

RAPHAEL POLYDORO RIBEIRO

**ANÁLISE ESTRUTURAL DO CONJUNTO DE PALHETAS DE UM AERADOR
DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista como parte dos requisitos para a obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

Guaratinguetá
2015

R484a	<p>Ribeiro, Raphael Polydoro</p> <p>Análise estrutural do conjunto de palhetas de um aerador da estação de tratamento de efluentes / Raphael Polydoro Ribeiro – Guaratinguetá, 2015. 50 f. : il. Bibliografia : f. 48-49</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015. Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva</p> <p>1. Engenharia de estruturas 2. Análise estrutural (Engenharia) 3. Método dos elementos finitos 4. I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 624.01</p>
-------	--

Raphael Polydoro Ribeiro

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. ERICK SIQUEIRA GUIDI
UNESP-FEG

Prof. Dr. MÁRCIO AUGUSTO MARTIN
Membro Externo

Dezembro de 2015

DADOS CURRICULARES

RAPHAEL POLYDORO RIBEIRO

NASCIMENTO 10.10.1990 – SANTO ANDRÉ / SP

FILIAÇÃO Dawdson Ribeiro Filho
Eliana Polydoro Ribeiro

2009/2015 Curso de Graduação de Engenharia Mecânica
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá –
Universidade Estadual Paulista

À minha família que em todos os momentos me deu o apoio e forças para percorrer esta jornada.

AGRADECIMENTOS

Meu primeiro agradecimento vai para minha mãe, Eliana, meu pai, Dawson e minhas irmãs, Maíra e Thaís, que durante todos estes anos me deram suporte financeiro e principalmente emocional para que pudesse alcançar este sonho,

à minha namorada *Aline Emídio de Paula* que sempre me deu apoio e incentivo para superar os desafios vividos,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

à *Prof. Lucia* que dividiu suas experiências profissionais e me ensinou a trabalhar com o software SolidWorks, apoio com o qual foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

aos *Prof. Dr. Erick Siqueira Guidi e Fabrício Vieira Silva*, que me auxiliaram e deram conselhos fundamentais para a conclusão deste trabalho,

à meus mestres que, com muita dedicação e paixão compartilharam seus valiosos conhecimentos e amizade,

aos meus amigos *Rafael Fernandez, Lucas Escada Mathias, Alisson Henrique Furigo e Yuri Trivinho* que dividiram comigo angustias, lágrimas e risos ao longo da graduação.

aos meus amigos Matheus Ayres, André Ferreira, Thiago Quintas e Yuri Yonamine, que continuam presentes em minha vida e me deram suporte durante toda essa jornada,

aos meus amigos da república Abate-Inferninho que formaram uma segunda família,

aos meus amigos do grupo PET com quem passei incontáveis horas compartilhando o aprendizado e adquiri valiosos conhecimentos para minha vida profissional e pessoal.

"Sonhe grande, comece pequeno, ande rápido"

Caio Braz

RIBEIRO, R.P. Análise Estática do conjunto de palhetas de um aerador da estação de tratamento de efluentes. Guaratinguetá 2015. 50p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

RESUMO

Este trabalho visa estudar os efeitos dos esforços submetidos pelo conjunto de palhetas da estação de tratamento de efluentes (ETE) de uma empresa química situada no Vale do Paraíba. Para tal, primeiramente são calculados os esforços solicitados pelos efluentes sobre a estrutura, bem como pesquisado o torque ideal dos parafusos da estrutura. A partir destes dados, são realizadas simulações estáticas utilizando software apropriado e o método de elementos finitos. Com os resultados da simulação, é proposta uma possível solução para diminuir o nível de tensão ao qual a estrutura está submetida. Este trabalho servirá de consulta para a empresa interessada.

PALAVRAS-CHAVE: Ete. Palhetas. Tensão. Método de elementos finitos. Simulações.

RIBEIRO, R.P. **Static Analysis** . Guaratinguetá 2015. 50p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

ABSTRACT

This work aims to find the maximum tension in a group of blades in a Sewage Treatment Stations in a company located in Vale do Paraíba. First, the calculations of the strength requested by the effluents on the structure are done, and the optimum torque of the frame screws is researched. From these data, static simulations using appropriate software and the finite elements method are performed. Based on the results, a possible solution to reduce the strength in this structure is proposed. This study will be provided as a consultation material to the company.

KEYWORDS: Sts. Blades. Tension. Finite elements method. Simulations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de lagoa aerada mecanicamente com aerador tipo cachoeira.....	15
Figura 2 - Esquema de lançamento de efluentes em corpo d'água.	19
Figura 3 - Forças e momentos atuando em um corpo submerso.	21
Figura 4 - Experimento de Reynolds.	23
Figura 5 - Comportamento do coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds para corpos bidimensionais.	24
Figura 6 - Coeficientes de arrasto típicos para objetos bidimensionais para $Re \geq 10^4$	25
Figura 7 - Coeficientes de arrasto para outros tipos de objetos bidimensionais para $Re \geq 10^4$	25
Figura 8 - Malha de elementos finitos.	26
Figura 9 - Gráfico “Tensão x Deformação” típico de um material dúctil.	27
Figura 10 - Energia de deformação armazenada em elemento de volume.	28
Figura 11 - Elipse de falha para critério de Von Mises.....	30
Figura 12 - Palheta nova (esq.) e palheta após fratura (dir.).	31
Figura 13 - Conjunto de palhetas da ETE.....	32
Figura 14 - Elevação e perfil da palheta.	34
Figura 15 - Gráfico de força de arrasto x raio.	38
Figura 16 - Modelagem de palheta no SolidWorks.	39
Figura 17 - Montagem do conjunto de palhetas no SolidWorks.	40
Figura 18 - Modelagem das travas no SolidWorks.	40
Figura 19 - Renderização do conjunto de palhetas com parafusos no SolidWorks.	41
Figura 20 - Modelagem do eixo ao qual as palhetas estão acopladas.	41
Figura 21 - Modelagem do conjunto de palhetas e travas para simulação.	42
Figura 22 - Tensões no conjunto de palhetas submetidos apenas a força de arrasto.....	43
Figura 23 - Tensões no conjunto de palhetas submetidos a força de arrasto e torque dos parafusos.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Condições limites de metais e compostos orgânicos.	15
Tabela 2 - Padrões de lançamento de efluentes -Parâmetros Gerais.	17
Tabela 3 - Padrões de lançamento de efluentes (Parâmetros Inorgânicos).	17
Tabela 4 - Padrões de lançamento de efluentes (Parâmetros Orgânicos).	18
Tabela 5 - Padrões de qualidade para águas de classe 2.	20
Tabela 6 - Valores calculados para força de arrasto em função do raio da palheta.	37

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS	12

2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES	13
2.1.1	Principais poluentes	13
2.1.2	Processos aeróbicos de tratamento biológico em uma ETE	14
2.1.3	Legislações vigentes para lançamentos de efluentes líquidos	16
2.1.4	Padrões de lançamento	17
2.1.5	Padrão de qualidade de corpo receptor	18
2.2	COMPORTAMENTO DE ESCOAMENTO DE FLUIDOS AO REDOR DE CORPOS SUBMERSOS	20
2.2.1	Coefficiente de arrasto	22
2.2.2	Número de Reynolds	22
2.3	ESCOAMENTO SOBRE UMA PLACA PLANA NORMAL AO ESCOAMENTO	23
2.4	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	SITUAÇÃO PROBLEMA	31
3.2	PROPRIEDADES DO FLUIDO	32
3.3	DADOS DO PROJETO.....	34
3.4	CÁLCULO DA FORÇA DE ARRASTO NA PALHETA DO AERADOR	35
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	39
4.1	CONFIGURAÇÃO DA PALHETA EM SOFTWARE DE MODELAGEM 3D.....	39
4.2	SIMULAÇÕES ESTÁTICAS DO CONJUNTO DE PALHETAS.....	42
5	CONCLUSÕES	46
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	47
	REFERÊNCIAS	48
	ANEXO A - TORQUE MÁXIMO EM PARAFUSOS.....	50

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, há uma crescente preocupação com relação aos impactos ambientais causados tanto pelas indústrias, como pelas residências. As legislações ambientais se tornam cada vez mais rígidas e a conscientização da população aumenta a cada dia. Produtos que não sejam provenientes de cadeias produtivas ecologicamente corretas vêm sendo cada vez mais rejeitados pelos consumidores.

Sendo assim, as indústrias tiveram que se adaptar a esta nova realidade, adaptando suas instalações aos decretos e leis elaborados durante os anos, contribuindo para que os sistemas de tratamento de efluente ganhem cada vez mais força no ambiente industrial.

A tendência é que as leis de proteção ambiental se tornem cada vez mais restritivas. Por esta razão, problemas de eficiência em sistemas de tratamento de efluente se tornam assim cada vez mais perigosos para as indústrias.

Neste trabalho são estudados os esforços sobre um conjunto de palhetas do aerador da estação de tratamento de efluentes, de modo a analisar se as tensões geradas por estes esforços são maiores que o limite de escoamento do material do conjunto.

Para o desenvolvimento deste tema são estudados e calculados os esforços que o fluido submete à estrutura das palhetas, bem como são realizadas simulações de modo a obter o valor máximo de tensão ao qual o conjunto está submetido.

Para a realização do trabalho é utilizada bibliografia adequada, apoio de professores especialistas em cada área que engloba o trabalho, além de conhecimentos adquiridos em sala de aula e conhecimentos específicos adquiridos com a elaboração deste trabalho.

1.1 OBJETIVOS

O Objetivo principal do trabalho é estudar os efeitos dos esforços em um conjunto de palhetas de uma Estação de tratamento de efluentes de uma empresa situada no Vale do Paraíba, de modo a analisar se as tensões geradas são maiores que o limite de escoamento do material.

Além disso, o trabalho tem como objetivos específicos:

- Estudar e quantificar os esforços que o fluido solicita no conjunto;
- Familiarização com software de modelagem 3D e simulação, para que desta forma possa ser realizada a elaboração de um modelo;
- Analisar através de software e critério adequado, qual o valor de tensão máximo no conjunto.
- Propor uma possível solução para o problema encontrado pela empresa interessada.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

Todas as substâncias líquidas ou gasosas que são originados em processos industriais ou de esgotos domésticos são denominadas efluentes. Estes podem ser divididos em dois tipos:

- Efluente doméstico: água potável + impurezas geradas pelo uso.
- Efluente industrial: água de consumo industrial + impurezas geradas pelo uso.

(Beatriz Farrugia, Revista TAE 03/04/2013).

Os rios tem capacidade de autodepuração natural, porém, o avanço da atividade industrial fez com que essa capacidade se tornasse insuficiente, devido ao alto volume de efluentes lançados.

A estação de tratamento de efluentes tem como objetivo simular em escala acelerada o processo de autodepuração dos rios, tratando os efluentes líquidos gerados tanto nos processos produtivos quanto nos esgotos sanitários. Esse sistema tem grande importância, pois, depois de tratados, estes efluentes serão lançados novamente em rios, lagos, mares ou infiltrados no solo. Quanto melhor a qualidade no tratamento dos efluentes, menor será o impacto ambiental causado pela atividade industrial.

Os sistemas de tratamento de efluentes podem ter concepção físico-química, biológica ou serem uma combinação de ambos.

