se que esta linha de saída da vazão de água de processo da Unidade está presente na quinta camada de recheio de partículas. Sendo assim, as camadas representativas na operação de coalescência nas colunas são as camadas 1, 2, 3, 4 e 5. Isto posto, nas Tabela 4, observa-se as frações mássicas das partículas do recheio necessárias para o cálculo do diâmetro médio de Sauter.

Tabela 4: Característica dos recheios - Fração Mássica.

CARACTERÍSTICA DOS RECHEIOS - FRAÇÃO MÁSSICA				
RECHEIO	MASSA (kg)	FRAÇÃO MÁSSICA	d_{p,i} (mm)	x_i/d_{p,i}
ANTRACITA	1147,6	0,07	0,54	0,13
GRANADA #16	10205,93	0,63	0,91	0,69
GRANADA #36	1542,23	0,10	0,54	0,18
1/4" X 1/8"	1542,23	0,10	5,07	0,02
1/4" X 1/8"	1.723,67	0,11	10,13	0,01

O diâmetro médio de Sauter das partículas do leito das colunas recheadas da DOX é calculado pela equação 4.4.3:

$$\bar{D}_p = 0,97 \text{ mm}$$

Com o conhecimento da não esfericidade das partículas, será adotado um valor de esfericidade ϕ igual a 0,7. Desta maneira, $\beta \cong 5,0$.

4.3. Parâmetros das Colunas Recheadas

No desenho isométrico da Unidade notam-se as dimensões, altura e diâmetro, das colunas recheadas. Neste caso, a variável de interesse é o diâmetro, necessário ao cálculo da área transversal (área perpendicular ao sentido da vazão do fluido), útil na determinação da velocidade superficial, q , de escoamento da água de processo pelo coalescedor vertical.

Assim sendo, o diâmetro da coluna é:

$$D = 2,438 \text{ m}$$

A altura do recheio de partículas responsáveis pelo coalescimento das gotículas de óleo da água de processo é:

$$|\Delta z| = 1,9 \text{ m}$$

4.4. Análises

a. Cálculos

Nesta etapa, decidiu-se estruturar os dados separadamente por coluna, levando-se em consideração cada campanha primária. Num histórico de dados coletados, entre os períodos de janeiro a setembro de 2013, obtiveram-se 48 campanhas para a coluna A e 47 para a B. Devido ao elevado número de dados, será ilustrado neste trabalho apenas o modelo dos cálculos realizados, sendo posteriormente apresentados os resultados das análises gráficas obtidas.

Os valores de viscosidade e densidade necessários aos cálculos serão baseados no valor da água pura na temperatura de 80°C:

$$\rho = 971,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\mu = 0,000354 \frac{\text{N s}}{\text{m}^2}$$

Sendo assim, para cada campanha foi realizada uma tabela de dados (Tabela 5). Nesta tabela, a primeira coluna é referente ao valor do PDI indicado por instrumentos de campo, na área industrial, em kg_f/cm^2 . A sétima coluna é este valor do PDI, porém com conversão de unidades (N/m^2). A sexta coluna é calculada pela equação 5.1.9, onde o valor obtido pelo lado direito da equação é dependente das variáveis de operação listadas nas outras colunas. A metodologia matemática utilizada foi a convergência do valor da sexta coluna

para o valor da sétima, de forma que a variável a ser alterada para atingir tal igualdade foi a porosidade, intrínseca na equação 5.1.9 no fator de permeabilidade do meio poroso, k (método iterativo).

Torna-se necessário ressaltar que apesar da equação para a porosidade ser do tipo cúbica, isto é, apresenta soluções por radicais, por comodidade optou-se pela solução numérica via planilha eletrônica.

Segue o exemplo dos cálculos realizados de uma campanha da coluna A em operação primária:

Tabela 5: Formato de cálculos.

