

UNESP

FACULDADE DE ENGENHARIA DO CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

GUARATINGUETÁ

2016

MARCELO ANDERSON COSTA

PARAMETRIZAÇÃO E CÁLCULO ESTRUTURAL ATRAVÉS DO MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS DE UMA COMPORTA SEGMENTO DE FUNDO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia
do Campus de Guaratinguetá, Universidade
Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Mecânica na área de Projetos.

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva.

Guaratinguetá

2016

C837p

Costa, Marcelo Anderson

Parametrização e cálculo estrutural através do método dos elementos finitos de uma comporta segmento de fundo / Marcelo Anderson Costa – Guaratinguetá, 2016.

72f.: il.

Bibliografia: f. 71-72

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

1. Comportas 2. Método dos elementos finitos 3. Projeto estrutural I. Título

CDU 624.04(043)

MARCELO ANDERSON COSTA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

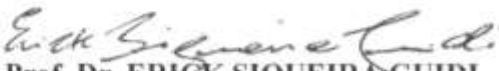
PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: PROJETOS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


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


Prof. Dr. ERICK SIQUEIRA GUIDI
UNESP-FEG


Prof. Dr. CARLOS ALBERTO CHAVES
UNITAU

Setembro de 2016

DADOS CURRICULARES

MARCELO ANDERSON COSTA

NASCIMENTO	20.10.1986 – SÃO JOSÉ DOS CAMPOS / SP
FILIAÇÃO	Sebastião Pereira Costa Maria Lúcia dos Santos Costa
2005/2009	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica na Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.
2011/2013	Curso de Pós-Graduação MBA em Gerência de Projetos, nível de Especialização, na Universidade de Taubaté
2014/2016	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

Setembro de 2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela sabedoria, paciência e persistência, principalmente durante o período de elaboração deste trabalho.

Meus mais sinceros agradecimentos ao apoio incondicional de minha esposa, Josie li Cerqueira Taranto, que sempre esteve ao meu lado, sendo uma companheira em todos os desafios deste período.

Ao meu orientador Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva e a Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista (UNESP), agradeço pela oportunidade e suporte no desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço também a todos os colegas que direta e indiretamente participaram deste projeto e que foram essenciais.

Eu gosto do impossível porque
lá a concorrência é menor.
Walt Disney

COSTA, M. A. **Parametrização e Cálculo Estrutural Através do Método dos Elementos Finitos de Uma Comporta Segmento de Fundo**. 72f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

RESUMO

As comportas hidráulicas são essenciais para a proteção e operação de canais e barragens, diante disso este trabalho apresenta a parametrização de um modelo em três dimensões (3D) utilizando a ferramenta ilogic, com a linguagem de programação *Visual Basic* (VB), e o cálculo estrutural pelo método dos elementos finitos (MEF) de uma comporta segmento de fundo com dimensões de 6,0 m de largura (L) por 5,0 m de altura (H), com raio (R) de 10,0 m e submetida a uma pressão hidráulica (H_s) de 45,3 m.c.a, utilizando para isso o software Autodesk Inventor 2014. Esta comporta, que é utilizada em vertedores de fundo de barragens, possui grande complexidade de projeto e cálculo devido a sua geometria radial e a elevada pressão que está submetida. Baseado nisso, foi desenvolvido um modelo 3D parametrizado para criar o projeto da estrutura desta comporta a partir de quaisquer dimensões fornecidas pelo usuário, o que apresentou resultados muito satisfatórios gerando os modelos 3D utilizados neste trabalho na fase de otimização, os quais foram submetidos a análise das tensões e deslocamentos utilizando um mesmo software em todo este processo. O uso desta ferramenta customizada com as características específicas do equipamento resultou em uma grande economia de tempo e de recursos financeiros e humanos no desenvolvimento do projeto, pois esta ferramenta possibilitou a padronização de um processo e também a sua automatização. Contudo, o desenvolvimento desta ferramenta possibilitou o sucesso nos objetivos de otimizar o projeto visando a redução da massa sem qualquer aumento de horas de projeto ou fabricação, sendo obtidas de fato reduções percentuais nas horas de engenharia para o cálculo e projeto da estrutura apresentada de 91% e na massa líquida de 20,8% comparado ao projeto pelo método tradicional da comporta utilizada como referência que já foi construída, sendo estes resultados significativos e conclusivos de que o uso deste método robusto e avançado de projeto pode aumentar a eficiência e a competitividade de fabricantes de equipamentos no mercado.

PALAVRAS CHAVE: Comporta Segmento de Fundo, Parametrização, Elementos Finitos.

COSTA, M. A. **Parameterization and Structural Calculation Using the Finite Element Method on the Bottom Radial Gate**. 72p. Dissertation of Master's Degree in Mechanical Engineering – Guaratinguetá Engineering College of the São Paulo State University, Guaratinguetá, 2016.

ABSTRACT

Hydraulic gates are essential for the protection and operation of canals and dams, given that this research presents the parameterization of a three dimensions (3D) model using the ilogic tool with the programming language Visual Basic (VB), and the structural calculation by the finite element method (FEM) of a gate bottom segment with dimensions of 6.0 m wide (L) by 5.0 m height (H) with radius (R) of 10.0 m subjected to a hydraulic pressure (Hs) 45.3 m.w.c, making use of Autodesk Inventor 2014 software. This entails that is used in dam spillways background, has high calculation complexity and design due to its radial geometry and high pressure is subjected. Based on this, a 3D model was developed parameterized to create the structure of the design of this gate from any dimensions provided by the user, which showed very good results generating 3D models used in this work in the optimization phase, which were subjected to analysis the stresses and displacements using the same software in all of this. The use of this customized tool to the specific characteristics of the equipment resulted in a great savings of time and financial and human resources in the development of the project, because this tool made it possible to standardize a process and also its automation. However, the development of this tool has enabled the success in the objectives of optimizing the design in order to reduce the mass without any increase in hours of design or manufacturing, and obtained indeed percentage reductions in engineering hours to calculate and presented structure 91 project % and the net weight of 20.8% compared to the traditional design of the gate used as a reference method that has already been built, which are significant and conclusive results that the use of this robust method and design of advanced can increase efficiency and competitiveness equipment manufacturers market companies.

KEYWORDS: Bottom Radial Gate, Parameterization, Finite Element.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura com comportas planas e radiais.....	17
Figura 2 - Modelo esquemático de uma usina hidrelétrica.....	20
Figura 3 - Acidente da comporta segmento na Barragem de Folsom, Califórnia-EUA.....	21
Figura 4 - Comporta plana tipo gaveta.	27
Figura 5 - Comportas radiais tipo segmento do vertedouro.	28
Figura 6 - Barragem da usina hidrelétrica de Tsankov Kamak, na Bulgária.....	29
Figura 7 - Modelo de uma comporta segmento de fundo com blindagem.	30
Figura 8 - Estrutura de uma comporta segmento de fundo.....	30
Figura 9 - Modelo de um comporta completa no Autodesk Inventor.	31
Figura 10 - Elemento tetraédrico (a) e malha de elementos tetraédricos (b).....	32
Figura 11 - Tensão de Von Mises em uma comporta segmento.	33
Figura 12 - Modelo Paramétrico de uma junta utilizando o ilogic.....	34
Figura 13 - Parametrização direta do modelo 3D.....	35
Figura 14 - Parametrização com planilha eletrônica do modelo 3D.	36
Figura 15 - Parametrização com ilogic do modelo 3D.....	37
Figura 16 - Processo de construção e aplicação do modelo parametrizado.	38
Figura 17 - Processo de desenvolvimento do modelo e parametrização.....	39
Figura 18 - Paramento de uma comporta radial.	40
Figura 19 - Paramento comporta segmento de fundo.....	41
Figura 20 - Viga horizontal da comporta segmento de fundo.	42
Figura 21 - Viga vertical intermediária da comporta segmento de fundo.	43
Figura 22 - Viga vertical externa da comporta segmento de fundo.	44
Figura 23 - Reforço horizontal da comporta segmento de fundo.....	45
Figura 24 - Conjunto do braço de uma comporta radial.....	46
Figura 25 - Viga horizontal externa da comporta segmento de fundo.	47
Figura 26 - Montagem do modelo da comporta segmento de fundo.....	48
Figura 27 - Regras de parametrização do modelo 3D.	49
Figura 28 - Regra de parametrização das vigas horizontais.	50
Figura 29 - Regra de parametrização do reforço horizontal.....	51

Figura 30 - Tela inicial do modelo parametrizado da comporta.....	52
Figura 31 - Dados de entrada do modelo parametrizado.....	52
Figura 32 - Seleção do tipo de simulação para o modelo 3D.	55
Figura 33 - Restrições para a simulação do modelo 3D.	56
Figura 34 - Carregamento do modelo 3D.	57
Figura 35 - Propriedades da malha de elementos finitos no modelo 3D.	57
Figura 36 - Malha de elementos finitos no modelo para simulação.	58
Figura 37 - Modelo 3D da comporta segmento de fundo.....	59
Figura 38 - Tensões de Von Mises no modelo 1 da comporta segmento de fundo.....	61
Figura 39 - Tensões de Von Mises no modelo 6 da comporta segmento de fundo.....	62
Figura 40 - Tensões de Von Mises no modelo8 da comporta segmento de fundo.....	63
Figura 41 - Deformação no modelo 1 da comporta segmento de fundo.	64
Figura 42 - Deformação no modelo 6 da comporta segmento de fundo.	65
Figura 43 - Deformação no modelo 8 da comporta segmento de fundo.	65
Figura 44 - Massa do modelo da comporta segmento de fundo.....	66
Figura 45 - Malha de elementos finitos no modelo para simulação.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -Referências de comportas segmento de fundo	53
Tabela 2 - Resistência estática do aço ASTM A36 e ASTM A572 Grau 50.	54
Tabela 3 -Coeficientes de correção para tensão admissível NBR 8883(2008)	54
Tabela 4 -Tensão admissível em relação ao escoamento NBR 8883(2008)	54
Tabela 5 - Resultados do processo de otimização da estrutura da comporta	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
CAE	Computer Aided Engineering
CAD	Computer Aided Drafting
FEA	Finite Element Analysis
MEF	Método dos Elementos Finitos
FEM	Finite Element Method
NEM	Numerical Element Method
APDL	Ansys Parametric Designer Language
VB	Visual Basic
2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	16
1.2 OBJETIVOS.....	18
1.3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	18
1.4 ESTADO DA ARTE	22
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1 DEFINIÇÃO.....	26
2.2 TIPOS DE COMPORTAS HIDRÁULICAS	26
2.2.1 Comportas Planas	27
2.2.2 Comportas Radiais.....	28
2.3 COMPORTA SEGMENTO DE FUNDO	29
2.7 AUTODESK INVENTOR	31
2.8 PARAMETRIZAÇÃO	33
3.4.1 Ferramenta Parâmetros	34
3.4.2 Planilhas Eletrônicas.....	35
3.4.2 Ferramenta ilogic.....	36
3 METODOLOGIA.....	38
3.1 TABULEIRO	39
3.1.1 Paramento	40
3.1.1 Viga Horizontal	41
3.1.1 Viga Vertical Intermediária	42
3.1.1 Viga Vertical Externa	43
3.1.1 Reforço Horizontal	44
3.2 CONJUNTO DO BRAÇO	45
3.3 MODELO DA COMPORTA SEGMENTO DE FUNDO	47
3.4 PARAMETRIZAÇÃO COM ILOGIC.....	48
3.5 CÁLCULO DA ESTRUTURA	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	59

4.1 MODELO PARAMÉTRICO	59
4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS	67
5 CONCLUSÕES	69
5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	70
6 REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

Quanto a origem das comportas hidráulicas, ERBISTI (2002) afirma que estes equipamentos foram desenvolvidos para a operação em sistemas de irrigação, abastecimento de água e navegação fluvial, sendo estas fabricadas em madeira para operar nos canais de irrigação de grandes plantações, principalmente na região da China, a centenas de anos atrás. Segundo o autor, por volta de 1830, foram construídas as primeiras comportas metálicas que inicialmente foram fabricadas em ferro fundido e posteriormente, com o desenvolvimento industrial, em aço carbono.

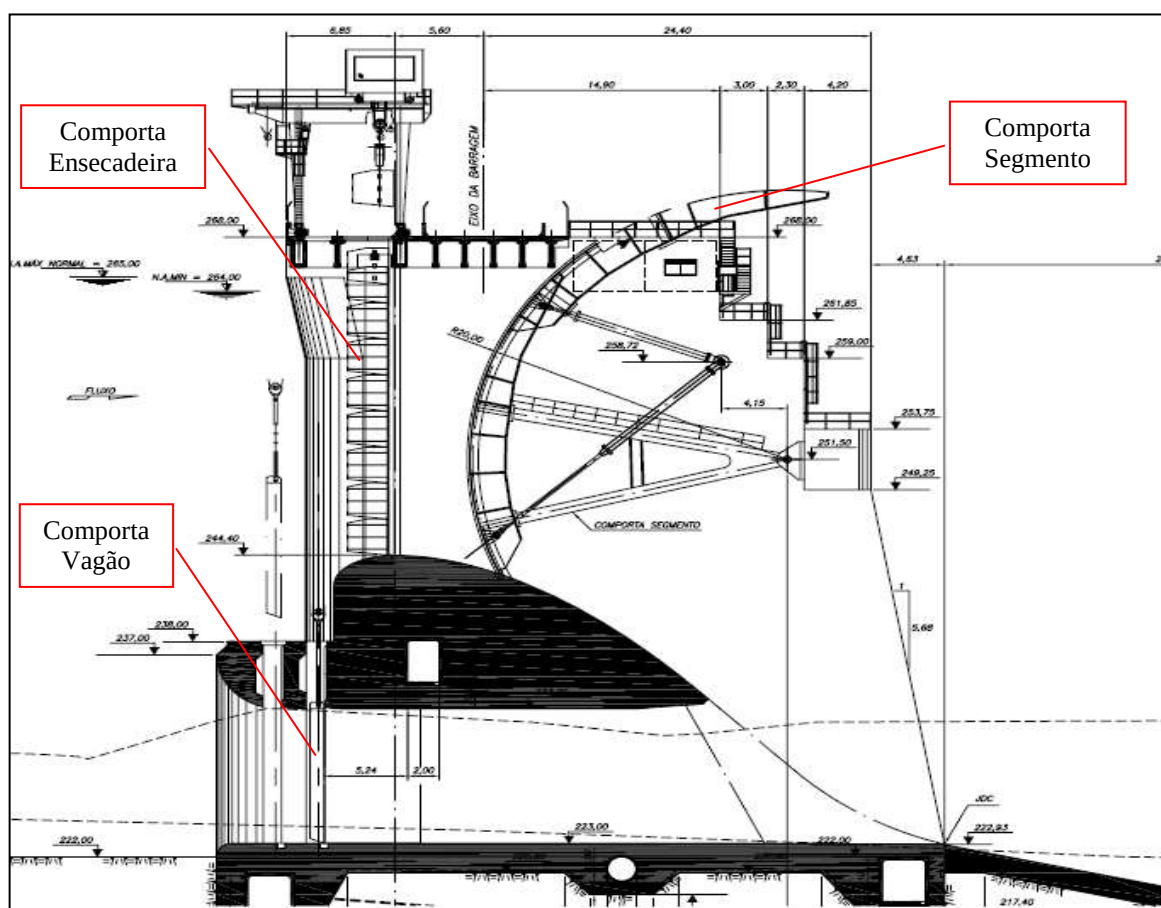
O uso do aço carbono na fabricação de comportas possibilitou o desenvolvimento de equipamentos de dimensões maiores comparado com aquelas construídas em ferro fundido que possuíam por limitação da resistência do material e de capacidade de produção da matéria prima dimensões pequenas. A partir de então, houveram avanços significativos no desenvolvimento de novos tipos de comportas e técnicas de fabricação para atender o aumento da demanda de canais e barragens cada vez maiores.

