

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

FELIPE DE LIMA ANDRADE CARDOSO

**ESTUDO CONCEITUAL E PROJETO DO RASPADOR DO SISTEMA
LIMPA GRADES DA USINA HIDRELÉTRICA DE JUPIÁ.**

**SÃO CARLOS, SP
2011**

FELIPE DE LIMA ANDRADE CARDOSO

**ESTUDO CONCEITUAL E PROJETO DO RASPADOR DO SISTEMA LIMPA
GRADES DA USINA HIDRELÉTRICA DE JUPIÁ.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, como requisito para
a conclusão do curso de graduação em
Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Projeto Mecânico

Orientador: Prof. Dr. Jaime Gilberto Duduch.

SÃO CARLOS, SP
2011

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

C268e Cardoso, Felipe de Lima Andrade.
Estudo conceitual e projeto do raspador do sistema limpa grades da usina hidrelétrica de Jupiá / Felipe de Lima Andrade Cardoso ; orientador Jaime Gilberto Duduch -- São Carlos, 2011.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica e Área de concentração em Projeto Mecânico) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

1. Sistema de limpeza. 2. Usinas hidrelétricas. 3. Plantas aquáticas. 4. Mexilhões-dourados. 5. Jupiá. 6. Raspador. I. Título.

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Candidato(s): Felipe de Lima Andrade Cardoso

Título: Estudo Conceitual e Projeto do Raspador do Sistema Limpa Grades da Usina Hidrelétrica de Jupiaá.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo
Curso de Engenharia Mecânica.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Luciana Montanari

Nota atribuída: 10,0 (dez)

Luciana Montanari
(assinatura)

Prof. Dr. Jonas de Carvalho

Nota atribuída: 10,0 (dez.)

[Assinatura]
(assinatura)

Prof. Dr. (orientador) Jaime G. Duduch

Nota atribuída: 10,0 (dez)

[Assinatura]
(assinatura)

Média: 10 (dez.)

Resultado: Aprovado

Data: 01, 12, 2011

RESUMO

O Reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) Souza Dias (Jupiá) apresenta grandes problemas no que diz respeito à infestação de plantas aquáticas submersas e mexilhões-dourados, que comprometem cada vez mais a eficiência do processo de geração de energia. Em determinados períodos do ano, sobretudo naqueles onde há maior vazão dos principais rios que abastecem Jupiá (Paraná, Tietê e Sucuriú), a hidrelétrica pode ser praticamente parada devido ao entupimento das grades de proteção das turbinas em razão do acúmulo de plantas submersas. O problema é agravado pelo acúmulo de mexilhões-dourados. Dados da CESP revelam que, desde 1994 até 1999, houve a substituição de mais de 1.055 painéis da grade de proteção da turbina de Jupiá, e a coleta de cerca de 50.000 m³ de plantas aquáticas mediante o uso de pórtico limpa grades. Estudos revelam que o alto fluxo de água ao longo dos rios Tietê e Paraná é a maior restrição ao uso do controle químico de plantas imersas, uma vez que é necessário um longo período de contato para a ação destes compostos. Alternativamente, desenvolveram-se equipamentos para o controle mecânico destas plantas, que consistem em um sistema de limpeza de grades composto por um raspador e uma caçamba de coleta de resíduos. Devido às constantes paradas de produção de energia, a Escola de Engenharia de São Carlos, em conjunto com a CESP, atua no desenvolvimento de um novo sistema de limpeza para as grades da UHE de Jupiá; sendo o escopo deste projeto o estudo conceitual e projeto do raspador deste novo sistema de limpeza.

PALAVRAS-CHAVE: Sistema de Limpeza. Usinas Hidrelétricas. Plantas Aquáticas. Mexilhões-Dourados. Jupiá. Raspador

ABSTRACT

The Reservoir of the Hydroelectric Power Plant (HPP) Souza Dias (Jupiá) has major problems regarding to the infestation of submerged aquatic plants and golden mussels, which also affects the efficiency of power generation. In certain times of the year, especially when there is greater flows of the major rivers that supply Jupiá (Paraná, Tietê and Sucuriú), the hydroelectric generation can be practically stopped due to clogging of the turbines' guardrails because of the accumulation of submerged plants, the problem is also compounded by the accumulation of golden mussels. CESP data revealed that, from 1994 to 1999, more than 1055 panels of Jupiá's guardrail turbine were replaced, and were collected about 50,000 cubic meters of water plants by using clean porch railings. Studies show that high water flow along the Paraná and Tietê rivers is a major constraint to the use of chemical control of submerged plants, since it takes a long period of contact for the action of these compounds. Alternatively, It was developed equipment for the mechanical control of these plants, which consist of grids' cleaning system composed of a scraper and a bucket to collect waste. Due to the constant power plant shutdowns, the School of Engineering of Sao Carlos, in partnership with the CESP, works in the development of a new cleaning system for the grids of Jupiá's Hydroelectric Power Plant. The scope of this project is a conceptual study and design of the scraper of this new cleaning system.

KEYWORDS: Cleaning System. Hydroelectric Power Plants. Aquatic Plants. Golden Mussels. Jupiá. Scraper.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	6
1.1 GENERALIDADES.....	9
1.1.1 UHE ENG. SOUZA DIAS (JUPIÁ)	9
1.1.2 MACRÓFITAS AQUÁTICAS.....	11
1.1.3 MEXILHÕES-DOURADOS	14
2. RESISTÊNCIA DE CORPOS IMERSOS EM FLUIDOS.....	18
2.1 ESTABILIDADE E EMPUXO.....	18
2.2 RESISTÊNCIA FLUIDODINÂMICA (ARRASTO)	20
3. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF).....	26
4. PROJETO E RESULTADOS.....	32
4.1 SISTEMA AUTOMÁTICO DE LIMPEZA DE GRADES	32
4.2 RASPADOR.....	34
4.2.1 ESTADO DA ARTE.....	34
4.2.2 PROJETO.....	37
4.2.3 SIMULAÇÕES E ANÁLISES	42
5. CONCLUSÃO.....	52
6. BIBLIOGRAFIA	53

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

As plantas aquáticas são de fundamental importância em sistemas hídricos, uma vez que desempenham importante papel no que diz respeito ao estoque de energia e carbono nas bases das pirâmides alimentares, promovendo, assim, habitats adequados para diversos organismos (NEVES, 2002). Entretanto, o desenvolvimento excessivo dessas plantas aquáticas prejudica a utilização destes corpos hídricos, não só ambientalmente, mas também para o uso humano; acarretando problemas no que diz respeito à navegação, à geração de energia em usinas hidrelétricas e à captação de água para irrigação e consumo (PITELLI, 1998).

O problema aqui exposto concerne principalmente aos prejuízos na geração de energia elétrica, em razão, principalmente, da grande concentração de plantas aquáticas, nos reservatórios das usinas da Companhia Energética de São Paulo-CESP. A situação mais grave ocorre na Usina Hidrelétrica Eng. Souza Dias (UHE de Jupia).

Em certas épocas do ano, notadamente nos períodos mais chuvosos, entre janeiro e abril, há o aumento da vazão de água da usina. Este aumento na vazão faz com que haja a fragmentação e deslocamento de plantas aquáticas submersas, as quais podem acumular-se nas grades de proteção da turbina das unidades geradoras e causar seu entupimento (TANAKA, 1998). O acúmulo destas plantas nas grades causa a diminuição da captação de água por parte da turbina, provocando oscilação de potência da mesma, e maior pressão sobre as grades, o que freqüentemente as deforma ou rompe, tornando inevitável a interrupção do funcionamento da unidade geradora. Nesse momento são acionados os pórticos limpa-grades, com o objetivo de retirar o material acumulado, gerando grande volume de plantas e outros materiais que necessitam ser carregados em caminhões e transportados para áreas de descarte (MARTINS, 2005).

Outro problema que também acomete a UHE de Jupia é a incrustação nas grades de tomada d'água das turbinas de uma espécie de molusco, popularmente conhecida como mexilhão-dourado. Esta espécie, originária da Ásia, causa um problema semelhante àquele causado pelas plantas submersas, pois sua aderência às grades provoca perda de carga do sistema, diminuindo o rendimento da Usina. Além disso, a redução da área livre provoca o aumento da força do fluxo de água sobre a grade, podendo ocasionar um rompimento desta (SIMEÃO, 2006).

Dados da CESP revelam que, desde 2004, houve a substituição de mais de 1.055 painéis da grade de proteção da turbina de Jupuíá, e a coleta de cerca de 50.000 m³ de plantas aquáticas mediante o uso de pórtico limpa grades, o que acarretou grande gasto com manutenção e perdas, e até mesmo interrupções, de geração de energia elétrica em decorrência do acúmulo de mexilhões, e, sobretudo, de plantas aquáticas, nestas grades.

Inspeções subaquáticas foram realizadas em algumas das unidades hidrelétricas da CESP e constatou-se que mexilhões-dourados, plantas subaquáticas e troncos estão distribuídos nas grades de tomada d'água conforme Figura 1.

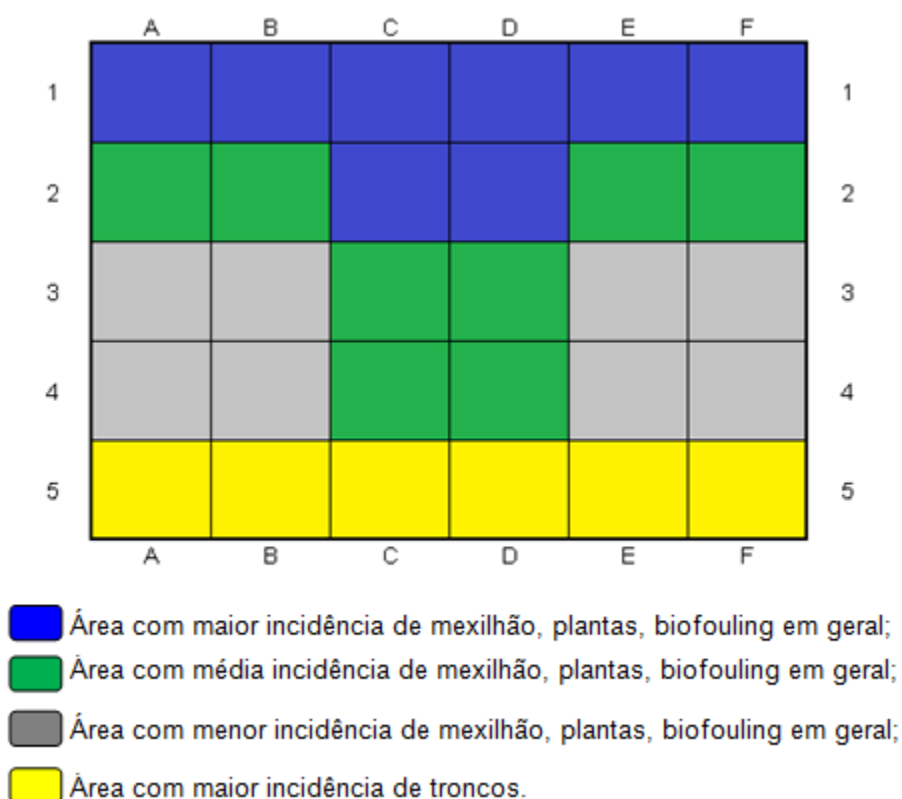


Figura 1 - Esquema de ocorrência de mexilhões, plantas e troncos nas grades das UHE's da CESP.

Com o intuito de ilustrar o problema, são apresentados a seguir imagens que dão uma dimensão da situação enfrentada em algumas usinas hidrelétricas da CESP, sobretudo na UHE Eng. Souza Dias (Jupuíá). A incrustação de mexilhões-dourados nas grades da UHE é ilustrada na Figura 2, onde também está demonstrada a danificação das grades de tomada d'água em decorrência do aumento da força de arraste hidrodinâmico causado pela concentração de algas e moluscos nas grades. Já o problema da proliferação de plantas aquáticas é ilustrado na Figura 3.



Figura 2 – À esquerda grade tomada por mexilhões, à direita rompimento de grade devido ao aumento do arraste hidrodinâmico em razão do acúmulo de plantas e mexilhões.



Figura 3 - Proliferação de Algas na UHE de Jupuí.

Devido às constantes paradas de produção de energia e elevados gastos com manutenção e troca das grades de tomada d'água, a Escola de Engenharia de São Carlos, em conjunto com a CESP, atua no desenvolvimento de um novo sistema de limpeza para as grades da UHE de Jupuí. Dentre as propostas no projeto deste sistema, podemos citar:

- Realizar a limpeza sem retirada de material;
- Realizar a limpeza das grades sem redução significativa de carga da unidade geradora;
 - Realizar a limpeza de forma automática – detecção do entupimento e monitoramento da condição de limpeza;
 - Utilização de poucos operadores;
 - Equipamento de alta robustez e confiabilidade;
 - Baixo custo operacional e baixa manutenção;
 - Possibilidade de utilização do equipamento em mais de uma tomada d'água.

O escopo do trabalho aqui apresentado é o estudo conceitual e projeto do raspador deste novo sistema de limpeza, que substituirá o pórtico limpa-grades da UHE de Jupia.

1.1 GENERALIDADES

1.1.1 UHE ENG. SOUZA DIAS (JUPIÁ)

Situada no Rio Paraná, entre as cidades de Andradina e Castilho (SP) e Três Lagoas (MS), a UHE Jupia é a terceira maior usina hidrelétrica do Brasil e também uma das mais eficientes, atrás apenas da UHE de Itaipu. Sua construção foi iniciada na primeira metade da década de 1969, pelo governador Adhemar Pereira de Barros, e finalizada no ano de 1974, utilizando tecnologia 1974.

A usina possui 14 (catorze) unidades geradoras com turbinas tipo Kaplan, possuindo uma potência total instalada de 1.551,2 MW (CESP, 2011). Possui também dois grupos de turbina-gerador, para serviço auxiliar, com uma potência instalada de 4.750 kW por grupo. Sua barragem tem 5.495 m de comprimento e seu reservatório 330 km². A usina dispõe ainda de uma eclusa, que possibilita a navegação no Rio Paraná e a integração hidroviária com o Rio Tietê.

A seguir, a título de conhecimento, apresentarei os dados característicos da UHE de Jupia, retirados do site da CESP na Internet, bem como uma foto ilustrativa da represa (Figura 4) e um esquema mostrando a unidade geradora em corte (Figura 5).

Tabela 1 - Características Gerais da UHE de Jupuíá (CESP, 2011).

Condições de montante	
Área da bacia hidrográfica	470.000 km ²
Área do espelho d'água (N.A. 280,00 m)	330 km ²
Volume morto	2.450 x 10 ⁶ m ³
Volume útil	903 x 10 ⁶ m ³
Volume reservado para cheia de projeto	168 x 10 ⁶ m ³
Barragem de concreto	
Comprimento no coroamento	1.040,00 m
Barragem de terra	
Comprimento no coroamento	-
Ombreira esquerda	2.385,00 m
Ombreira direita	2.070,00 m
Níveis característicos de montante	
N.A. máximo maxiorum	280,50 m
N.A. máximo útil	280,00 m
N.A. mínimo útil	280,00 m
Vazão média de longo termo (MLT período 1931 - 2005)	6.350 m ³ /s
Vazão defluente máxima média diária observada (10/02/83)	28.943 m ³ /s
Condições de jusante	
N.A. máximo maxiorum	270,00 m
N.A. máximo	265,00 m
N.A. mínimo	254,60 m
Vazão máxima dos vertentes (N.A. 280,50 m)	50.130 m ³ /s
Vazão turbinada nominal total	6.440 m ³ /s
Unidades geradoras - turbinas	
Tipo	Kaplan de eixo vertical
Turbinas instaladas	14
Potência nominal unitária	103.000 kW
Queda de referência	21,30 m
Engolimento máximo	727 m ³ /s
Unidades geradoras - geradores	
Tipo	Umbrella eixo vertical
Potência nominal	110.800 kW
Potência nominal total instalada	1.551.200 kW
Órgãos de descarga	
Comportas de superfície	4
Dimensões do vão	15,00 x 12,80 m
Cota da soleira	268,00 m
Cota de topo da comporta de superfície	280,00 m
Descarga máxima por vão (N.A. 280,00 m)	1.250 m ³ /s
Descarga máxima por vão (N.A. 280,50 m)	1.358 m ³ /s
Comportas de fundo	37
Dimensões do vão	10,00 x 7,61 m
Cota da soleira	255,00 m
Descarga máxima por vão (N.A. 280,00 m)	1.189 m ³ /s
Descarga máxima por vão (N.A. 280,50 m)	1.208 m ³ /s



Figura 4 - Fotos da UHE de Jupuí (CESP, 2011).