DATA E HORÁRIO	Dados das Campanhas							POROSIDADE
	Indicação PDI (Kg/cm ²)	Vazão da água de processo (t/h)	Velocidade Superficial (m/s)	Teor médio de óleos na alimentação (mg/l)	Turbidez (NTU)	PDI (N/m ²) - Calculado	PDI (N/m ²)	
02/01/2013 03:00	0,07	50,53	0,0031	117,50	1345,10	7.361,51	7.361,51	0,36
02/01/2013 04:00	0,07	47,85	0,0029	117,50	1345,10	7.632,97	7.632,97	0,35
02/01/2013 05:00	0,09	51,76	0,0032	117,50	1345,10	9.038,21	9.038,21	0,34
02/01/2013 06:00	0,09	46,20	0,0028	117,50	1345,10	8.910,46	8.910,46	0,33
02/01/2013 07:00	0,10	51,73	0,0032	117,50	1345,10	10.619,10	10.619,10	0,33
02/01/2013 08:00	0,10	49,63	0,0030	117,50	1345,10	10.762,81	10.762,81	0,32
02/01/2013 09:00	0,10	47,55	0,0029	117,50	1345,10	10.682,97	10.682,97	0,32
02/01/2013 10:00	0,12	51,41	0,0031	117,50	1345,10	12.215,95	12.215,95	0,32
02/01/2013 11:00	0,10	45,15	0,0028	117,50	1345,10	10.587,16	10.587,16	0,32
02/01/2013 12:00	0,10	44,96	0,0028	117,50	1345,10	10.890,56	10.890,56	0,31
02/01/2013 13:00	0,11	44,85	0,0027	117,50	1345,10	11.098,15	11.098,15	0,31
02/01/2013 14:00	0,11	44,69	0,0027	117,50	1345,10	11.577,21	11.577,21	0,31
02/01/2013 15:00	0,11	45,34	0,0028	117,50	1345,10	11.752,86	11.752,86	0,31
02/01/2013 16:00	0,13	49,02	0,0030	117,50	1345,10	13.126,16	13.126,16	0,31
02/01/2013 17:00	0,12	45,06	0,0028	117,50	1345,10	12.375,64	12.375,64	0,30
02/01/2013 18:00	0,13	47,48	0,0029	117,50	1345,10	13.333,75	13.333,75	0,30
02/01/2013 19:00	0,13	46,36	0,0028	117,50	1345,10	13.717,00	13.717,00	0,30
02/01/2013 20:00	0,13	45,05	0,0028	117,50	1345,10	14.036,37	14.036,37	0,29
02/01/2013 21:00	0,16	48,90	0,0030	117,50	1345,10	16.271,97	16.271,97	0,29
02/01/2013 22:00	0,15	44,68	0,0027	117,50	1345,10	15.776,94	15.776,94	0,29
02/01/2013 23:00	0,17	49,66	0,0030	117,50	1345,10	18.124,32	18.124,32	0,28
03/01/2013 00:00	0,17	45,91	0,0028	117,50	1345,10	17.773,01	17.773,01	0,28
03/01/2013 01:00	0,18	49,35	0,0030	117,50	1345,10	19.337,93	19.337,93	0,28
03/01/2013 02:00	0,19	46,92	0,0029	117,50	1345,10	19.449,71	19.449,71	0,27
03/01/2013 03:00	0,19	49,64	0,0030	117,50	1345,10	20.359,92	20.359,92	0,27
03/01/2013 04:00	0,18	43,96	0,0027	117,50	1345,10	18.571,44	18.571,44	0,27
03/01/2013 05:00	0,20	47,95	0,0029	97,50	785,00	20.615,42	20.615,42	0,27
03/01/2013 06:00	0,21	47,80	0,0029	97,50	785,00	21.621,44	21.621,44	0,27
03/01/2013 07:00	0,21	47,52	0,0029	97,50	785,00	22.276,15	22.276,15	0,26
03/01/2013 08:00	0,21	45,69	0,0028	97,50	785,00	22.100,50	22.100,50	0,26
03/01/2013 09:00	0,24	49,93	0,0031	97,50	785,00	24.703,37	24.703,37	0,26
03/01/2013 10:00	0,24	48,25	0,0030	97,50	785,00	25.118,56	25.118,56	0,26
03/01/2013 11:00	0,23	44,76	0,0027	97,50	785,00	24.431,91	24.431,91	0,25
03/01/2013 12:00	0,25	45,51	0,0028	97,50	785,00	25.805,20	25.805,20	0,25
03/01/2013 13:00	0,26	46,23	0,0028	97,50	785,00	26.859,13	26.859,13	0,25
03/01/2013 14:00	0,26	48,19	0,0030	97,50	785,00	27.673,52	27.673,52	0,25
03/01/2013 15:00	0,29	50,50	0,0031	97,50	785,00	30.084,78	30.084,78	0,25
03/01/2013 16:00	0,28	45,96	0,0028	97,50	785,00	29.222,48	29.222,48	0,24
03/01/2013 17:00	0,30	48,74	0,0030	97,50	785,00	31.314,36	31.314,36	0,24
03/01/2013 18:00	0,30	47,46	0,0029	97,50	785,00	31.010,96	31.010,96	0,24
03/01/2013 19:00	0,30	49,25	0,0030	97,50	785,00	31.378,23	31.378,23	0,24
03/01/2013 20:00	0,28	46,71	0,0029	97,50	785,00	29.446,04	29.446,04	0,24
03/01/2013 21:00	0,27	45,41	0,0028	97,50	785,00	28.775,36	28.775,36	0,24
03/01/2013 22:00	0,27	45,08	0,0028	97,50	785,00	28.440,02	28.440,02	0,24
03/01/2013 23:00	0,30	49,55	0,0030	97,50	785,00	31.521,95	31.521,95	0,24
04/01/2013 00:00	0,29	48,62	0,0030	97,50	785,00	30.020,91	30.020,91	0,25
04/01/2013 01:00	0,29	49,76	0,0030	97,50	785,00	30.164,62	30.164,62	0,25
04/01/2013 02:00	0,30	49,53	0,0030	97,50	785,00	31.889,23	31.889,23	0,24
04/01/2013 03:00	0,32	47,11	0,0029	97,50	785,00	33.086,87	33.086,87	0,24
04/01/2013 04:00	0,32	45,44	0,0028	97,50	785,00	33.134,77	33.134,77	0,23
04/01/2013 05:00	0,37	50,39	0,0031	118,40	1389,10	38.532,15	38.532,15	0,23
04/01/2013 06:00	0,38	49,74	0,0030	118,40	1389,10	39.713,82	39.713,82	0,23
04/01/2013 07:00	0,39	49,40	0,0030	118,40	1389,10	40.320,63	40.320,63	0,23
04/01/2013 08:00	0,40	49,59	0,0030	118,40	1389,10	42.141,05	42.141,05	0,22
04/01/2013 09:00	0,41	49,32	0,0030	118,40	1389,10	43.003,35	43.003,35	0,22
04/01/2013 10:00	0,42	49,01	0,0030	118,40	1389,10	43.690,00	43.690,00	0,22
04/01/2013 11:00	0,43	49,86	0,0031	118,40	1389,10	45.238,95	45.238,95	0,22
04/01/2013 12:00	0,44	49,53	0,0030	118,40	1389,10	45.877,69	45.877,69	0,22
04/01/2013 13:00	0,44	48,59	0,0030	118,40	1389,10	46.260,94	46.260,94	0,22
04/01/2013 14:00	0,46	49,59	0,0030	118,40	1389,10	47.841,82	47.841,82	0,22

b. Resultados, Gráficos e Discussões

Na série de dados calculados, pode-se avaliar os dois perfis desejados, do aumento de pressão e o perfil de colmatação do meio poroso, em função do tempo de operação primária.

Para esta análise consideraram-se os perfis médios de concentração de óleo em uma determinada campanha. Esta proposta foi baseada na requisição de avaliar se o teor de óleo na água de processo de alimentação no coalescedor vertical primário da DOX influenciaria diretamente no aumento da perda de carga no meio poroso, ou seja, se em concentrações maiores de óleo o recheio de partículas colmataria mais rapidamente.

Inicialmente, Figura 9 e Figura 10, foi avaliado o tempo de duração das campanhas associadas ao teor médio de óleo na corrente de entrada da Unidade. Os dados do gráfico seguem a analogia da ordem cronológica das campanhas.

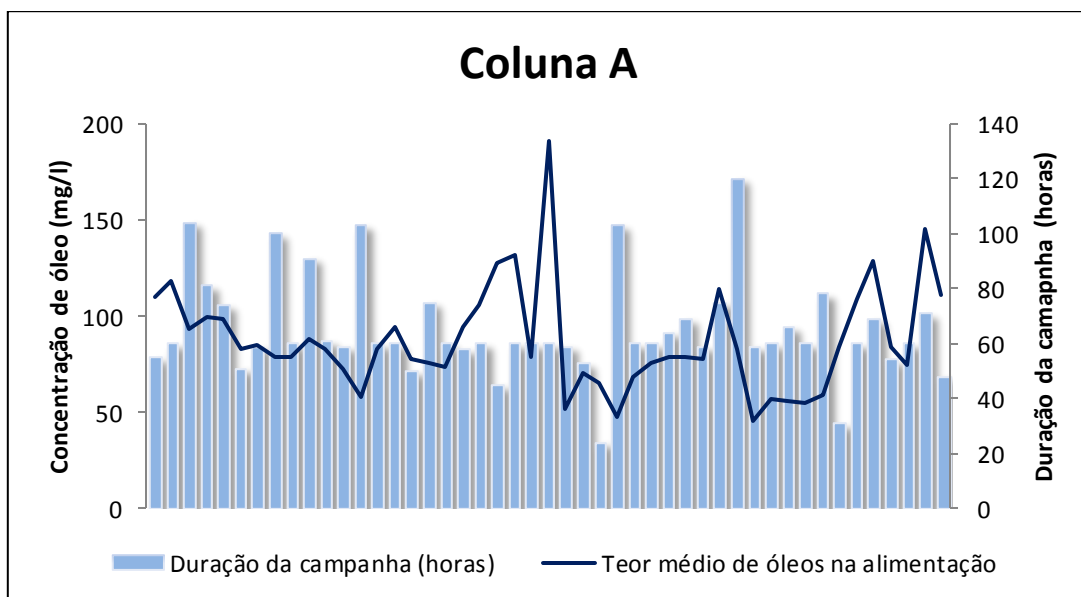


Figura 9: Dias de campanha x teor médio de óleo (Coluna A).