De acordo com Lewis (1995), existem muitos tipos de comportas hidráulicas, porém há uma predominância de alguns destes em razão de vantagens técnicas e de características dos mercados, sendo exemplos, o caso das estruturas de controle de nível de barragens, conhecidas como vertedouros, onde existe o amplo uso de comportas radiais tipo segmento, e o caso dos canais de transposição e irrigação onde há o vasto uso de comportas planas tipo deslizantes. A seleção de comportas leva em consideração um conjunto de fatores como a experiência, as referências e a disponibilidade do mercado, porém a criação de padrões e tendências de alguns tipos específicos podem ser responsáveis pelo desuso de alguns equipamentos.

A apresentação dos tipos de comportas demanda uma grande pesquisa bibliográfica, visto que não existem muitas referências acadêmicas e técnicas publicadas e possíveis de serem citadas, por este motivo estes equipamentos serão classificados e somente exemplificados de forma genérica. Assim, as comportas podem ser classificadas como planas ou radiais, com base em sua forma construtiva, e estas podem ser tipificadas de acordo com fatores como, por exemplo, seu local de instalação, funcionalidade e tipo de acionamento.

Dentre as comportas planas, são exemplos aquelas de tipo ensecadeira, deslizante e vagão, já dentre as comportas radiais, destacam-se aquelas de tipo segmento, setor e basculante. Para ilustrar alguns destes tipos descritos, a Figura 1 apresenta um projeto adaptado com um vertedouro de superfície e outro de fundo onde são utilizadas comportas ensecadeiras, vagão e segmento.

Figura 1 - Estrutura com comportas planas e radiais.



Fonte: Próprio autor.

Estes equipamentos possuem a função de garantir a segurança, possibilitar a manutenção e operacionalizar estruturas de geração de energia, controle de níveis, distribuição de água, entre outras. Diante de tamanha importância, é fundamental que o dimensionamento e a fabricação ocorram de acordo com padrões normalizados, como os estabelecidos, por exemplo, pela norma brasileira NBR 8883 (2008) ou pela norma alemã DIN 19704 (1998).

Do mesmo modo que as comportas, outros equipamentos hidromecânicos como as válvulas, grades e condutos são muito importantes para os empreendimentos onde são instalados e por isso

seus respectivos projetos também requerem atenção especial. Estes projetos são feitos, em algumas empresas, ainda de forma manual ou por meio de planilhas eletrônicas, onde são considerados fatores empíricos atribuídos às experiências individuais, entretanto o uso de softwares de *Computer Aided Engineering* (CAE) está substituindo estes métodos, o que agiliza, padroniza e aumenta a confiabilidade dos projetos e consequentemente gera vantagens competitivas as empresas que fazem uso desta ferramenta.

Contudo, cabe ressaltar a relevância das comportas dentre os demais hidromecânicos e destacar a comporta segmento de fundo como uma das mais complexas quanto ao projeto e fabricação, pois, dentre os equipamentos de forma similar, está sujeito as maiores pressões hidráulicas e também têm projeto exclusivo para cada local de instalação, cliente e aplicação que atendem às exigências da legislação local e do cliente. Além disso, para este tipo de equipamento com grandes dimensões, as empresas necessitam de uma infraestrutura com grandes áreas, máquinas robustas e mão de obra especializada, de modo que sua construção pode ser realizada em partes, cada uma em um país.

1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo desta dissertação é desenvolver a parametrização e o cálculo estrutural de uma comporta segmento fundo utilizando a ferramenta ilogic e ferramenta de simulação em elementos finitos do software Autodesk Inventor 2014.

Além disso, este trabalho visa apresentar a comporta segmento de fundo, que é relativamente desconhecida e com pouca bibliografia, e também apresentar as funcionalidades da ferramenta ilogic para a parametrização de modelos 3D de componentes ou conjuntos, com um equipamento hidromecânico.

1.3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Esta dissertação é relevante para o meio acadêmico e para a sociedade, pois apresenta o processo de desenvolvimento de um equipamento hidromecânico complexo por meio de um software onde são aplicadas várias disciplinas. Tal exposição pode incentivar no meio acadêmico e na sociedade, docentes, discentes e interessados em desenvolverem estudos avançados de

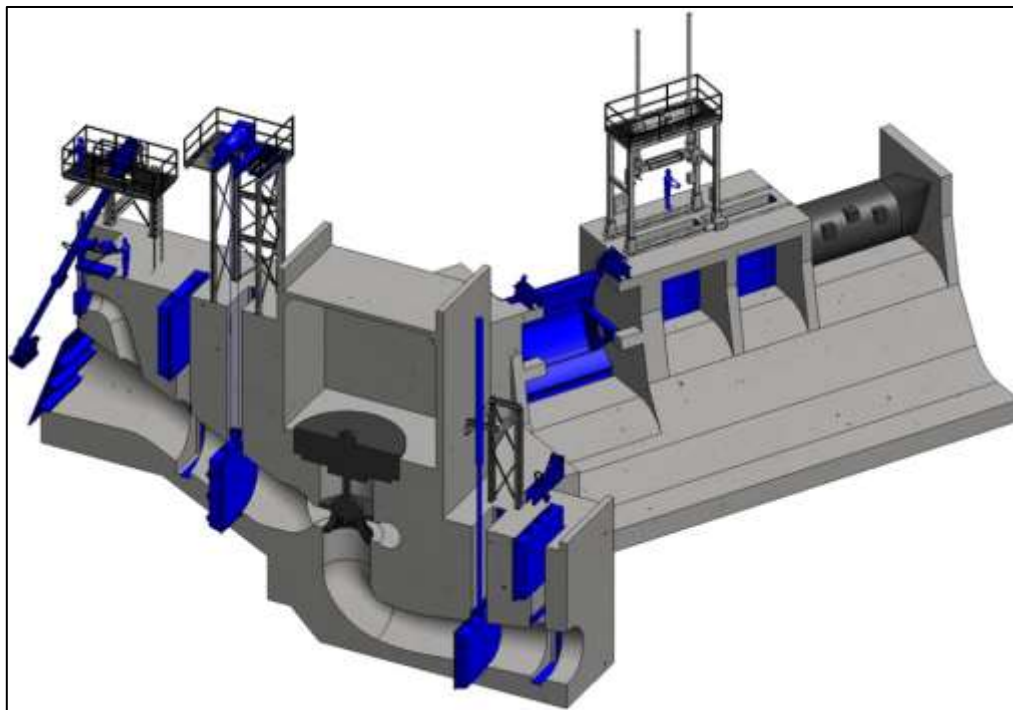
parametrização com o software Autodesk Inventor, para aplicar em outros projetos de componentes ou equipamentos incentivando inovações, soluções e melhorias na área de engenharia, o que seria uma oportunidade de aproximação da universidade com os centros de desenvolvimento de tecnologia das empresas ou a oportunidade de um profissional se aperfeiçoar e transmitir às empresas este conhecimento.

Os estudos envolvendo os equipamentos hidromecânicos são muito importantes para garantir a eficiência na operação em sistemas de irrigação, navegação e em especial na geração de energia em usinas hidrelétricas, as quais são responsáveis pela geração da maior parcela da energia elétrica consumida no Brasil, de tal forma que é incontestável o mérito de todo e qualquer estudo para promover melhorias nesta área. Dentre estes equipamentos se destacam as comportas, pois estas são as principais responsáveis pela regulação do fluxo durante a operação e manutenção, pela segurança das estruturas mecânicas e civis, do meio ambiente e comunidades nos arredores de empreendimentos onde são instaladas.

A presença de equipamentos hidromecânicos, com destaque para as comportas, é demonstrada no modelo esquemático de uma usina hidrelétrica, apresentado na Figura 2, onde é possível identificar a expressiva proporção de comportas dentre os demais equipamentos. Além da presença em quantidade significativa, a Figura 2 demonstra que uma usina hidrelétrica depende das comportas para operar, ou seja, caso uma comporta falhe ou não funcione corretamente a geração de energia pode ser comprometida e interromper o fornecimento de eletricidade às residências, hospitais, indústrias, comércios, etc.

As comportas hidráulicas devem ser dimensionadas para condições críticas de operação, com carregamentos combinados de esforços dinâmicos, inclusive vibrações, e mecânicos como o atrito e impactos externos, por esta razão cada projeto é individual e demanda um extenso período de trabalho para a realização do cálculo da estrutura e dos esforços de manobra, bem como para a elaboração dos desenhos de implantação, conjunto e detalhes para fabricação e de outros documentos que incluem especificações, manuais e registros de qualidade. Este processo pode se tornar ainda mais complexo em projetos com muitos equipamentos diferentes, pois neste caso são necessários um grande volume de recursos, com um custo relativamente grande, para atender esta demanda de trabalho no tempo previsto e requerido pela equipe de planejamento.

Figura 2 - Modelo esquemático de uma usina hidrelétrica.



Fonte: <http://mecanhydro.com/products-page/>. Acesso em: 27-09-2015.

A partir da comparação entre as planas e radiais, aquelas com tabuleiro plano são menos complexas, quanto ao projeto e fabricação, que as comportas com tabuleiro radial, porém em ambos os casos existem basicamente duas condições de instalação, nas condições de fundo e de superfície, estando os equipamentos de fundo relativamente aos de superfície submetidos a condições de maior carregamento e criticidade estrutural. Por este motivo, o cálculo estrutural de comportas segmento de fundo é considerado, principalmente nas indústrias de equipamentos hidromecânicos, como uma atividade de alta complexidade e importância, pois a falha desta comporta pode causar graves danos à barragem e seus arredores.

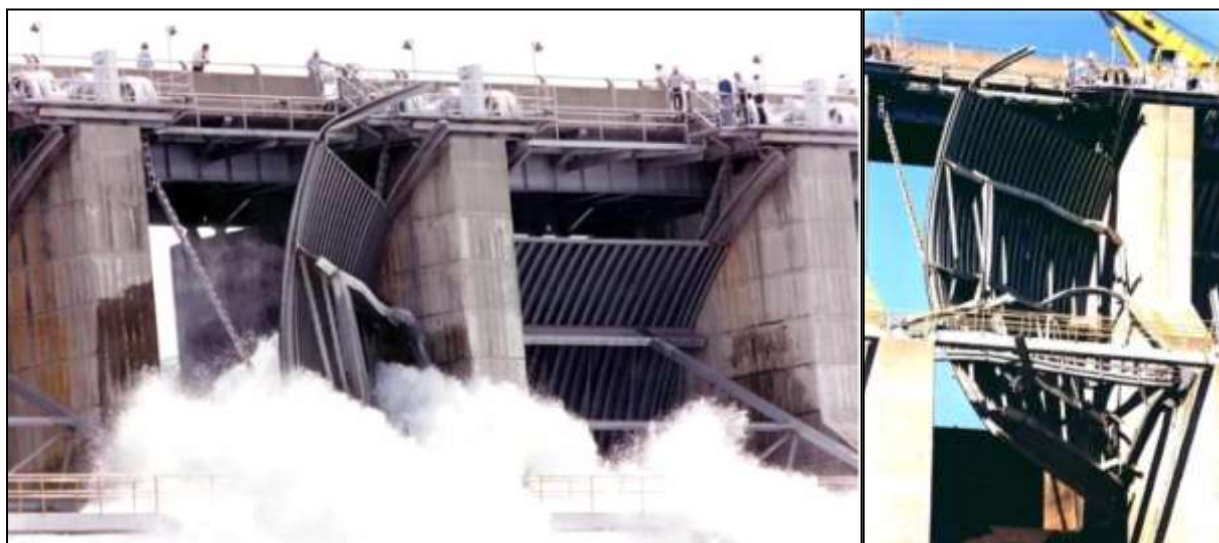
As comportas segmento de fundo são frequentemente utilizadas em vertedouros de fundo ou descarregadores de fundo, que são essencialmente estruturas de controle de nível da barragem, estando os descarregadores posicionados próximos da base da barragem para verter água quando o nível estiver abaixo da soleira do vertedouro principal de superfície e para executar a limpeza de sedimentos acumulados na base da barragem. Já os vertedouros de superfície, estes são posicionados no topo da barragem, pois estas estruturas têm a função de controle em níveis máximos e normais de água evitando o transbordamento, o que pode ser feito também através de

um vertedouro livre, sem comportas, em pequenas barragens ou para complementar a demanda em grandes barragens.

Dentre o histórico de acidentes provocados por falhas estruturais em comportas, é possível destacar o ocorrido na barragem de Folsom na Califórnia, nos Estados Unidos, em 17 de julho de 1995, quando uma das comportas segmento do vertedouro, com dimensões de 12,8 m de vão e 15,2 m de altura, se rompeu. Este dano estrutural causou um acidente sem vítimas, mas com um custo muito grande para execução dos reparos, além do prejuízo gerado pela necessidade de baixar o nível de água do reservatório, a qual é utilizado para a geração de energia, sendo exibidas na Figura 3 a comporta com e sem fluxo de água.

Diante de situações como esta apresentada anteriormente, para empresas de projeto e fabricação de comportas, a utilização de ferramentas para otimizar o processo de desenvolvimento dos equipamentos hidromecânicos, como os modelos paramétricos e o cálculo estrutural em elementos finitos, representam uma estratégia robusta para garantir a participação de forma competitiva e segura no mercado. Estes modelos paramétricos otimizam a modelagem dos equipamentos, facilitam os estudos de montagem e operação e são a base para os cálculos estruturais, além de gerar de forma automática os desenhos de fabricação que ficam ligadas ao modelo permitindo a atualização global do projeto.

Figura 3 - Acidente da comporta segmento na Barragem de Folsom, Califórnia-EUA.



Fonte: ISHII, et al. 2014.

Com relação ao método de cálculo estrutural por meio de elementos finitos, este é compatível e bastante útil para a análise de comportas em função da complexidade de suas estruturas, e alguns softwares utilizados nas indústrias podem analisar estas estruturas e também a dinâmica do fluxo de modo automatizado. Dentre os possíveis softwares destaca-se o ANSYS, que possui vários modos de análise, e para o qual já existem ferramentas paramétricas desenvolvidas, como apresentado por GRANDO (2012) e ALMEIDA (2015) em seus trabalhos acadêmicos.