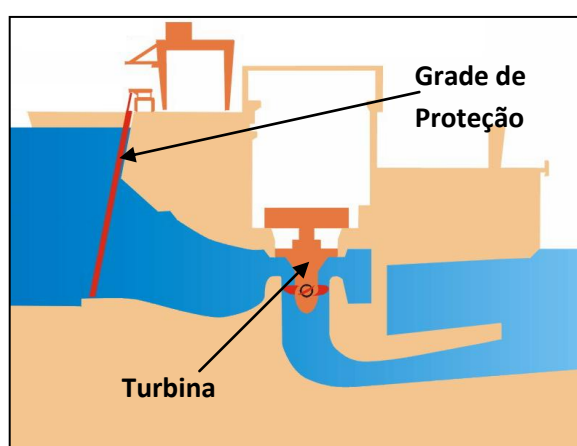


Figura 5 - Esquema em corte da UHE de Jupuí (CESP, 2011).

1.1.2 MACRÓFITAS AQUÁTICAS

O fato de ocorrerem infestações por plantas aquáticas em ambientes hídricos é uma indicação de que a água ali existente apresenta alguns problemas, que em sua maioria, possuem solução complexa, como por exemplo: nutrientes em excesso advindos de fontes como o esgoto doméstico, resíduos industriais, erosão de terras agrícolas e elevada decomposição de plantas e outros organismos.

O reservatório da Usina Hidrelétrica Engenheiro Souza Dias (Jupuí), apresenta grande problemas devido à presença de uma elevada concentração de plantas aquáticas submersas na água de seu reservatório, sobretudo das espécies *Egeria densa*, *Egeria najas* e *Ceratophyllum demersum*. Nos pontos de maior colonização, correspondentes às lagoas marginais situadas o leito do rio Tietê, essas plantas ocupam grandes extensões no reservatório, gerando acúmulos de até 50 t/ha. Nos períodos chuvosos, as cheias deslocam massas de plantas em direção

à usina, e se acumulam nas grades de proteção das unidades, tornando obrigatória sua remoção, a fim de evitar o entupimento das grades (MARCONDES, 2003).

Além dos tipos de plantas submersas já citadas, existem outros tipos de plantas, não submersas, que também prejudicam a operação da usina, como é o caso de espécies como *Eichhornia crassipes* (aguapé), *Typha subulata* (taboa) e *Pistia stratiotes* (alface-d'água), como ilustra a Figura 6.

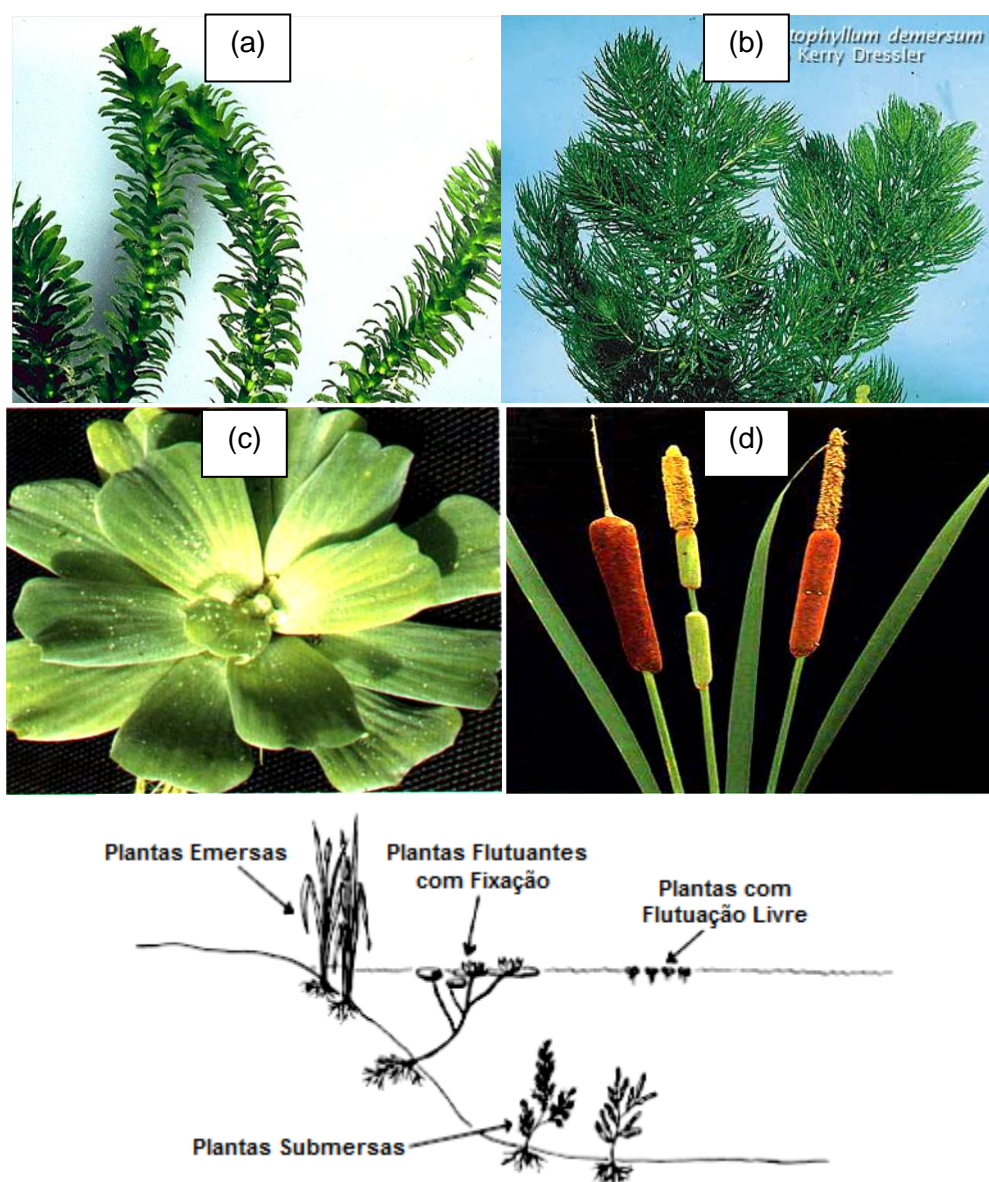


Figura 6 – (a) *Egeria densa*, (b) *Ceratophyllum demersum*, (c) *Pistia stratiotes* (alface-d'água), (d) *Typha subulata* (taboa), por fim um esquemático d distribuição de diversos tipos de plantas que encontram-se às margens do reservatório em questão.

A proliferação e alta densidade destas plantas trazem alguns prejuízos, dentre eles pode-se citar a captação de água para o abastecimento e consumo humano e

animal e irrigação; prejudicam também navegação, pois dificultam ou impedem a passagem de embarcações pela hidrovia ou eclusas; a pesca, pois dificultam o acesso ao corpo d'água e provocam o crescimento de peixes atrofiados; dificultam, ou até mesmo impedem o lazer; ameaçam a saúde pública, uma vez que facilitam o acúmulo de lixo; causam impactos ambientais como a morte de peixes e a redução de troca gasosa entre a água e atmosfera; além de tornarem-se prejudiciais à geração energia.

Dados de relatórios da CESP apontam que, para o caso da UHE de Jupia, quando as plantas aquáticas bloqueiam a passagem de água pelas grades de proteção da turbina, a potência de geração de energia é reduzida para 50%, a fim de evitar danos às grades. Entretanto, caso haja avarias nessas grades, há a necessidade de substituição dos painéis danificados; e para substituição de painel, a unidade geradora correspondente àquele painel fica parada por cerca de 40 horas.

Para se ter idéia da extensão do problema, em fevereiro de 1999, deixou de ser gerada energia suficiente para atender cerca de 1,65 milhões de domicílios. A seguir é apresentado um gráfico coletado da CESP que mostra uma média mensal de geração de energia e um período de 05 anos; neste gráfico, conseguimos ver uma clara diminuição dos níveis médios de geração de energia entre janeiro e abril, com destaque para o mês de fevereiro, período mais chuvoso (Figura 7).

Geração Mensal Média de Energia (MWh) - 1994 a 1999

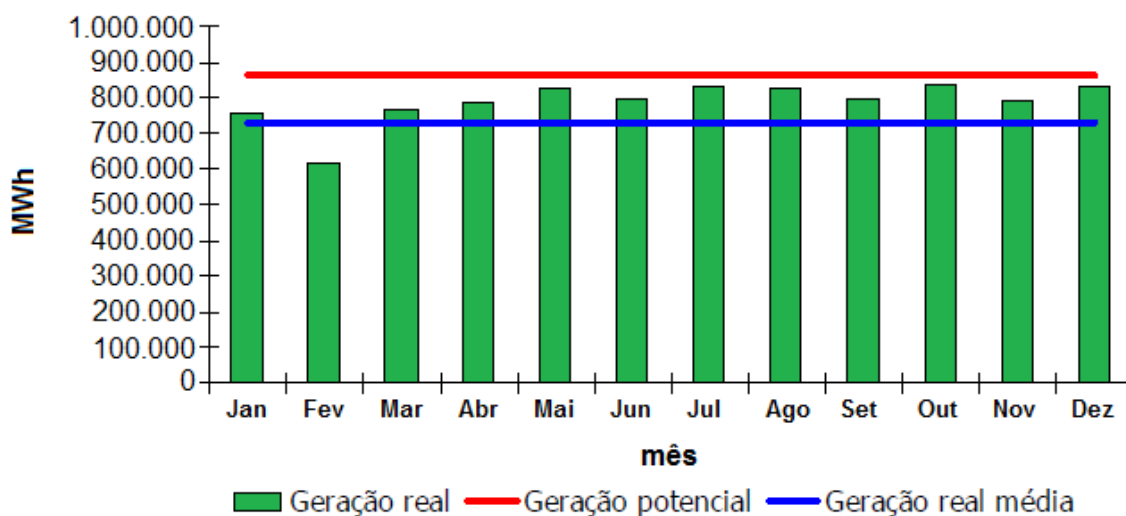


Figura 7 - Energia Mensal Média gerada entre 1994 e 1999 (CESP, 2011).

A fim de controlar os diversos tipos de plantas existentes, a CESP vem realizando alguns estudos de controle preventivo de entupimento de suas grades, dentre eles podemos destacar: controles químicos, através da avaliação de compostos e herbicidas que possam mitigar a proliferação destas plantas; controle biológico, com o levantamento de inimigos naturais das macrófitas e o uso de um barco colheitadeira para remover as algas que ficam na superfície. Além disso, é realizada a limpeza da grade da usina de tomada d'água por meio de pórticos limpa-grades (Figura 8).

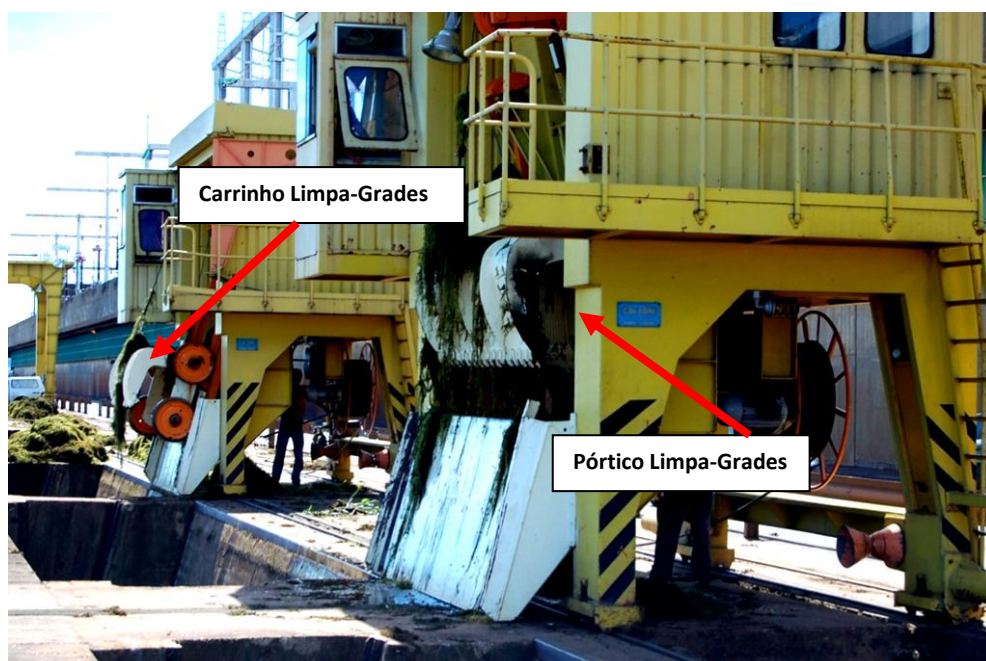


Figura 8 - Sistema de Pórtico e Carrinho Limpa-Grades atualmente utilizado na UHE de Jupia.

1.1.3 MEXILHÕES-DOURADOS

Há vários casos de invasões de espécies de invertebrados aquáticos em todo o mundo, e especificamente no Brasil, há o relato da introdução de várias espécies de camarões e caranguejos, e mais recentemente do mexilhão-dourado (*Limnoperna fortunei*). A introdução de espécies em um novo ecossistema é algo preocupante, uma vez que em ambientes favoráveis a estas, com a ausência de predadores naturais, parasitas e/ou competidores, estas espécies afetam as comunidades biológicas ali existentes, podendo haver altas densidades populacionais dessas novas espécies introduzidas (SIMEÃO, 2006).

O *Limnoperma fortunei*, conhecido popularmente como mexilhão-dourado (CESP, 2011), é um molusco bivalve, que possui duas conchas simetricamente articuladas. Este gênero compreende algumas espécies (*L. siamensis*, *L. depressa*, *L. supoti* e *L. lacustris*) que possuem diferença marginal, mas que são provavelmente sinônimos (SIMEÃO, 2006). Quando adultos, estes moluscos possuem um tamanho médio de 3 cm a 4 cm; seu ciclo de vida é de aproximadamente 3 anos e a suas características marcantes são seus hábitos epifaunais (se fixam em substratos rígidos por meio de bissos) e grande adapção à diversas condições ambientais.



Figura 9 - Bissos de mexilhão tipo zebra (CESP, 2011).

Originário do sudeste da Ásia e comumente encontrado na China, Coréia, Taiwan e Tailândia, acredita-se que a introdução deste molusco na América do Sul se deu através da água de lastro de navios. No Brasil, sua presença foi registrada pela primeira vez em 1998, no Delta do Rio Jacuí, próximo a Porto Alegre. Atualmente, esta espécie já infestou diversos lagos e reservatórios da Região Sul e do Pantanal, destacando-se alguns rios sul americanos como o Guaíba, Uruguai, Paraguai e Paraná; atualmente o molusco é um dos problemas relacionados à obstrução das grades de tomadas d'água da UHE de Jupia.

Este molusco tornou-se um problema em sistemas hídricos (Figura 10), pois causam a obstrução de captações de água, de filtros, de sistemas de resfriamento e drenagem e danos em motores e embarcações. Sua incrustação em grades de tomadas d'água em Usinas Hidrelétricas (Figura 11) provoca perda de carga no sistema hidráulico, diminuindo assim seu rendimento. Além disso, a redução da área

livre para escoamento provoca aumento da força do fluxo de água sobre estas grades, podendo ocasionar rompimento.



Figura 10 - Entupimento e obstrução de dutos por mexilhões. Note também que estes mexilhões propiciam a oxidação de tubulações, como visto à direita.



Figura 11 - Grade de tomada d'água de usina hidrelétrica infestada por mexilhões-dourados.

A CESP desenvolveu alguns métodos de prevenção e controle de infestações do *limnoperma fortunei* nas UHEs (Figura 12), como por exemplo:

- Uso de materiais inóspitos à fixação dos mexilhões, para revestimento externo e interno de estruturas susceptíveis à incrustações;

- Injeção de cloro no tratamento da água utilizada no sistema de resfriamento das unidades geradoras e sistemas considerados vitais para a geração de energia das UHEs;
- Adaptação de equipamentos para facilitar procedimentos de limpeza, como a introdução de borrachas nas pontas dos carros dos sistemas de limpeza das grades de tomadas d'água a fim de adequar sua operação à remoção do limnoperma fortunei.



Figura 12 - À esquerda, operador aplicando tinta para minimizar a fixação de mexilhões em grade de UHE. À direita, adaptação de palhetas de borracha nas pontas de limpador de grade a fim de remover mexilhões incrustados.

2. RESISTÊNCIA DE CORPOS IMERSOS EM FLUIDOS

Aqui será feita uma apresentação simplificada da relação entre o movimento de corpos imersos, ou em flutuação, em um meio fluido e a ação de forças que agem sobre aqueles em decorrência da ação dos fluidos.

Devido à complexidade de determinação das tensões existentes em um fluido em função do espaço, tempo, e de alterações imprimidas ao mesmo devido à imersão de corpos de geometrias variadas em seu escoamento, simplificações são feitas no modelo; como, por exemplo, a consideração de incompressibilidade de um fluido. A complexidade de análise destas forças e comportamentos cresce também com o aumento da viscosidade de um fluido, complexidade do corpo imerso e turbulência fluidodinâmica; medida através de considerações acerca do número de Reynolds, que será mais tarde apresentado.