Neste gráfico é possível perceber que existem algumas campanhas onde uma duração menor esteve aparentemente interligada ao indicador de maior concentração de óleo na alimentação. Entretanto, para outras

determinadas campanhas, esse aumento de concentração não influenciou diretamente no tempo de operação da unidade.

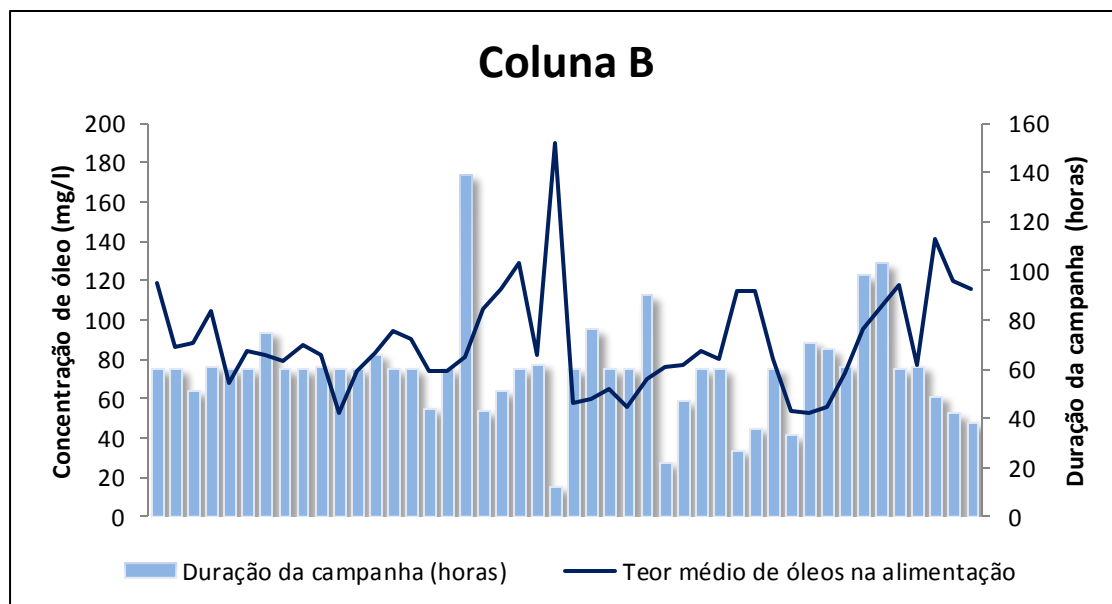


Figura 10: Dias de campanha x teor médio de óleo(Coluna B).

Para esta coluna, B, é mais perceptível a correlação entre o indicador do teor de óleo sobre o tempo de duração da campanha.

- **Diferencial de pressão**

Detalharam-se nas Figuras 11 e 12 todas as campanhas em função do aumento do diferencial de pressão, ainda associando à concentração média de óleo na água de processo alimentada à Unidade DOX.

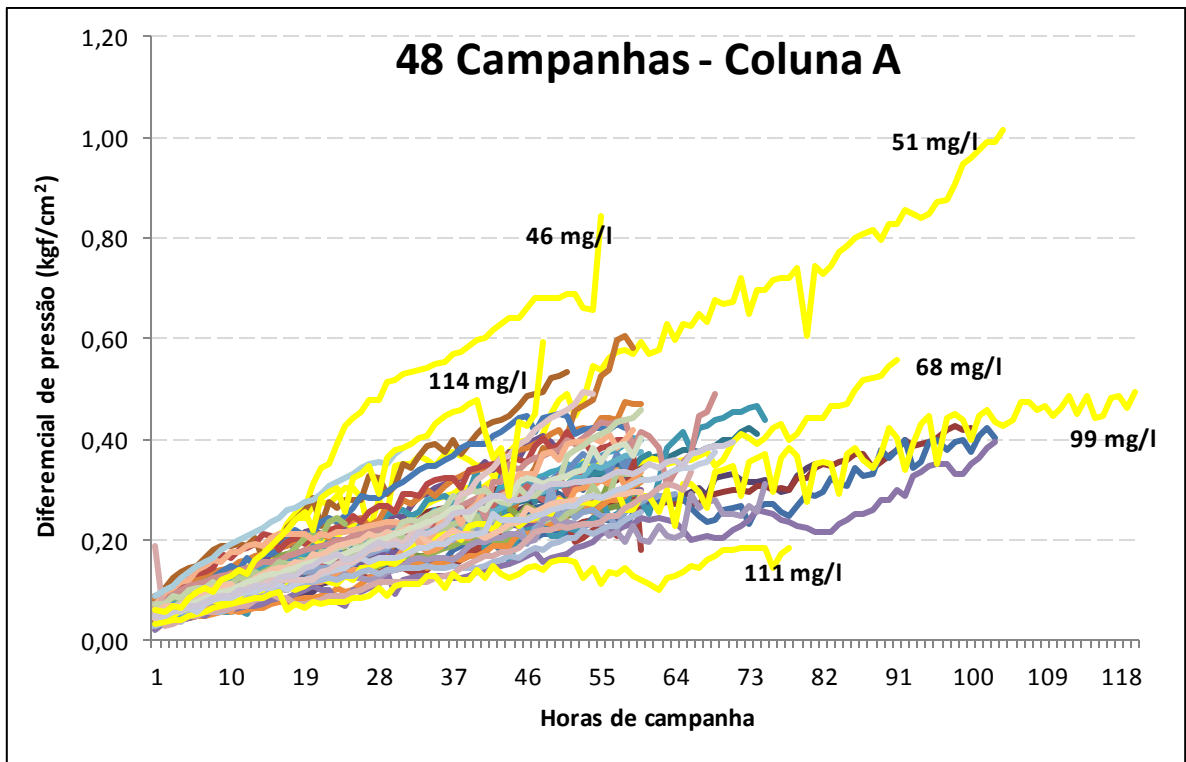


Figura 11: Aumento do diferencial de pressão nas campanhas - Coluna A.