Contudo, este software possui alto custo de aquisição e manutenção, além de não tem uma boa interface com outros softwares, para a importação de modelos 3D, e um método de parametrização estável, o qual utiliza uma linguagem de programação específica denominada *Ansys Parametric Designer Language* (APDL) que dificulta a correção e a criação de novos programas para a parametrização de modelos por um usuário que não tenha um treinamento específico. Por estes motivos, são necessárias alternativas mais viáveis para a aplicação industrial, dentre as quais se destaca o software Autodesk Inventor 2014, que possui meios de parametrização muito simples, uma interface direta para modelos deste mesmo software e a possibilidade também de gerar os desenhos de detalhes para a fabricação, sendo esta uma ferramenta que pode gerar grande redução de custos.

Utilizando o Autodesk Inventor 2014, é possível realizar a parametrização através de interfaces simples, que podem ser acessadas por meio dos menus principais e utilizadas de forma eficiente, como demonstrado por HERCOS (2015), porém outras maneiras possíveis são através do link com planilhas eletrônicas externas, como o Microsoft Excel, para fornecer os dados de entrada ao programa, e através do uso da linguagem de programação Visual Basic (VB), que foi amplamente difundida em programas da Microsoft, na ferramenta ilogic onde é possível criar regras lógicas com as mais diversas finalidades relacionadas ao modelo 3D.

1.4 ESTADO DA ARTE

ERBISTI (2002) compilou em sua publicação uma coletânea de informações sobre comportas para orientar os engenheiros sobre o cálculo, projeto, fabricação, teste e montagem destes equipamentos, com destaque para as comportas segmento, todavia não há nenhum tipo de memorial detalhado para o cálculo estrutural, mas as orientações para este processo com base nas disciplinas de resistência dos materiais e dinâmica são muito relevantes. A respeito da comporta

segmento de fundo, ou comporta segmento submersa, o autor afirma que este é o tipo mais eficiente e com menor custo para a instalação em estruturas de descarga de fundo ou vertedouros de fundo, além disso outra contribuição importante do autor, e muito utilizada ainda hoje, são equações para estimar, com base em uma série de projetos já fabricados por algumas empresas, para fins de orçamento a massa da estrutura das comportas.

LOPES (2002) se propôs a desenvolver uma ferramenta de engenharia para parametrizar e otimizar modelos, utilizado na elaboração linguagens de programação FORTRAN e APDL no software de *Computer Aided Engineering* (CAE) ANSYS, que realiza análises estruturais com base no método dos elementos finitos. Neste trabalho foi apresentado como resultado da análise de uma bifurcação, que é uma peça especial de tubulação, a redução da massa da estrutura de 54.000 kg para 34.178 kg, após a utilização do programa desenvolvido para otimização com base na análise de elementos finitos, reduzindo em 36,7% a massa e utilizando neste processo um tempo de 2 horas.

BACALTCHUK (2008) defendeu em seu trabalho um conjunto de sugestões para reduzir os custos da energia elétrica gerada em usinas hidrelétricas através da melhoria do projeto de infraestrutura da usina, o que poderia garantir a redução de até 40% no custo do MWh. Dentre suas considerações destaca-se a sugestão de utilizar vertedouros de fundo, com comportas segmento de fundo ou comportas planas, em alternativa aos tradicionais vertedouros de superfície, o que pode reduzir significativamente o volume de concreto armado, as escavações em rocha e as ensecadeiras de concreto.

Como resultado deste trabalho, existem atualmente no Brasil uma série de pequenas usinas hidrelétricas em construção que utilizam vertedouro de fundo em barragens, das quais a grande maioria está localizada na região sul do país. Com isso, as comportas segmento de fundo que haviam sido deixadas de serem selecionadas para projetos de barragens voltaram a fazer parte do mercado de equipamentos hidromecânicos.

GRANDO (2012) apresentou uma nova forma de abordagem do cálculo estrutural através do método dos elementos finitos utilizando uma ferramenta de parametrização que foi desenvolvida a partir da motivação pela divergência encontrada nas tensões dos braços de uma comporta segmento entre o cálculo analítico e numérico. Em seu trabalho o autor desenvolveu e apresentou como resultado de seus estudos uma nova forma de obter os valores das tensões no plano vertical dos braços que forma um pórtico em forma de “A”.

Através da ferramenta paramétrica apresentada por este autor, fica evidente a complexidade de uma comporta radial do vertedouro com sua estrutura complexa que certamente demanda um tempo muito grande para o cálculo estrutural e projeto. Por este motivo, o autor enfatiza que em decorrência da competitividade deste mercado de equipamentos hidromecânicos, que é globalizado, é necessário o desenvolvimento de ferramentas para reduzir os custos com o material e mão de obra de desenvolvimento dos equipamentos para aumentar as margens de lucro, que atualmente são baixas, e com isso garantir a manutenção do negócio.

DANESHMAND et al. (2013) apresentaram um estudo com a análise de parâmetros hidráulicos de fluxo em uma estrutura de descarga de fundo, utilizando uma comporta radial, por meio de modelos físico e numérico, sendo neste caso utilizado um modelo reduzido da estrutura da descarga de fundo da barragem de Shahryar no Irã, com o objetivo de investigar as forças hidráulicas sobre a comporta radial e os padrões de fluxo nesta região do sistema. Os resultados obtidos por este autor utilizaram métodos numéricos baseados no *Natural Element Method* (NEM) para estudar forças hidráulicas no *Finite Element Method* (FEM) para avaliar as frequências naturais da comporta, e o modelo físico construído em dimensões reduzidas. Quanto as condições de contorno, estas foram aplicadas para diferentes aberturas da comporta radial e como resultado foi obtido uma boa concordância para as distribuições de pressão no fluxo e na comporta, comparando os métodos empregados.

ALMEIDA (2015) também se propôs a desenvolver uma ferramenta paramétrica em linguagem APDL, a ser aplicada no software ANSYS, para dimensionar a estrutura de um pórtico rolante de vigas centrais, sendo este um tipo de equipamento de levantamento muito utilizado em usinas hidrelétricas e pátios de movimentação de materiais. Através desta ferramenta desenvolvida pelo autor, foi possível analisar com mais agilidade vários casos de carga em uma mesma estrutura, além de promover alterações da estrutura a fim de otimizá-la com muita facilidade, visto que neste caso é necessário apenas a alteração dos parâmetros de entrada, o que comprovadamente possibilitou um grande ganho de tempo e redução dos recursos para o projeto da estrutura do pórtico rolante.

HERCOS (2015) apresentou uma ferramenta paramétrica elaborada diretamente no software Autodesk Inventor 2014 com a finalidade de gerar o modelo 3D que pode ser utilizado para o cálculo estrutural pelo MEF utilizando este mesmo software ou outro como o ANSYS, conforme métodos e resultados apresentado pelo autor. Este modelo paramétrico permitiu grande agilidade

na modelagem de uma comporta deslizante garantindo liberdade ao projetista para utilizar o mesmo software ou qualquer outro compatível para realizar o cálculo estrutural. Entretanto, o autor destaca que o uso de um mesmo software permite que o projeto 3D e 2D possam estar interligados, ou seja, uma vez que os desenhos de fabricação tenham sido elaborados a partir do modelo 3D, qualquer alteração no modelo modifica os desenhos.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos sendo o primeiro a Introdução, o segundo a Revisão Bibliográfica, o terceiro a Metodologia, o quarto os Resultados e Discussões e, por último, o quinto apresenta as Conclusões.

O capítulo primeiro apresenta uma introdução ao tema proposto com a abordagem das características das comportas hidráulicas e sua importância em sistemas como os de geração de energia, além disso expõe os objetivos da pesquisa, as justificativas sobre a relevância do tema selecionado para a dissertação e um panorama das publicações sobre o tema apresentado, com o que já foi desenvolvido sobre o assunto.

Na sequência, o segundo capítulo traz uma revisão bibliográfica com as teorias apresentadas em livros, publicações técnicas, periódicos, sites e normas técnicas relacionadas as comportas hidráulicas, ao cálculo estrutural por meio de elementos finitos e a parametrização de modelos de equipamentos.

No terceiro capítulo são elencados os métodos utilizados para a obtenção dos resultados, abordando a sequência de etapas, os dados de entrada, os dados de saída e as ferramentas envolvidas.

Já no capítulo de Resultados e Discussões, todos as tensões e deformações obtidas são apresentadas, analisadas e comparadas com os limites admissíveis segundo a norma NBR8883 (2008).

Por fim, no último capítulo estão as conclusões e comentários finais sobre os resultados obtidos juntamente com sugestões para outras pesquisas com objetivo de dar continuidade ao estudo desenvolvido.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O uso da água em sistema de irrigação para a agricultura é de conhecimento da humanidade desde muito tempo, pois a necessidade do cultivo de alimentos, os quais necessitam de muita água, em períodos de estiagem ou em locais com baixo índice pluviométrico incentivaram a criação de sistemas de irrigação, que inicialmente eram feitos por meio de canais que faziam uso da gravidade. O avanço da tecnologia e o crescimento demográfico levaram o ser humano a desenvolver barragens para represar água no período de seca, equipamentos para controlar o fluxo de canais de condução da água para plantações e equipamentos utilizando força motriz gerada por meio de rodas d'água.

Conforme exposto por ERBISTI (2002), o aumento das estruturas de irrigação causou a necessidade de fabricar comportas cada vez maiores, e em meados do século XIX foram desenvolvidas as comportas em ferro fundido, sendo a primeira utilização conhecida de uma comporta ocorrida no rio Sena, na França, em 1853. No início do século XX, principalmente na Alemanha, Estados Unidos e Holanda, foram desenvolvidos vários tipos de comportas que ainda são produzidas. Já no Brasil, em 1924 na usina hidrelétrica Ilha dos Pombos, no rio Paraíba, a instalação de três comportas tipo setor com 45 metros de vão e 7,4 metros de altura, foi um recorde para comportas de seu tipo.

2.1 DEFINIÇÃO

As definições existentes para comportas hidráulicas são similares e foram sintetizadas na Norma Brasileira NBR 7259 (2001), elaborada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que define estes equipamentos como dispositivos mecânicos utilizados para controlar vazões hidráulicas em qualquer conduto aberto ou fechado.

2.2 TIPOS DE COMPORTAS HIDRÁULICAS

As comportas podem ser classificadas de várias maneiras, porém a classificação pela forma do paramento, radial ou plana, e pela função, de serviço ou manutenção, é uma das mais aceitas no meio industrial. Com isso, para facilitar o entendimento dos projetos das comportas, estas podem ser simplesmente do tipo plana ou radial.

2.2.1 Comportas Planas

As comportas planas, ou seja, aquelas com paramentos planos, são amplamente utilizadas em estruturas de contenção de água e canais devido a sua estrutura simples e de fácil instalação e manutenção. Estas comportas, que foram estudadas por HERCOS (2015), dentre as quais se destacam as ensecadeiras (stoplogs), as vagões e as deslizantes ou gavetas, são aplicadas com o objetivo de controlar a vazão e de isolar áreas para a realização de manutenções ou inspeções, em situações programadas ou de emergência, para proteger outros equipamentos do sistema e os arredores da instalação.

De acordo com ERBISTI (2002), as comportas planas possuem uma estrutura composta de alguns elementos comuns a grande maioria das comportas como: peças fixas, paramento, vedação, elementos de rolamentos e deslizamento e o sistema de acionamento. Na Figura 4 estão ilustradas comportas gavetas com acionamento manual, uma concepção comum e muito aplicada em canais de irrigação.

Figura 4 - Comporta plana tipo gaveta.

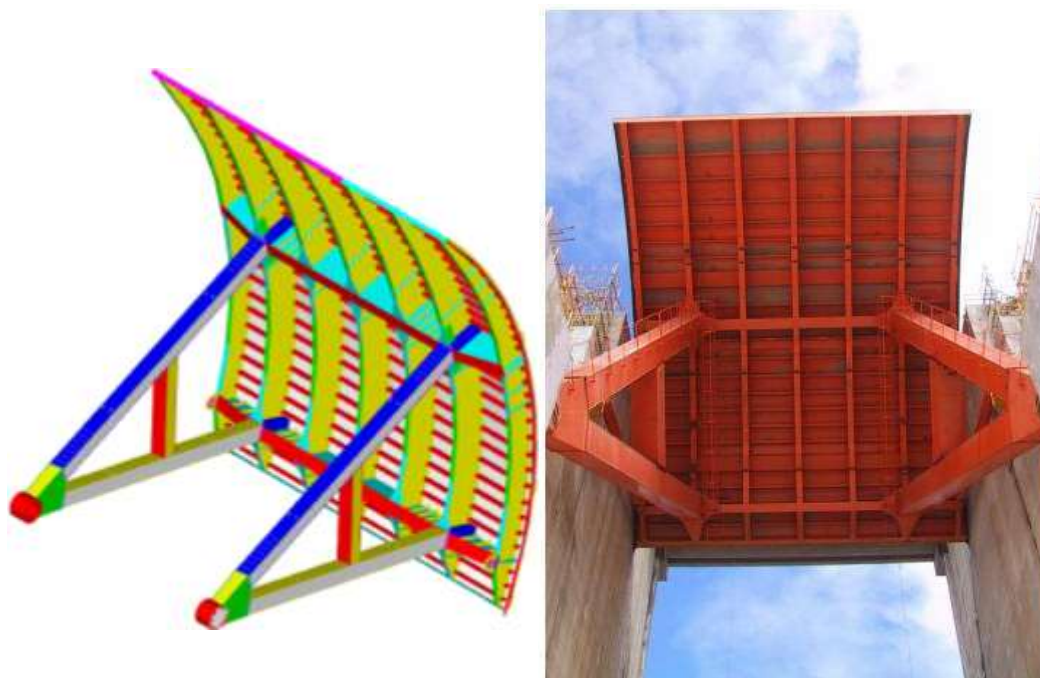


Fonte: Próprio autor.

2.2.2 Comportas Radiais

As comportas radiais são aquelas que possuem o tabuleiro em forma de segmento de círculo, por isso possuem hidrodinâmica melhor com relação as demais comportas. Este tipo de comporta, apresentada na Figura 5, tem seu projeto e fabricação mais complexos relativamente às comportas planas, conforme apresentado por GRANDO (2012), porém em aplicações como os vertedouros de barragens é amplamente utilizada e está presente em quase todas as usinas hidrelétricas no Brasil e América Latina.

Figura 5 - Comportas radiais tipo segmento do vertedouro.