Nesta seção, é apresentada uma introdução básica ao princípio de empuxo e sustentabilidade de um corpo (princípio de Arquimedes) e à força de arrasto fluidodinâmica. A compreensão da física por trás destas teorias é importante para o projeto da máquina em questão, uma vez que sua operação ocorre em regime fluidodinâmico, e, por conseguinte, seu projeto deve levar em consideração a sustentação e minimização de forças de arraste na máquina, a fim de promover uma condição de operação eficiente para o sistema de limpeza de grades aqui proposto.

2.1 ESTABILIDADE E EMPUXO

Considerando-se um objeto imerso, ou flutuando, em um fluido, a força vertical que atua sobre ele em decorrência da pressão deste líquido é chamada de empuxo. Para a análise em seguir, consideraremos esta força aplicada em elementos de volumes cilíndricos, assim como mostrado na Figura 13.

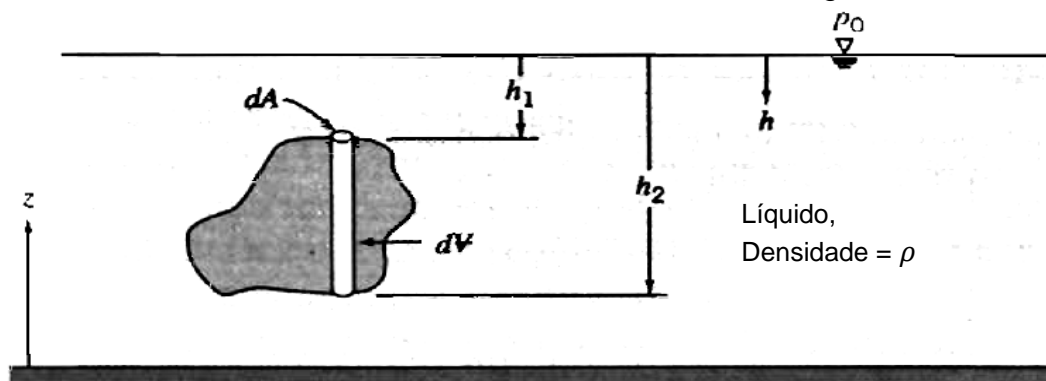


Figura 13 - Corpo imerso em um líquido em repouso (FOX, 2004)

Sendo assim, para um fluido em repouso, temos que:

$$\frac{dp}{dh} = \rho g$$

Considerando a densidade do líquido como uma constante, integraremos a expressão anterior, obtendo assim:

$$p = p_0 + \rho gh$$

Sendo a força resultado do produto da pressão exercida sobre uma área, temos que:

$$F_z = (p_0 + \rho gh_2)dA - (p_0 + \rho gh_1)dA = \rho g(h_2 - h_1)dA$$

Podemos escrever $(h_2 - h_1)dA = dV$, ou seja, o volume do elemento/objeto em questão, podemos reescrever da seguinte forma:

$$F_z = \int dF_z = \int_V \rho g V \quad (I)$$

A relação exposta em (I) pode ser traduzida como o Princípio de Arquimedes, que enuncia que “*Todo corpo mergulhado num fluido em repouso sofre, por parte do fluido, uma força vertical para cima, cuja intensidade é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo.*” Conta-se que esta relação foi utilizada por Arquimedes em 220 a.C para determinar a quantidade de ouro contida na coroa do Rei Hiero II (FOX, 2004).

O empuxo nada mais é que a pressão hidrodinâmica exercida por um fluido sobre um corpo imerso no mesmo, e que é a resultante das pressões infinitesimais que o fluido exerce sobre este objeto imerso. Como a coluna de líquido é maior na parte inferior do corpo, a pressão ali será maior, e daí a resultante das forças será apontada para cima e diretamente proporcional ao volume do corpo imerso (Figura 14).

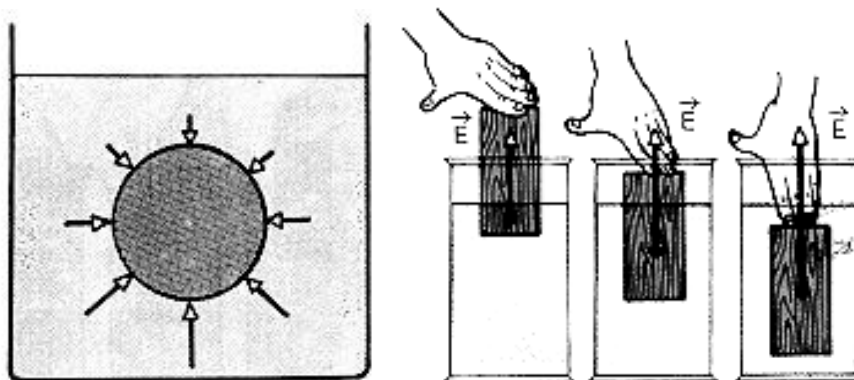


Figura 14 - Figuras mostrando a dependência do empuxo com relação à profundidade e volume do corpo mergulhado.

Do exposto, pode-se chegar à algumas condições de sustentação e estabilidade de um corpo em um fluido. A condição de estabilidade acontecerá quando o empuxo igualar a força peso do mesmo, podendo para isso o corpo estar totalmente imerso, como é o caso de submarinos, ou parcialmente imerso, como no caso de icebergs. Para o caso do sistema limpa-grades da UHE de Jupia, como a descida do carrinho limpador acontecerá mediante seu peso-próprio, a condição de sustentação não deve ocorrer; devendo para isso o empuxo se apresentar sempre menor que o peso do carrinho de limpeza em questão.

2.2 RESISTÊNCIA FLUIDODINÂMICA (ARRASTO)

Um corpo imerso em um fluido em repouso sofre por parte deste uma força no sentido oposto ao seu movimento; força esta denominada de arrasto. Analogia semelhante poderia ser feita em um escoamento com velocidade uniforme, no infinito, ao redor de um corpo imóvel; sendo este o caso do escoamento sobre o sistema limpa-grades da UHE de Jupia.

Para o estudo de escoamentos, e do arrasto, é conveniente a introdução de uma grandeza criada a partir das experiências de Reynolds, um físico e engenheiro hidráulico irlandês, sobre o escoamento de fluidos incompressíveis em tubos cilíndricos longos, que mostrou ser um caso particular de uma teoria mais geral, a chamada resistência fluidodinâmica. Os dados coletados por Reynolds servem para classificar um escoamento entre laminar e turbulento. Para o caso de escoamentos externos (aqueles que não ocorrem no confinamento de paredes), como é o caso em questão, caracterizam-se por regime laminar aqueles que apresentam $R_e \leq 5 \cdot 10^5$ (FOX, 2004). O significado físico deste número adimensional é um quociente de forças, expresso por forças de inércia sobre forças de viscosidade, e a sua fórmula é expressa por:

$$R_e = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (II)$$

Onde:

R_e = Número de Reynolds;

ρ = massa específica do fluido;

μ = viscosidade dinâmica do fluido;
 v = velocidade média do fluido;
 D = longitude característica do fluxo.

Observando (II), pode-se ver que a viscosidade de um fluido é de fundamental importância para entender um dado escoamento. Por isso, há uma divisão clara entre dois tipos de escoamentos, os viscosos e os não-viscosos, onde se desprezam os efeitos da viscosidade do fluido (escoamentos invíscidos), sendo a viscosidade do fluido, μ , é considerada nula. Entretanto esta é uma situação ideal, uma vez que todos os fluidos possuem escoamento; fazendo assim com que haja tensões de cisalhamento de uma camada de fluido sobre a outra, conforme conjunto de equações a seguir, onde u , v e w são versores de velocidade nas direções x , y e z , respectivamente, e τ a tensão de cisalhamento:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

A região de aparecimento destas tensões possui maior ou menor extensão em função de alguns parâmetros como características geométricas do corpo, velocidade e propriedade do fluido em questão. Sob determinadas condições, as ações viscosas ficam limitadas sobre uma fina camada, denominada de camada limite. Dependendo do gradiente de pressão na camada limite, podem ocorrer o deslocamento da camada com o aparecimento de uma nova região de escoamento, na parte traseira dos corpos, região esta denominada de esteira (*wake*) (Figura 15).

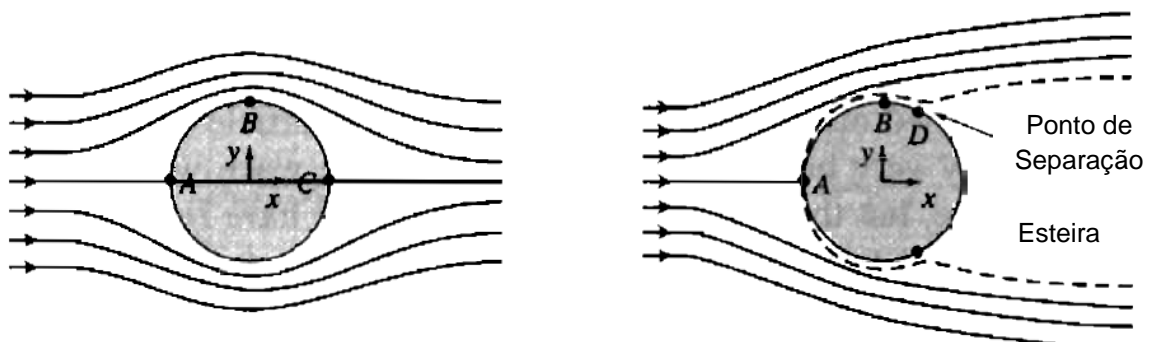


Figura 15 - Configuração qualitativa do escoamento incompressível sobre um cilindro. À esquerda um escoamento invíscido e à direita viscoso (FOX, 2004).

Devemos aqui lembrar que além das tensões de cisalhamento já expostas, o movimento de um fluido, e como conseqüência de um corpo imerso no mesmo, sofre a ação de forças normais (que não serão aqui formuladas em razão de simplicidade de análise) e que, no escoamento de um fluido real, são causadas pelos mesmos atritos internos (frutos da viscosidade) que causam a tensão cisalhante. Para esquematizar os dois tipos de força e tensão atuantes neste sistema (meio contínuo), utilizaremos a representação mostrada na Figura 16.

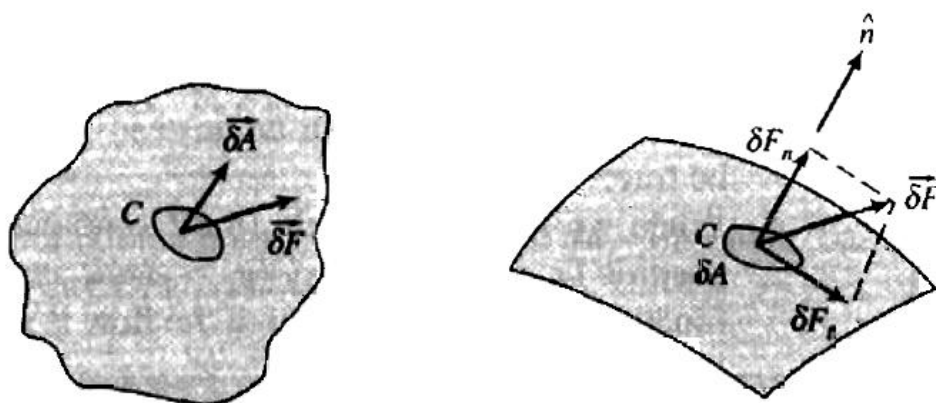


Figura 16 - Conceito de tensão num meio contínuo (FOX, 2004).

Onde podemos escrever tensões normais (σ) e cisalhantes (τ) da seguinte forma:

$$\sigma_n = \lim_{\delta A_n \rightarrow 0} \frac{\delta F_n}{\delta A_n}$$

$$\tau_n = \lim_{\delta A_n \rightarrow 0} \frac{\delta F_t}{\delta A_n}$$

Um número infinito de planos pode passar pelo ponto C (Figura 16), representando infinitas tensões associadas a estes planos. Entretanto, o estado plano de tensões pode ser completamente descrito através das tensões atuantes em três pontos que passam por este ponto C, sendo então especificada por nove componentes, conforme esquematizado abaixo:

$$\text{Estado de tensões} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

Esse estado de tensões pode ser representado por um elemento cúbico elementar onde são distribuídas as tensões conforme a Figura 17.

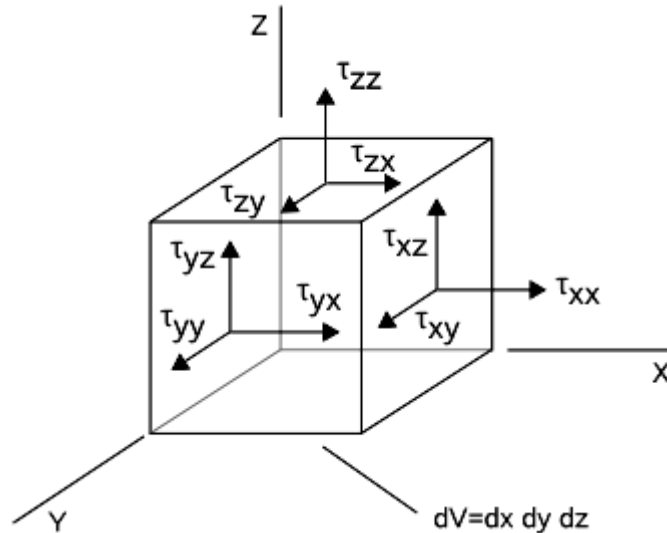


Figura 17 - Elemento cúbico elementar de estado de tensões.

De posse dos conceitos acerca de tensões, viscosidade e Reynolds, podemos agora fazer uma discussão sobre estas variáveis.

Quando o número de Reynolds é baixo, as forças viscosas têm uma importante influência na configuração do escoamento. O fluido é deformado pelo movimento do objeto imerso e a resistência é causada principalmente pelas forças que são necessárias para deformar o meio fluídico. No corpo, a resistência total não é somente aquela resultante da distribuição de tensões normais e de cisalhamento sobre sua superfície, mas sim da distribuição de tensões sobre toda a região do fluido que foi deformada, esta é a chamada resistência de deformação (SCHIOZER, 1990).

Para números de Reynolds altos, talvez fosse lógico pensar que a influência da viscosidade na resistência seja desprezível. Entretanto, num escoamento não viscoso, é nula a resistência devido a efeitos de tensões de distribuição normal. Logo, conclui-se que, dada a existência destas tensões, que a viscosidade tem um importante papel no seu aparecimento. A primeira consequência da viscosidade é direta, ou seja, embora a ação de deformação, a altos números de Reynolds, se restrinja a uma fina camada ao redor do corpo, aí as variações de velocidade são tão intensas que mesmo no caso de viscosidade pequena resultam tensões de cisalhamento consideráveis, responsáveis por uma parte da resistência ao qual um

corpo imerso fica submetido, é a chamada resistência viscosa superficial (SCHIOZER, 1990).

Apesar da resistência que atua em um corpo ser composta de duas parcelas, a resistência superficial e a de forma, a divisão entre elas torna-se complexa, de modo que, na prática, essas resistências (ou arrastos) podem ser representadas da seguinte forma (GILES, 1967):

$$R = \frac{1}{2} C_R \rho A V^2$$

Onde:

R = Resistência ou arrasto;

C_R = Coeficiente de resistência ao avanço;

ρ = massa específica do fluido;

A = Área característica, usualmente a área projetada sobre um plano perpendicular ao movimento do fluido;

V = velocidade relativa do fluido em relação ao corpo.

O Coeficiente de resistência ao avanço C_R depende de fatores como a forma, posicionamento, volume e velocidade de um corpo. Para os casos onde a resistência ao avanço é formada quase que exclusivamente pela resistência de forma, o C_R torna-se praticamente independente da velocidade e volume de um corpo imerso no fluido.

Do exposto, podemos traçar um paralelo entre o tamanho da esteira gerada pela separação do fluido que se move contra um obstáculo (Figura 15) e o arrasto. Ao se diminuir o tamanho da esteira, o escoamento do fluido se deformará menos; e dado que esta deformação é responsável pelas forças de arraste, diminuiremos também o arraste.

Para projetar a carenagem, ou fuselagem, de um corpo de forma conveniente, pode-se reduzir o gradiente adverso de pressão (deformação sofrida pelo fluido), e assim reduzir o arraste. Por exemplo, utilizando uma seção gradualmente afunilada, como mostrado na figura a seguir, pode-se diminuir este gradiente, e como consequência teremos um perfil de pressões mais uniformes, resultando assim em uma menor força de arraste sobre a estrutura.

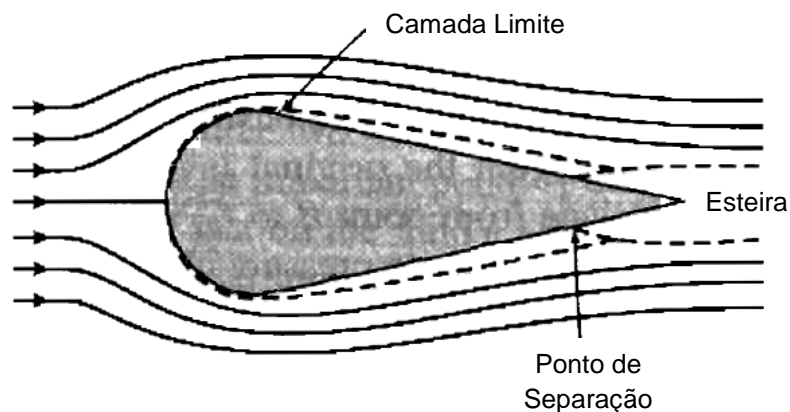


Figura 18 - Escoamento em torno de um objeto com perfil carenado (FOX, 2004).