2.1.1 Principais poluentes

- PH (produto hidrogeniônico da água): fator responsável pela medição da acidez ou alcalinidade de uma determinada substância.

- Temperatura: grandes valores de temperatura reduzem o valor de oxigênio dissolvido em um corpo d'água, o que pode gerar grandes problemas. Valores próximos a 0°C provocam redução da atividade celular dos micro-organismos.

Metais pesados: esse tipo de material é bioacumulável e pode causar doenças crônicas.

- Cianetos: possui grande potencial tóxico e, se estiver presente em condições ácidas pode liberar o gás cianídrico que é altamente venenoso.

- Óleos e graxas: a presença deste tipo de substância é altamente indesejável pois grandes concentrações formam uma camada superficial oleosa, dificultando a troca de oxigênio entre o efluente e o ar. Em processos biológicos, sua presença dificulta também a formação do lodo.

- DQO (Demanda Química de Oxigênio): este parâmetro é uma medida indireta da quantidade de matéria orgânica presente no efluente, a medida que mede a quantidade de oxigênio que é necessária para oxidar quimicamente um determinado despejo.

- DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio): quantidade de oxigênio que é necessária para estabilizar a matéria-orgânica. É uma medida indireta da quantidade de matéria orgânica biodegradável presente no efluente.

- Índice de Fenóis: este índice expressa a quantidade de fenóis presente em um determinado despejo. Como os fenóis são substâncias muito tóxicas, podem inibir o crescimento das bactérias.

- ABS (Tensoativos ou Detergentes): estes podem formar espumas nos tanques de aeração. Hoje em dia, a maioria dos detergentes comerciais são biodegradáveis.

- Nitrogênio e Fósforo: estas substâncias favorecem o crescimento de algas nos rios, lagos, etc. onde são lançados. Estas concentrações deve ser controladas para evitar esse fenômeno.

2.1.2 Processos aeróbicos de tratamento biológico em uma ETE

Dentre os variados processos para tratamento de efluentes presentes em uma ETE (Estação de Tratamento de Efluentes), o foco deste trabalho será no processo ao qual o objeto de estudo está aplicado: o processo aeróbico de tratamento biológico na ETE. O conjunto de palhetas faz parte de um aerador de superfície instalado em uma lagoa aerada.

Os processos aeróbicos possuem maior estabilidade e velocidade em relação ao processo anaeróbico e por isso são mais vantajosos. Este processo consiste no desenvolvimento de micro-organismos favorecidos pelas condições ótimas de pH e temperatura. Estes micro-organismos podem assimilar os compostos orgânicos diretamente através da membrana plasmática ou sintetizar enzimas que quebram as cadeias mais longas para serem assimilados posteriormente. As bactérias alimentadas se unem formando o "lodo" que é removido então por decantação ou flotação. O aumento na concentração de metais ou compostos químicos no efluente pode ser prejudicial para o mesmo, através da inibição da

atividade biológica. Para evitar que isso ocorra, existem condições limites de metais e compostos químicos (tabela 1).

Tabela 1- Condições limites de metais e compostos orgânicos.

Metais / Compostos Químicos	Carga Contínua (mg/L)	Carga de choque (mg/L)
Cádmio	1	10
Cromo Total	2	2
Cobre	1	1,5
Ferro	35	100
Manganês	1	-
Chumbo	1	-
Mercúrio	0,002	0,5
Níquel	1	5
Prata	0,03	0,25
Zinco	5	25
Cobalto	<1	-
Cianeto	1	1 a 10
Arsênico	0,7	-

Fonte: Adaptado de (Curso de Tecnologias de Tratamento de Efluentes - Fadel, K.H, Matusaki, L.F, 2013)

- Lagoas Aeradas: este tipo de processo aeróbico consiste em fornecer oxigênio através de aeradores ou sopradores de ar comprimido para o efluente. Este tipo de lagoa ocupa grandes áreas e deve ter o solo impermeabilizado para evitar sua contaminação.

Figura 1 - Exemplo de lagoa aerada mecanicamente com aerador tipo cachoeira.



Fonte: (Revista TAE, 2012)

Geralmente, são utilizadas duas opções para impermeabilização das lagoas aeradas: leito de argila ou mantas de polietileno de alta densidade.

A profundidade da lagoa de aeração pode variar entre 1,8 a 6,0m, porém não se recomenda profundidades superiores a 3,5m quando se utiliza aeradores de superfície, devido a possibilidade de haver decantação dos sólidos em suspensão.

O dimensionamento deste sistema de aeração foge ao escopo deste trabalho, porém alguns parâmetros devem ser considerados neste momento, tais como:

- Vazão: quanto mais uniforme, menores são as condições do choque no equilíbrio biológico.

- PH: para um sistema de tratamento biológico, o pH deve ser mantido em uma faixa que varia entre 6,5 a 8,5.

- Temperatura: deve ser inferior a 40°C, evitando assim uma queda brusca no nível de oxigênio dissolvido.

- DBO: uma quantidade grande de matéria orgânica presente no efluente que será despejado em rios, lagos, etc. é indesejável, pois caso isso ocorra haverá a proliferação de micro-organismos nestes ambientes. Esse aumento populacional gera também um aumento no consumo de oxigênio que será convertido em energia para estes micro-organismos. Com a queda na oxigenação da água pode haver a mortandade de peixes e outros animais aquáticos por asfixia.

2.1.3 Legislações vigentes para lançamentos de efluentes líquidos

A nível federal, a legislação que regulamenta o lançamento de efluentes líquidos e corpos d'água é a Resolução CONAMA nº430 de 13 de maio de 2011. Esta dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA.

Porém, as legislações estaduais tendem a ser mais restritivas em relação a resolução do CONAMA. Cada estado possui uma legislação ambiental própria. A legislação que atende ao estado de São Paulo é a Lei 997 de 31 de maio de 1976, regulamentada pelo Decreto 8468.

A Lei de Crimes Ambientais 9.605, de 12/02/1998, mais recente, dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Seu art. 3º cita que: "As pessoas jurídicas serão responsabilizadas administrativa, civil e penalmente conforme o disposto nesta Lei, nos casos em que a infração seja cometida por decisão de seu representante legal ou contratual, ou de seu órgão colegiado, no interesse ou benefício da sua entidade".

Diante desta lei, toda e qualquer infração penal de caráter ambiental passou a ser considerada crime.

A tendência é de que cada vez mais aumentem as restrições para o lançamento de efluentes, visando a preservação de corpos d'água e lençóis freáticos.

2.1.4 Padrões de lançamento

Segundo Fadel, K.H, Matusaki, L.F, 2013, os padrões de lançamento são os limites máximos para substâncias orgânicas ou inorgânicas presentes nos efluentes tratados, possam ser descartados nos corpos d'água. Estes padrões são indicados nas legislações ambientais de cada órgão de controle ambiental do estado.

Tabela 2 - Padrões de lançamento de efluentes -Parâmetros Gerais.

Parâmetros	Unidade	Resolução CONAMA 430 Artigo 16	Decreto 8468 Artigo 18	Decreto 8468 Rede Coletora Artigo 19-A
DBO	O ₂	remoção >60%	remoção >80% ou emissão <60mg/L	-
Temperatura	-	<40°C		
Óleos veget. e gord. animais	-	50 mg/L	-	-
Óleos minerais	-	20 mg/L	-	-
pH	-	5,0 - 9,0	5,0 - 9,0	6,0 - 10,0
Resíduo Sedimentável	-	1,0 mL/L	1,0 mL/L	10 mL/L
Material Flutuante	-	ausente	-	-

Fonte: Adaptado de (Curso de Tecnologias de Tratamento de Efluentes - Fadel, K.H, Matusaki, L.F, 2013)

Tabela 3 - Padrões de lançamento de efluentes (Parâmetros Inorgânicos).

(continua)				
Parâmetros Inorgânicos	Fórmula Química	Resolução CONAMA 430 - Artigo 16 (mg/L)	Decreto 8468 Artigo 18 (mg/L)	Decreto 8468 Rede Coletora Artigo 19-A (mg/L)
Arsênio	As	0,5	0,2	1,5*
Bário	Ba	5,0	5,0	-
Boro	B	5,0	5,0	-
Cádmio	Cd	0,2	0,2	1,5*
Chumbo	Pb	0,5	0,5	1,5*
Cianeto	CN	Total 1,0 / Livre 0,2	0,2	0,2

Tabela 4 - Padrões de lançamento de efluentes (Parâmetros Inorgânicos).

(conclusão)

Parâmetros Inorgânicos	Fórmula Química	Resolução CONAMA 430 - Artigo 16 (mg/L)	Decreto 8468 Artigo 18 (mg/L)	Decreto 8468 Rede Coletora Artigo 19-A (mg/L)
Cobre	Cu	1,0	1,0	1,5*
Cromo Hexavalente	Cr ⁺⁶	0,1	0,1	0,5
Cromo Trivalente	Cr ⁺³	1,0	5,0	5,0*
Estanho	Sn	4,0	4,0	4,0*
Ferro Solúvel	Fe ⁺²	15,0	15,0	15,0
Flúor	F	10,0	10,0	10,0
Manganês solúvel	Mn ⁺²	1,0	1,0	-
Mercúrio	Hg	0,01	0,01	1,5*
Nitrogênio Amoniacal	N	20,0 (**)	-	-
Selênio	Se	0,30	0,02	1,5*
Sulfeto	S	1,0	-	50,0
Zinco	Zn	5,0	5,0	5,0

(*) alterado na Resolução Conama 430 (13.05.2011)

(**) não aplicável a sistemas de tratamento de esgotos sanitários

Fonte: Adaptado de (Curso de Tecnologias de Tratamento de Efluentes - Fadel, K.H, Matusaki, L.F, 2013)

Tabela 5 - Padrões de lançamento de efluentes (Parâmetros Orgânicos).