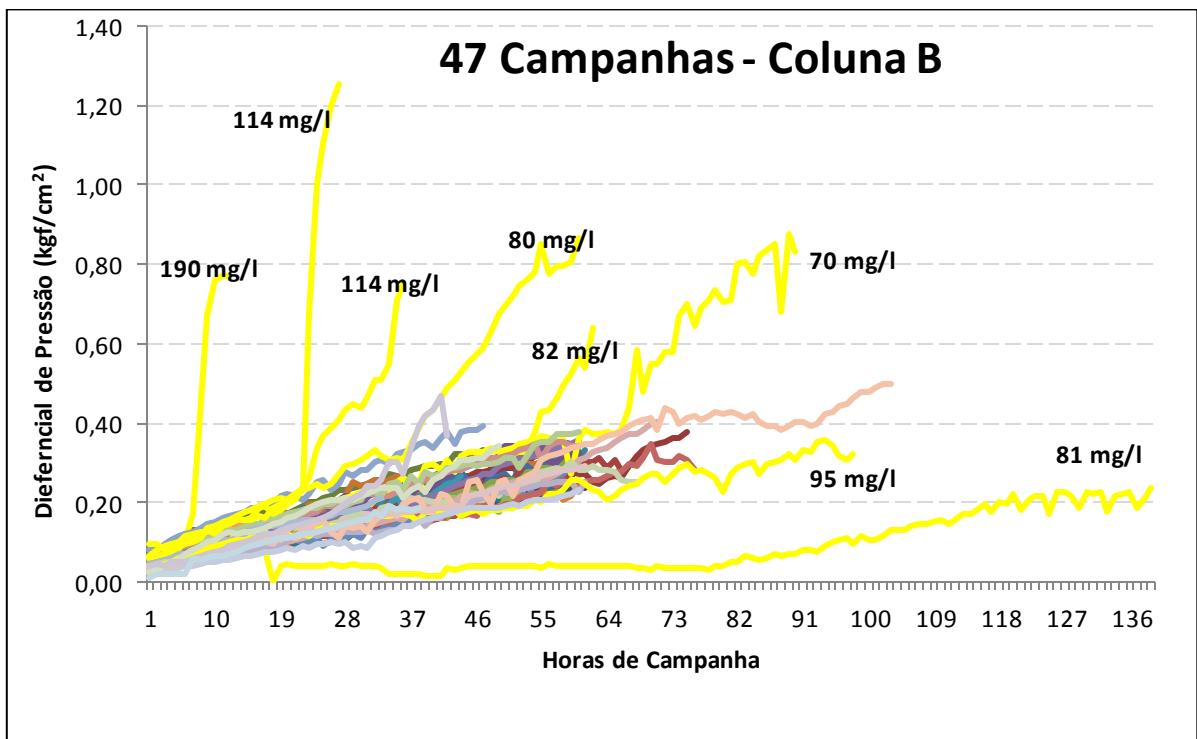


Figura 12: Aumento do diferencial de pressão nas campanhas - Coluna B.

Para análise dos gráficos acima, foram destacadas algumas curvas, com coloração amarela, para interpretação dos dados. Para a coluna A, pode-se observar que o aumento do diferencial de pressão não está diretamente relacionado ao teor de óleo na dispersão alimentada à coluna. Nota-se um aumento mais rápido e intenso do diferencial de pressão para uma condição de 46 mg/L de óleo na água de processo. Ao contrário, para uma concentração maior, com valor de 111 mg/L, o aumento do diferencial de pressão verificado não é acentuado num período de campanha com operação de aproximadamente 80 horas. Levando-se em consideração a inclinação das curvas do gráfico, observa-se que não necessariamente em concentrações mais elevadas de óleo na corrente de entrada do coalescedor primário, o meio apresenta taxa de aumento do diferencial de pressão maior, ou seja, o meio não colmata mais rapidamente, conforme pode ser observado usando a comparação, por exemplo, das curvas de 51 e 99 mg/L.

Para as campanhas da coluna B verifica-se uma tendência maior de colmatação do meio em pequenos intervalos de tempo, para as concentrações de 114 e 190 mg/L, por exemplo. Todavia, ao analisar as curvas de 80, 81 e 82 mg/L, apesar das concentrações serem aproximadamente iguais, o perfil do aumento do diferencial de pressão não apresentou semelhança. Nota-se também que os períodos de campanha foram distintos, enquanto para a curva de 80 mg/L de óleo o meio colmatou em 60 horas, para 81 mg/L o coalescedor operou no mínimo pelo dobro do tempo. A análise entre às curvas de 70 e 95 mg/L revela que a curva com menor teor apresentou um aumento do diferencial de pressão mais acentuado, considerando um mesmo intervalo de tempo.

Aprofundando os estudos, decidiu-se separar as campanhas por faixas de concentrações médias para melhor compreender cada comportamento. Sabendo-se do intervalo de concentrações médias de óleo na dispersão de alimentação em cada coluna, 46 – 190 mg/L na A e 53 – 90 mg/L na B, adotaram-se faixas de concentrações com intervalos de 20 mg/L, partindo-se do parâmetro inferior em 40 mg/L. Sabido que numa determinada faixa de operação existem campanhas com diferentes tempos de duração, foi estabelecido uma parâmetro de avaliação em tempos comuns, visando desta forma evitar disparidades e erros de análise. Assim:

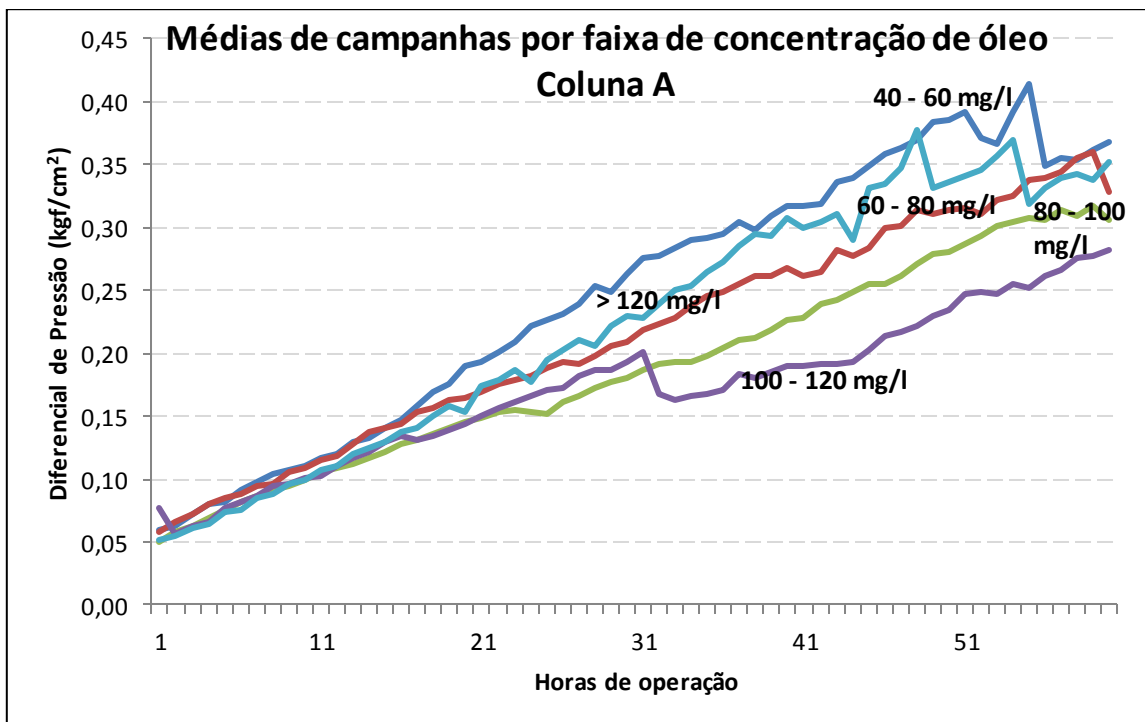


Figura 13: Médias de campanhas por faixas de concentração de óleos - Coluna A.