Logo, no que diz respeito ao projeto do sistema de limpeza de grades de Jupirá, e aos seus componentes, deve-se realizar o projeto tentando sempre reduzir a área perpendicular ao curso da tomada d'água (curso do rio), procurando também, sempre que possível, realizar o projeto baseado em formas aerodinâmicas, semelhantemente àquela mostrada na Figura 18.

3. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

O método dos elementos finitos (MEF), também chamado de análises de elementos finitos, baseia-se na idéia de representar uma geometria complexa em blocos simplificados; em outras palavras, consiste em transformar um grande objeto complexo em objetos menores e de geometria simples, cuja formulação matemática para resolução de determinado problema seja menos complexa. Assim, através da sobreposição de efeitos nestes objetos menores, conseguimos obter uma solução adequada para o problema em questão.

Os métodos clássicos de resolução de problemas aproximam a solução de um sistema de equações, dentro do domínio do problema, por uma combinação linear de funções aproximação multiplicadas por certos parâmetros, que passam ser incógnitas do problema e são calculados de forma que a equação seja satisfeita. Estas funções aproximação devem satisfazer as condições de contorno para o problema como um todo, dentro do domínio. Sendo assim, a construção destas funções torna-se complexa e de grande restrição à utilização de métodos clássicos.

No método dos elementos finitos, o domínio do problema é aproximado por um conjunto de domínios e sub-domínios de geometria simples, elementos finitos, para os quais é possível definir de forma sistemática as funções aproximação necessárias para a solução do problema. Através de condições de continuidade e balanço das variáveis que compõe a interface de um elemento, é possível estabelecer equações para todo o domínio, este processo é chamado de montagem do sistema global de equações e viabiliza a solução de problemas complexos (PETRY, 2002).

Para ilustrar, de forma simplificada, este efeito de aproximação de um objeto complexo por objetos mais simples, utiliza-se a exemplificação da aproximação da área de um círculo utilizando elementos triangulares, conforme figura a seguir.

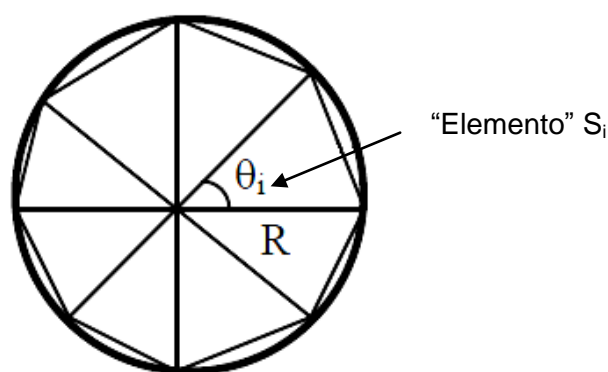


Figura 19 - Figura representativa da simplificação da área de um círculo por elementos triangulares.

Da representação acima, tem-se que a área de um triângulo pode ser dada por $S_i = \frac{1}{2}R^2 \sin \theta_i$. Sendo assim, ao considerarmos todo o círculo, a área deste será a soma de áreas do número triângulos (N) e a solução será mais exata quanto maior for o número destes elementos triangulares, tendendo à exatidão quando $N \rightarrow \infty$. Assim, temos matematicamente que a área do círculo é dada por $S_N = \sum_{i=1}^N S_i = \frac{1}{2}R^2 N \sin\left(\frac{2\pi}{N}\right) \rightarrow \pi R^2$ quando $N \rightarrow \infty$.

Como procedimento para a aplicação do MEF, segundo Reddy e Gartling, 1994, tem-se o seguinte processo:

1. Pré-Processamento: Discretização do domínio em um conjunto de elementos finitos, geração da malha de elementos finitos (definir as coordenadas dos nós que compõem a malha e as conectividades que definem os elementos, não havendo sobreposição dos domínios dos elementos);
2. Formulação das equações diferenciais a serem analisadas;
3. Desenvolvimento de equações de elementos finitos do problema a partir das equações diferenciais;
4. Montagem (*assembly*) das equações a nível de elemento para a obtenção das equações a nível de elemento para obter o sistema global de equações algébricas (sobre todo o domínio);
5. Imposição das condições de contorno;
6. Solução das Equações;
7. Pós-processamento dos resultados.

Para a satisfatória solução de um problema pelo MEF, é preciso, além de definir as equações matemáticas que regem o problema e ajustar as condições de contorno

adequadas à física do problema, selecionar uma malha adequada que divida a estrutura complexa em questão em estruturas, ou volumes, menores. A incorreta escolha do tipo de malha leva à soluções pobres e que, algumas vezes, podem fugir da solução real do problema, uma vez que não delimitam satisfatoriamente elementos infinitesimais que cubram todo o domínio do problema proposto. Saliento aqui que, não se deve escolher a estrutura mais complexa e com maior quantidade de nós para a solução de um problema, uma vez que isto implica em maior tempo e capacidade de processamento, fazendo com que se perda recursos financeiros nos processos, mas sim aquela satisfaz de forma adequada as condições impostas pelo problema em questão; além do mais, a experiência mostra que certos tipos de estrutura não satisfazem bem determinados problemas. Por exemplo, é recomendável que se evite usar uma estrutura tetraédrica linear (04 nós) em um elemento 3D para a análise de tensões, uma vez que isto leva a um resultado impreciso; entretanto este tipo de estrutura pode ser utilizado para análises dinâmicas, conduzindo-nos assim a resultados satisfatórios. A seguir, apresentam-se os principais tipos de elementos 3D que são utilizados na solução de malhas para elementos finitos (Figuras 20, 21, 22):

- Tetraédricos:

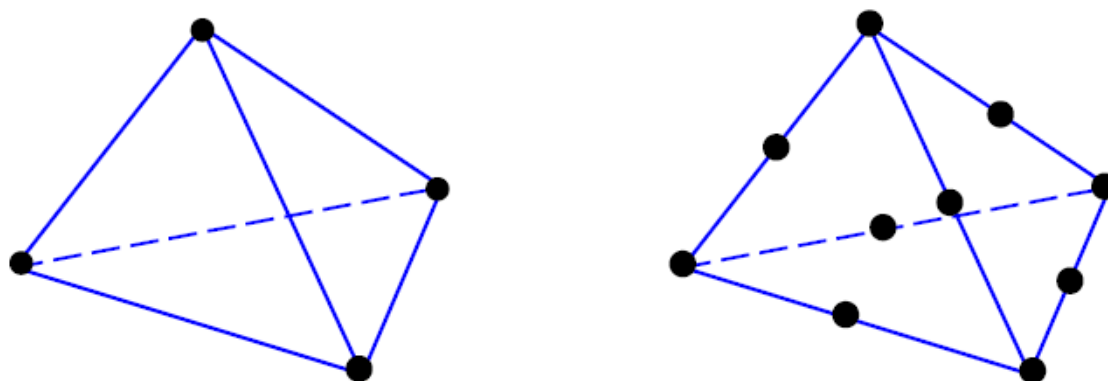


Figura 20 - À esquerda um elemento tetraédrico linear (4 nós) e à direita um elemento tetraédrico quadrático (10 nós) (LIU, 1998).

- Hexaédrico:

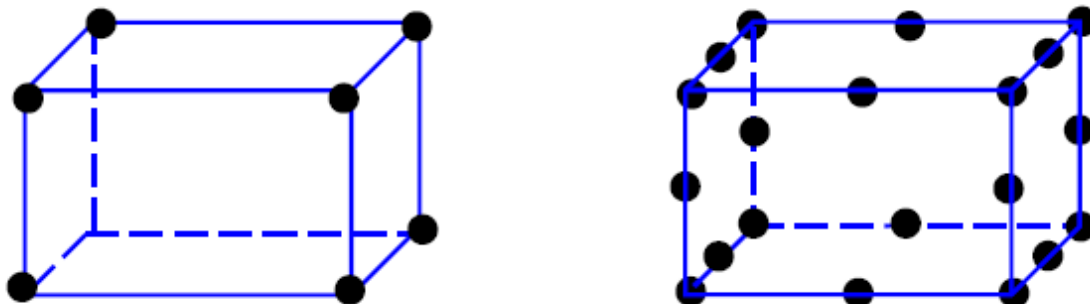


Figura 21 - À esquerda um elemento hexaédrico linear (8 nós) e à direita um elemento hexaédrico quadrático (20 nós) (LIU, 1998).

- Pentaédrico:

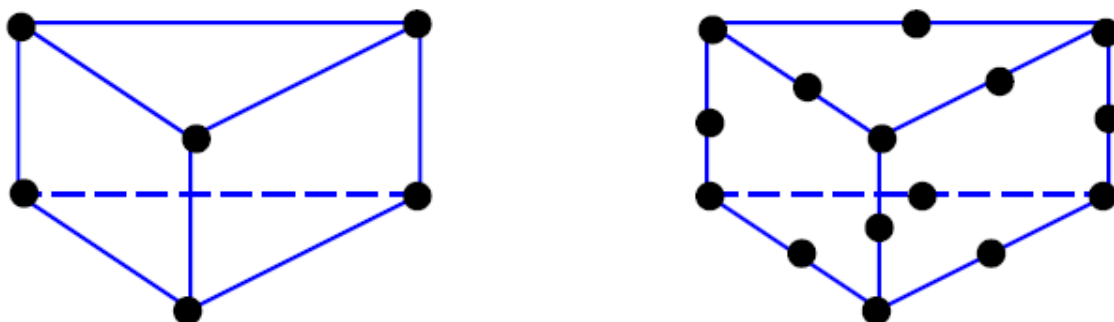


Figura 22 - À esquerda um elemento pentaédrico linear (6 nós) e à direita um elemento pentaédrico quadrático (15 nós) (LIU, 1998).

Deve-se também lembrar que o MEF produz um efeito conhecido enrijecimento (*stiffening effect*), uma vez que a composição do modelo computacional, através da sobreposição de matrizes de rigidez, faz com que este seja mais rijo do que a estrutura real; e como o método dos elementos finitos é baseado em deslocamentos destas pequenas estruturas, estes deslocamentos por sua vez apresentam-se menores em modelos computacionais do que na estrutura real, fazendo-se com que o MEF aproxime a solução por baixo, como esquematizado na Figura 23. Cabe aqui ressaltar que, em especial, isto é verdadeiro para análises de deslocamentos unicamente baseadas em MEF.

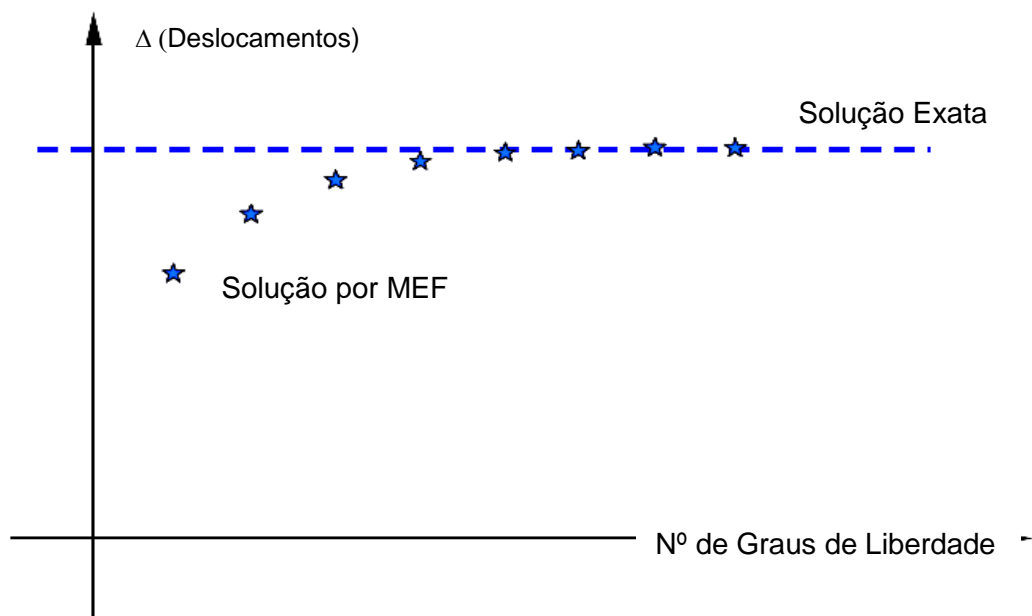


Figura 23 - Aproximação por baixo da solução real pelo MEF (LIU, 1998).

Por ser um método bastante integrado com as metodologias CAD/CAM (*Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing*), o FEM (*Finite Element Method*) permite uma representação rápida de uma estrutura em um ambiente virtual de testes; sendo assim possível simular em um curto espaço de tempo o comportamento de uma estrutura submetida às mais diversas condições de operação. Isto garante não só economia de tempo, mas de recursos necessários à concepção de um projeto, pois é possível otimizar uma estrutura antes mesmo que seja lançado seu protótipo.

A grande liberdade na discretização do domínio e das funções faz com que se utilize o método dos elementos finitos para resolver praticamente qualquer problema susceptível de ser representado matematicamente por equações às derivadas parciais, com quaisquer condições de fronteira (ZIENKIEWICZ, 1988).

Como ilustração do MEF, é apresentada a seguir uma análise preliminar da estrutura a ser utilizada pelo sistema limpa-grades da UHE de Jupia, elaborada pelo Prof. Dr. Jonas de Carvalho do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC-USP.

Nesta análise estrutural consideraram-se as cargas de arraste devido ao fluxo da água incidente sobre a estrutura e o peso próprio da mesma. Neste caso os carregamentos devido à ação de corte das pás foram aplicados como momentos torçores no eixo, os apoios (mancais) dos eixos e das rodas foram considerados

rígidos o suficiente para transmitir os esforços. Sendo assim, serão representados a seguir a estrutura isométrica preliminar e a estrutura isométrica simplificada do sistema de limpeza de grades, já com a malha do MEF gerada, bem como posterior resultado desta análise.

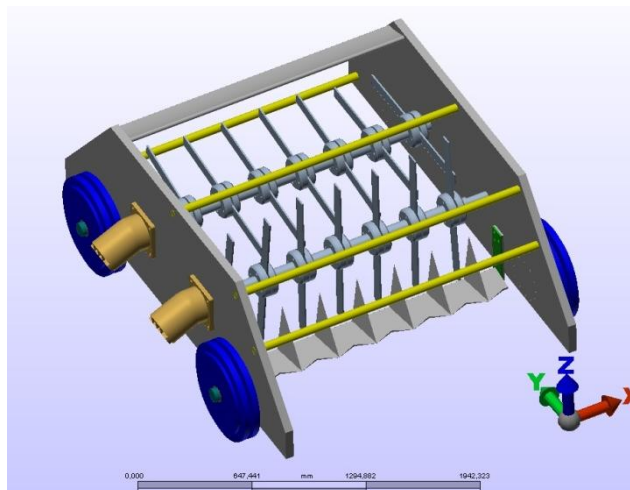


Figura 24 - CAD preliminar do novo sistema limpa-grades da UHE de Jupia.

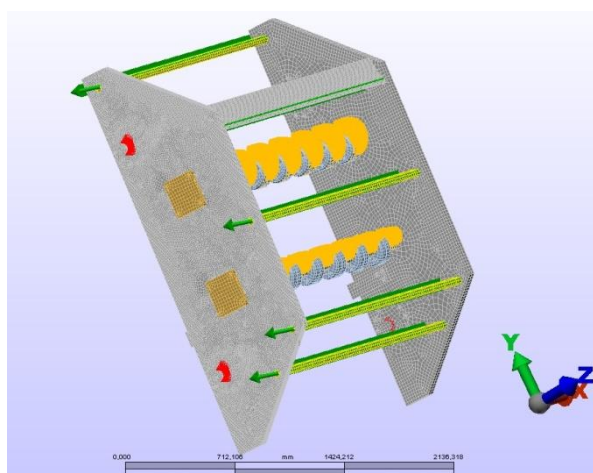


Figura 25 - Modelo inicial simplificado isométrico, já com malha gerada, com cargas e vinculações.

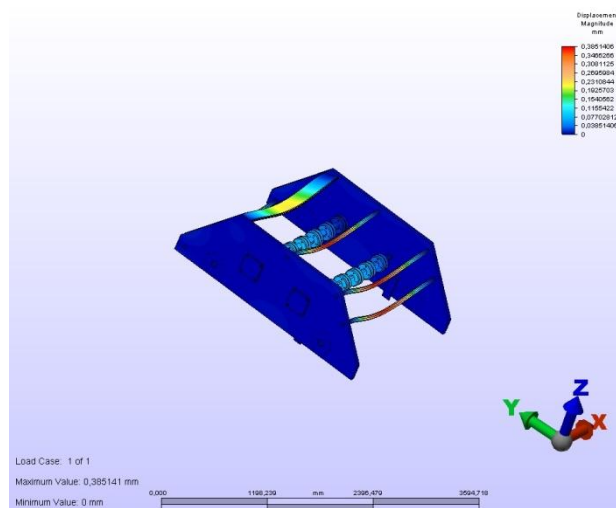


Figura 26 – Deslocamentos resultantes da simulação em MEF. Perfil isométrico.