Parâmetros Orgânicos	Fórmula Química	Resolução CONAMA 430 - Artigo 16 (mg/L)	Decreto 8468 Artigo 18 (mg/L)	Decreto 8468 Rede Coletora Artigo 19-A (mg/L)
Benzeno	C ₆ H ₆	1,2	-	-
Clorofórmio	-	1,0	-	-
Dicloroeteno	-	1,0(∑1,1+1,2cis +1,2trans)	-	-
Estireno	C ₆ H ₅ CH CH ₂	0,07	-	-
Etilbenzeno	C ₈ H ₁₀	0,84	-	-
Fenóis	C ₆ H ₅ OH	0,5	0,5	5,0
Tetracloroeto de carbono	CCl ₄	1,0	-	-
Tricloroeteno	-	1,0	-	-
Tolueno	-	1,2	-	-
Xileno	-	1,6	-	-

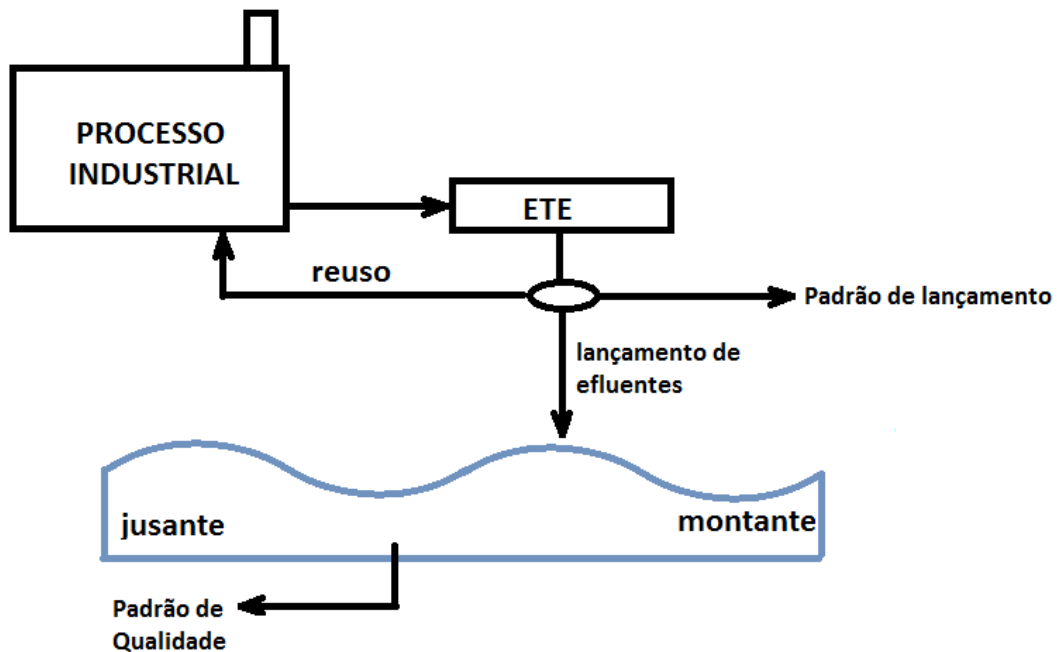
Fonte: Adaptado de (Curso de Tecnologias de Tratamento de Efluentes - Fadel, Matusaki, 2013)

2.1.5 Padrão de qualidade de corpo receptor

Além dos padrões de lançamento, deve também ser respeitada a manutenção da qualidade dos corpos receptores a jusante do lançamento dos efluentes. (Fadel, K.H, Matusaki, L.F, 2013).

Ou seja, a classificação do rio deve ser mantida constante, tanto a montante quanto a jusante do lançamento de uma determinada indústria.

Figura 2 - Esquema de lançamento de efluentes em corpo d'água.



Fonte: Autoria própria

Para áreas de proteção de mananciais, os rios são classificados como Classe I. Para esse tipo de área, fica proibido o lançamento de efluentes, mesmo após serem tratados.

No trecho do rio Paraíba do Sul localizado no Vale do Paraíba, onde as águas são utilizadas para processo industrial estudado e devolvidas ao rio, sua classificação é de Classe II. Essa classificação é referente a rios cujas águas são destinadas ao abastecimento doméstico, após tratamento convencional; à proteção de comunidades aquáticas; à recreação de contato primário (natação, esqui, mergulho); à irrigação de hortaliças e plantas frutíferas; à aquicultura de espécies destinadas à alimentação humana. (Fadel, K.H, Matusaki, L.F, 2013).

Tabela 6 - Padrões de qualidade para águas de classe 2.

Parâmetros	Valor máximo
Materiais flutuantes/espumas não naturais	virtualmente ausentes
Óleos e graxas	virtualmente ausentes
Substâncias que causem gosto ou odor	virtualmente ausentes
Substâncias que causem depósitos	virtualmente ausentes
Corantes artificiais	removíveis por coagulação
DBO (em 5 dias) a 20°C	até 5mg/L
Parâmetros	Valor máximo
OD (qualquer amostra)	não inferior a 5mg/L
Cor	até 75mg Pt/L
Turbidez	até 100 UNT
pH	entre 6,0 e 9,0
Coliformes fecais	NMP até 1.000/100mL
Amônia não ionizável	-
Arsênio	0,01 mg/L
Bário	0,7 mg/L
Cádmio	0,001 mg/L
Cromo Total	0,05 mg/L
Cianeto	0,005 mg/L
Cobre	0,009 mg/L
Chumbo	0,01 mg/L
Estanho	-
Fenóis	0,003 mg/L
Fluoretos	1,4 mg/L
Mercúrio	0,0002 mg/L
Nitrato	10,0 mg/L
Nitrito	1,0 mg/L
Selênio	0,01 mg/L
Zinco	0,18 mg/L

Fonte: Adaptado de (Curso de Tecnologias de Tratamento de Efluentes - Fadel, K.H, Matusaki, L.F, 2013)

2.2 COMPORTAMENTO DE ESCOAMENTO DE FLUIDOS AO REDOR DE CORPOS SUBMERSOS

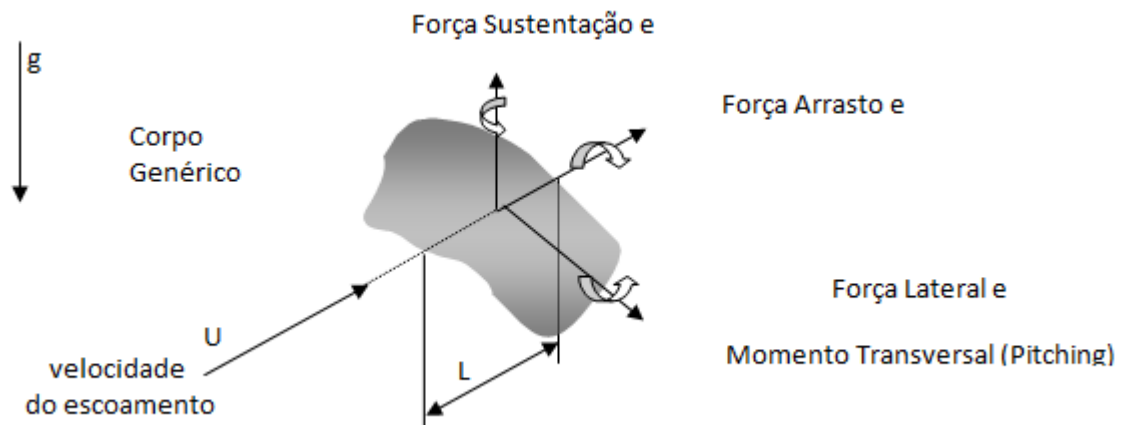
Todo corpo submerso sofre uma força resultante, resultado da interação entre o fluido e o corpo. Esta força depende não só da velocidade relativa entre o fluido e o corpo como também de características geométricas do corpo, além das propriedades do fluido em questão, tais como: massa específica, viscosidade, etc.

Essa força resultante é resultado de tensões presentes em cada elemento infinitesimal do mesmo. Essas tensões são compostas de tensões superficiais, resultado de uma ação viscosa e

de tensões normais, resultado da pressão local. A figura 3 representa as forças atuantes em um corpo genérico submerso. É importante ressaltar que para o estudo dessas forças, algumas hipóteses devem ser consideradas:

- Linhas de corrente paralelas no infinito;
- Diagrama de velocidades uniforme no infinito;
- Regime permanente;
- Fluido incompressível;
- Não se consideram diferenças de cotas para determinar diferenças de pressão.

Figura 3 - Forças e momentos atuando em um corpo submerso.



Fonte: Adaptado de (EM - 847 : LABORATÓRIO DE CALOR E FLUÍDOS, UNICAMP)

Formulações integrais da distribuição de pressão ou de tensão superficial não são sempre satisfatórias na prática, pois não levam em consideração a existência de uma camada-limite, que separa o escoamento. Essa separação pode gerar formação de esteiras, criando uma região de baixa pressão que aumenta o arrasto local e muda o campo de escoamento global e a distribuição de pressão sobre o corpo. Outro grande empecilho para este tipo de formulação é a complexidade de se deduzir expressões de distribuição de pressão e tensão de cisalhamento para geometrias mais complexas.

Para contornar estas adversidades, uma alternativa muito utilizada para se conhecer tais distribuições foi a de definir coeficientes adimensionais para arrasto e sustentação para assim realizar uma análise simplificada, técnica numérica ou experimentos apropriados. A força de arrasto é definida como a componente da força resultante que atua na direção paralela ao

escoamento e a força de sustentação como a componente da força resultante que atua na direção normal ao escoamento.

Para este trabalho, o foco será apenas no estudo da força de arrasto, pois é a força atuante no objeto de estudo: as palhetas do aerador da ETE.

2.2.1 Coeficiente de arrasto

O coeficiente de arrasto é uma grandeza adimensional, definida por:

$$C_d = \frac{F_d}{1/2 * \rho * v^2 * A} \quad (1)$$

Onde:

C_d = Coeficiente de arrasto [adimensional]

F_d = Força de arrasto [N]

ρ = massa específica do fluido [kg/m^3]

A = área característica do objeto. [m^2]

Na maioria dos casos, a área característica é a área projetada vista por um observador que olha para o objeto na direção paralela a velocidade do escoamento. Esta área pode ser também relacionada a sombra do objeto gerada por uma fonte luminosa paralela ao escoamento e projetada em uma tela normal a este escoamento ou pode ser também a área da planta, ou seja, a área na direção normal ao escoamento. (Munson, 2004)

2.2.2 Número de Reynolds

O engenheiro Osborne Reynolds estudou o comportamento de escoamentos e a ocorrência de regimes distintos: laminar, turbulento e de transição. Através de estudos, descobriu um parâmetro adimensional, no qual o regime de escoamento pode ser determinado. Este parâmetro posteriormente recebeu o nome de número de Reynolds, em sua homenagem e tem a forma:

$$Re = \frac{\rho * v * L}{\mu} \quad (2)$$

Este parâmetro relaciona forças de inércia e forças viscosas. Caso as forças de inércia sejam pequenas em relação às forças viscosas, o número de Reynolds decresce, resultando em

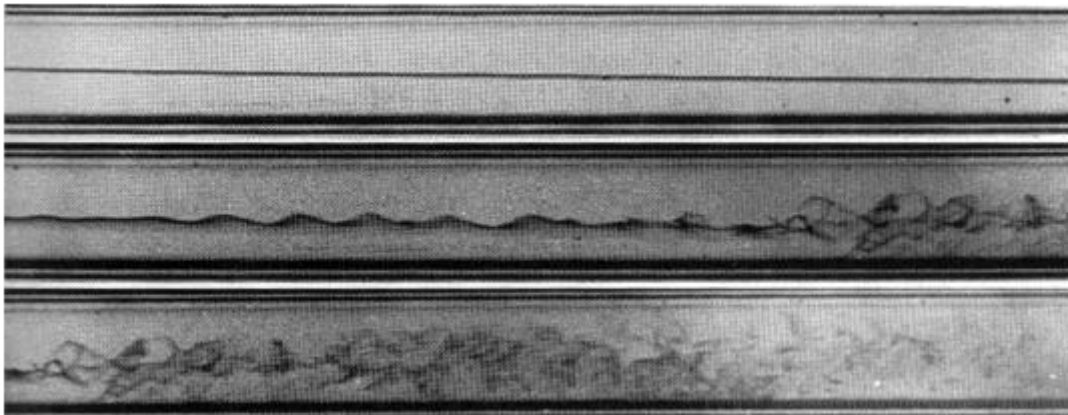
um escoamento laminar, onde a trajetória das partículas de fluido são bem organizadas. Em contrapartida, casos em que as forças de inércia sejam superiores às forças viscosas geram altos números de Reynolds, resultando em um escoamento turbulento, os quais possuem irregularidades para todas as componentes de velocidade e pressão.