Fonte: Próprio autor

Dentre as comportas radiais destaca-se a segmento de fundo, pois este equipamento possui várias funções essenciais na operação de uma barragem. Esta comporta é normalmente instalada próximo da base da barragem atuando na manutenção da vazão do rio represado, na falta de uma estrutura específica, e na descarga de fundo com o objetivo de controlar o nível e fazer a limpeza dos sedimentos que de forma natural se acumulam no fundo do reservatório. Quanto ao dimensionamento, devido a seu local de instalação, esta comporta está submetida a pressão hidráulica de toda a coluna d'água do reservatório, por isso sua estrutura é bastante reforçada diferente dos demais tipos de comporta radial.

2.3 COMPORTA SEGMENTO DE FUNDO

A barragem da usina hidrelétrica de Tsankov Kamak, na Bulgária, possui um vertedouro com quatro comportas radiais, que apesar de próximo a superfície, possui nível d'água maior que a altura das comportas e por isso pode ser considerada de fundo. Além disso, existe um descarregador de fundo que utiliza comportas segmento de fundo, o qual é mostrado em operação na Figura 6 com o objetivo aparente de manter a vazão mínima do rio e garantir sua permanência após a construção da barragem.

Figura 6 - Barragem da usina hidrelétrica de Tsankov Kamak, na Bulgária.

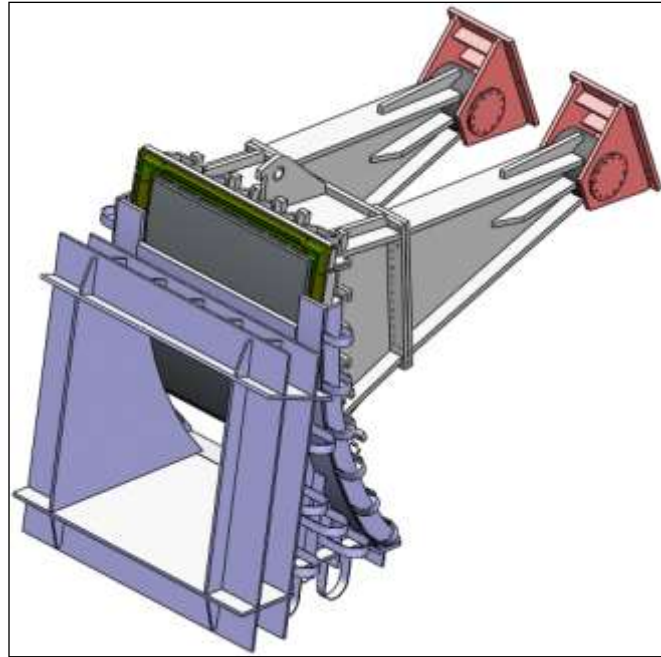


Fonte: <http://www.archello.com/en/project/hydropower-station-tsankov-kamak>. Acesso em: 11-10-2015.

Por estarem submetidas a grandes pressões em função de sua posição de instalação, a comporta segmento tem uma estrutura muito reforçada, como ilustra o modelo apresentado na Figura 7, sendo esta sua principal e mais nítida diferença relativa aos demais tipos de comporta segmento. Além da estrutura, outro diferencial desta comporta são as dimensões reduzidas em função das altas pressões inviáveis e em alguns casos desnecessário a construção de grandes comportas, de modo de que sua estrutura possui grande densidade e mesmo em pequenas dimensões necessitam de um grande planejamento para seu transporte, que é realizado com a

estrutura completa e não em partes como mostrado na Figura 8, e a montagem que exige um planejamento complexo, com a mobilização de muitos recursos, sendo alguns deles especiais.

Figura 7 - Modelo de uma comporta segmento de fundo com blindagem.



Fonte: Próprio autor

Figura 8 - Estrutura de uma comporta segmento de fundo.



Fonte: http://en.jhmw.com/en/Article_Class.asp?ClassID=841&ArticleID=28177. Acesso em: 11-10-2015.

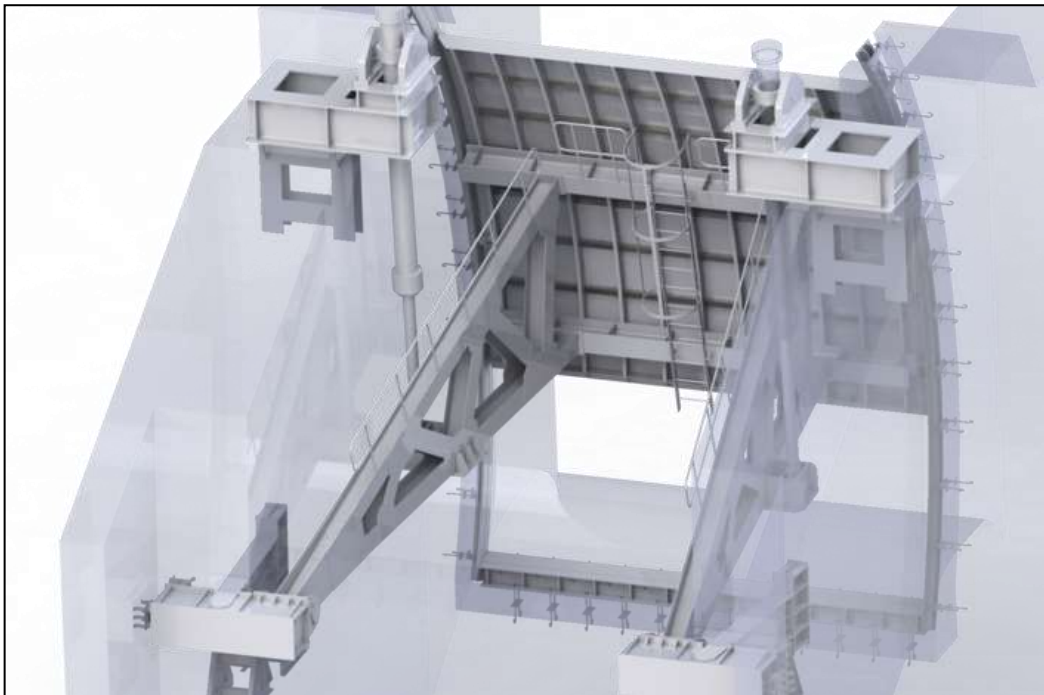
2.7 AUTODESK INVENTOR

Segundo WAGUESPACK (2013), o software Autodesk Inventor é aplicado em projetos de engenharia e para tal possui diversos recursos, que auxiliam na modelagem, análise estrutural e detalhamento de conjuntos e seus componentes, através de uma interface simples e com comandos de fácil acesso para auxiliar o usuário durante o desenvolvimento do projeto. Dentre suas principais funcionalidades está a modelagem em 3D, por meio da qual é possível projetar componentes, montar conjuntos e verificar as interferências entre componentes, mas com esta mesma ferramenta é possível inserir restrições e regras, analisar a estrutura através do método dos elementos finitos e gerar os desenhos de detalhes em 2D.

A integração de várias ferramentas em um único software otimiza o projeto, pois reduz os custos e os riscos de problemas técnicos, o que foi apresentado por HERCOS (2015). Além disso, todas as ferramentas são interligadas e qualquer alteração realizada no modelo 3D, automaticamente atualiza os desenhos 2D, o que gera economia de tempo comparado ao projeto que utiliza vários softwares específicos.

A Figura 9 exibe o modelo 3D de uma comporta segmento completa, com todos os seus componentes e acessórios, onde é possível observar a riqueza de detalhes possíveis de serem criados e a qualidade do projeto que pode desenvolvido com este software.

Figura 9 - Modelo de um comporta completa no Autodesk Inventor.

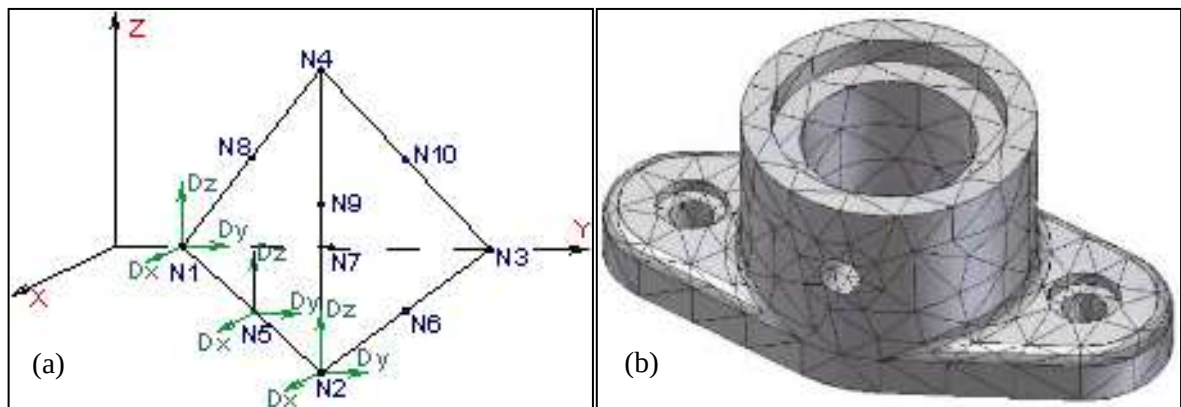


Fonte: (<https://grabcad.com/library/tainter-gate-radial-gate-1>. Acesso em: 28-09-2015).

Com relação a ferramenta de análise de tensões e deslocamentos, SHIH (2014) destaca que no módulo de análise de tensões do Autodesk Inventor 2014, as tensões são calculadas usando uma análise estática e linear baseada no método dos elementos finitos (MEF). Este método numérico é utilizado para encontrar soluções aproximadas de sistemas complexos, de modo que este método é amplamente aplicado na engenharia mecânica e conhecido como *Finite Element Analysis* (FEA).

Ainda segundo o autor, este software utiliza elementos tipo tetraédricos de quatro nós, o que possibilita modelar superfícies planas e também curvas, conforme ilustrado na Figura 10. O deslocamento de cada nó descrito nas direções dos eixos cartesianos X, Y e Z, chamados graus de liberdade, compõe a equação de deslocamento do elemento, que forma com as demais equações um sistema de equações global do objeto, o qual é analisado e seus resultados utilizados nos cálculos de tensão e deformação.

Figura 10 - Elemento tetraédrico (a) e malha de elementos tetraédricos (b).

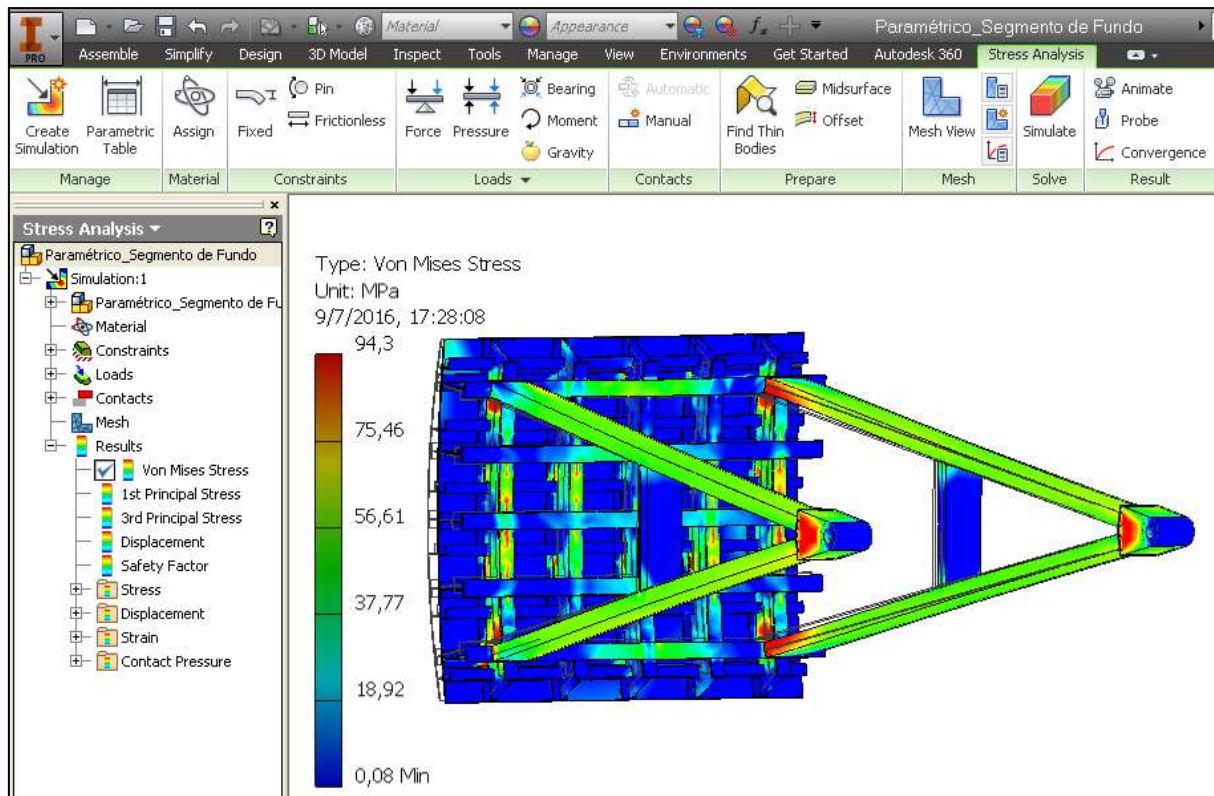


Fonte: (a) (<https://knowledge.autodesk.com/support/simulation-mechanical/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ENU/SimMech/files/GUID-EB10FAC1-1CCC-4EB4-A3AD-C7DE7F3B8CEC-htm.html>).

Acesso em: 12-05-2016); (b) SHIH, 2014 – cap. 16 pag.

A partir de um modelo 3D, com materiais já definidos, são incluídas restrições, um carregamento estático, contatos entre os componentes em conjuntos e a malha de elementos finitos para realizar a simulação. O modelo do conjunto de uma comporta segmento é apresentado na Figura 11 com os resultados obtidos para a tensão de Von Mises, com o objetivo de ilustrar a forma de apresentação gráfica destes resultados que permitem a compreensão do comportamento da estrutura.

Figura 11 - Tensão de Von Mises em uma comporta segmento.