4. PROJETO E RESULTADOS

4.1 SISTEMA AUTOMÁTICO DE LIMPEZA DE GRADES

A fim de minimizar o problema de parada de operação das unidades geradoras de energia da UHE de Jupia, o Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, sob requisição da CESP, atuou no projeto e desenvolvimento de um Sistema Automatizado de Limpeza de Grades.

O sistema de limpeza hoje utilizado pela CESP é composto de um carro-limpador (Figura 8) acoplado a um pórtico e que executa a limpeza através de uma descida controlada, sem necessidade de motor, por intermédio de seu peso próprio. Sua operação, apesar de simples, não é automática e requer a remoção de materiais impróprios à correta operação da usina, sobretudo algas que se acumulam nas grades de proteção da tomada d'água (Figura 3).

Na fase de planejamento deste sistema, houve algumas propostas preliminares e avaliações no que diz respeito a diferentes tipos de sistemas de retirada dos materiais (algas e mexilhões) indesejados nas grades, e optou-se por um sistema de corte de material, mitigando assim gastos no que diz respeito à remoção e transporte do material a ser removido; seguem as propostas apresentadas:

- Hidrojateamento – alto custo e baixa eficiência;
- Retirada de Material (atualmente utilizado pela CESP) – baixa produtividade e redução de carga da unidade;
- Corte Horizontal – baixa produtividade e redução de carga da unidade;
- Corte Vertical – alta produtividade e sem redução de carga da unidade;

Destas avaliações surgiu a proposta final, que consiste em dois sistemas integrados para realizar a limpeza das grades da UHE de Jupia, a seguir citados, assim como exposto pelos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC-USP:

- Sistema de limpeza de grades através do corte do material vegetal em dimensões que possam atravessar grades e unidades geradoras de forma segura (poderá ser utilizado em mais de uma tomada d'água):
 - Deve aumentar a velocidade de limpeza;

- Diminuição de mão de obra.
- Sistema de monitoramento da quantidade de material vegetal que se alojam nas grades através da técnica de ultra-som (uma para cada tomada d'água):
 - Baixo custo unitário;
 - Permitirá a otimização na utilização do sistema de limpeza;
 - Sua eficácia possibilitará a diminuição de equipamentos de limpeza necessários.
- Unidade central de controle e integração (recebe os dados de monitoramento e programa a limpeza).

Para a elaboração deste projeto, a metodologia a ser utilizada baseia-se em forte experimentação para checar as hipóteses em função da inexistência de informações relativas à aglomeração e compactação de matéria sobre a grade; a adoção de uma abordagem progressiva e modular de construção, onde foram tratados problemas isolados em escala reduzida, até se chegar à solução, e em tamanho real; e também o reaproveitamento e integração destes módulos construtivos entre o protótipo e o modelo final.

A seguir estão algumas figuras representativas do modelo preliminar proposto para o Sistema Automático de Limpeza de Grades; cabe ressaltar aqui que as figuras a seguir representam apenas a idéia inicial do projeto, sendo cada parte (módulo) do mesmo, detalhada e aperfeiçoada pelos respectivos responsáveis, sendo o módulo desenvolvido aqui neste trabalho uma proposta final para o raspador a ser utilizado neste sistema.

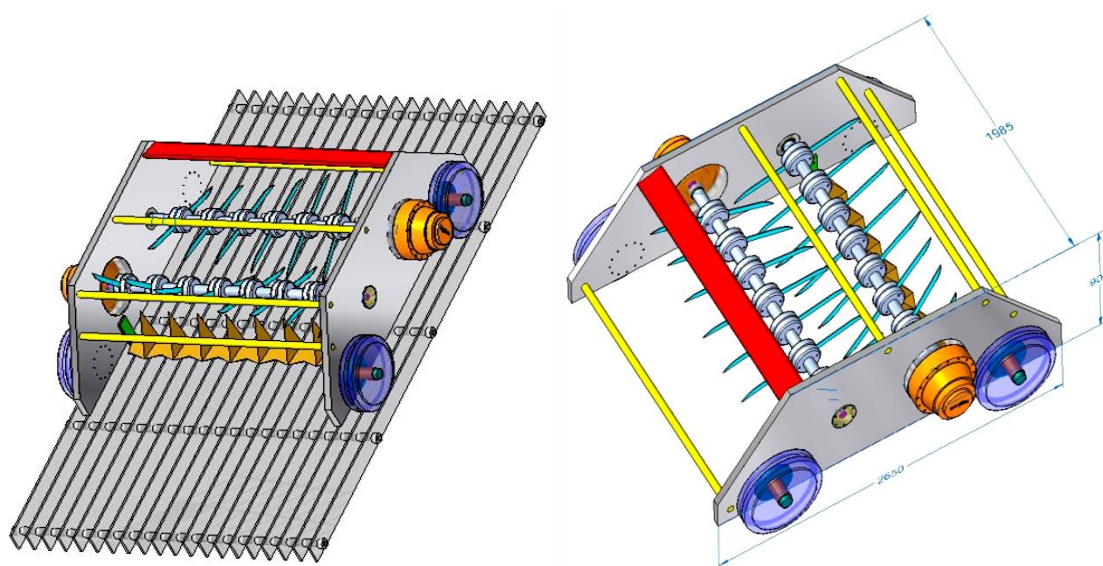


Figura 27 - Vistas Isométricas do Protótipo Inicial do Sistema de Limpeza e Corte.

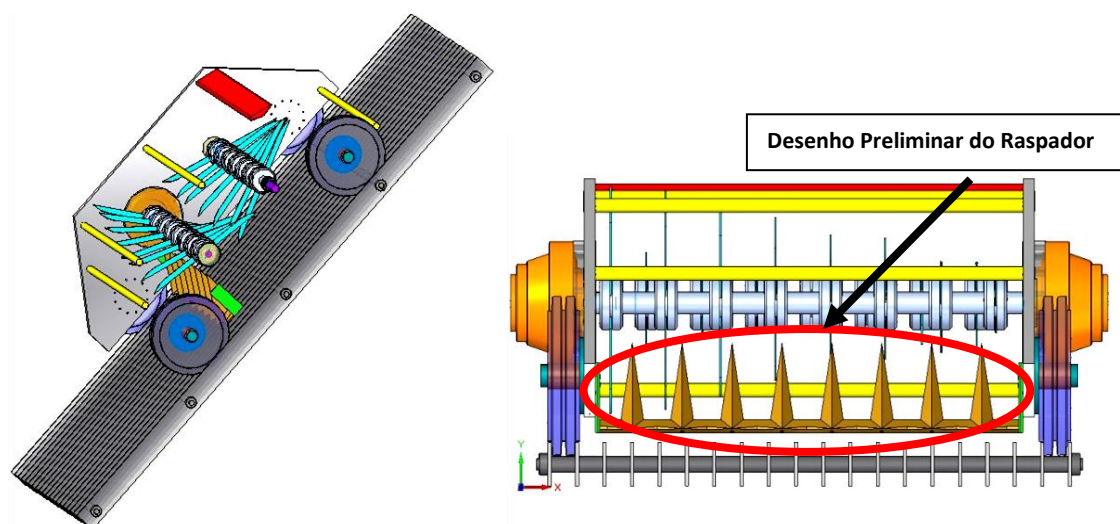


Figura 28 - À esquerda, vista em corte do Protótipo do Sistema de Limpeza. À direita vista inferior do Protótipo e destaque para o desenho preliminar do raspador (módulo desenvolvido neste trabalho).

4.2 RASPADOR

4.2.1 ESTADO DA ARTE

Para o projeto do Raspador do Sistema Automático de Limpeza de Grades, utilizou-se, além do senso comum, uma pesquisa para averiguar como esta limpeza é hoje realizada nas principais UHEs brasileiras que sofrem com problemas de grande acúmulo de algas e de mexilhões-dourados. O modelo hoje largamente utilizado para raspar estes materiais indesejados consiste, basicamente, em um aparato de metal, muitas vezes uma rampa em forma de cunha, acoplado a um sistema de limpeza que desce por intermédio de peso próprio ou motores; para o caso específico da UHE de Jupia, e também em outras unidades da CESP, como a UHE de Porto Primavera, este sistema utiliza-se de peso próprio. Para ilustrar este sistema básico, utilizaremos o exemplo da UHE de Porto Primavera.



Figura 29 - Sistema de Limpeza da UHE de Porto Primavera.

Vale notar que o Sistema de Limpeza presente em Porto Primavera não possui grande área para armazenamento de algas, em virtude de uma menor incidência de acúmulo de algas à UHE de Jupia. Este último, por sua vez, possui uma caçamba de armazenamento que inicia a limpeza aberta, e ao atingir o fim do curso (extremidade inferior terminal da grade) se fecha, aprisionando ali algas existentes, assim como ilustrado na Figura 30.



Figura 30 - Sistema de Limpeza atualmente utilizado em Jupia.

No projeto aqui proposto, as algas serão cortadas em tamanhos compatíveis com o espaçamento da grade de proteção da tomada d'água e com a passagem pela turbina; sendo assim, esta caçamba não é mais necessária, sendo eliminada do projeto em questão. Vale também notar que o problema não se limita ao acúmulo de algas nas grades, mas também da impregnação de mexilhões-dourados nas mesmas.

Inicialmente, cogitou-se realizar somente a limpeza das algas em uma primeira, deixando a limpeza destes mexilhões para uma segunda etapa; uma vez que o acúmulo do *limnoperma fortunei* se dá de forma previsível e pode ser realizada de forma preventiva, enquanto que o acúmulo de algas se dá, muitas vezes, de forma repentina. Entretanto, a própria CESP já implementou, com sucesso, em algumas de suas UHEs uma simples adaptação em seus sistemas de limpeza que permite a limpeza de mexilhões de forma satisfatória ao mesmo tempo em que é realizada a limpeza de algas. Este sistema consiste basicamente em palhetas de borracha adaptadas à ponta da caçamba (ou rastelo) que se fecha ao fim de curso de descida do sistema de limpeza e passa por entre as grades (Figura 12, à direita). Este sistema também pode ser encontrado na UHE de Porto Primavera, conforme destaque na Figura 31.



Figura 31 - Detalhe das palhetas de borracha adaptadas à caçamba (rastelo) do Sistema de Limpeza da UHE de Porto Primavera.

4.2.2 PROJETO

Em decorrência das características anteriormente apresentadas, optou-se por um projeto de raspador em que seria mantida a presença da rampa em forma de cunha, muito comum em raspadores desta natureza, mas seria eliminada a caçamba (ou rastelo) para acúmulo de algas. Também se optou por manter o uso das palhetas de borracha para a limpeza de mexilhões-dourados, introduzidas pela CESP em algumas de suas unidades hidrelétricas.

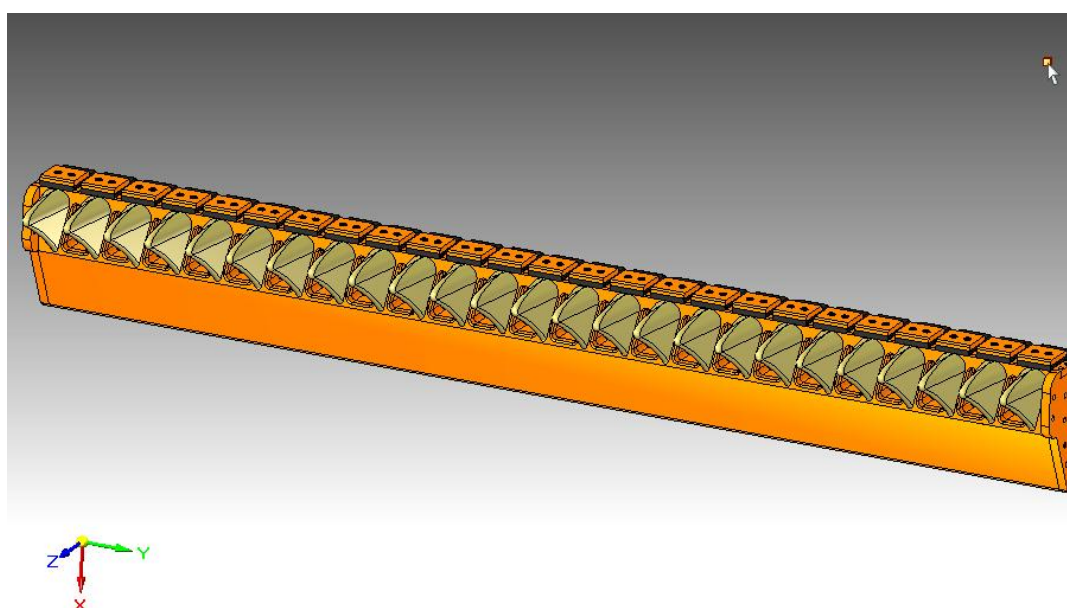


Figura 32 - Vista Isométrica do Raspador.

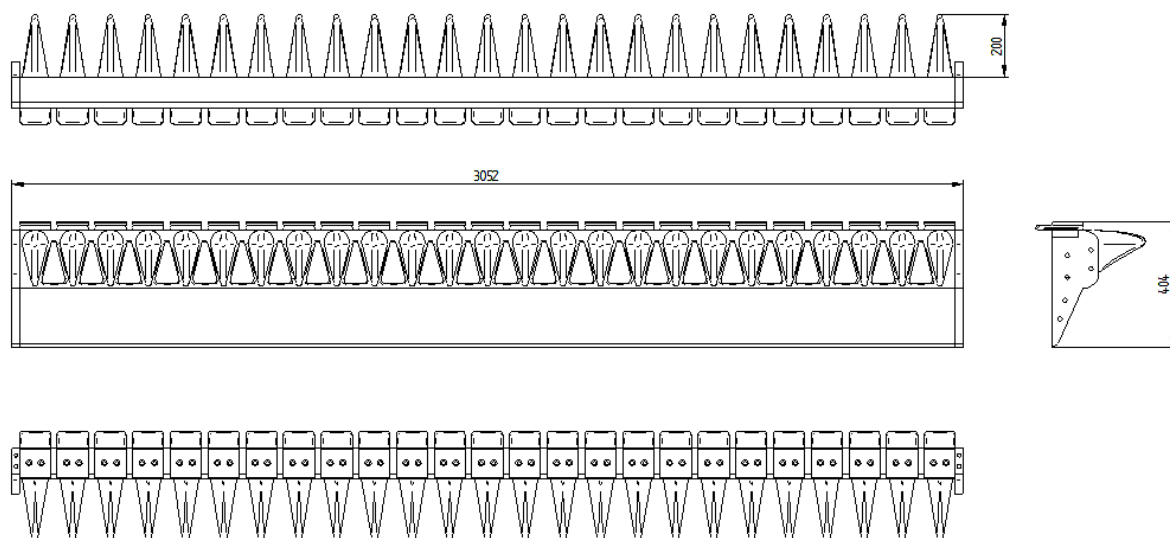


Figura 33 – Representação esquemática 2D do Desenho de Conjunto do Raspador (dimensões em mm).

A fim de direcionar algas, troncos e demais detritos em direção às facas, utilizaram-se também guias em forma de barbatanas. Estas guias, além de direcionarem o material a ser cortado para as facas, possuem um perfil aerodinâmico que faz com que o fluxo de água que incide sobre o raspador seja direcionado para seções de alívio, reduzindo assim a força de arraste hidrodinâmico sobre o raspador.

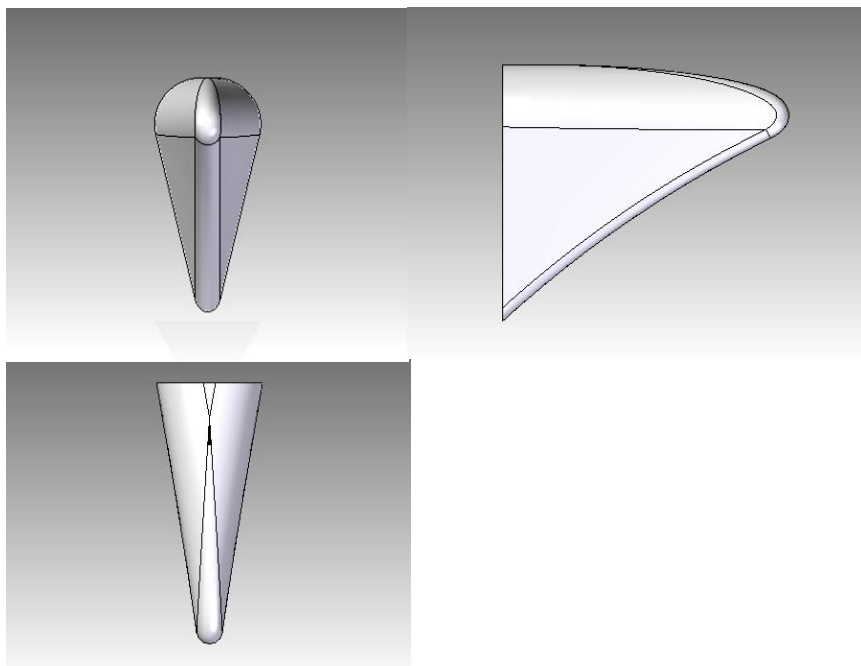


Figura 34 - Detalhe da barbatana-guia utilizada no projeto.