A figura 4 ilustra a experiência realizada por Reynolds, onde um escoamento de tinta entre duas placas paralelas ocorre da esquerda para a direita.

No primeiro escoamento da figura, observa-se a ocorrência de um regime laminar, cuja regularidade no escoamento pode ser claramente observada. Já no escoamento central, observa-se o início da ocorrência de turbulência. Este regime é chamado regime de transição.

Por fim, no último escoamento, pode-se observar claramente a irregularidade característica do regime turbulento.

Figura 4 - Experimento de Reynolds.



Fonte: (PINHO, 2013)

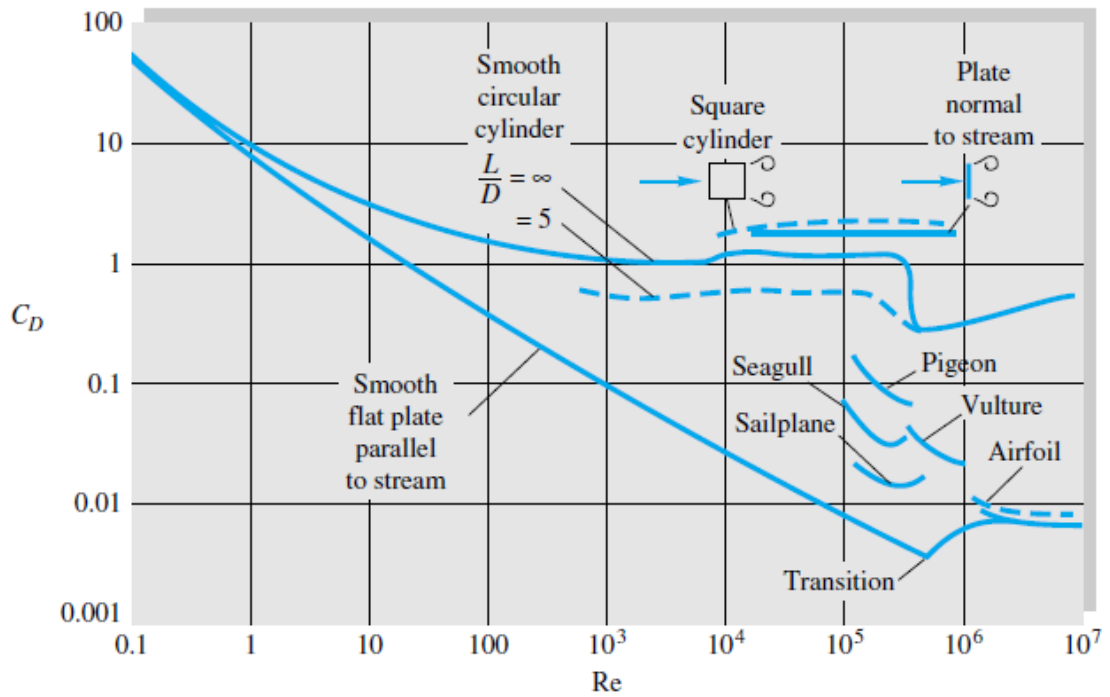
Sempre que são estudados escoamentos de fluidos em corpos, deve-se levar em consideração o número de Reynolds, pois o coeficiente de arrasto tem forte dependência com este parâmetro, visto que este coeficiente varia de acordo com o regime (laminar, de transição ou turbulento).

2.3 ESCOAMENTO SOBRE UMA PLACA PLANA NORMAL AO ESCOAMENTO

Para corpos extremamente rombudos, como uma placa plana perpendicular ao escoamento, o escoamento separa na borda da placa e isto independe do tipo de escoamento na camada limite. (Munson, 2004).

Ou seja, para escoamentos em torno do objeto alvo de estudo neste trabalho, o coeficiente de arrasto possui uma dependência muito pequena em relação ao número de Reynolds, como pode ser verificado através da figura 5.






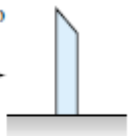





Figura 5 - Comportamento do coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds para corpos bidimensionais.



Fonte: (WHITE, 2010)

As figuras 6 e 7 mostram alguns dados de coeficientes de arrasto para objetos bidimensionais, em escoamentos cujo número de Reynolds é superior a 10^4 .

Figura 6 - Coeficientes de arrasto típicos para objetos bidimensionais para $Re \geq 10^4$.

Shape	C_D based on frontal area	Shape	C_D based on frontal area	Shape	C_D based on frontal area
Square cylinder:	2.1	Half-cylinder:	1.2	Plate:	2.0
					
	1.6		1.7	Thin plate normal to a wall:	1.4
Half tube:	1.2	Equilateral triangle:	1.6		
				Hexagon:	1.0
	2.3		2.0		0.7

Fonte: (WHITE, 2010)

Figura 7 - Coeficientes de arrasto para outros tipos de objetos bidimensionais para $Re \geq 10^4$.

Shape	C_D based on frontal area																							
Rounded nose section:	<table border="1"> <tr> <td>$L/H:$</td> <td>0.5</td> <td>1.0</td> <td>2.0</td> <td>4.0</td> <td>6.0</td> </tr> <tr> <td>$C_D:$</td> <td>1.16</td> <td>0.90</td> <td>0.70</td> <td>0.68</td> <td>0.64</td> </tr> </table>						$L/H:$	0.5	1.0	2.0	4.0	6.0	$C_D:$	1.16	0.90	0.70	0.68	0.64						
$L/H:$	0.5	1.0	2.0	4.0	6.0																			
$C_D:$	1.16	0.90	0.70	0.68	0.64																			
Flat nose section	<table border="1"> <tr> <td>$L/H:$</td> <td>0.1</td> <td>0.4</td> <td>0.7</td> <td>1.2</td> <td>2.0</td> <td>2.5</td> <td>3.0</td> <td>6.0</td> </tr> <tr> <td>$C_D:$</td> <td>1.9</td> <td>2.3</td> <td>2.7</td> <td>2.1</td> <td>1.8</td> <td>1.4</td> <td>1.3</td> <td>0.9</td> </tr> </table>						$L/H:$	0.1	0.4	0.7	1.2	2.0	2.5	3.0	6.0	$C_D:$	1.9	2.3	2.7	2.1	1.8	1.4	1.3	0.9
$L/H:$	0.1	0.4	0.7	1.2	2.0	2.5	3.0	6.0																
$C_D:$	1.9	2.3	2.7	2.1	1.8	1.4	1.3	0.9																
Elliptical cylinder:	<table border="1"> <tr> <th></th> <th>Laminar</th> <th>Turbulent</th> </tr> <tr> <td>1:1</td> <td>1.2</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <td>2:1</td> <td>0.6</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td>4:1</td> <td>0.35</td> <td>0.15</td> </tr> <tr> <td>8:1</td> <td>0.25</td> <td>0.1</td> </tr> </table>			Laminar	Turbulent	1:1	1.2	0.3	2:1	0.6	0.2	4:1	0.35	0.15	8:1	0.25	0.1							
	Laminar	Turbulent																						
1:1	1.2	0.3																						
2:1	0.6	0.2																						
4:1	0.35	0.15																						
8:1	0.25	0.1																						

Fonte: (WHITE, 2010)

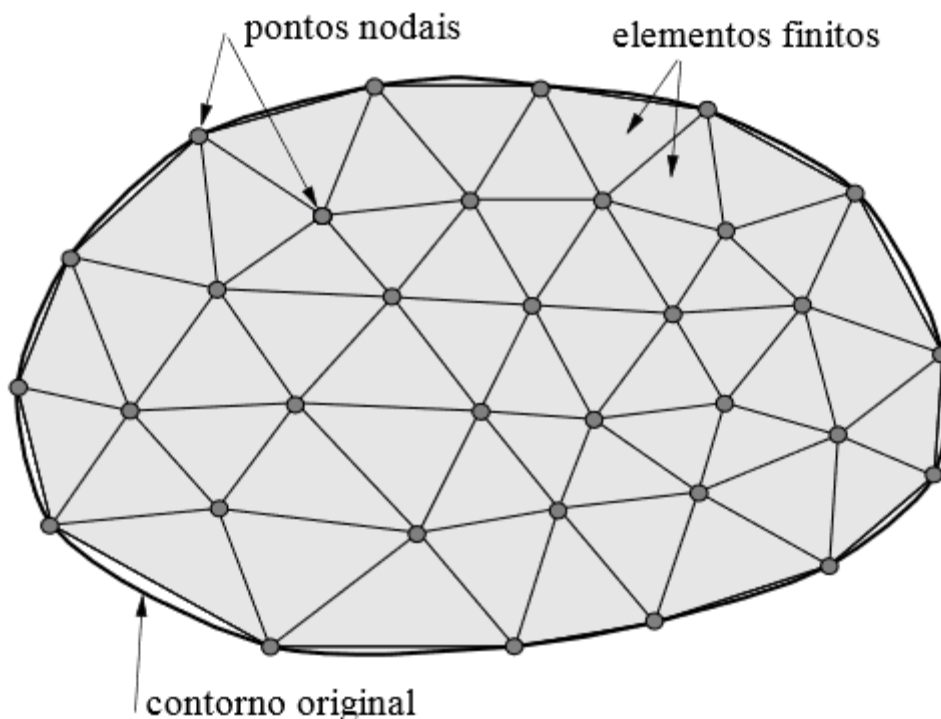
As palhetas do aerador da estação de tratamento de efluentes podem ser aproximadas a placas planas perpendiculares ao escoamento. Deste maneira, como mostrado nas figuras 5, 6 e 7 o coeficiente de arrasto independe do número de Reynolds para escoamentos com $Re \geq 10^4$.

2.4 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

O MEF, ou Método de Elementos Finitos consiste em um método numérico que descreve, através de equações diferenciais parciais, com determinadas condições de contorno, além de condições iniciais, algum fenômeno físico.

O princípio do MEF é baseado na divisão do domínio em sub-regiões de geometrias simples, conforme mostrado na figura 8.

Figura 8 - Malha de elementos finitos.



Fonte: (DE SOUZA, 2003)

Os elementos finitos conectam entre si através de pontos, denominados pontos nodais, que em conjunto formam a malha de elementos finitos.

Existem diversos tipos de geometria para elementos finitos já desenvolvidos, como por exemplo: elementos triangulares, tetraédricos, cúbicos, hexaédricos, etc.

A precisão do método de elementos finitos está diretamente relacionada à quantidade de nós e o tamanho dos elementos. Quanto menor o tamanho do elemento, mais elementos haverá na malha e conseqüentemente, maior será a convergência do problema.