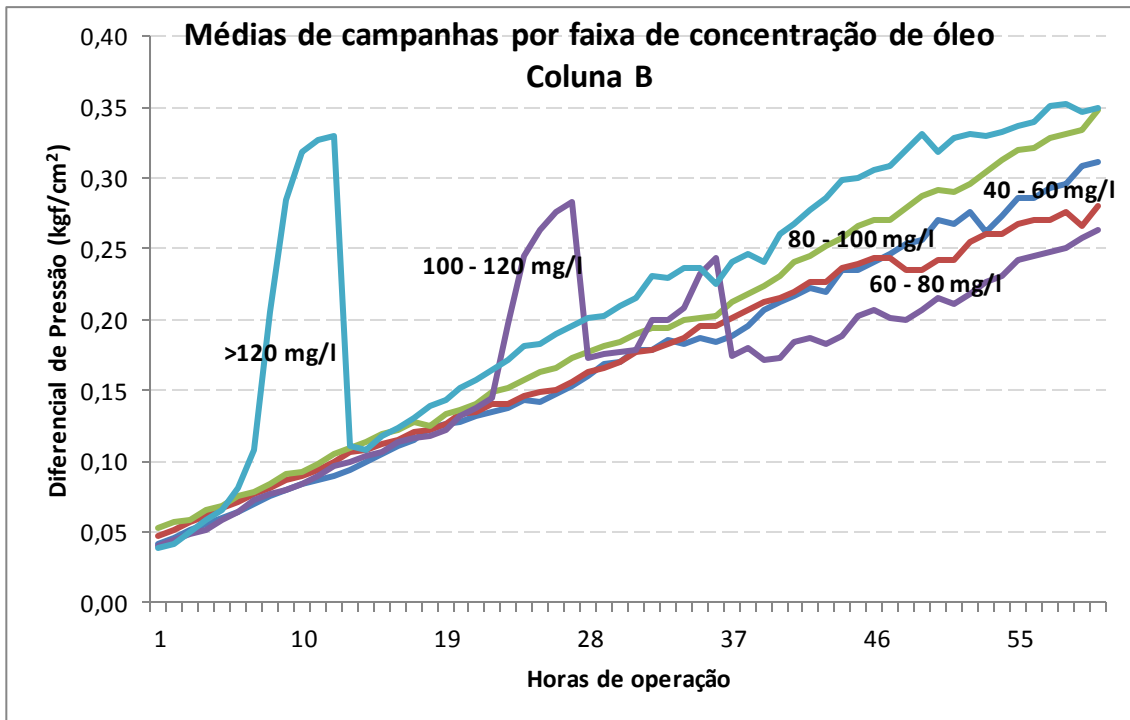


Figura 14: Médias de campanhas por faixa de concentração de óleos - Coluna B.

Na análise do gráfico da coluna A, nas primeiras 20 horas, aproximadamente, de operação tem-se o mesmo perfil de aumento do diferencial de pressão. Após este período, não observa-se uma relação direta entre a concentração média de óleo sob influência no aumento do diferencial de pressão. Em contrapartida, o gráfico da coluna B revela, nos primeiros instantes, picos de elevação do diferencial de pressão relacionado ao teor médio de óleo. Entretanto, os picos observados nas faixas de “100 – 120 mg/l” e “>120 mg/l” estão diretamente relacionados a uma determinada campanha, onde seu rápido aumento do diferencial de pressão influencia na média calculada com as outras campanhas avaliadas na mesma faixa. Para isso, eliminam-se estas determinadas campanhas visando clarificar esta análise.

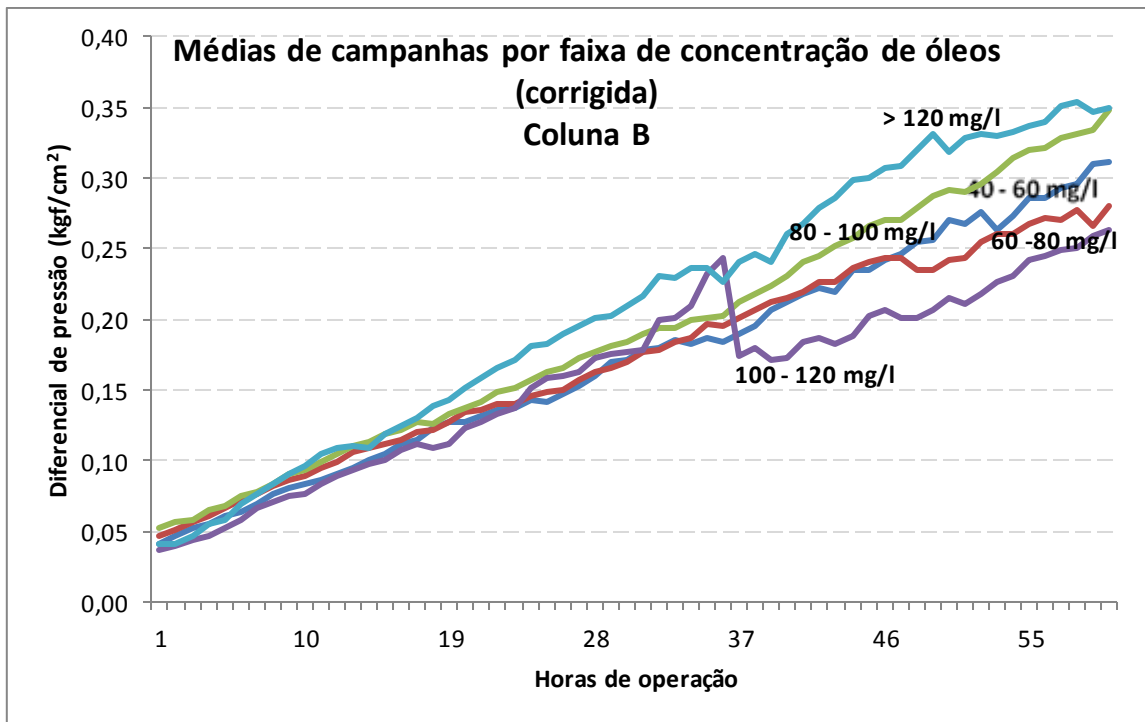


Figura 15: Médias de campanhas por faixa de concentração de óleos (corrigida) - Coluna B.

Esta análise corrigida revela que, para tempos inferiores a 20 horas de operação, as faixas de concentração apresentam um perfil de aumento de diferencial de pressão com grande semelhança. Após este instante, a faixa com destaque, “>120 mg/l”, apresenta uma taxa de crescimento, ou seja, inclinação maior que as outras curvas. Entretanto, não se verificou esta observação para as outras curvas, não sendo evidentes, portanto, perfis de aumento do delta de pressão mais acentuado para faixas de maior concentração frente às faixas de concentrações menores de óleo.

Assim sendo, observou-se que o perfil de aumento do diferencial de pressão nos coalescedores verticais não está correlacionado diretamente ao parâmetro do teor de óleo na água de processo de alimentação a ser tratada na Unidade DOX.