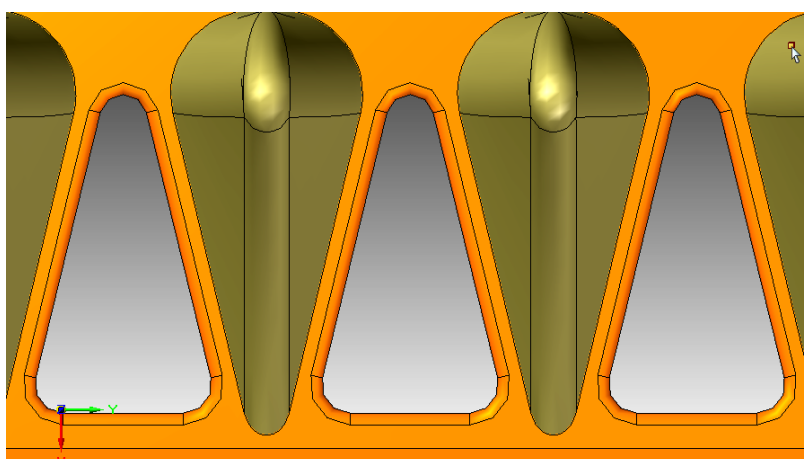


Figura 35 - Detalhe das seções de alívio localizadas entre as barbatanas-guias.

Na Figura 36 estará representada a solução para a remoção dos mexilhões-dourados, bastante semelhante àquela já citada e bastante utilizada pela CESP;

consistindo basicamente de uma borracha que passará por entre as grades da tomada d'água.

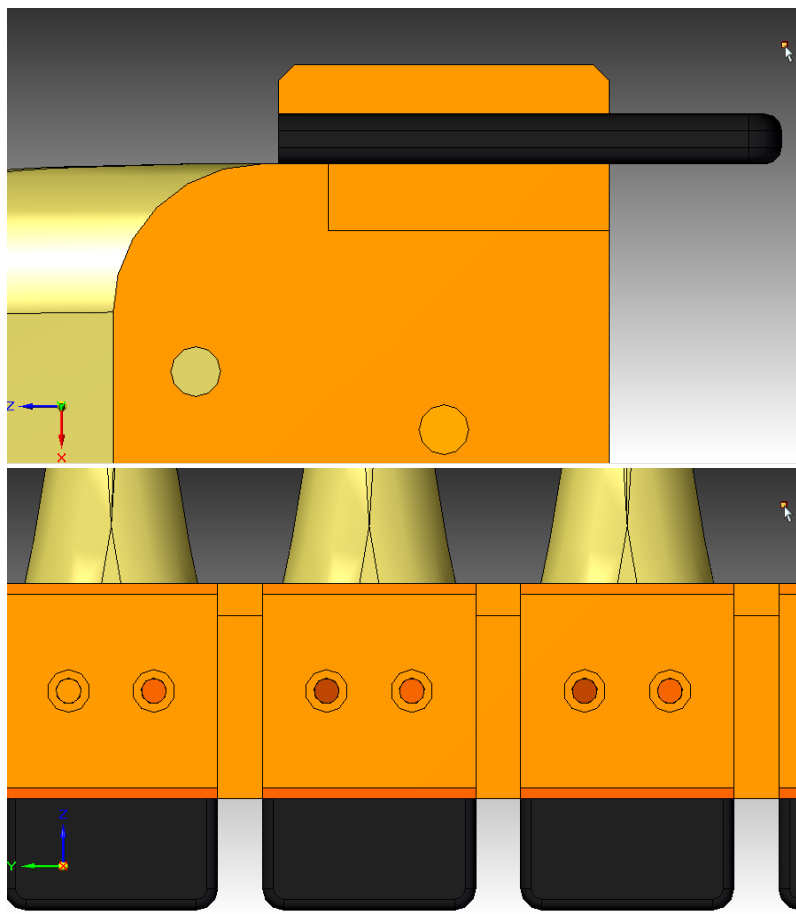


Figura 36 - Detalhe das palhetas utilizadas na parte superior do raspador.

Na construção do raspador, além de sua funcionalidade, pensou-se também na facilidade de fabricação do mesmo, bem como na redução de seu peso. Para isto, o raspador foi dividido em algumas chapas e partes, permitindo assim uma manufatura mais econômica do mesmo. Além disso, pensou-se no alívio de peso e posterior reforço da estrutura em que houve este alívio; para isso utilizaram-se os próprios vãos de alívio como reforços estruturais, fazendo com que a junção entre o tampo superior e inferior assemelhe-se às estruturas do tipo *honeycomb*. Com o intuito de mostrar as várias partes que compõe este conjunto, e as várias chapas e estruturas de reforço, mostrarei a seguir alguns desenhos de vistas explodidas do raspador.

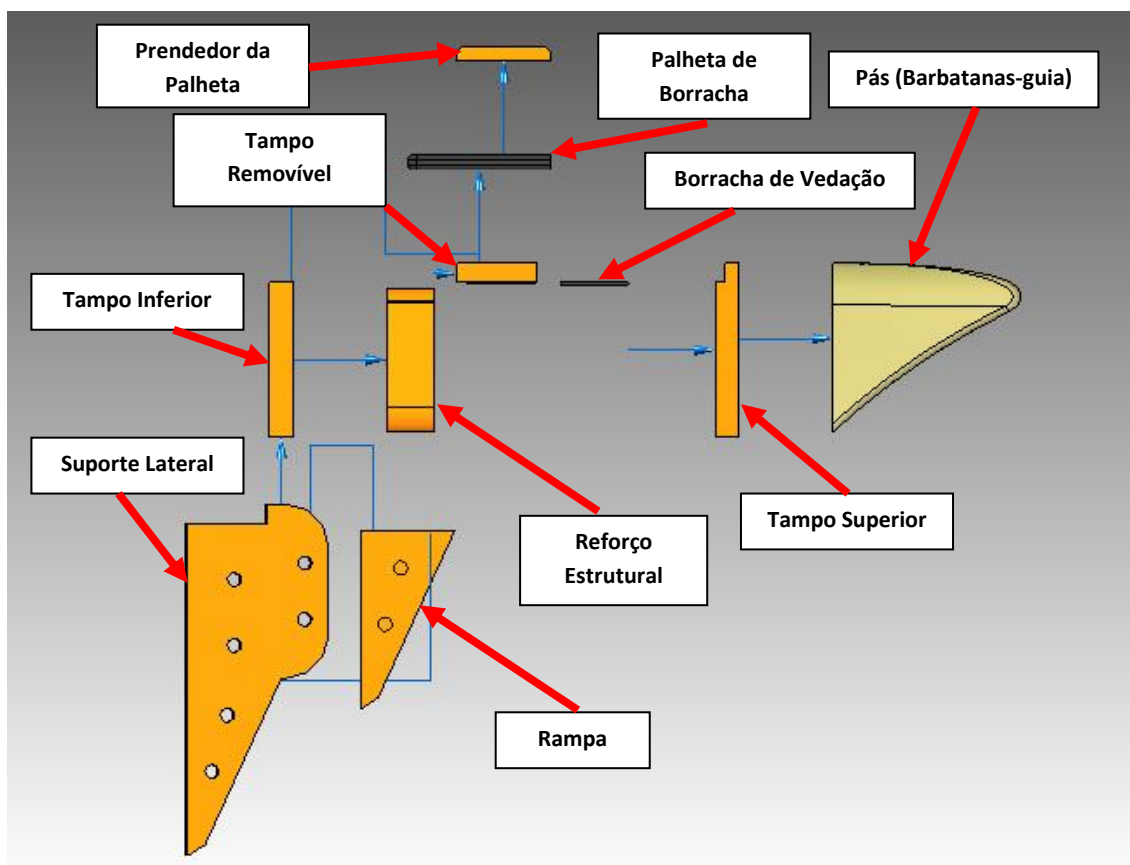


Figura 37 - Vista Lateral do Raspador explodida mostrando todas as suas partes.

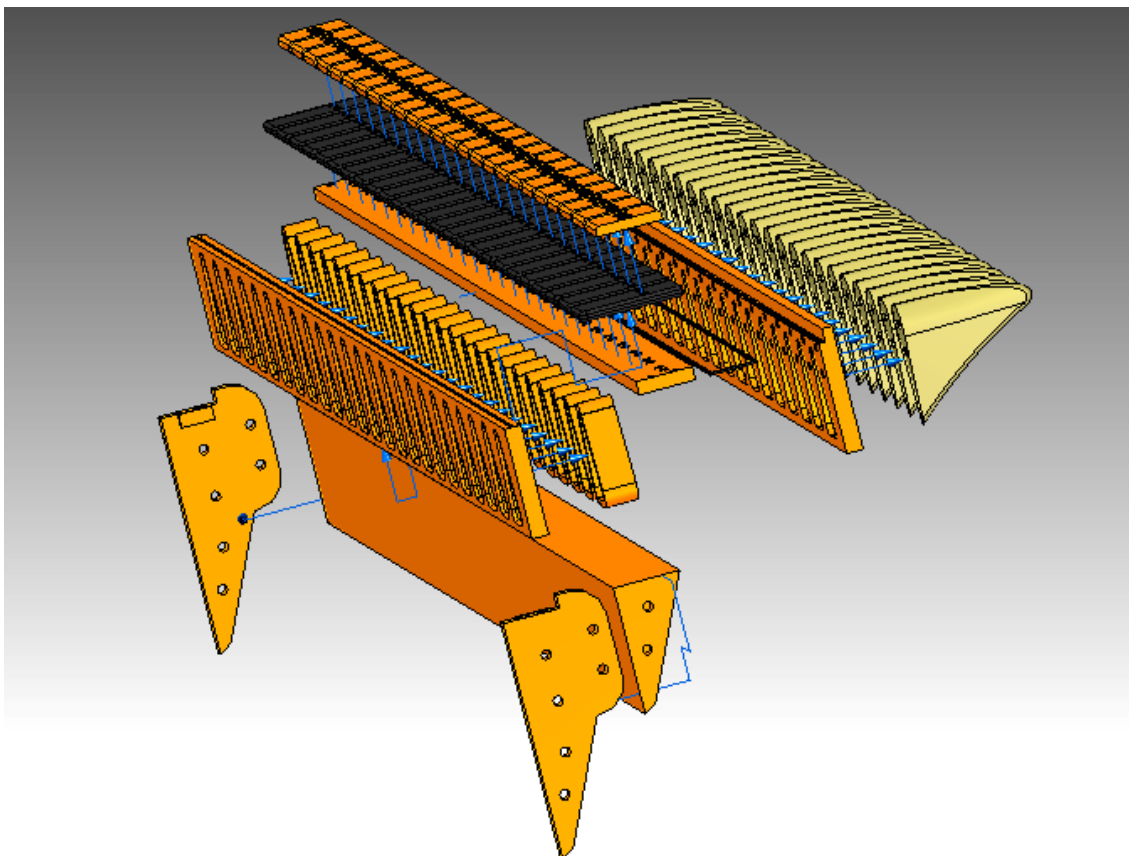


Figura 38 - Vista Isométrica Explodida do Raspador.

Pensando na manutenção do Raspador, optou-se por tornar um dos tampos removível e utilizar borrachas de vedação para evitar a entrada de água pelo mesmo. Assim, conseguimos obter acesso à estrutura interna oca do Raspador para realizar possíveis reparos, como, por exemplo, a substituição das barbatanas-guia. A Figura 39 ilustra a vista superior do conjunto, porém sem a presença do tampo.

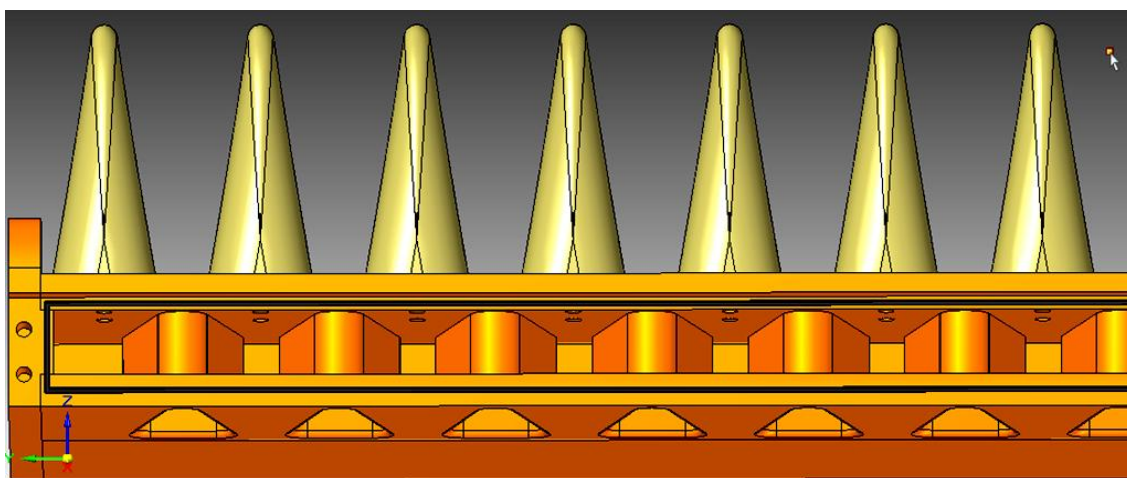


Figura 39 - Detalhe do Raspador sem um dos tampos, obtendo acesso à parte interna do mesmo.

4.2.3 SIMULAÇÕES E ANÁLISES

Para entender melhor o comportamento da estrutura proposta para o Raspador, e visualizar tensões, forças e pressões as quais a estrutura será submetida quando em operação, foram realizadas algumas análises.

Deve-se ressaltar que estas análises servem somente para a avaliação preliminar, e que para resultados mais complexos e precisos deve-se utilizar um processamento computacional e gráfico com desempenho superior aos aqui utilizados. Todas as análises propostas neste trabalho foram executadas em um computador pessoal, possuindo, portanto, um foco mais acadêmico. Entretanto, os resultados mostram que a estrutura foi dimensionada de forma satisfatória e suportará os esforços quando em operação.

A unidade de processamento utilizada para efetuar todas as análises aqui presentes possui um processador Core i5-430M, 4Gb de RAM, 500 Gb HDD e Placa Gráfica dedicada de 1024 Mb (ATI Mobility Radeon 5450) com suporte adicional de um processador gráfico integrado (que utiliza memória do sistema computacional) de 1690 Mb (Intel Graphics Media Accelerator HD), totalizando assim uma memória gráfica de 2714 Mb.

Foram realizados dois tipos de análise, uma estática, onde as forças de arraste geradas pela água sobre o raspador foram calculadas separadamente e então inseridas em um modelo computacional para avaliar a deformação e as tensões a que a estrutura estaria submetida. O segundo tipo de simulação aqui desenvolvido foi hidrodinâmica, onde foram avaliados os efeitos da geometria da estrutura sobre o fluxo fluídico a que esta estaria submetida.

O software utilizado para efetuar estas simulações foi o Autodesk Algor Multiphysics 2012, cedido em versão de estudante gratuitamente pela Autodesk.

4.2.3.1 ANÁLISE ESTÁTICA

A análise estática foi realizada de forma que a força resultante da interação fluido/estrutura incida sobre esta com um ângulo de 15° , para cima, em relação à normal à sua vista frontal, conforme ilustra a Figura 40.

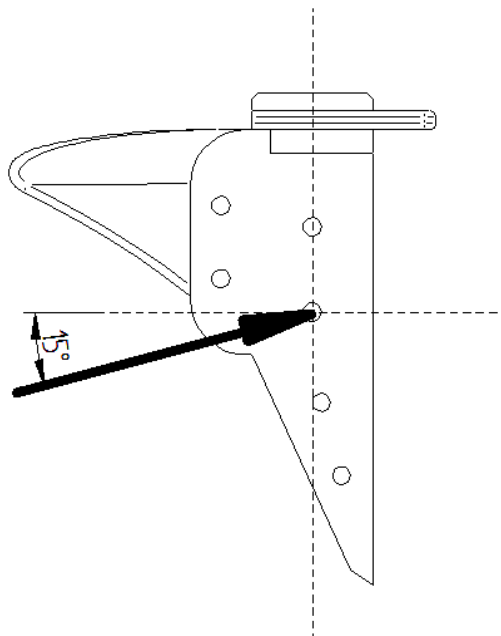


Figura 40 - Representação da força incidente sobre o Raspador no modelo computacional.