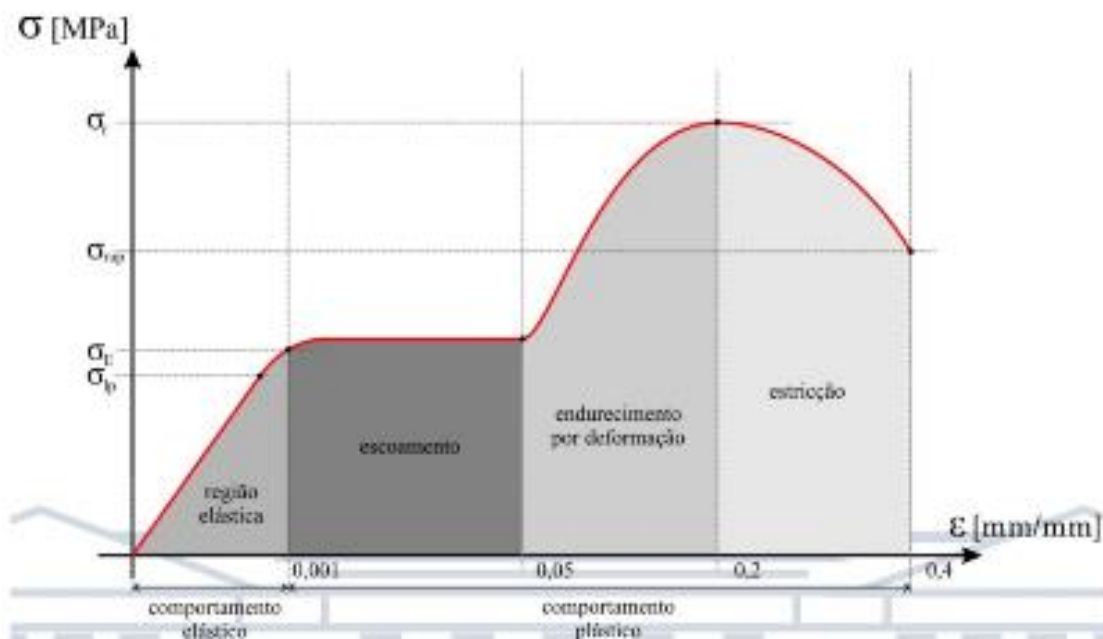
2.5 CRITÉRIO DE VON MISES

Para um carregamento multiaxial, é necessário considerar o mecanismo real de falha, ou seja, a combinação de todas as componentes de tensão presentes no elemento estrutural. Para isso foram estudadas diversas teorias de falhas para materiais frágeis e dúcteis.

O critério de Von Mises é um critério de ruptura para materiais dúcteis, ou seja, que suporta grandes deformações antes de sua ruptura. A falha neste tipo de material se dá após a ocorrência de deformações plásticas.

Um gráfico típico de tensão x deformação pode ser observado na figura 9.

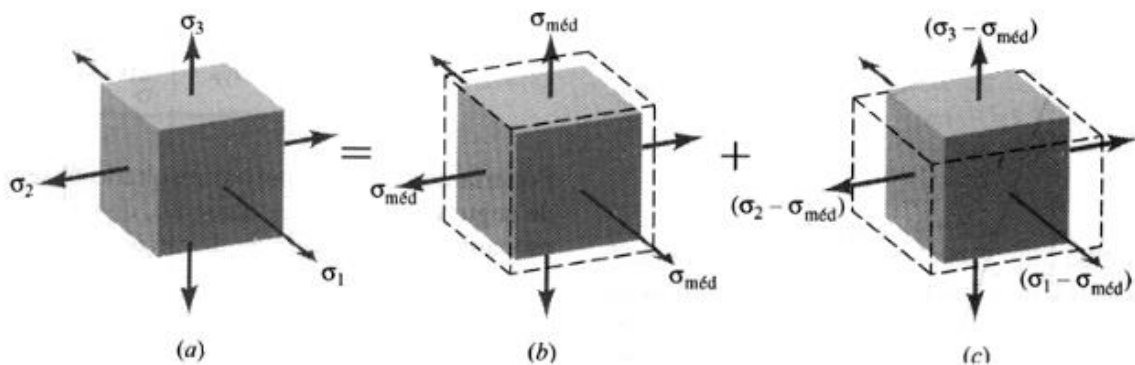
Figura 9 - Gráfico “Tensão x Deformação” típico de um material dúctil.



Fonte: (CURY, 2013)

O critério de Von Mises geralmente é mais utilizado e é baseado na energia de distorção de um dado elemento e define que: "um elemento estrutural (dúctil) irá falhar se a energia associada à mudança de forma de um corpo, submetido a um carregamento multiaxial, ultrapassar a energia de distorção de um corpo de prova submetido a um ensaio uniaxial de tração".

Figura 10 - Energia de deformação armazenada em elemento de volume.



Fonte: (DE LIMA, 2012)

Na figura 10, o elemento (a) representa o estado triaxial de tensões, o elemento (b) representa a variação do volume do elemento e o elemento (c) a sua distorção.

A densidade de deformação devida ao carregamento multiaxial pode ser escrita pela equação (3):

$$U_0 = \frac{1}{2} (\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3) \quad (3)$$

Combinando a lei de Hooke com a equação(3), é possível obter a equação (4):

$$U_0 = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + 2\nu (\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_1 \sigma_3 + \sigma_2 \sigma_3)] \quad (4)$$

Esta energia possui parte associada à variação de volume e parte associada à distorção do elemento. A variação de volume é dada pela média entre as tensões σ_1 , σ_2 e σ_3 .

Quando as tensões que causam a distorção do elemento são substituídas na equação (4), obtêm-se a seguinte expressão para densidade de energia de distorção:

$$U_d = \frac{1}{12G} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] \quad (5)$$

A densidade de energia de distorção de um corpo de prova de tração com limite de escoamento S_e é dada pela equação (6):

$$U_{d \text{ (ensaio de tração)}} = \frac{1}{6G} S_e^2 \quad (6)$$

Esta equação é obtida através da equação (5), com $\sigma_1 = S_e$; $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$.

Portanto, de acordo com a definição do critério de Von Mises, a falha ocorrerá quando a energia de distorção para um carregamento geral se igualar ou exceder o valor $U_{d \text{ (ensaio de tração)}}$.

Sendo assim, o critério de falha da energia de distorção máxima pode ser equacionado, em termos das tensões principais através da equação (7):

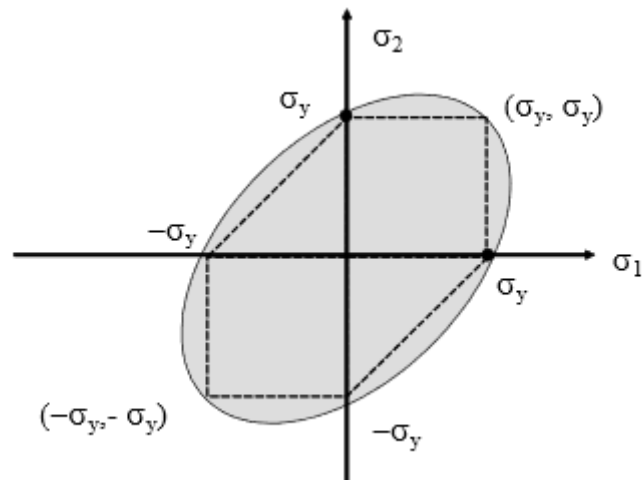
$$\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] = S_e^2 \quad (7)$$

Já para o caso de tensão plana, uma expressão pode ser obtida apenas substituindo o valor de $\sigma_3 = 0$ na equação (7).

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2 = S_e^2 \quad (8)$$

Esta equação é uma equação de elipse no plano $\sigma_1 \times \sigma_2$, como mostrado na figura 11:

Figura 11 - Elipse de falha para critério de Von Mises



Fonte: (DE LIMA, 2012)

Na figura 11, pode-se observar o critério de Tresca, expresso pelas linhas pontilhadas. Observa-se que o critério de falha de materiais dúcteis de Tresca é mais conservador que o critério de Von Mises.

A tensão de Von Mises, pode ser obtida tirando-se a raiz quadrada dos termos da esquerda da equação (7). Assim:

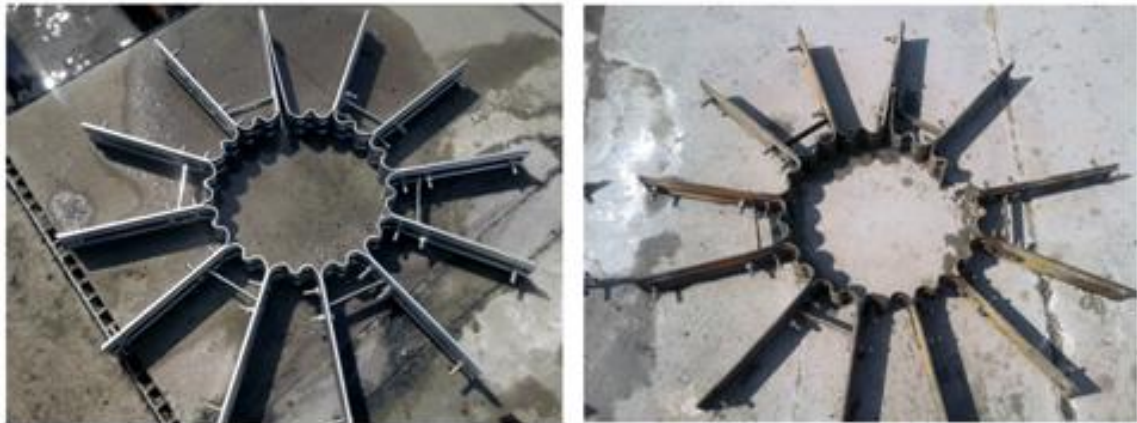
$$\sigma_{vm} = \frac{\sqrt{2}}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]^{1/2} \quad (9)$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 SITUAÇÃO PROBLEMA

O presente trabalho objetiva estudar os esforços causados sobre as palhetas de um aerador da estação de tratamento de efluentes, para o estudo de suas possíveis causas de falhas. O aerador trabalha ininterruptamente com velocidade angular constante e as falhas ocorrem sempre no ponto da cinta da palheta que está em contato com o eixo rotativo.

Figura 12 - Palheta nova (esq.) e palheta após fratura (dir.).



Fonte: Empresa interessada

Esta falha implica em uma série de consequências para a empresa interessada, tais como:

- Diminuição da oxigenação da piscina de aeração, com conseqüente diminuição da atividade microbiológica neste local e finalmente, diminuição do rendimento global da ETE,
- Altos custos anuais com manutenção;

Figura 13 - Conjunto de palhetas da ETE.



Fonte: Empresa interessada

Este trabalho tem por objetivo estudar os efeitos dos esforços sobre a estrutura do conjunto de palhetas. Para que seja possível a realização deste estudo, é necessário primeiramente obter os esforços que o fluido provoca na estrutura, para que então seja possível, através de modelagem em software CAD e análise de elementos finitos, obter o valor aproximado de tensão máxima para o componente.

3.2 PROPRIEDADES DO FLUIDO

Primeiramente, foram realizadas medições das propriedades do fluido da lagoa aerada da estação de tratamento de efluentes, durante 3 dias, obtendo-se os seguintes resultados:

Dias de análise: 06, 07 e 08 de maio de 2015.