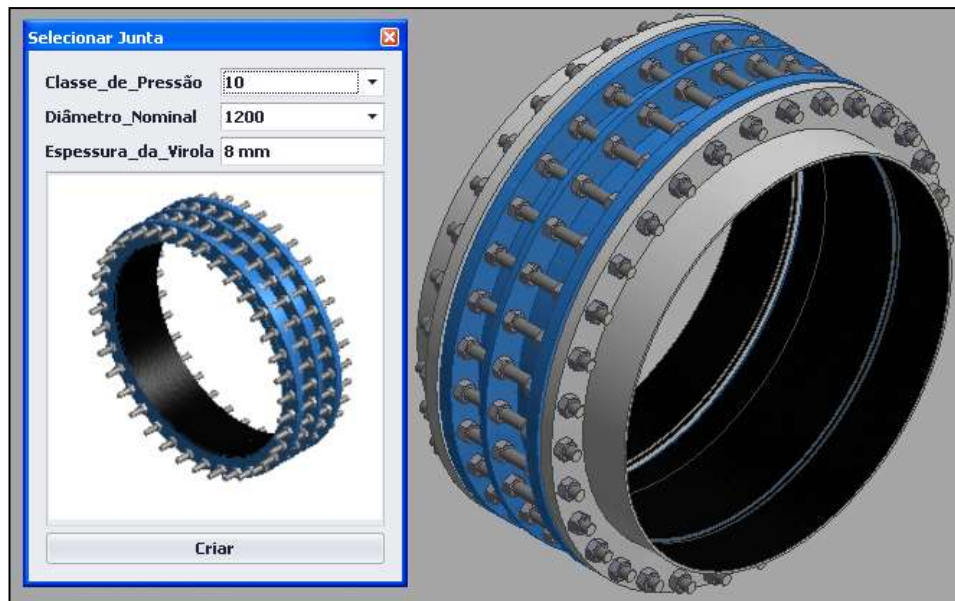
Fonte: Próprio autor.

2.8 PARAMETRIZAÇÃO

Além das ferramentas descritas, o software Autodesk Inventor 2014 possui ferramentas de parametrização com o objetivo de possibilitar a automatização e padronização de projetos similares gerando uma redução no tempo e custo destes projetos. Uma destas ferramentas é o ilogic que utiliza a programação em *Visual Basic* (VB) com uma interface simples e funções pré-definidas, para construir modelos paramétricos como este, apresentado na Figura 12, de uma junta axialmente travada que é utilizada em tubulações.

A parametrização de um componente ou conjunto neste software pode ser realizada de três maneiras, as quais têm acesso facilitado através da interface do software, sendo estas por meio da ferramenta de parâmetros, de planilhas eletrônicas externas associadas ao modelo 3D e da ferramenta ilogic. Cabe destacar que este software cria, de forma automática, para cada dimensão inserida, um parâmetro que pode ser visualizado e modificado, diretamente ou indiretamente, o que agiliza o processo de desenvolvimento do paramétrico.

Figura 12 - Modelo Paramétrico de uma junta utilizando o illogic.



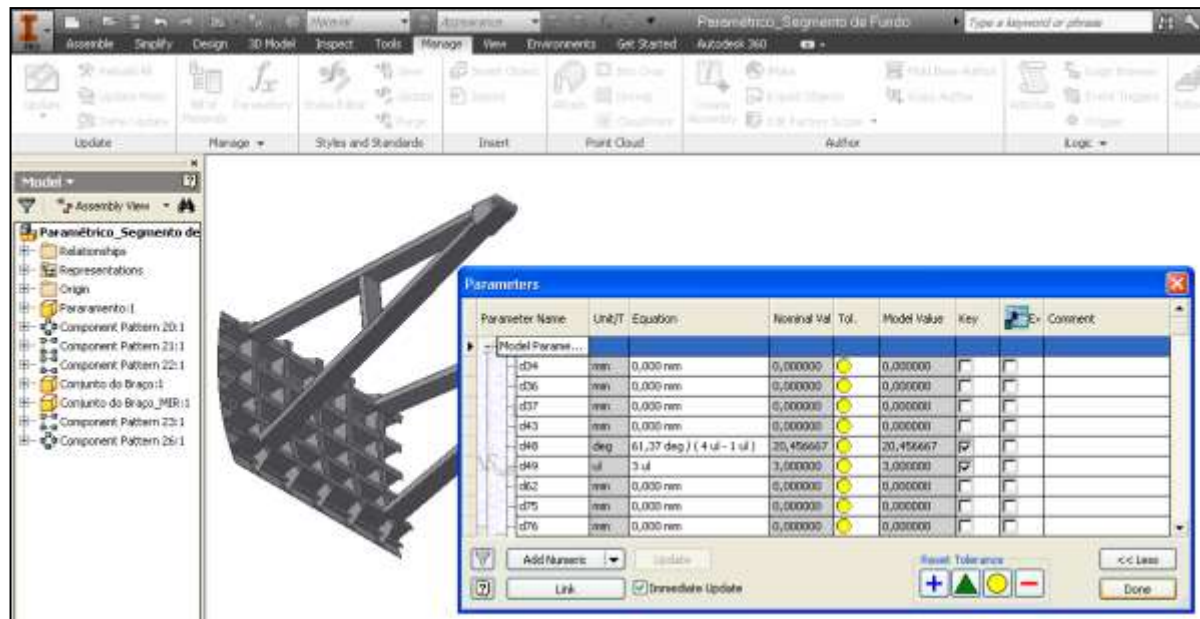
Fonte: Próprio autor.

O uso da parametrização para modelos complexos requer o uso de uma ferramenta robusta para atender a demanda de complexidade, por este motivo alguns testes e pesquisas bibliográficas podem auxiliar na tomada de decisão sobre qual a ferramenta mais indicada. As ferramentas disponíveis no software Autodesk Inventor 2014 são apresentadas a seguir com o objetivo de discutir brevemente suas características limitações para a aplicação em projeto de engenharia.

3.4.1 Ferramenta Parâmetros

A forma mais simples de parametrizar é através da ferramenta *Parameters* que pode ser acessada através do menu *Manage*, onde estão os parâmetros relativos a todas as dimensões utilizadas na construção do componente ou do conjunto criadas automaticamente pelo software. Nesta ferramenta é possível alterar valores e inserir relações e equações cujos resultados são reproduzidos automaticamente no modelo 3D, como é apresentado na Figura 13.

Figura 13 - Parametrização direta do modelo 3D.



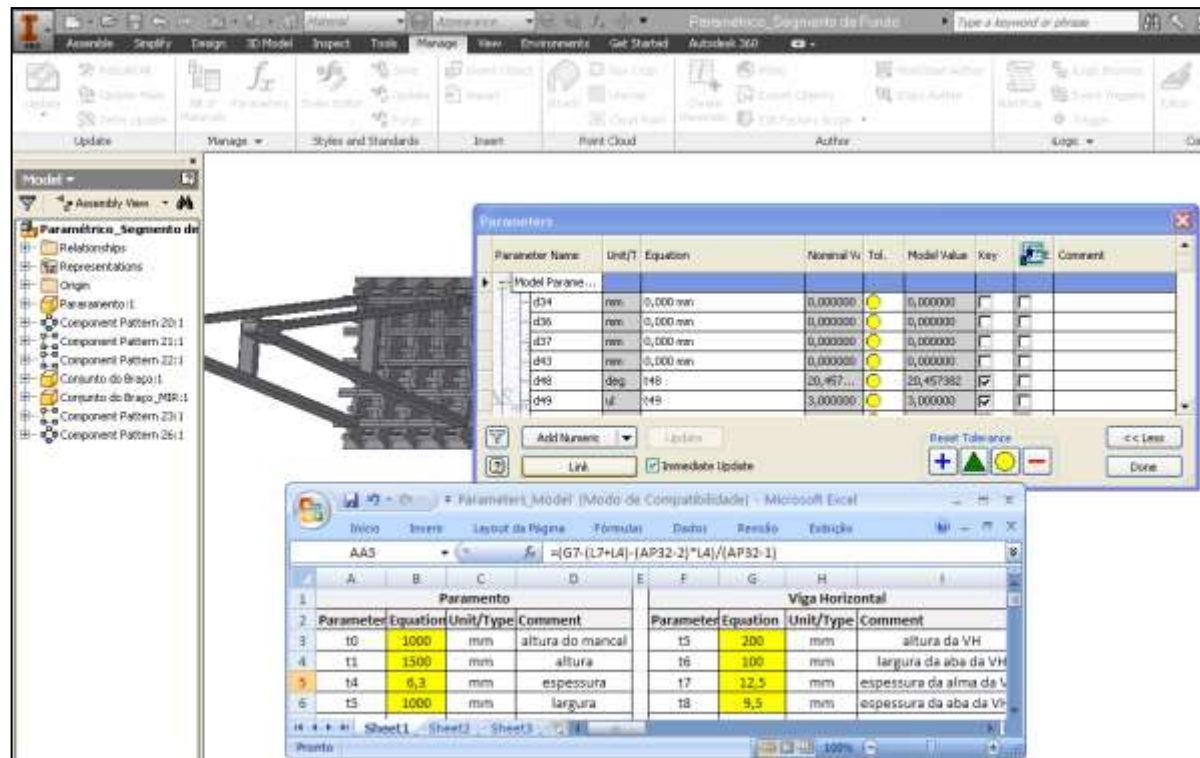
Fonte: Próprio autor.

O uso desta ferramenta é bastante eficiente para modelos com forma simples e com poucos componentes conforme apresentado por HERCOS (2015), porém para modelos com muitos parâmetros e restrições a programação é mais complexa dificultando o desenvolvimento.

3.4.2 Planilhas Eletrônicas

A utilização de planilhas eletrônicas como o software Microsoft Excel para fornecer parâmetros ao modelo é uma possibilidade de parametrização bastante acessível no Autodesk Inventor 2014, devido a domínio comum dos usuários sobre esta ferramenta. Estas planilhas possibilitam a criação de relações complexas com maior facilidade utilizando equações e Tabelas, sendo os resultados ligados aos parâmetros do modelo de tal forma que imediatamente após alterar os dados e salvar a planilha, o modelo reconhece as novas informações e procede com as devidas alterações, conforme mostra a Figura 14.

Figura 14 - Parametrização com planilha eletrônica do modelo 3D.

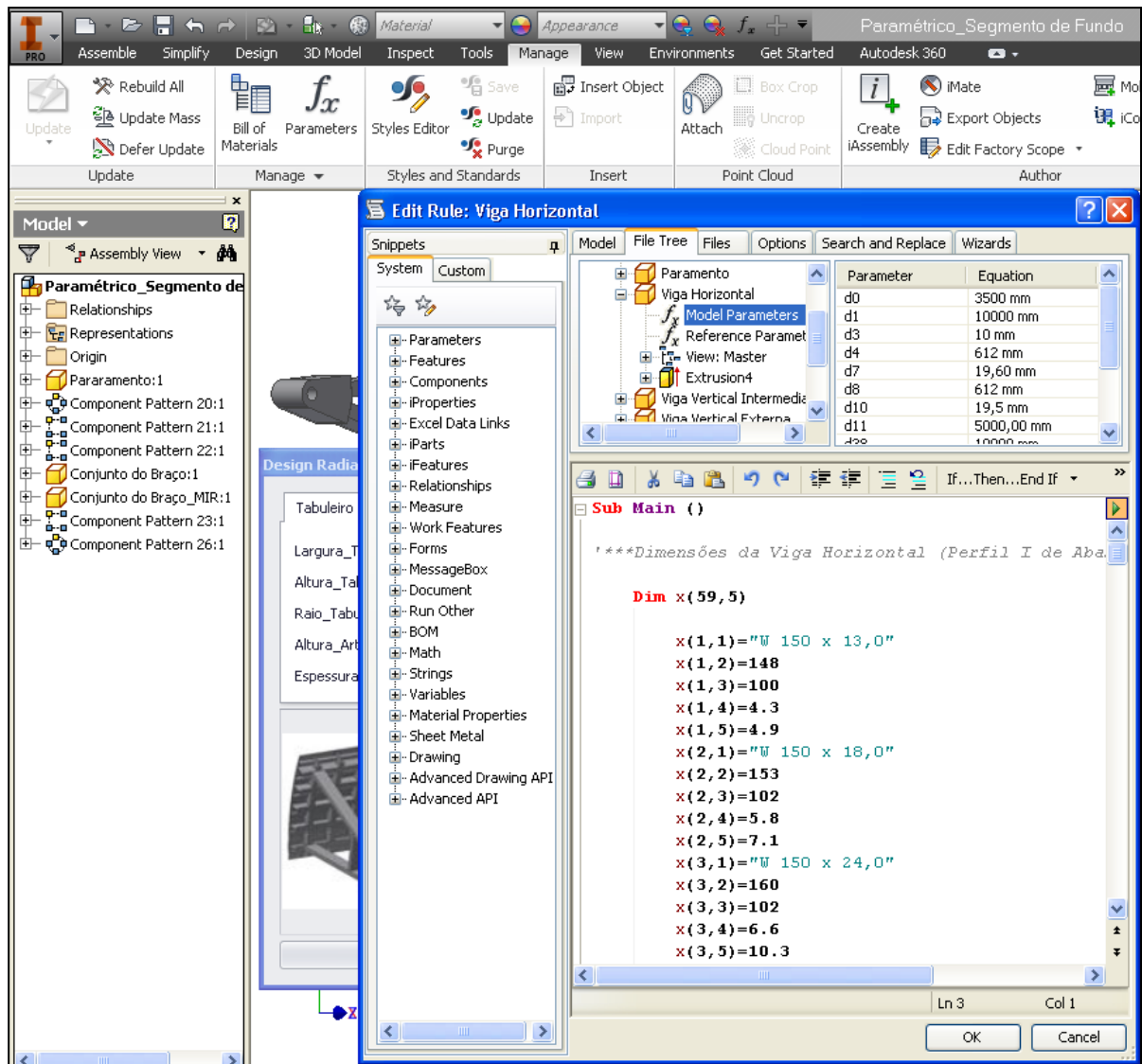


Fonte: Próprio autor.

3.4.2 Ferramenta ilogic

A ferramenta denominada ilogic é uma interface de programação direta em linguagem de programação VB, a qual foi muito difundida em softwares da Microsoft como o Excel. Nesta interface do software é possível acessar todos os parâmetros de qualquer componente ou da montagem, ainda nesta ferramenta existe um menu de acesso rápido com muitas funções prontas, para facilitar o aprendizado e apresentar alternativas, como mostra a Figura 15.

Figura 15 - Parametrização com iLogic do modelo 3D.



Fonte: Próprio autor.

3 METODOLOGIA

A construção de um modelo parametrizado para uma comporta segmento de fundo, utilizando o software Autodesk Inventor 2014, partiu de um modelo genérico com características específicas deste equipamento. Em função da complexidade, este modelo adotou características padronizadas para garantir a execução dentro de limitações de fabricação e comerciais.

Desta forma, diante de inúmeras concepções para este equipamento, foram adotadas a utilização da grande maioria das vigas em perfis laminados, os braços com forma de pórtico em “A” com vigas de perfil tubular retangular, além de folgas para a montagem da vedação e outras folgas necessárias para a fabricação.

Como este trabalho não se restringe somente a criar um modelo paramétrico, a construção do modelo inicial necessita de atenção durante a montagem dos componentes quanto as restrições e formas utilizadas para evitar erros durante as simulações que serão realizadas.

Com a conclusão do modelo foi desenvolvida a parametrização de suas dimensões através da ferramenta illogic, na sequência foram definidos os critérios para o cálculo estrutural, que foi realizado com base em um estudo de caso comparando a massa de um equipamento construído e em operação com a massa do projeto, otimizado com o modelo paramétrico desenvolvido neste trabalho, de iguais dimensões aprovado pelos critérios da norma NBR 8883 (2008). Este processo é apresentado esquematicamente na Figura 16 com as principais atividades.