▪ Porosidade e Colmatação

Avalia-se o perfil de colmatação das campanhas ao longo das horas de operação:

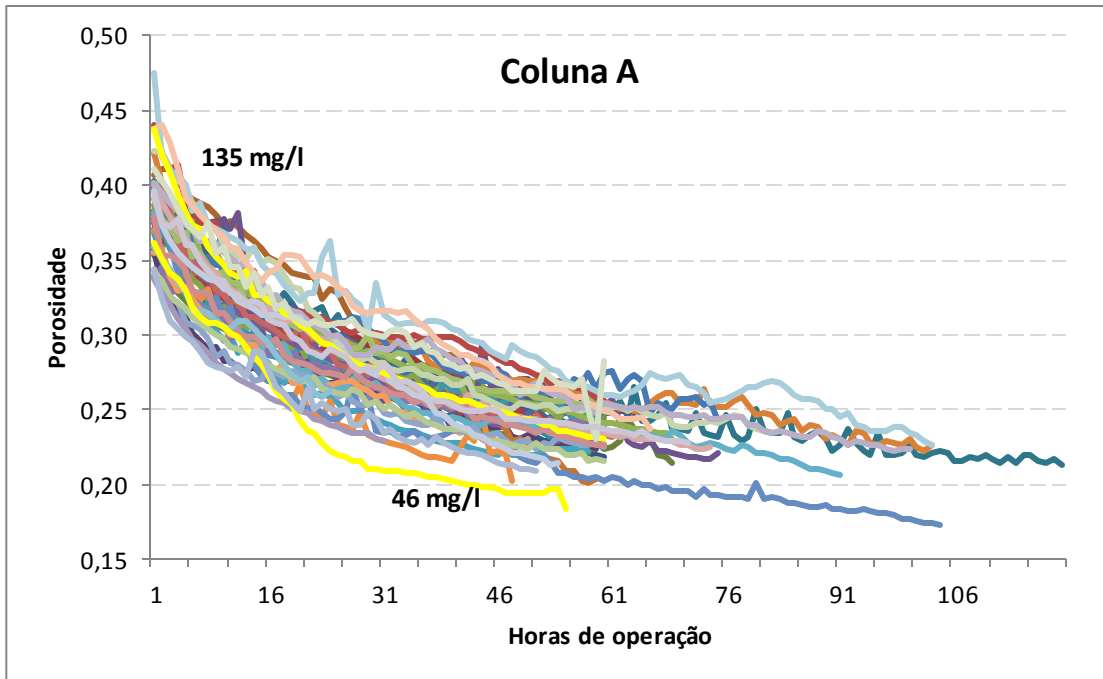


Figura 16: Perfil de colmatação das campanhas em função da concentração de óleo – Coluna A.

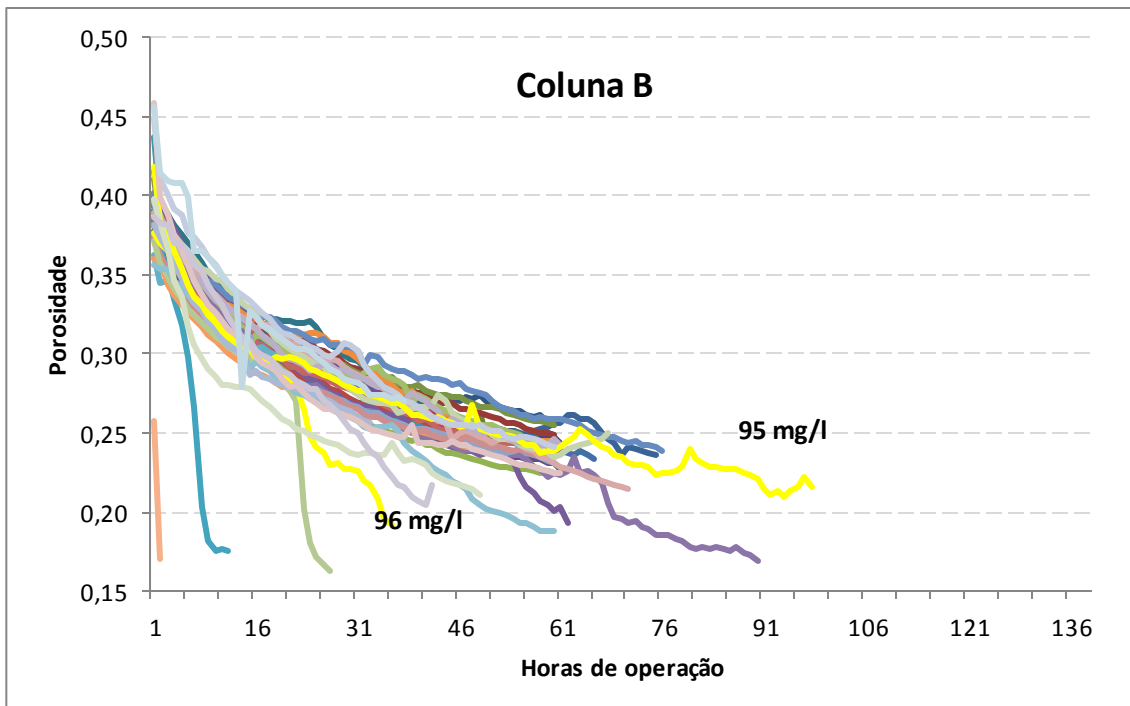


Figura 17: Perfil de colmatação das campanhas em função da concentração de óleo – Coluna B.

Além da preliminar percepção da redução da porosidade ao longo das horas de operação da campanha, nota-se que em ambos os gráficos, relacionados a cada uma das colunas, os perfis de colmatação apresentam grande similaridade. Em A as curvas relacionadas à concentração média de óleo assumem uma mesma tendência de redução da porosidade ao longo da campanha. Todavia ao analisar as curvas destacadas observa-se para uma concentração média menor de óleo o meio apresentou uma redução mais acentuada de porosidade num determinado período, demonstrando, portanto, que o perfil de colmatação foi significativo. Ao analisar a coluna B associa-se o perfil de colmatação mais rápido, grande redução da porosidade num curto intervalo de tempo, para os picos relacionados e já analisados anteriormente, nos gráficos de diferencial de pressão. Entretanto, para concentrações relativamente iguais, 95 mg/l e 96 mg/l de óleo na água de processo, verifica-se comportamentos diferentes de colmatação. Enquanto uma curva (95 mg/l) representa uma tendência contínua de saturação do meio poroso, a outra (96 mg/l) indica uma saturação mais rápida em um período de operação menor, em horas.

Em analogia à análise por faixas de concentração de óleo já realizadas em etapas anteriores, a percepção de disparidades entre os perfis de colmatação não é clara. Em B fica evidente um pequeno destaque da curva para faixa de concentração “> 120 mg/l” de óleos, a qual revela uma taxa de redução de porosidade maior.