Amostra VO 06.05.2015

- μ_1 = Visc. Brook. RVT 1/100 = 27 mPa.s
- dr_1 = Densidade (densímetro) = 1,0050

Amostra de VO 07.05.2015

- μ_2 = Visc. Brook. RVT 1/100 = 30 mPa.s
- dr_2 = Densidade (densímetro) = 1,0050

Amostra de VO 08.05.2015

- μ_3 = Visc. Brook. RVT 1/100 = 32 mPa.s

- dr_3 = Densidade (densímetro) = 1,0050

Para a realização dos cálculos referentes a este trabalho, será utilizado o valor médio para viscosidade do fluido. Como o valor da densidade não foi alterado nas três medições, seu valor médio é igual ao seu valor unitário:

- Densidade média:

$$dr = 1,0050$$

- Viscosidade média

$$\mu = \frac{\mu_1 + \mu_2 + \mu_3}{3} \quad (10)$$

$$\mu = \frac{27 + 30 + 32}{3}$$

$$\mu = 29,667 \text{ mPa.s}$$

- massa específica do fluido:

$$\text{massa específica da água: } \rho_{H_2O} = 999,97 \text{ kg/m}^3$$

Sabe-se que, conhecendo-se a densidade relativa de um fluido e a massa específica da água é possível determinar a massa específica do fluido em questão:

$$\rho_{\text{fluido}} = \rho_{H_2O} \times dr \quad (11)$$

Portanto:

$$\rho_{\text{fluido}} = 999,97 \times 1,005$$

$$\rho_{\text{fluido}} = 1004,97 \text{ kg/m}^3$$

3.3 DADOS DO PROJETO

- Material da palheta: Aço AISI 304
- palhetas acopladas a um eixo rotativo, conforme mostrado na figura 14.
- velocidade de rotação do eixo (ω): 78 rpm

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot 78 / 60 = 8,168 \text{ rad/s}$$

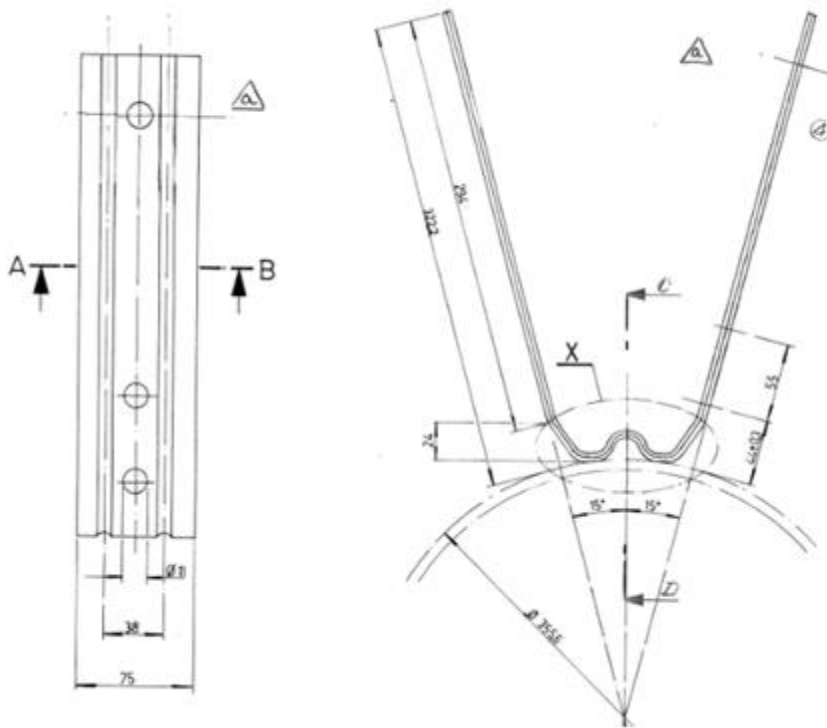
- especificações da palheta: conforme mostrado na figura 8:
- largura da palheta: $l = 75 \text{ mm}$;
- altura da palheta: $h = 322,2 \text{ mm}$
- inclinação da palheta em relação a vertical: 15°
- área projetada:

$$A = l \cdot h \cdot \cos 15^\circ \quad (12)$$

$$A = 0,075 \cdot 0,322 \cdot \cos 15$$

$$A = 0,02334 \text{ m}^2$$

Figura 14 - Elevação e perfil da palheta.



Fonte: desenho técnico fornecido pelo fabricante do conjunto

3.4 CÁLCULO DA FORÇA DE ARRASTO NA PALHETA DO AERADOR

Conforme mostrado na seção 2.3, o coeficiente de arrasto para placas planas perpendiculares ao escoamento é independente do número de Reynolds para $Re \geq 10^4$. Desta forma, será necessário calcular o número de Reynolds através da equação (2) para checar se o escoamento em questão está nesta faixa.

$$Re = \frac{\rho * v * L}{\mu}$$

$$Re = \frac{1004,97 * v * 0,322}{29,66 * 10^{-3}}$$

Como o conjunto de palhetas está submetido ao movimento de rotação em torno do eixo acoplado ao motor, a velocidade em cada ponto da palheta varia. A velocidade a uma distância r do centro do eixo de rotação do motor pode ser calculada como:

$$v = w * r \tag{13}$$

onde:

v = velocidade linear em um determinado ponto da palheta (variável): m/s;

w = velocidade angular de rotação do eixo do motor (fixa): rad/s;

r = distância do centro do eixo do motor ao ponto de interesse: m;

Sendo assim, será calculado o número de Reynolds para a situação mais crítica (na base da palheta, pois possui o menor raio e por consequência, menor Reynolds), para verificar se $Re \geq 10^4$.

Para este ponto, têm-se que $r = 0,1778\text{m}$, logo:

$$v = 8,168 * 0,1778$$

$$v = 1,4522 \text{ m/s}$$

Substituindo o valor de v na equação (2), têm-se que:

$$Re = \frac{1004,97 * 1,4522 * 0,322}{29,66 * 10^{-3}}$$

$$Re = 1,58 \times 10^4$$

Portanto, como $Re \geq 10^4$, o coeficiente de arrasto é independente do número de Reynolds e pode ser obtido através da figura 7:

Relação L/H:

$$L/H = \frac{0,075}{0,3222} = 0,2327$$

Com esta relação, interpolando os dados para placa plana da figura 7, obtêm-se que:

$$Cd = 2,0769$$

Isolando a força de arrasto na equação (1), temos que:

$$Fd = \frac{1}{2} (Cd * \rho * v^2 * A) \quad (14)$$

Substituindo-se a velocidade da equação (13) pela equação (14), temos que:

$$Fd = \frac{1}{2} (Cd * \rho * w^2 * r^2 * A) \quad (15)$$

Dos parâmetros da equação (15), o raio é variável, logo a força de arrasto também é variável em cada ponto da palheta.

Como dito na seção 2.2, obter uma solução integral para este tipo de problema é muito difícil. Com a ajuda do software Microsoft Excel 2013 foi construída uma planilha na qual através da variação do raio e, por consequência, da velocidade, foram calculadas as forças de arrasto em diversos pontos da palheta.

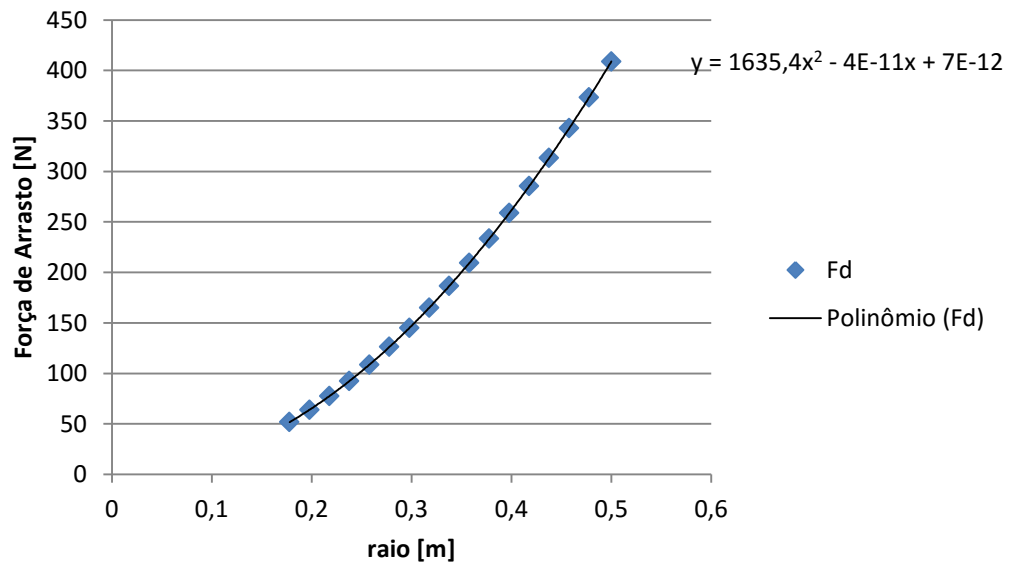
Tabela 7 - Valores calculados para força de arrasto em função do raio da palheta.

Cálculo da força de arrasto em diversos pontos da palheta:					
raio	unidade	velocidade	unidade	Fd	unidade
0,1778	m	1,45	m/s	51,70	N
0,1978	m	1,61	m/s	63,98	N
0,2178	m	1,78	m/s	77,58	N
0,2378	m	1,94	m/s	92,48	N
0,2578	m	2,10	m/s	108,69	N
0,2778	m	2,27	m/s	126,21	N
0,2978	m	2,43	m/s	145,03	N
0,3178	m	2,59	m/s	165,17	N
0,3378	m	2,75	m/s	186,61	N
0,3578	m	2,92	m/s	209,36	N
0,3778	m	3,08	m/s	233,42	N
0,3978	m	3,25	m/s	258,79	N
0,4178	m	3,41	m/s	285,46	N
0,4378	m	3,57	m/s	313,45	N
0,4578	m	3,74	m/s	342,74	N
0,4778	m	3,90	m/s	373,34	N
0,5	m	4,08	m/s	408,84	N

Fonte: autoria própria

A partir dos dados da tabela 7, foi possível plotar o gráfico abaixo, que relaciona a Força de arrasto em função da distância da palheta ao centro do eixo rotativo. Após a plotagem do gráfico, foi possível obter a equação do gráfico, mostrada na figura 15. Esses valores serão úteis para uma solução mais próxima da realidade nas simulações realizadas posteriormente, se necessário.

Figura 15 - Gráfico de força de arrasto x raio.



Fonte: autoria própria

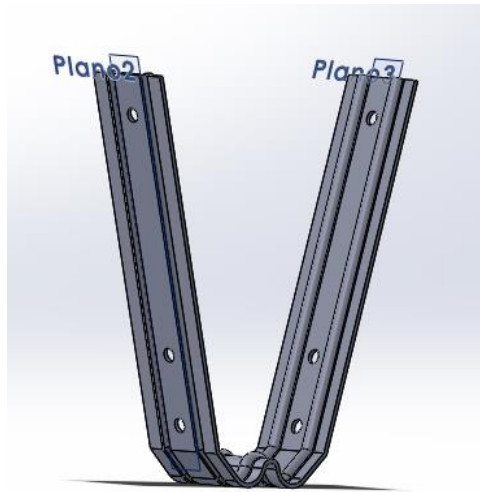
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 - CONFIGURAÇÃO DA PALHETA EM SOFTWARE DE MODELAGEM 3D

Primeiramente, foi realizada uma modelagem da palheta no software de modelagem 3D SolidWorks.