Figura 16 - Processo de construção e aplicação do modelo parametrizado.



Fonte: Próprio autor.

Contudo, para possibilitar a montagem do modelo para a parametrização, cujo processo é apresentado na Figura 17, foram atribuídas as dimensões similares às do equipamento selecionado para o estudo de caso, porém algumas dimensões que foram atribuídos valores não poderiam ser utilizadas a fim de manter a proporcionalidade e similaridade do modelo com a realidade.

Figura 17 - Processo de desenvolvimento do modelo e parametrização.



Fonte: Próprio autor.

De maneira específica, o modelo da estrutura desta comporta segmento de fundo foi obtido por meio da construção e montagem de vários componentes que podem ser agrupados da seguinte maneira:

- Tabuleiro: formado pelo paramento, vigas horizontais, vigas verticais, reforços horizontais;
- Braço: cubo, terminal e vigas.

Os demais componentes da comporta como as peças fixas e o conjunto de acionamento foram omitidos do modelo, pois o objetivo da aplicação do modelo 3D é o cálculo da estrutura principal e estes componentes, apesar de muito importantes, não estão sujeitos diretamente às pressões hidráulicas atuantes.

3.1 TABULEIRO

O tabuleiro é um conjunto formado pelo paramento, vigas e reforços, como ilustrado na Figura 18, os quais são responsáveis principalmente por garantir resistência ao conjunto que é dimensionado para resistir a máxima pressão possível. Estes componentes foram projetados separadamente para facilitar a construção e a edição do modelo, reduzir a possibilidade de falhas e facilitar o uso do modelo na criação de desenhos de fabricação.

Figura 18 - Paramento de uma comporta radial.



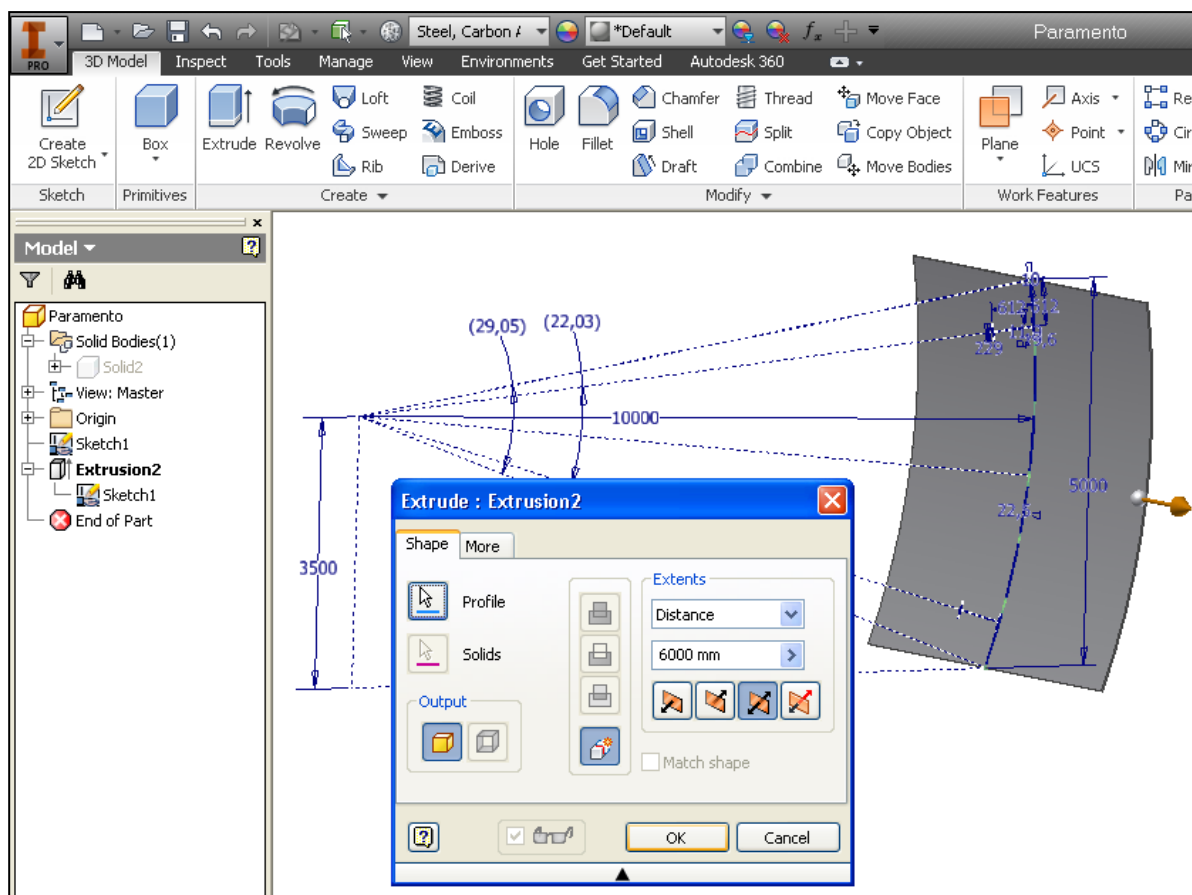
Fonte: Próprio autor.

3.1.1 Paramento

O paramento, que basicamente pode ser definido como a chapa de base do tabuleiro, é projetado para a comporta segmento de fundo a partir das dimensões de largura, altura e raio, que já são conhecidas, além da espessura que pode ser adotada com base em uma analogia ou utilizada conforme o projeto conhecido, com qual será feita análise comparativa.

Outras dimensões também foram incluídas neste esboço, ou *sketch* no software, por que, mesmo não sendo necessárias ao paramento, serão utilizadas em outros componentes e também na montagem, como por exemplo, o ângulo entre as vigas horizontais das extremidades. A Figura 19 apresenta estas dimensões e o projeto do tabuleiro, que foi resultado da construção do esboço.

Figura 19 - Paramento comporta segmento de fundo.



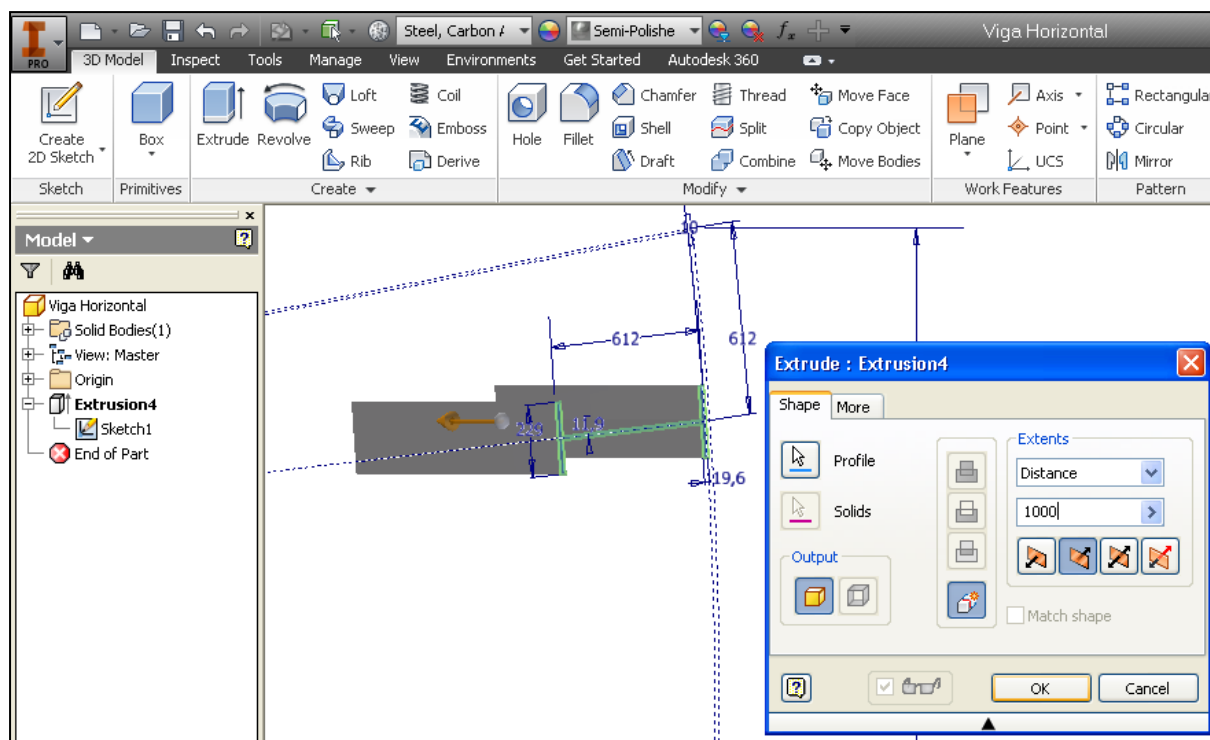
Fonte: Próprio autor.

3.1.1 Viga Horizontal

Neste projeto as vigas horizontais foram adotadas como principais do tabuleiro sendo projetadas de forma contínua, ou seja, sem qualquer emenda soldada. Como consequência desta premissa, as vigas verticais foram segmentadas em posições intermediárias e nas extremidades.

O perfil “I” de abas paralelas, conhecido no mercado como perfil “W” é bastante aplicado em estruturas metálicas como colunas, treliças e caminhos de rolamento de pontes rolantes devido à sua ampla gama de dimensões, a sua elevada resistência e baixo peso linear comparado a outros perfis laminados ou perfis soldados, sendo que estes possuem custo maior em função da manufatura. O perfil escolhido como viga horizontal, conforme ilustra a Figura 20, foi o W 610x125, com dimensões conforme o catálogo online de um dos fabricantes deste tipo de perfil, com comprimento igual à largura do paramento menos 100mm em cada extremidade, ou seja, menos 200 mm para garantir uma folga para a montagem da vedação da comporta.

Figura 20 - Viga horizontal da comporta segmento de fundo.



Fonte: Próprio autor.

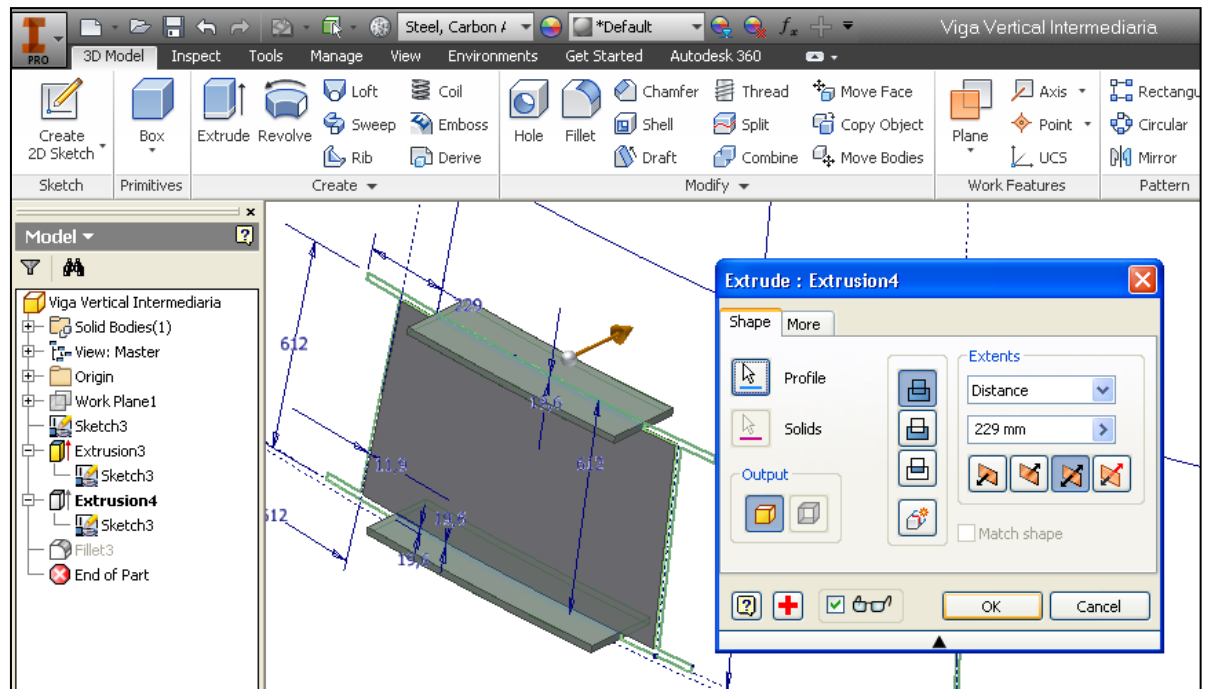
Para reduzir o número de variáveis, mas sem prejudicar a forma da estrutura, no perfil não foram considerados os raios das junções das abas com a alma. Entretanto, após as primeiras simulações realizadas, foi detectado a necessidade de incluir estes raios para aliviar as tensões concentradas nesta região.

3.1.1 Viga Vertical Intermediária

As vigas verticais intermediárias utilizam perfis iguais aos das vigas horizontais, ou seja, também são construídas utilizando perfis tipo W 615x125, que foi inicialmente definido para o modelo. Estas vigas, diferentemente das horizontais, necessitam de uma conformação para adquirir a forma radial, além de recortes nas extremidades para possibilitar a montagem sob o paramento e entre as vigas horizontais.

O projeto das vigas verticais, mostrado na Figura 21, é dependente da viga horizontal e do o raio do paramento, também o espaçamento entre as vigas horizontais é fundamental para definir o comprimento.

Figura 21 - Viga vertical intermediária da comporta segmento de fundo.