Gráficos de colmatação média das campanhas associadas a faixas de concentração de óleo na corrente de alimentação da Unidade:

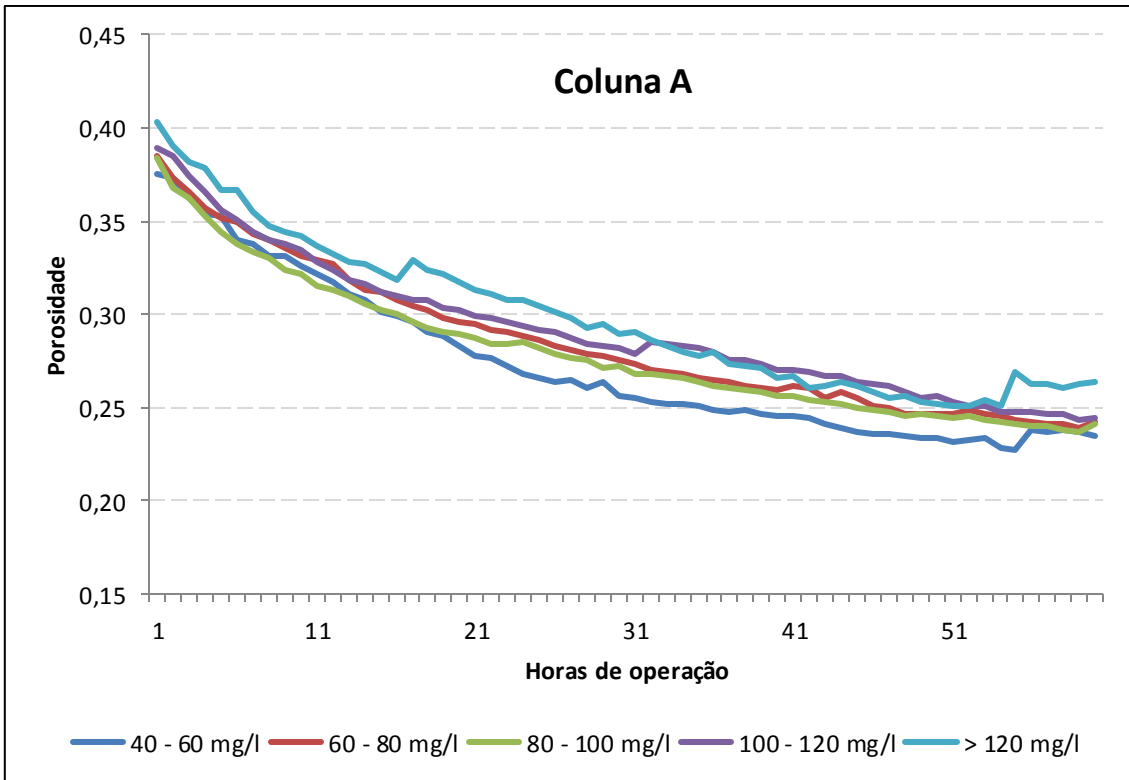


Figura 18: Colmatação média por faixa de concentração de óleo- Coluna A.

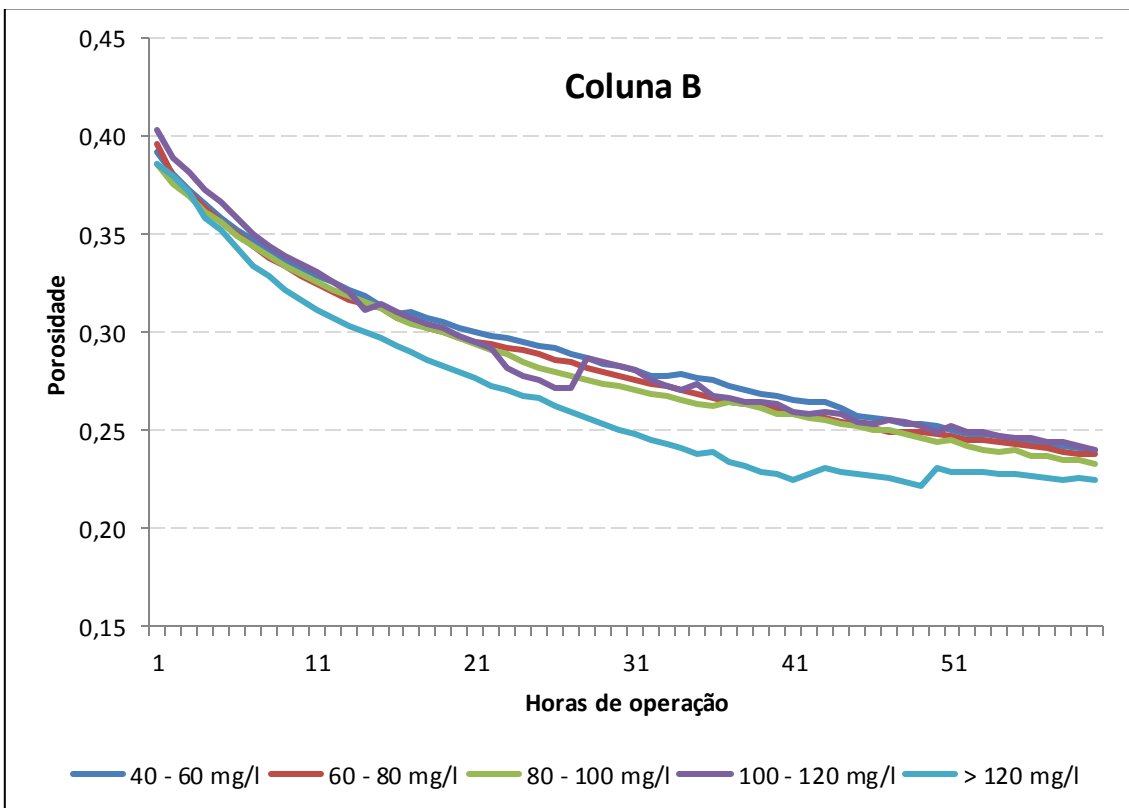


Figura 19: Colmatação média por faixa de concentração de óleo - Coluna B.

▪ Turbidez

Além da análise diária da concentração de óleo realizada na água de processo da Unidade DOX, avalia-se a turbidez da amostra. Conceitualmente, turbidez é uma propriedade física que traduz a presença de materiais em suspensão e que interferem na passagem de luz através do fluido. Materiais, de origem orgânica ou inorgânica, variando em dimensões até sólidos, podem influenciar na turvação.

Estendendo as análises, decidiu-se correlacionar a medida de turbidez com a concentração de óleo disperso na água de processo, objetivando compreender a relação existente entre as duas variáveis acompanhadas.