O tipo de análise executada foi de tensão estática com o modelo de material uniforme, aço AISI 1020, com as seguintes propriedades:

Tabela 2 - Propriedades do aço AISI 1020 extraídas do Autodesk Multiphysics.

Modelo do Material	Padrão
Fonte do Material	<i>Autodesk Simulation Material Library</i>
Descrição do Material	AISI 1020
Densidade em Massa	7 N·s ² /mm/mm ³
Módulo de Elasticidade	200000 N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.29
Módulo de Cisalhamento	80000 N/mm ²
Coefficiente de Expansão Térmico	1 1/°C

Como unidades padrões na análise, utilizamos o seguinte sistema: (N, mm, s, °C, K, V, ohm, A, J). O modelo utilizado não sofreu simplificações e a malha gerada contém elementos do tipo “brick” e tetraédricos (Figura 41), sendo a malha gerada e refinada, conforme parametrização, automaticamente pelo Autodesk Multiphysics 2012.

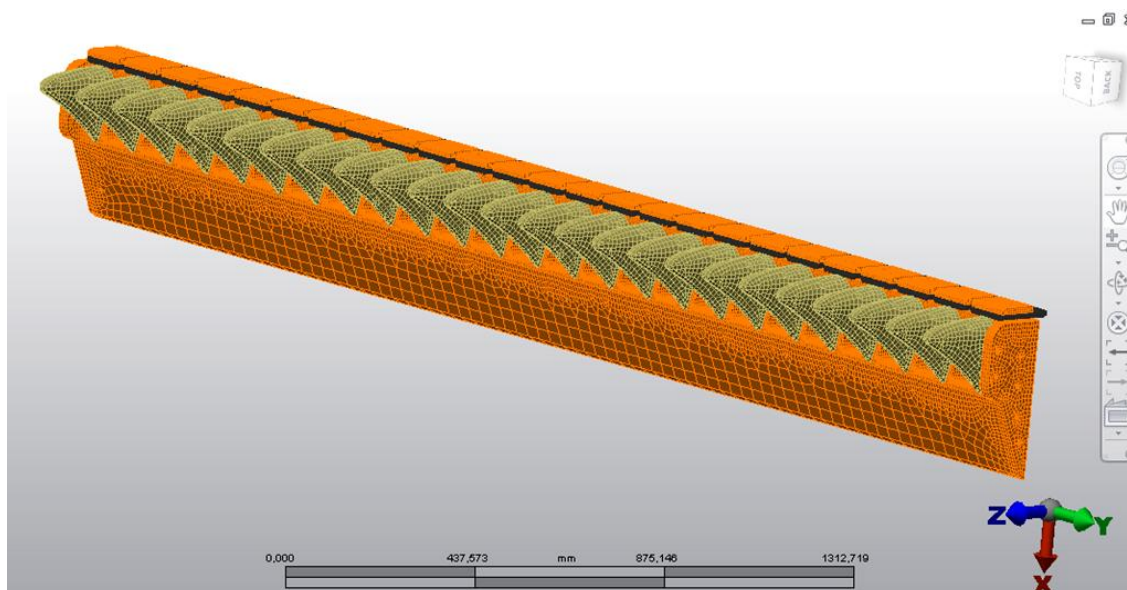


Figura 41 – Modelo para análise estática com malha já gerada.

Nesta análise, as forças de arraste foram calculadas separadamente conforme a fórmula de já apresentada, e recapitulada aqui como se segue:

$$R = \frac{1}{2} C_R \rho A V^2$$

Onde:

R = Resistência ou arrasto;

C_R = Coeficiente de resistência ao avanço;

ρ = massa específica do fluido;

A = Área característica, usualmente a área projetada sobre um plano perpendicular ao movimento do fluido;

V = velocidade relativa do fluido em relação ao corpo.

Como parâmetros gerais, utilizou-se os mesmos da análise da estrutura do Sistema Automático de Limpeza de Grades como um todo, efetuada pelo Prof. Dr. Jonas de Carvalho; onde $C_R = 1,5$; $\rho_{\text{água}} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$; $V_{\text{água}} = 3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. A área característica da estrutura, e de suas respectivas partes, foi medida no software Solid Edge ST3. A seguir será representada a distribuição de forças utilizadas na estrutura representada pela Figura 41.

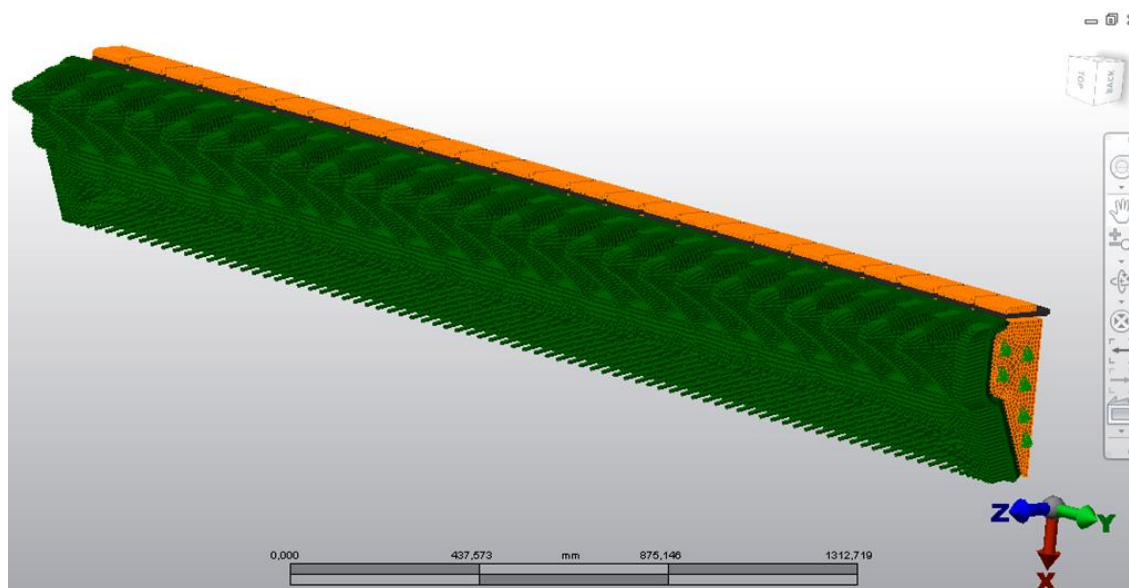


Figura 42 - Distribuição de Forças sobre a superfície do Raspador.

Na Figura 42, a superfície em verde escuro representa aquela em que foram consideradas forças agindo sobre a estrutura, enquanto que as superfícies triangulares em verde claro representam a fixação da estrutura, onde serão colocados os parafusos que sustentarão a mesma, e assim, considerada como imóvel.

Considera-se além da ação das forças específicas, cujo somatório (superfície verde escuro) é de aproximadamente 6341 N agindo sobre a estrutura devido ao arraste fluidodinâmico, consideramos a influência do peso da estrutura e do empuxo. A aceleração da gravidade utilizada foi de 9814,56 mm/s² e os parâmetros físicos da estrutura, como, por exemplo, massa e volume foram calculados a partir do Autodesk Multiphysics. A seguir são apresentados estes parâmetros físicos (Tabela 3) e o resultado da análise estática.

Tabela 3 - Propriedades físicas da estrutura do Raspador calculadas a partir do Autodesk Multiphysics.

Informações do Modelo					
Volume (mm ³)		8,8424E+07	Força-Peso (N)		6,4767E+03
Centro de Gravidade (mm)		Momento de Inércia (N*s ² *mm)		Produto de Inércia (N*s ² *mm)	
Xc	1,3761E+02	Ixx	5,2639E+05	Ixy	-1,8160E+03
Yc	-1,9995E+01	Iyy	2,5464E+04	Ixz	4,2377E+03
Zc	6,8031E+01	Izz	5,4101E+05	Iyz	-8,9719E+02

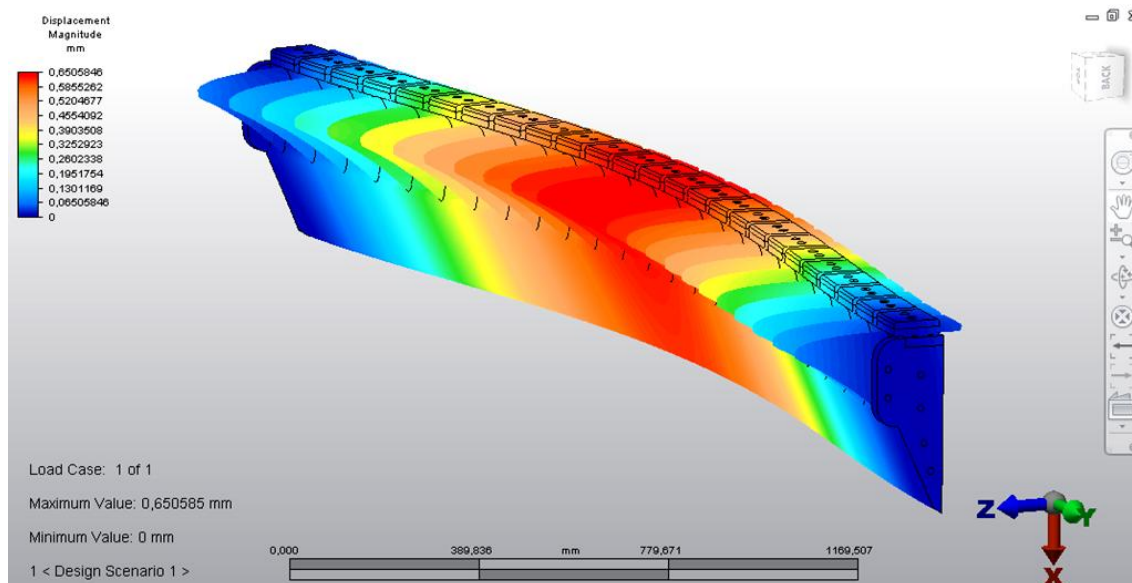


Figura 43 - Deslocamentos ao qual o Raspador é submetido.

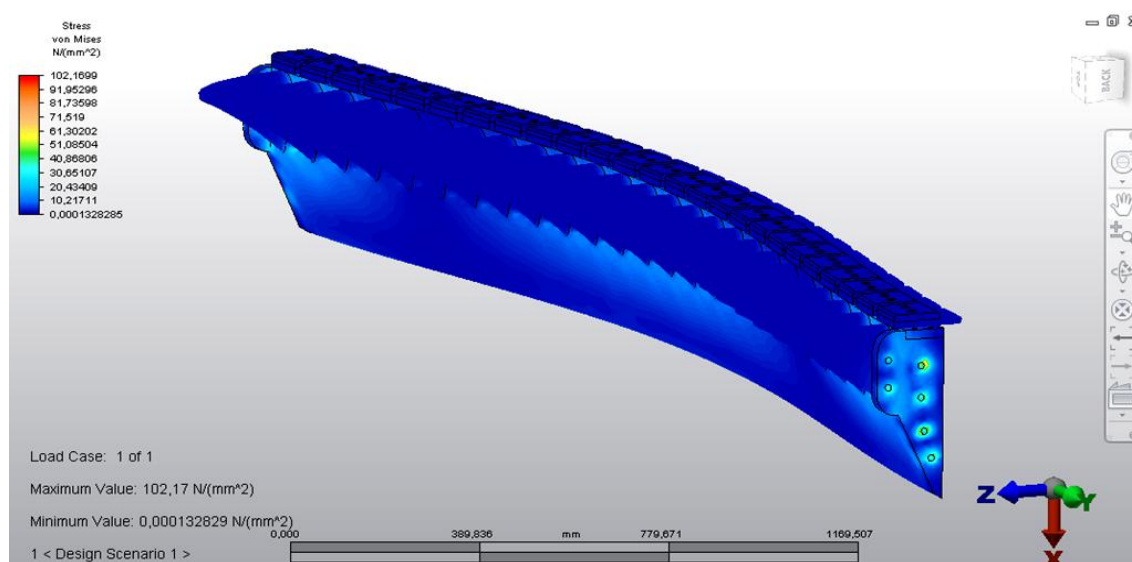


Figura 44 - Tensões (Von Misses) às quais estão submetidas o Raspador.

Da análise efetuada, nota-se que mesmo com as limitações computacionais, o resultado é satisfatório; uma vez que efetuando esta análise estaticamente ignoram-se os efeitos positivos que a forma geométrica da estrutura, sobretudo das pás, pode fornecer no que diz respeito à redução de arrasto. E mesmo majorando o resultado, chega-se a uma tensão atuando máxima sobre a estrutura de cerca de 102 MPa (Figura 42), aquém do limite de escoamento para o aço 1020, que é de 200 - 210 MPa. Além disso, o deslocamento (flecha) que a estrutura está submetida é de somente 0,65 mm (Figura 43); o que pode ser considerado bastante satisfatório para uma estrutura deste porte.

4.2.3.2 ANÁLISE HIDRODINÂMICA

Para a análise hidrodinâmica utilizou-se um modelo simplificado do Raspador devido às limitações computacionais. Como a análise no que diz respeito à resistência da estrutura foi realizada de forma estática, e majorando as solicitações e resultados, esta análise hidrodinâmica mostra somente como o fluido se comporta em relação à estrutura imersa em seu fluxo. Além disso, será indicado também como se dá a distribuição de pressões no Raspador e também uma indicação de como as forças estão distribuídas sobre sua superfície.

Ainda sobre as simplificações efetuadas, alguns detalhes da seção de alívio foram minimizados; a parte responsável pela limpeza dos mexilhões, e que, devido às suas dimensões, não tem grande influência sobre o comportamento do fluido ao passar pela estrutura do raspador, foi suprimida; e os vazios da estrutura do raspador, bem como os reforços estruturais ali existentes, foram suprimidos e substituídos por um maciço. Também foram suprimidos todos os furos de colocação de parafuso existentes na estrutura. Estas simplificações, apesar de à primeira vista parecerem inúmeras não comprometem o resultado, uma vez que a análise hidrodinâmica aqui apresentada está interessada somente em efeitos externos, relacionados à geometria externa do raspador. Sendo assim, a maior simplificação, que é a substituição do vazio interno da estrutura por um maciço, não compromete em nada os resultados aqui apresentados. A Figura 45 mostra as simplificações estruturais realizadas.

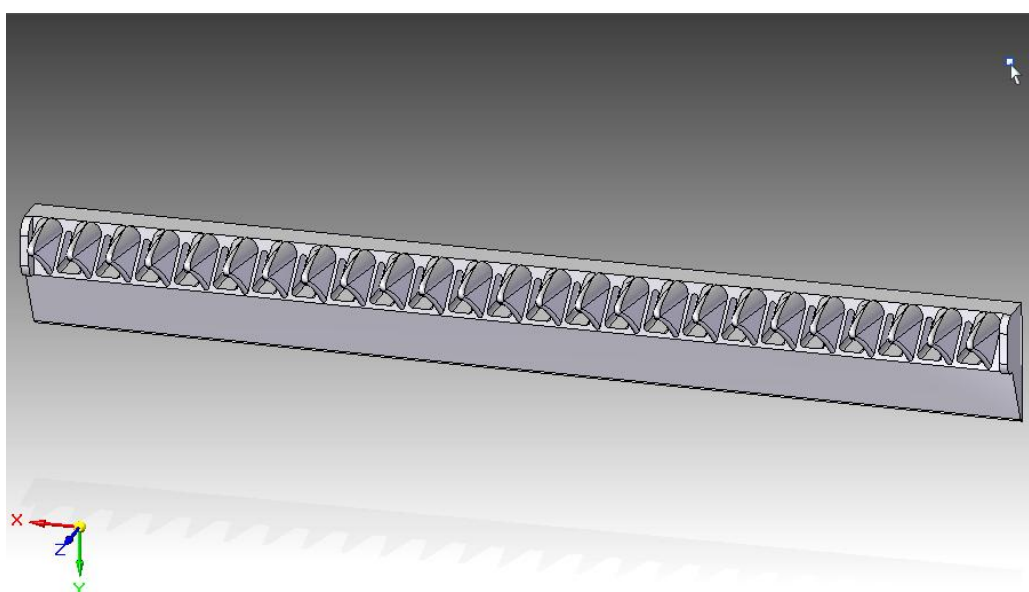


Figura 45 - Estrutura simplificada para análises fluidodinâmica do Raspador.

Para gerar o ambiente de análises fluidodinâmicas no software em questão, é preciso definir um sólido através de operação booleana com a estrutura que se deseja analisar. Desta forma, o resultado é um sólido que possui em seu interior um vazio com o formato da estrutura simplificada do Raspador. As dimensões externas desse sólido foram definidas como 6000x4000x12000 mm. Neste sólido foram definidas superfícies de entrada de fluido, com velocidade de 3000 mm/s (superfície à esquerda da Figura 46) e uma superfície e saída (superfície à direita da Figura 46).