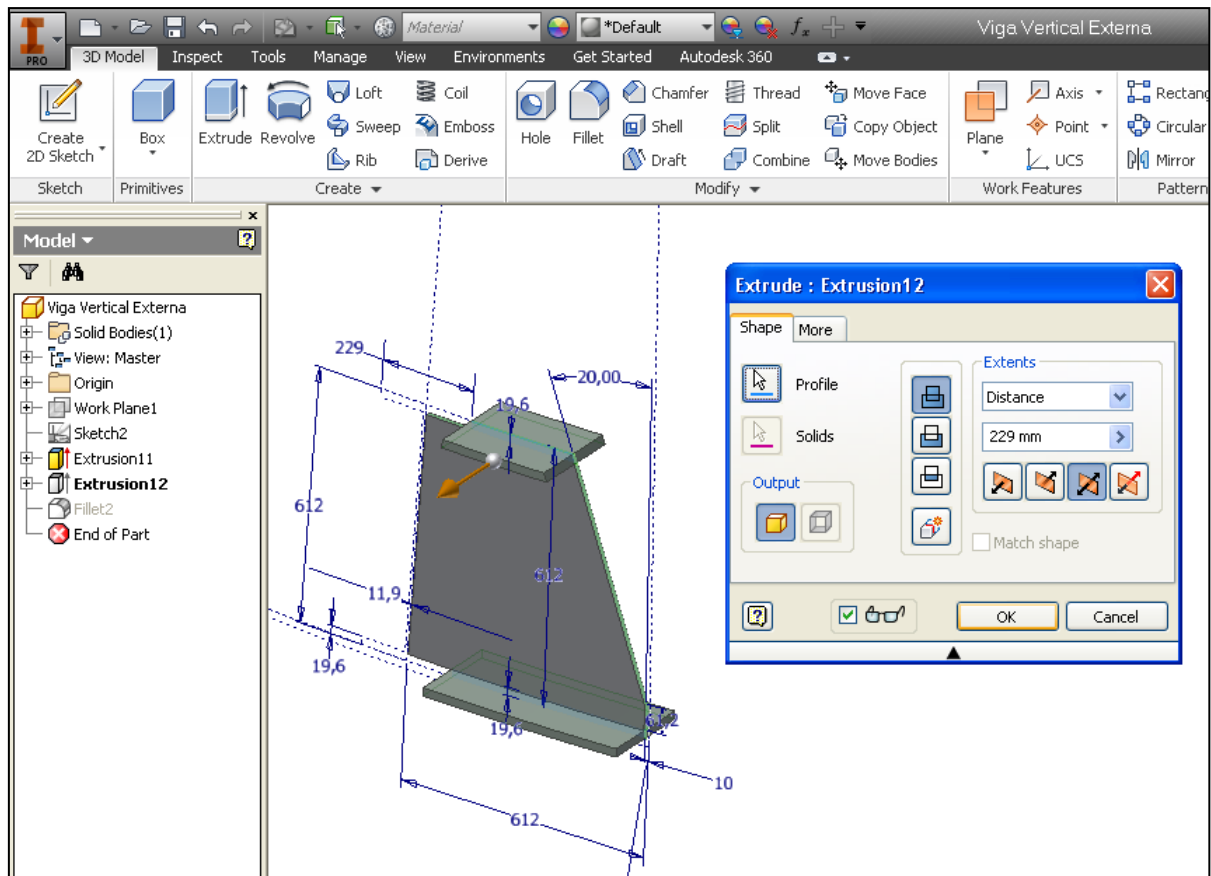


Fonte: Próprio autor.

3.1.1 Viga Vertical Externa

Assim como as vigas verticais intermediárias, as vigas verticais externas possuem o mesmo perfil, mas estão posicionadas nas extremidades inferior e superior do tabuleiro. Neste caso também existe a dependência direta das dimensões e do posicionamento das vigas horizontais e das dimensões do paramento, mas na viga vertical externa, mostrada na Figura 22, foi possível padronizar uma folga de 10 mm com a borda do paramento para a montagem e um ângulo de 20° na alma da viga para evitar a interferência do tabuleiro com as partes fixas.

Figura 22 - Viga vertical externa da comporta segmento de fundo.

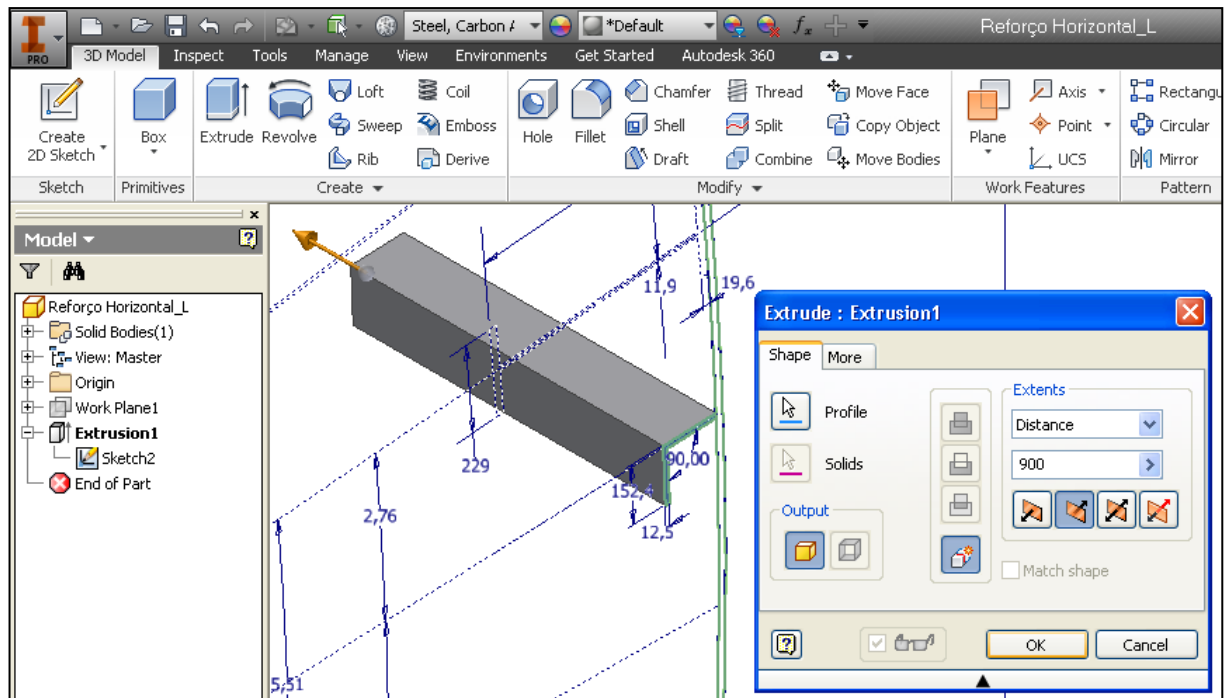


Fonte: Próprio autor.

3.1.1 Reforço Horizontal

A utilização de reforços horizontais é uma alternativa eficiente para agregar resistência ao tabuleiro comparada ao tradicional aumento das espessuras da estrutura ou o aumento da dimensão das vigas principais, de modo a não provocar grandes aumentos de massa e não prejudicar a fabricação, pois estes reforços têm forma simples e dimensão muito menor que as vigas principais da estrutura da comporta. Neste projeto, foram utilizados perfis laminados em forma de cantoneiras de abas iguais, como ilustra a Figura 23, e também barras retangulares (barras chatas), as quais são facilmente encontradas no mercado.

Figura 23 - Reforço horizontal da comporta segmento de fundo.



Fonte: Próprio autor.

3.2 CONJUNTO DO BRAÇO

O conjunto do braço de uma comporta radial, indicado na Figura 24, é responsável pela articulação e sustentação do tabuleiro, por isso possui várias formas e pode ser construído com vários tipos de perfis. Neste projeto, foi seguida uma linha clássica com o intuito de aproveitar as analogias de equipamentos já fabricados, desta forma foi definida a utilização de braços com pórtico em forma de “A”, o qual juntamente com os terminais e mancais formam o conjunto do braço.

Para projetar este conjunto foi pré-definido que os perfis do pórtico em forma de “A” do braço seriam tubulares e retangulares com comprimento igual a diferença do raio da comporta com o comprimento do terminal e a altura da viga horizontal. Além disso, foi definido que a altura deste perfil seria igual à largura da aba do perfil da viga horizontal menos 20 mm, sendo 10 mm de folga em cada extremidade para a solda de montagem, e que sua largura e a espessura seriam variáveis de acordo com as necessidades do projeto.

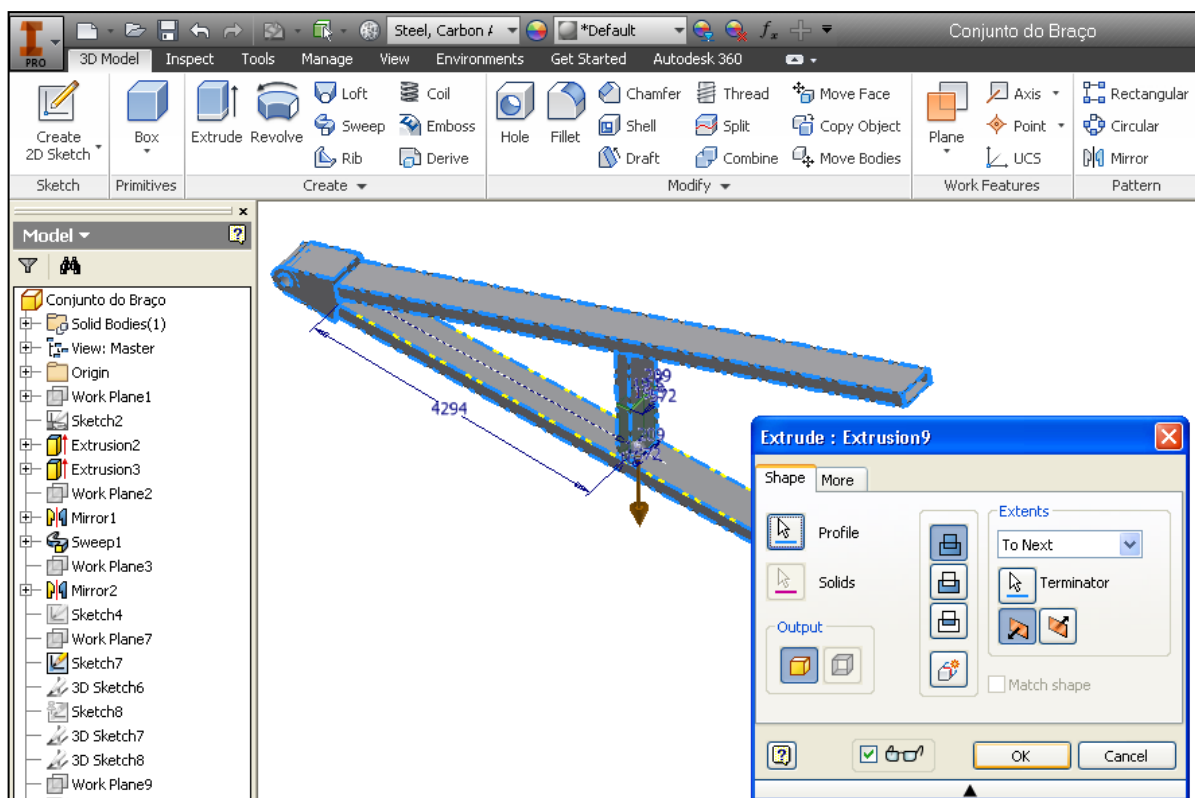
Figura 24 - Conjunto do braço de uma comporta radial.



Fonte: Próprio autor.

Para a construção do mancal foram definidos que o diâmetro do mancal seria um parâmetro independente e seu comprimento igual à largura do braço mais 20 mm de folga para a montagem. Uma vez definidas as dimensões do mancal, para o terminal foram determinados que o comprimento seria igual à duas vezes o diâmetro do mancal, sua espessura igual à espessura das vigas do braço e seu ângulo de construção igual ao ângulo entre as vigas principais do braço, sendo o modelo apresentado na Figura 25.

Figura 25 - Viga horizontal externa da comporta segmento de fundo.



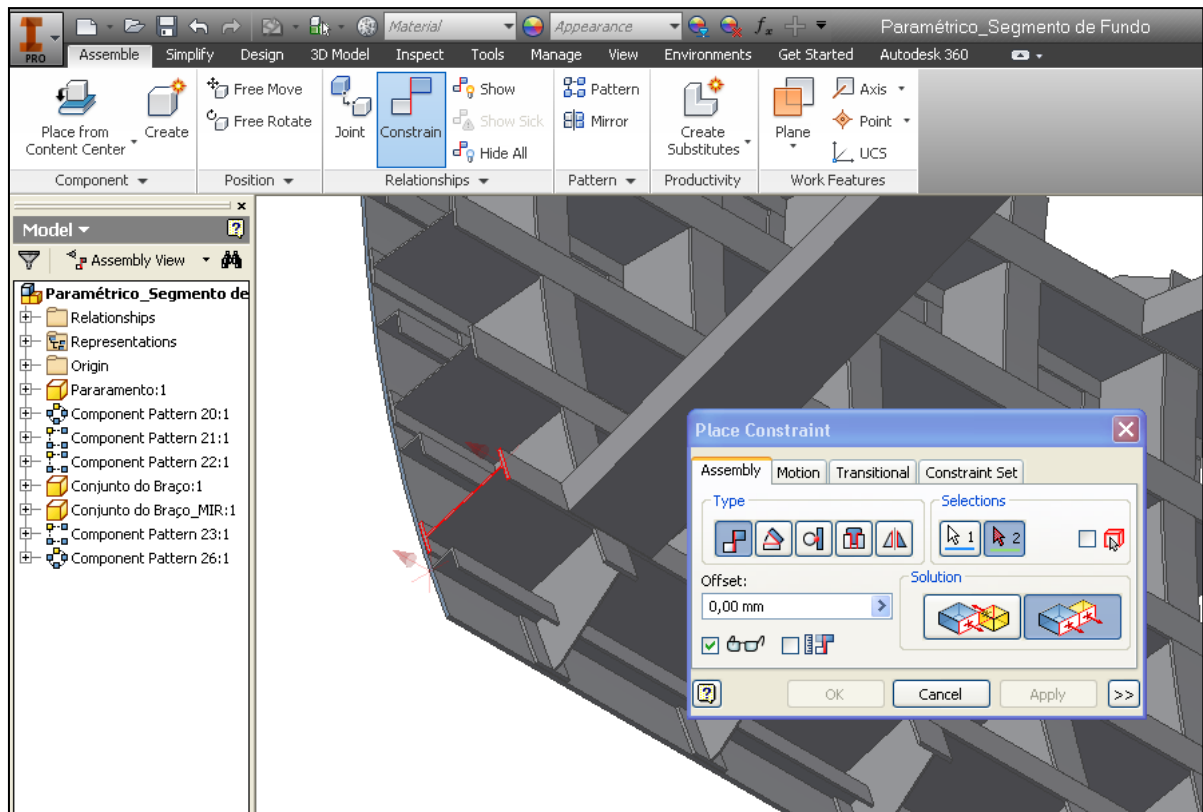
Fonte: Próprio autor.

3.3 MODELO DA COMPORTA SEGMENTO DE FUNDO

O modelo da comporta segmento de fundo foi construído a partir dos componentes projetados individualmente, que foram inseridos ao ambiente de montagem do software Autodesk Inventor 2014 para um conjunto proporcional e similar a um equipamento real. Estas partes que compõe o modelo foram posicionadas e unidas umas às outras por meio de restrições, como ilustrado na Figura 26, garantindo a fixação necessária para consolidar o conjunto e tornar possível realizar as simulações posteriormente.

A elaboração de um modelo para a parametrização é realizada sem grandes preocupações com as dimensões e quantidades de elementos, pois a intenção é que estes parâmetros sejam configurados para serem alterados diretamente ou através de regras relacionados a outros parâmetros. Todavia, é muito importante que as restrições sejam aplicadas em todos os pontos necessários de maneira correta para evitar falhas na parametrização causada pela existência de restrições que impossibilitem a alteração do conjunto diante da alteração dos parâmetros.