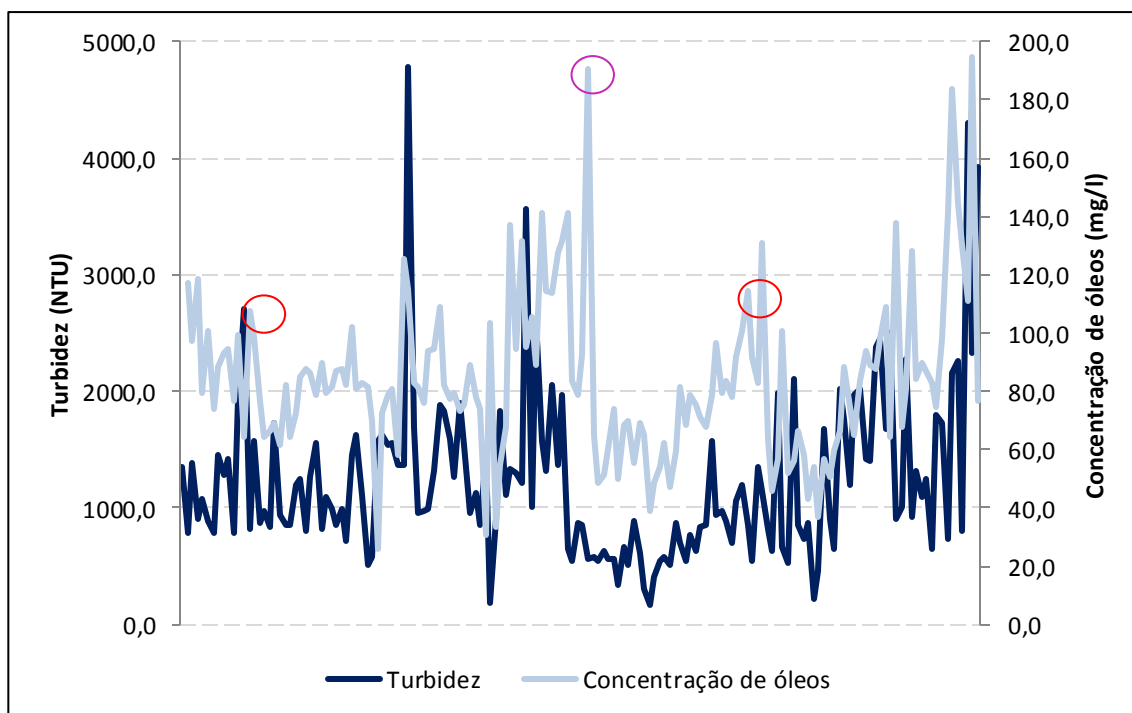


Figura 20: Turbidez x concentração de óleos.

Graficamente notam-se pontos de correlação entre turbidez e teor de óleo, onde valores de óleo elevados são identificados por uma maior

turvaçãoda amostra. No entanto, há pontos em que uma elevada concentração de óleo não interfere em tal grau a passagem de luz através da mistura, como pode ser visto pelo destaque em roxo no gráfico. Para os pontos destacados em vermelho nota-se que os teores de óleos são próximos entre si, aproximadamente 110 mg/l, porém a turbidez não é semelhante. No primeiro ponto a turvação da amostra é maior, enquanto que no segundo seu valor fica aproximadamente reduzindo pela metade.

Sendo assim a disparidade em relação aos pontos aumenta a indagação relacionada à correlação entre estas variáveis. A turbidez pode ser influenciada pela característica da mistura de óleo na água e não exclusivamente ao valor da concentração. De forma mais clara, a condição da água de processo com caráter de emulsão pode ser determinante. Quanto mais emulsionada estiver a água de processo, maior será a indicação de turbidez, não necessariamente estando a mistura com maior teor de óleo.

Todavia, deve-se lembrar a realidade de possível existência de sólidos na amostra. Conforme relatado anteriormente neste trabalho, a Unidade DOX tem finalidade operacional de remoção de sólidos suspensos e hidrocarbonetos dispersos na água de processo. Entretanto, para realização dos estudos, levou-se em consideração que no histórico do período avaliado não há indícios de observação de sólidos suspensos.

Portanto, os valores da turbidez podem estar relacionados à característica de emulsão da água de processo, mas também à existência de sólidos de dimensões pequenas.

Capítulo 5. Conclusões

A avaliação dos parâmetros de operação da Unidade DOX em relação ao aumento do diferencial de pressão no meio poroso, devido ao perfil de colmatação das partículas, mostrou-se eficaz para identificar que a concentração de óleo disperso na água de processo não evidencia uma influência direta na redução da porosidade do meio e, por conseguinte, nas horas de operação do coalescedor vertical com atividade primária. Desta maneira, a duração da campanha primária das colunas recheadas pode ser aumentada para períodos maiores, além do atual de 60 horas, estabelecendo-se, portanto, um valor limite de colmatação do meio, associada à mínima porosidade permitida e por correlação, ao diferencial máximo identificado pela instrumentação disponível no processo, PDI.

Especificamente, destaca-se a operação da Coluna B, que apresentou casos particulares onde houve rápida colmatação do meio poroso em campanhas com tempos de duração menores. Este fato pode estar associado à uma condição relacionada à eficiência de etapas anteriores à DOX, influenciando diretamente na qualidade da água de processo alimentada à Unidade, ou ao processo de retrolavagem realizado de forma ineficiente, resultando no retorno do filtro para operação sem completa regeneração.

A avaliação da turbidez mostrou-se útil para identificação de possíveis fatores não acompanhados pelo processo, partículas sólidas, que podem influenciar de maneira mais significativa no perfil de operação dos coalescedores verticais .

Capítulo 6. Trabalhos Futuros

Ao final deste projeto de curso, algumas investigações adicionais se mostram necessárias para que algumas dúvidas e questionamentos relativos a esse estudo sejam sanados, tais como:

1. Inclusão na rotina de acompanhamento da qualidade da água de processo de alimentação à Unidade DOX uma análise destinada à determinação do teor de sólidos na amostra.
2. Avaliar o perfil de colmatação do meio poroso de partículas do recheio dos filtros em função do levantamento de dados em relação ao teor de sólidos na água de processo.

Capítulo 7. Revisão Bibliográfica

- Livros

Blake, F. C., The Resistance of Packing to Fluid Flow, Transactions of the American Institute of Chemical Engineers, 14, 415 (1922).

Carman, P. C., Fluid Flow Through Granular Beds, Transactions of the Institution of Chemical Engineers (London), 15, 150 (1937).

Costa, L. P. e Massarani, G., Análise da Força Resistiva no Escoamento de Fluidos em Meios Porosos III, Anais do X ENEMP, São Carlos – SP, Vol. I, 86 (1982).

Coulson, J. M. and Richardson, J. F., Chemical Engineering, Volume Two – Unit Operations, 3rd ed., Pergamon Press (1978).

Darcy, H. P. G., Les Fontaines Publiques de La Ville de Dijon, pp. 590, Victor Dalmont, Paris (1856).

Ergun, S., Fluid Flow Through Packed Columns, Chemical Engineering Progress, 48, No. 2, 89 (1952).

Forchheimer, P., Wasserbewegung durch Boden, Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieuer, 45, 1782 (1901).

Foust, A. S. et al., "Principles of Unit Operations", 2nd ed., John Wiley & Sons (1980).

Fox, McDonald and Pritchard, "Introdução à Mecânica dos Fluidos", 6thed, John Wiley & Sons (2004).

Kozeny, J., Ueber Kapillare Leitung des Wassers im Boden, Sitzungsber Akad. Wiss., Wien, Abt. II A, 136, 271 (1927).

Massarani, G., Escoamento de Fluidos Não – Newtonianos Através de Meios Porosos: Modelo Capilar, Rev. Lat. Am. Ing. Quím. y Quím. Apl., 1, 83 (1971).

Massarani, G., Fluidodinâmica em Sistemas Particulados, 2^a ed., e-papers (2002).

- Notas de Aula

Peçanha, R.P. , Notas de Aula, EQE-473, Operações Unitárias I, Escola de Química/ UFRJ (2012/2).

- Material da Unidade DOX

Data Sheet dos equipamentos.

Databook da Unidade.

Desenhos isométricos.

- Página da Web

BRASKEM: <http://www.braskem.com.br/>

ANEXO

Colunas Verticais



Coalescedor Performax



Tubulações



Tomadas do Instrumento PDI