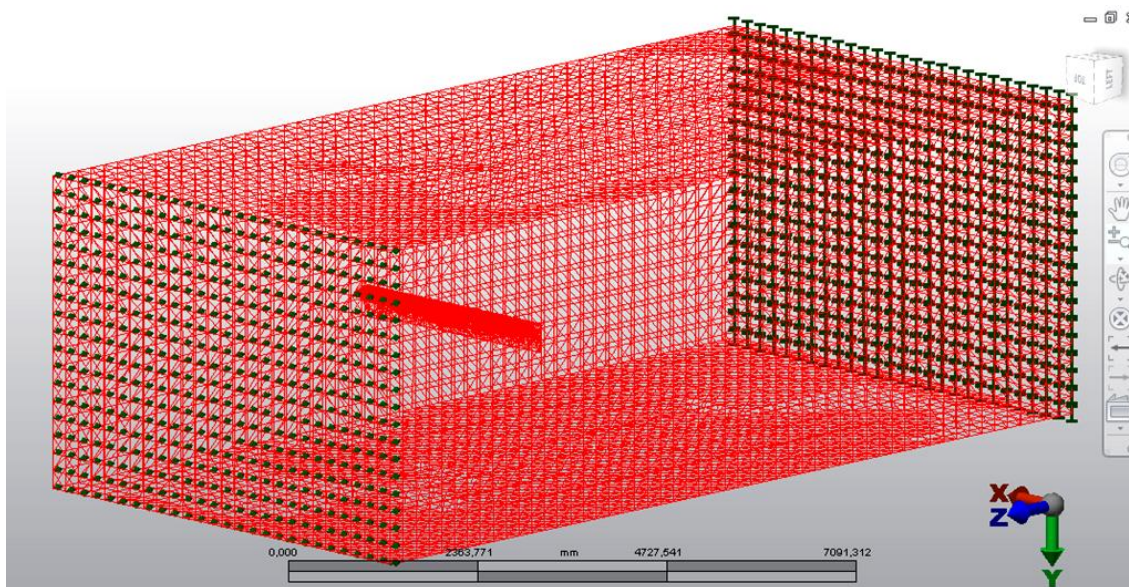


Figura 46 - Malha do sólido gerado por operação booleana com a estrutura do Raspador para a análise hidrodinâmica.

As características do fluido utilizados nesta análise, no caso água, são as seguintes:

Tabela 4 - Propriedades da água, extraídas do Autodesk Multiphysics.

Modelo do Material	Fluido
Fonte do Materil	<i>Autodesk Simulation Material Library</i>
Condições Físicas	68 F, 1 atm
Densidade Mássica	9 N·s ² /mm/mm ³
Viscosidade Dinâmica	9 N*s/mm ²

Para ajudar na convergência do problema, os parâmetros de velocidade do fluido foram configurados para atingir seu valor máximo (3000 mm/s) em 1 segundo, a partir do repouso, utilizando 20 passos. Esta velocidade é mantida constante por mais um segundo, utilizando-se 10 passos.

Realizada a análise, determinam-se as configurações de linhas de fluxo para mostrar o fluido escoando quando perturbado pela estrutura do Raspador. Este fluxo

será mostrado, a seguir, na Figura 47. O bloco em azul escuro representa a estrutura do Raspador, enquanto que as linhas coloridas representam o fluido e suas diversas velocidades. Este fluido movimenta-se da parte inferior esquerda da tela até a parte superior direita. Após o contato com o Raspador, o fluido perde velocidade e cria zonas de maior vorticidade, representadas pelas linhas azuis (excetuando-se o bloco azul escuro).

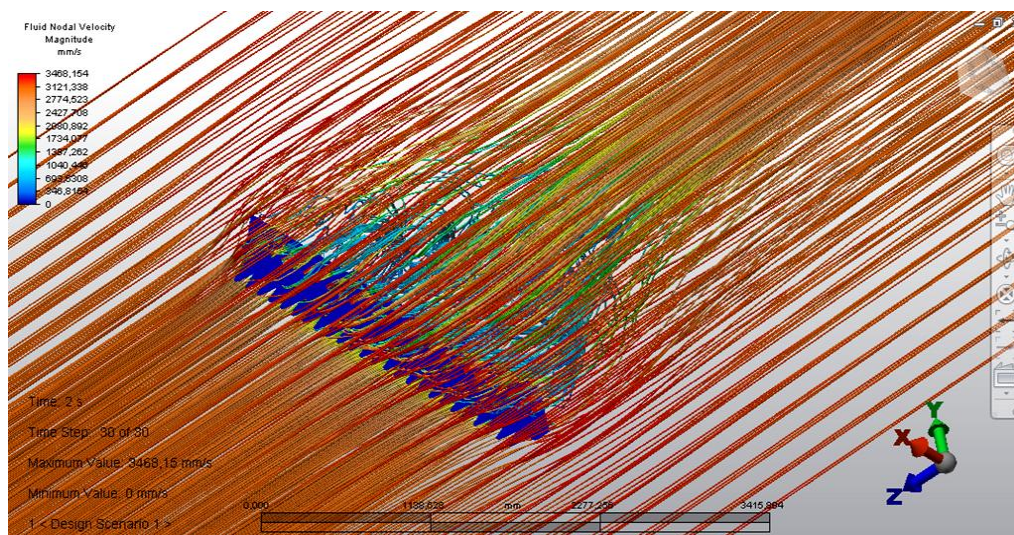


Figura 47 - Linhas de Fluxo Isométricas em interação com o Raspador.

Para melhor representar o que está acontecendo, foi criado um plano seccionando a estrutura do Raspador (Figura 48), mostrando como as linhas de fluxo se comportam após interação com o mesmo.

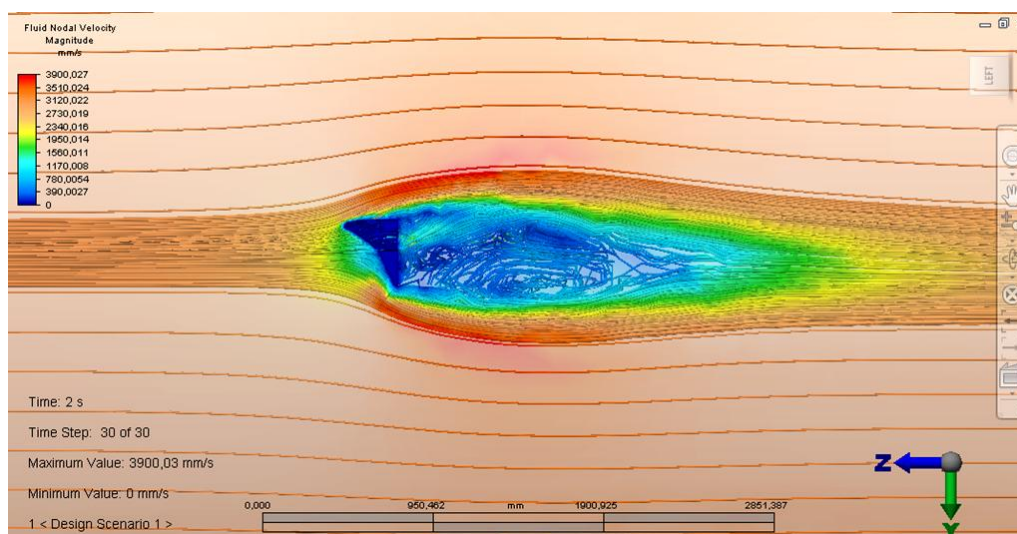


Figura 48 - Linhas de fluxo em plano YZ que secciona a estrutura do Raspador.

Após a interação com a estrutura o fluido diminui sua velocidade e cria zonas de vorticidade, representadas por linhas azuis escuras. Também observa-se que parte das linhas de fluxo atravessa a estrutura através das seções de alívio; isto faz com que a zona de esteira seja diminuída, reduzindo assim a deformação no fluido. Como base de comparação, esta mesma situação foi simulada em uma estrutura de Raspador sem as seções de alívio, apresentada na Figura 49.

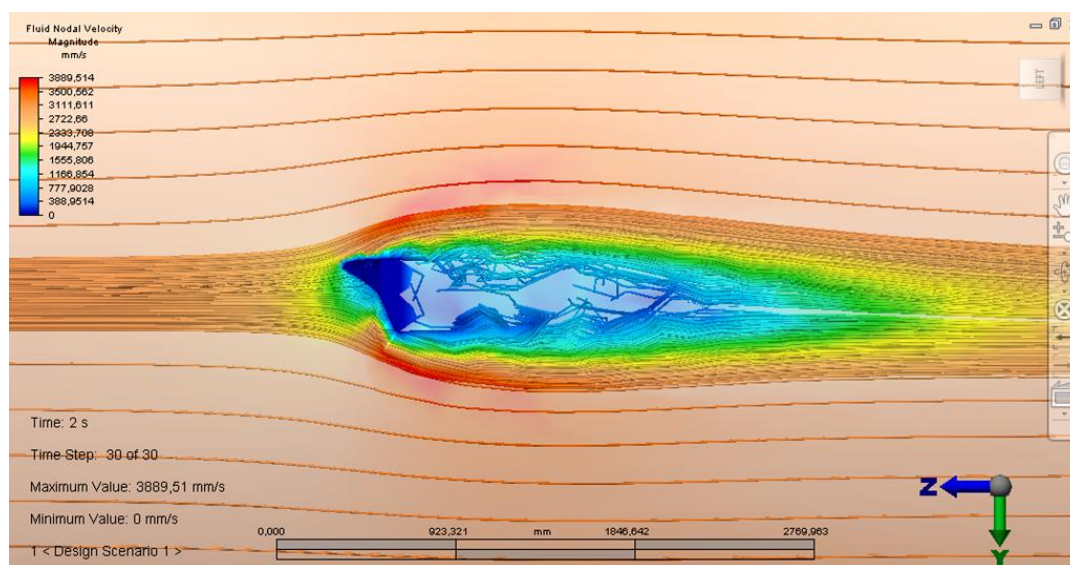


Figura 49 - Linhas de fluxo em Raspador sem seções de alívio.

Pode-se ver que há uma zona da Figura 49 em que, aparentemente, não há linhas de fluxo. Isso acontece porque há uma maior deformação do fluido ali existente, fazendo com que algumas linhas de fluxo mudem de plano, causando assim maior turbulência. Na Figura 50 representa-se a distribuição de pressões atuantes no fluido que circunda diretamente a estrutura do Raspador.

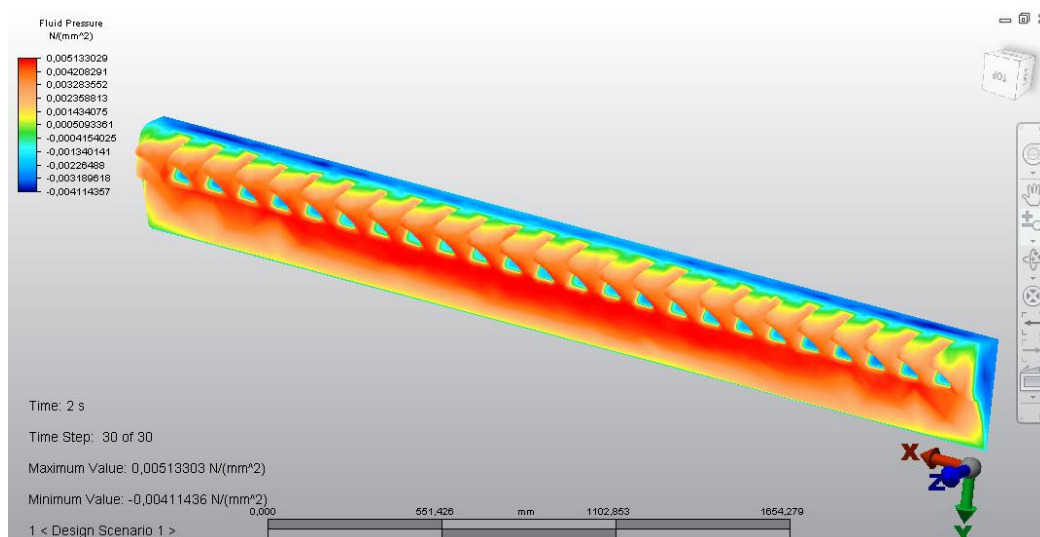


Figura 50 - Campo de pressão no fluido que circunda a estrutura do Raspador.

A Figura 50 apresenta um resultado bastante útil no que diz respeito à otimização do processo computacional. Aqui foi realizada uma simulação estática da estrutura mecânica, com um campo de pressão constante, o que majora os resultados da análise estática, assim como já discutido. Para uma otimização destes resultados, utiliza-se o campo de pressões do fluido que circunda a estrutura (Figura 50) como condição de entrada de pressões no modelo mecânico. Assim tem-se um resultado bastante próximo da situação real.

5. CONCLUSÃO

A energia gerada por hidrelétricas é responsável por mais de 70% da matriz energética brasileira. Por isso, quedas na eficiência na geração deste tipo de energia podem nos causar um grande impacto. Um dos grandes problemas de queda de eficiência na geração de energia hidrelétrica, e até mesmo interrupção desta geração, é a presença de algas e mexilhões nas grades de tomada d'água de usinas geradoras. Sendo a remoção eficaz destes corpos indesejados de extrema importância. O Sistema Automático de Limpeza de Grades aqui proposto, dimensionado para o uso na UHE de Jupia, se presta a este papel.

O projeto deste dispositivo envolve diversos módulos e diferentes áreas, cabendo a este trabalho uma proposta definitiva para o raspador deste sistema de limpeza. Neste projeto, além de conceitos relacionados à concepção de projetos mecânicos, foram utilizados conceitos de manufatura; uma vez que ao efetuar um projeto, deve-se pensar em geometrias que sejam possíveis de ser manufaturadas sem custos exorbitantes.

Para validar o projeto, foram realizadas simulações estáticas e hidrodinâmicas. A simulação estática seguiu os mesmos parâmetros que foram utilizados previamente na simulação da estrutura do Sistema Automático de Limpeza de Grades; já a simulação hidrodinâmica mostra como um escoamento fluídico tende a se comportar na presença da estrutura do Raspador aqui proposto.

A análise estática aqui realizada majora os resultados reais a que estaria submetida a estrutura do Raspador em consequência única da interação fluido/estrutura. Sendo assim, um importante resultado da análise fluidodinâmica é o campo de pressão aplicado ao fluido que circunda a estrutura (Figura 50). Este resultado pode ser usado em trabalhos futuros como condição inicial para uma nova simulação estático-mecânica, refinando assim o resultado da análise estática realizada neste trabalho.

6. BIBLIOGRAFIA

CESP. Disponível em: <<http://www.cesp.com.br>>. Acessado em 05/08/2011.

FOX, R. W.; ALAN, T. M. **Introduction to fluid mechanics**. 6^a.ed. John Wiley & Sons, 2004.

GILES, R. V. **Mecânica dos Fluidos e Hidráulica**. Coleção Schaum. Ed. McGraw-Hill do Brasil. Rio de Janeiro, 1967.

LIU Y. **Introduction to Finite Element Method**. University of Cincinnati. 1998.

MARCONDES, D. A. S. et al. **Eficiência de fluridone no controle de plantas aquáticas submersas no reservatório de Jupia**. Planta Daninha, v. 21, p. 69-77, 2003. (Edição especial).

MARTINS, D.; MARCHI, S.R.; COSTA, N.V.. **Estudo da movimentação de plantas aquáticas imersas presentes no reservatório da UHE Eng. Souza Dias - Jupia**. Planta daninha, Viçosa, v. 23, n. 2, jun. 2005.

NEVES, T.; FOLONI, L. L.; PITELLI, R. A. **Controle químico do aguapé (*Eichhornia crassipes*)**. Planta Daninha, v. 20, p. 89-97, 2002. (Edição especial).

PETRY, A. P. **Análise Numérica de Escoamentos Turbulentos Tridimensionais Empregando o Método de Elementos Finitos e Simulação de Grandes Escalas**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2002.

PITELLI, R. A. **Macrófitas aquáticas no Brasil, na condição de problemáticas**. In: WORKSHOP CONTROLE DE PLANTAS AQUÁTICAS, 1998, Brasília, Resumos... Brasília: IBAMA - Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 1998. p. 12-15.

REDDY, J. N., GARTLING, D. K. **The Finite Element Method in Heat Transfer and Fluid Dynamics**. CRC Press, 1994.

SCHIOZER, D. **Mecânica dos Fluidos**. 1a Ed. Unicamp. Editora Araguaia. São Paulo, 1990.

SIMEÃO, C. M. G.; MARTINEZ, C. B.; FORMAGIO, P. S. *Limnoperma Fortunei: Situação Atual e Perspectivas Futuras*. Comitê Brasileiro de Barragens. V. Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas. Florianópolis, SC. 2006.

TANAKA, R. H. **Prejuízos causados por plantas aquáticas**. In: WORKSHOP SOBRE CONTROLE DE PLANTAS AQUÁTICAS, 1988, Brasília. Anais... Brasília. IBAMA, 1988. p. 36-38.

ZIENKIEWICZ O. C., TAYLOR R. L., **The Finite Element Method**, Vol. 1, 4ª Ed. McGraw-Hill. Londres, 1988.