Para a realização da modelagem, inicialmente foi necessário o estudo sobre o funcionamento do software. Primeiramente, foi realizada a modelagem de uma palheta, conforme mostrado na figura 16 através de desenho fornecido pela empresa interessada:

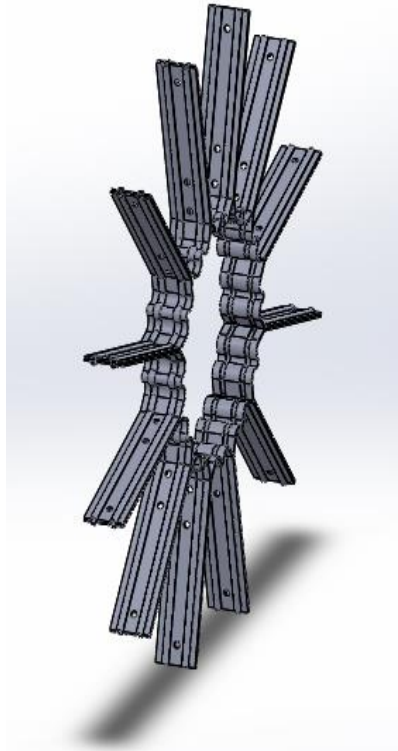
Figura 16 - Modelagem de palheta no SolidWorks.



Fonte: Autoria própria

Em seguida, foi realizada uma montagem do conjunto de palhetas, conforme mostrado na figura 17:

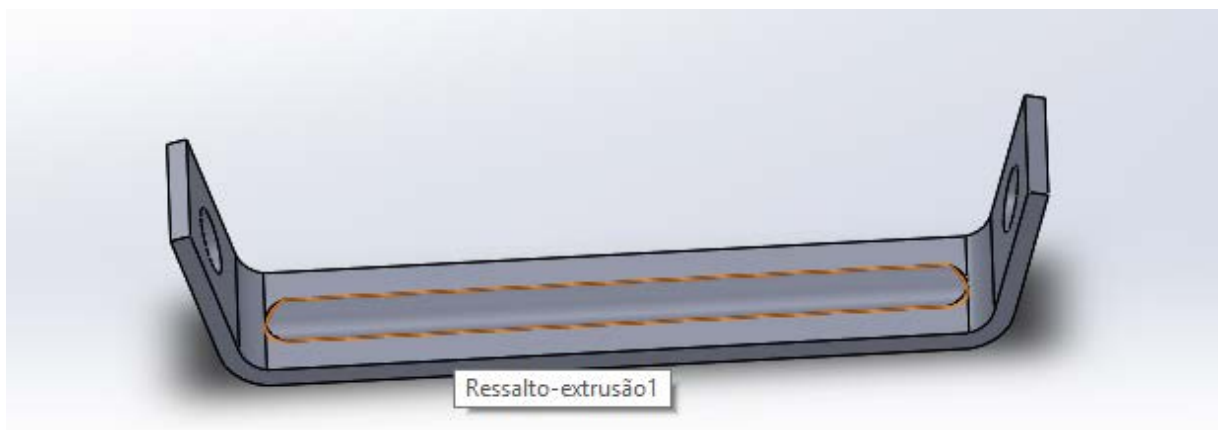
Figura 17 - Montagem do conjunto de palhetas no SolidWorks.



Fonte: Autoria própria

Posteriormente, foram modeladas as travas do conjunto de palhetas, mostrado na figura 18.

Figura 18 - Modelagem das travas no SolidWorks.



Fonte: Autoria própria

Foi realizada uma montagem das travas com parafusos no conjunto de palhetas, renderizadas para efeito ilustrativo, mostrado na figura 19.

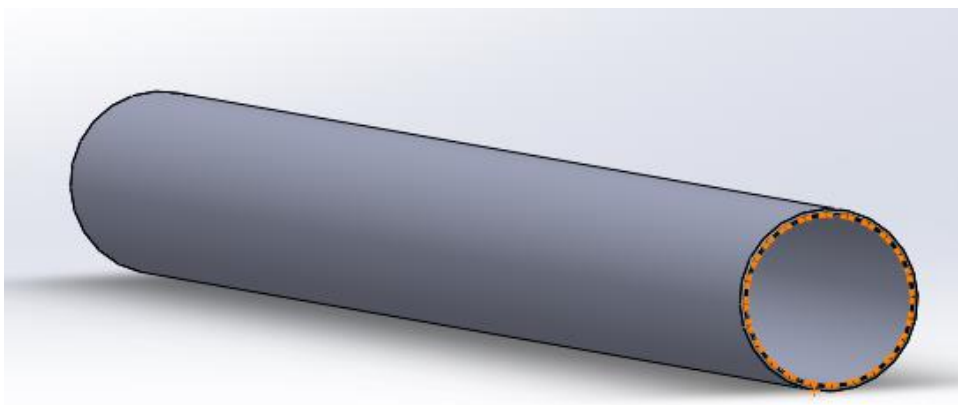
Figura 19 - Renderização do conjunto de palhetas com parafusos no SolidWorks.



Fonte: Autoria própria

Também foi modelado o eixo ao qual a palheta está acoplada, conforme mostrado na figura 20. Este eixo foi cortado no comprimento de 175mm para a realização das simulações estáticas.

Figura 20 - Modelagem do eixo ao qual as palhetas estão acopladas.



Fonte: Autoria própria

4.2 - SIMULAÇÕES ESTÁTICAS DO CONJUNTO DE PALHETAS

Primeiramente, é necessário que se conheça o limite de resistência à tração do material, bem como seu limite de escoamento.

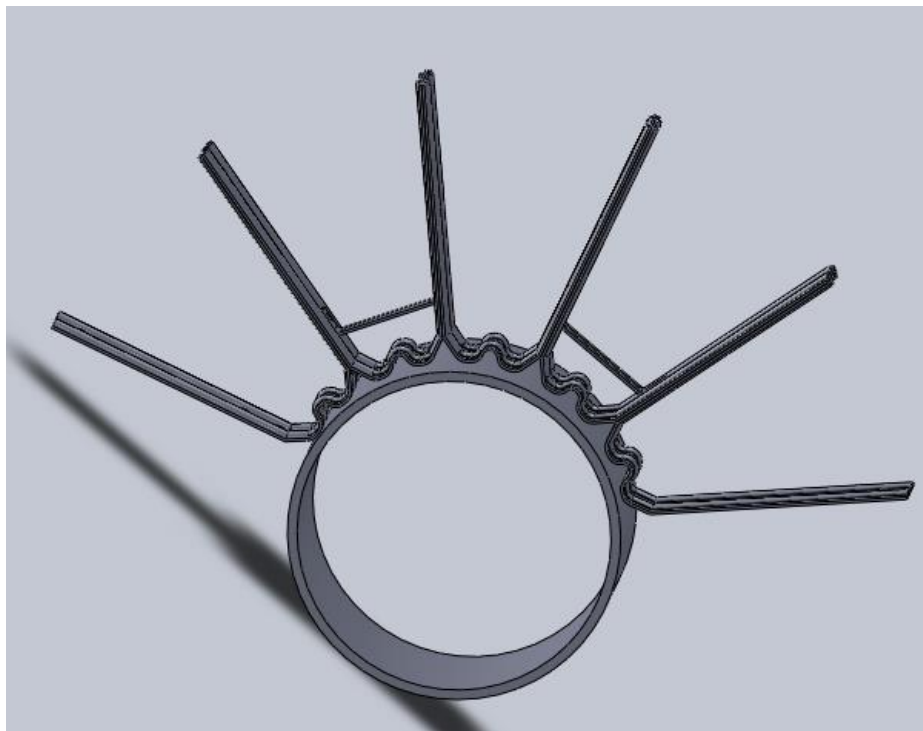
Segundo catálogo da Carbinox, para o aço AISI 304:

- Limite de resistência à tração = 540 MPa;
- Limite de escoamento = 240 MPa;

Para a realização das simulações estáticas dos esforços sobre o conjunto de palhetas foi utilizada a ferramenta Simulation do software SolidWorks. O critério de falha utilizado foi o de Von Mises.

Para ser realizada uma primeira avaliação, foi considerada a pior situação possível, que é a carga máxima obtida através da tabela 7 em toda a extensão das palhetas. Caso a tensão exceda o valor da tensão admissível, serão realizadas novas simulações, considerando a equação de forças obtidas através do gráfico da figura 15. Devido a simetria do conjunto, bem como a sua condição de operação (apenas 4 palhetas submersas) e limitações computacionais, foi modelado um conjunto com apenas 5 palhetas e travas para a realização da simulação, conforme mostrado na figura 21.

Figura 21 - Modelagem do conjunto de palhetas e travas para simulação.



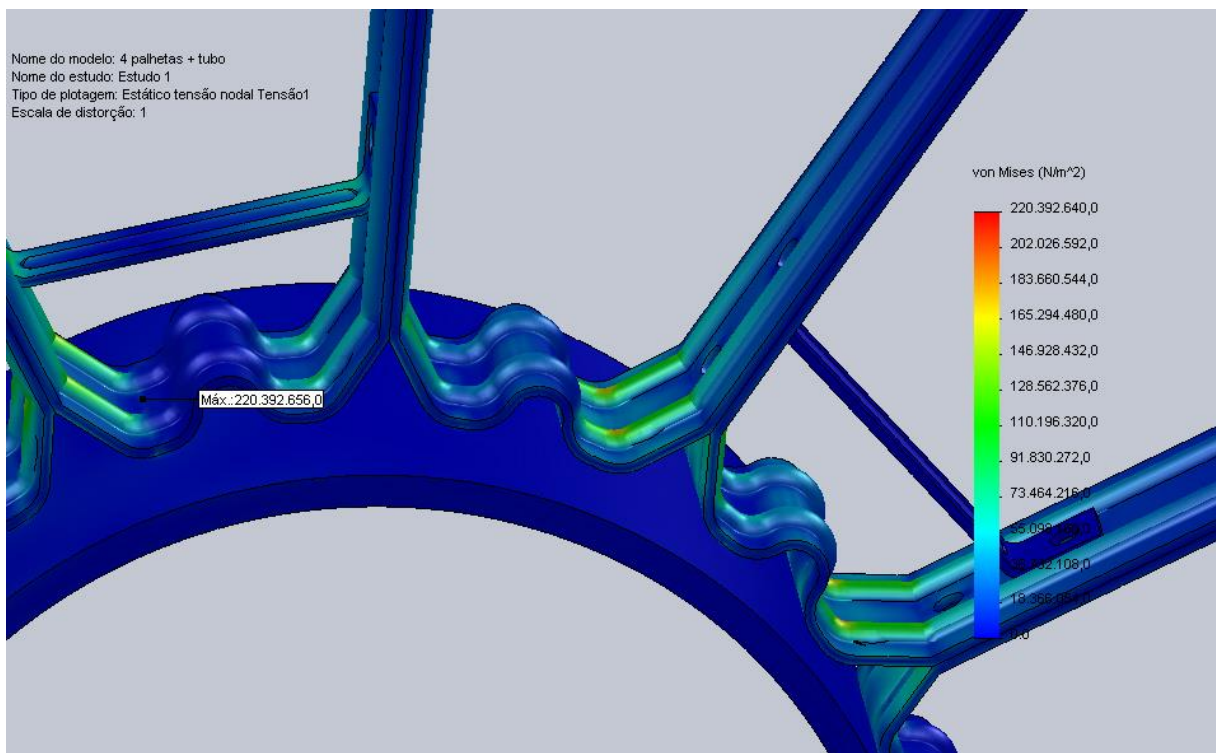
Fonte: Autoria própria

Devido a geometria da peça, foram necessárias várias tentativas de geração de malhas até que se encontrassem propriedades satisfatórias para a geração da mesma. Sendo assim, todas as simulações foram realizadas com malhas idênticas, cujas propriedades são listadas abaixo:

- Tipo de elemento: triangular;
- Tamanho do elemento - 5 mm;
- Tolerância - 0,25 mm.
- Qualidade da malha - alta;
- Total de nós - 407934 nós;
- Total de elementos - 240332 elementos.

O eixo, bem como as palhetas da extremidade, as quais não estão sujeitas ao carregamento foram fixados e o esforço de 408 N foi aplicado na mesma direção nas 4 palhetas centrais. Para esta simulação, não foi considerada a pré-carga nos parafusos. Pode-se verificar, através da figura 22, que o projeto foi validado quanto a força de arrasto, pois todo o conjunto apresentou tensão inferior ao limite do escoamento do material.

Figura 22 - Tensões no conjunto de palhetas submetidos apenas a força de arrasto.



Fonte: Autoria própria

Conforme mostrado na figura 22, o valor máximo de tensão encontrado foi de 220,39 MPa, segundo critério de Von Mises, abaixo do limite de escoamento do material, que é de 240 MPa.

O coeficiente de segurança de projeto pode ser expresso de acordo com a equação (16):

$$CS = \frac{Se}{\sigma} \quad (16)$$

onde:

Se = Limite de escoamento do material

σ = Tensão submetida pelo material

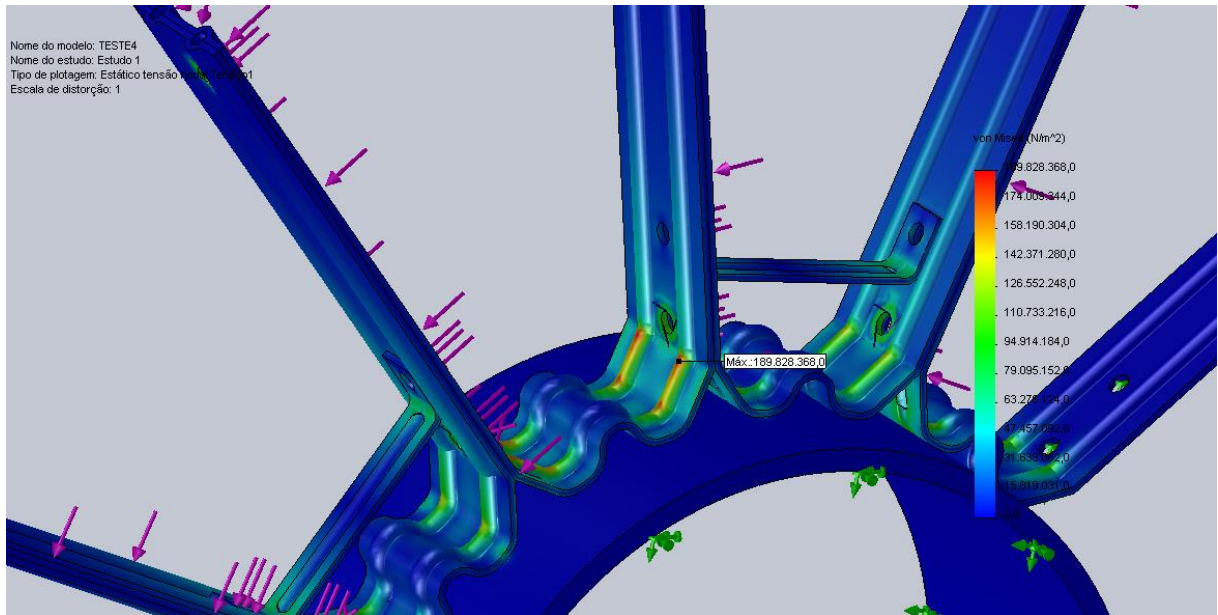
Sendo assim, para a primeira situação simulada, considerando apenas o esforço de arrasto máximo aplicado em toda a extensão da palheta, o coeficiente de segurança de projeto, segundo critério de Von Mises é igual a:

$$CS = \frac{240}{220,39}$$

$$CS = 1,09$$

Uma segunda análise foi realizada, considerando a pré-carga nos parafusos, a fim de se avaliar a influência deste carregamento no conjunto de palhetas. Para esta análise, foi utilizado o torque máximo nos parafusos, segundo tabela do Anexo I, para parafuso M10, classe 8.8, conforme desenho fornecido pela empresa interessada. Os elementos de fixação foram idênticos à simulação anterior (eixo e palhetas das extremidades fixados), e, além do torque de 50 N.m aplicado em todos os parafusos, foi considerada também a força de arrasto de 408 N em toda a extensão da palheta. Os resultados da simulação podem ser observados na figura 23.

Figura 23 - Tensões no conjunto de palhetas submetidos a força de arrasto e torque dos parafusos.



Fonte: Autoria própria

Os resultados observados na figura 23, também permitem validar o projeto com relação a força de arrasto e a pré-carga ideal dos parafusos, visto que a tensão máxima encontrada nesta situação: 189,83 MPa, foi inferior à tensão encontrada considerando-se apenas a força de arrasto atuando no conjunto, e, conseqüentemente, inferiores ao limite de escoamento do material: 240 MPa.

Sendo assim, para a segunda situação simulada, considerando o esforço de arrasto máximo aplicado em toda a extensão da palheta somado ao torque ideal dos parafusos segundo catálogo, o coeficiente de segurança de projeto, segundo critério de Von Mises é igual a:

$$CS = \frac{240}{189,83}$$

$$CS = 1,26$$

5 CONCLUSÕES

Através do conjunto de simulações obtidos, pode-se concluir que com relação ao carregamento de arrasto provocado pelos efluentes sobre a estrutura, o projeto está OK, com coeficiente de segurança igual a 1,09 em situação mais crítica. Em situação real de operação, a condição é mais favorável e este coeficiente de segurança tende a subir.

Conclui-se também que os parafusos, quando pré-carregados de maneira ideal, servem para aliviar as tensões as quais a estrutura está submetida, aumentando assim o coeficiente de segurança de projeto para 1,26, sob as mesmas condições de contorno.

Analisando as condições de montagem do conjunto, percebe-se que esta é uma condição crítica de projeto.

Como possível solução para o problema apresentado, será proposto à empresa interessada que seja feito um procedimento de montagem das palhetas de forma a aliviar a tensão que é gerada pelo torque aplicado na última palheta do conjunto.

Durante a realização do trabalho, foi possível a utilizar e aplicar o conhecimento adquirido toda a graduação, em disciplinas como Mecânica dos Fluidos, Elementos de Máquinas, Desenho Técnico, entre outras.

Através deste trabalho, foi possível para o autor obter conhecimento em software de modelagem e simulação SolidWorks.

O desenvolvimento desse trabalho foi de extrema importância para o amadurecimento pessoal e profissional do autor que felizmente poderá deixar material para consulta e possível continuidade do trabalho pela empresa interessada.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se realizar um estudo detalhado do ciclo de carregamento ao qual o conjunto de palhetas está submetido, de forma a simular a vida em fadiga do conjunto submetido às novas condições de carregamento (esforços de arrasto combinados ao torque dos parafusos obtidos por catálogo).

REFERÊNCIAS

BRASIL. Lei n.9605, de 12.02.1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9605.htm . Acesso em: 13 ago. 2015.

CARBINOX. **Divisões inoxidáveis**: informações técnicas. Disponível em: <http://www.carbinox.com.br/pt/produtos.asp?rg1=&categoria=1&linha=3&caracteristica=9> . Acesso em: 11 nov. 2015

CURY, Alexandre A. **Critérios de ruptura**. Disponível em: <http://www.ufjf.br/mac003/files/2015/01/criterios.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2015.

FADEL, K. H.; MATUSAKI, L.F. **Apostila do curso de Tecnologias de tratamento de efluentes**, 2013.

FAVORIT AÇOS ESPECIAIS. **Aço AISI 304 / AISI 304 L**. Disponível em: <http://www.favorit.com.br/produtos/acos-inoxidaveis/aco-aisi-304-aisi-304-l>>. Acesso em: 4 nov. 2015.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

JUVINAL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Projetos de componentes de máquinas**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

LIMA, Luciano R. Ornelas. **Critérios de resistência**. Disponível em: http://www.labciv.eng.uerj.br/rm4/Cap_2_criterios.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2015.

MUNSON, Bruce R.; OKIISHI, Theodore H.; YONG, Donald F. **Fundamentos da mecânica dos fluidos**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2004.

NORTH AMERICA STAINLES . **Properties of steal 304**. Disponível em: <http://www.northamericanstainless.com/wp-content/uploads/2010/10/Grade-304-> >. Acesso em: 11 nov. 2015.

SÃO PAULO (Estado). Decreto nº 8.468, de 08.09.1976. Aprova o Regulamento da Lei n.º 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio

ambiente. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**. Disponível em: <<http://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/1976/decreto-8468-08.09.1976.html>>. Acesso em: 10 ago. 2015.

TAE: mais oxigênio no tratamento de efluentes. Disponível em: <<http://www.revistatae.com.br/noticiaInt.asp?id=3942>>. Acesso em: 10 ago. 2015.

WHITE, F. M., **Mecânica dos fluidos**. 6. ed. Nova Iorque: Mc Graw Hill, 2010.


ANEXO A - TORQUE MÁXIMO EM PARAFUSOS

TOTAL
DISTRIBUIDORA MOTO PEÇAS LTDA

PORTO ALEGRE - RS (51) 3019-9191
SÃO JOSÉ - SC (48) 3035-7533
www.totalmoto.com.br

Fortbras
Libertação em Reparação Automotiva

TABELA DE TORQUE MÁXIMO EM PARAFUSOS

	RESISTÊNCIA DO MATERIAL						
	4.6	5.5	6.9	8.8	10.9	12.9	
MEDIDA	TORQUES A SEREM APLICADOS EM N.M.						MEDIDA
ROSCA	(PARA MKGF DIVIDIR POR 10)						SEXTAVADO
M 4	1	1,3	2,6	3	4,3	5,1	7
M 5	2	2,5	5,1	6	8,5	10,2	8
M 6	3,4	4,5	8,7	10,3	14,7	17,6	10
M 7	5,6	7,4	14,2	17,1	24,5	28,4	11
M 8	8,2	10,8	21,6	25,5	35,3	42,2	13
M10	16,7	21,6	42,2	50	70,6	85,3	15
M12	28,4	38,2	73,5	87,3	122	147	18
M14	45,1	60,8	116	138	194	235	22
M16	69,6	93,2	178	211	299	358	24
M18	95,1	127	245	289	412	490	27
M20	135	180	384	412	579	696	30
M22	182	245	471	559	784	941	32
M24	230	309	598	711	1000	1196	36
M27	343	461	887	1049	1481	1775	41
M30	466	623	1206	1422	2010	2403	46

Obs.: A tabela se aplicará entre parafusos e roscas com a mesma resistência.
Exemplo: As Porcas ou Roscas de alumínio tem resistência inferior ao parafuso!