Figura 26 - Montagem do modelo da comporta segmento de fundo.



Fonte: Próprio autor.

Neste modelo foram utilizadas cinco vigas horizontais e também cinco vigas verticais, juntamente com reforços horizontais intermediários e nas extremidades do tipo cantoneira. Contudo, esta configuração é somente uma referência e toda a configuração pode ser alterada uma vez que o modelo seja parametrizado.

3.4 PARAMETRIZAÇÃO COM ILOGIC

Para parametrizar toda a comporta foram criadas algumas regras para gerenciar cada tipo de componente, uma regra para gerenciar as demais regras e outra regra para gerenciar o formulário de interface que permite a edição do modelo que fica visível automaticamente com a abertura do arquivo do paramétrico. A Figura 27 mostra a janela do ilogic onde é possível visualizar as regras construídas para o modelo, que estão visíveis neste caso, os formulários referentes a este modelo, formulários globais de todos os modelos abertos e também as regras externas.

Figura 27 - Regras de parametrização do modelo 3D.

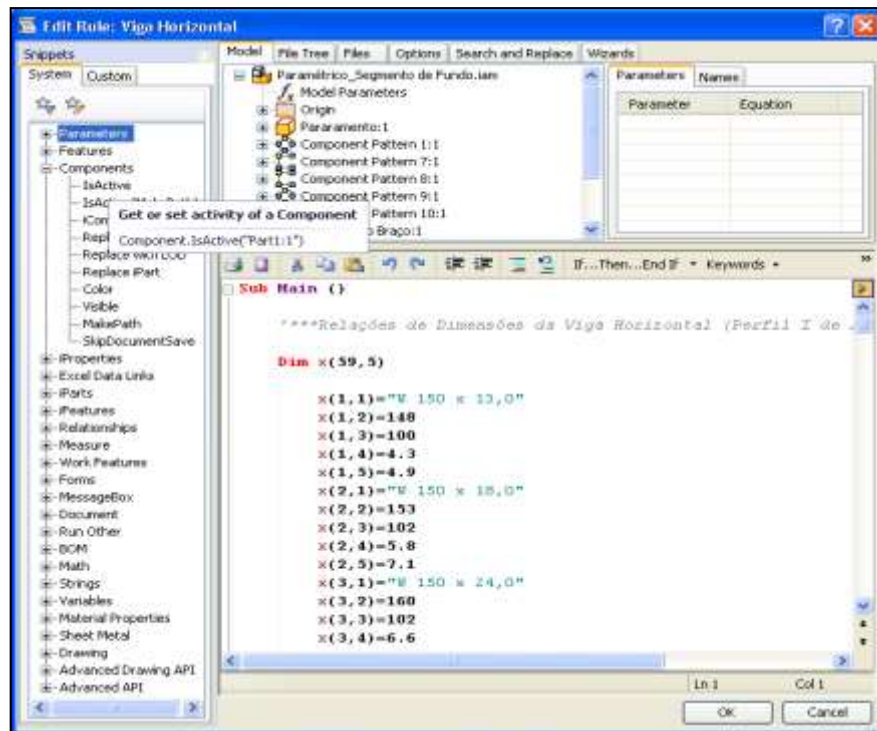


Fonte: Próprio autor.

A forma da comporta é definida pelo paramento, que é a chapa base do tabuleiro, o qual foi definido pelas dimensões de largura, altura, raio, altura da articulação (centro de giro) e espessura. Estas variáveis definem são inseridas pelo usuário e são responsáveis, juntamente com dimensões padronizadas para este tipo de equipamento, por gerar outras dimensões angulares e lineares que são essenciais para o dimensionamento e posicionamento de outros elementos do conjunto.

Para as vigas horizontais, foi criada uma regra incluindo uma tabela com todas as dimensões que são padronizadas para o perfil laminado em aço carbono tipo W selecionado para compor este componente, como mostra a Figura 28, sendo esta uma estratégia para reduzir a quantidade de variáveis que deveriam ser informadas pelo usuário do paramétrico. Além desta tabela, esta regra inclui equações para distribuir igualmente as vigas a partir de dados de outros componentes e da quantidade de vigas que é um dado de entrada.

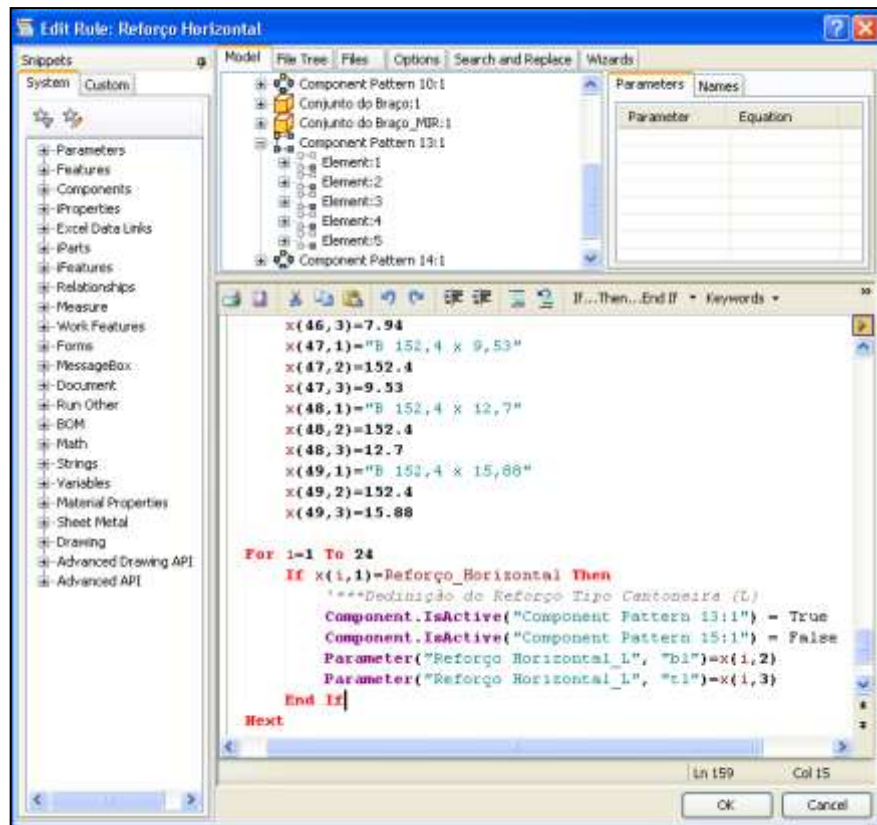
Figura 28 - Regra de parametrização das vigas horizontais.



Fonte: Próprio autor.

Outra regra do modelo paramétrico gerencia as características das vigas verticais, as quais utilizam o mesmo perfil das vigas horizontais, de tal forma que a única variável selecionada pelo usuário é a quantidade. Para a regra dos reforços horizontais, mostrada na Figura 29, também foi incluída uma tabela com as dimensões padronizadas dos perfis, neste caso do tipo cantoneira e barra chata e adotado que entre as vigas horizontais será inserido somente um reforço, cabendo ao usuário selecionar apenas o tipo e a dimensão do reforço.

Figura 29 - Regra de parametrização do reforço horizontal.

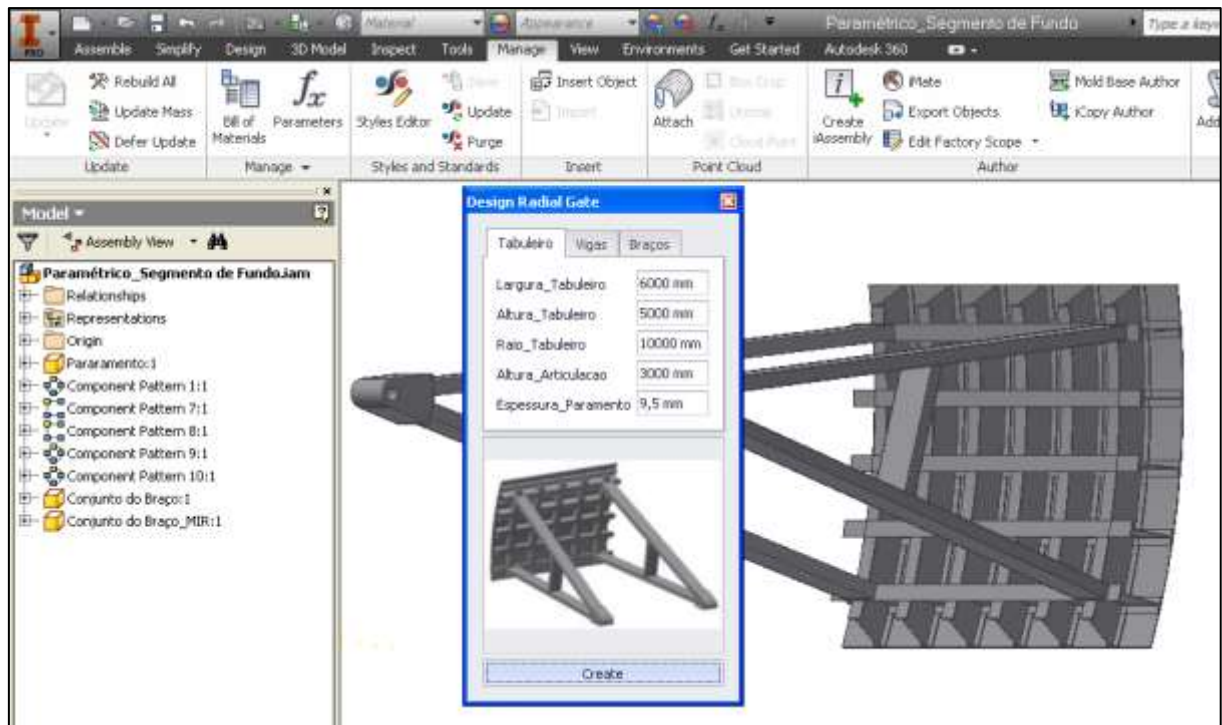


Fonte: Próprio autor.

Além destas, foi criado uma regra para parametrizar os conjuntos de braços, para o qual são necessários os diâmetros externo e interno do mancal, a largura e espessura das vigas do braço, que são de um mesmo perfil e compõe o pórtico com a forma clássica de “A”. As demais dimensões dos braços são dependentes de outros componentes ou foram padronizadas com valores usuais de fabricação.

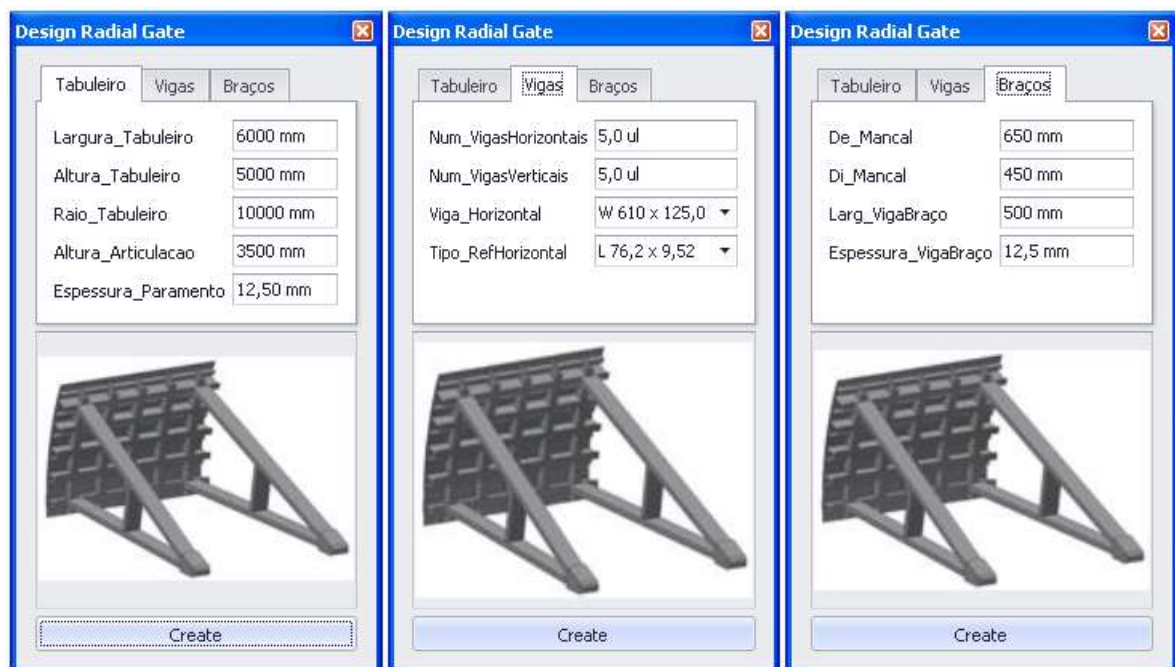
Diante da necessidade de que o usuário insira tantas informações, como propósito de desenvolver uma ferramenta automática e simples, foi criado um formulário de interface, para o qual também foi criada uma regra que o inicia instantaneamente junto com a modelo 3D parametrizado de forma automática. Nesta tela de interface que foi desenvolvida exclusivamente para este projeto e é exibida na Figura 30, foram criados três grupos de dados de entrada divididos em abas, as quais são apresentadas na Figura 31, onde o usuário pode inserir todos os dados necessários para criar o modelo 3D de forma organizada.

Figura 30 - Tela inicial do modelo parametrizado da comporta.



Fonte: Próprio autor.

Figura 31 - Dados de entrada do modelo parametrizado.



Fonte: Próprio autor.

Contudo, com a parametrização do modelo 3D da comporta segmento de fundo, que foi inicialmente construído com dimensões proporcionais à um caso real, foi possível criar uma

ferramenta exclusiva capaz de criar inúmeros modelos deste equipamento variando os dados de entrada pré-definidos. Estes modelos são úteis para estudos e simulações estruturais utilizando softwares de análise estrutural, dos quais foi utilizado neste trabalho o Autodesk Inventor 2014. O uso de um mesmo software para gerar o modelo 3D e para analisar a estrutura é intencional e com o objetivo de reduzir o número de problemas técnicos e agilizar o processo de otimização, que é manual, porém com o um grau de dificuldade muito reduzido em função do uso do modelo parametrizado.

3.5 CÁLCULO DA ESTRUTURA

Com base em uma pesquisa bibliográfica de comportas segmento de fundo fornecidas para importantes projetos, sendo alguns exemplos apresentado na Tabela 1, foi selecionado uma comporta com dimensões e massas conhecidas para aplicar o paramétrico e criar um modelo para análise estrutural com base nas recomendações da norma NBR 8883 (2008), e deste modo validar o modelo. Deste processo foi possível obter a massa da comporta de modo a comparar com a massa do equipamento construído e em operação para concluir sobre a eficiência do processo proposto para o projeto deste tipo de equipamento.

Tabela 1 - Referências de comportas segmento de fundo.

Obra / País	Vão (L)	Altura (H)	Raio (R)	Pressão Hidráulica (Hs)
PH Agostura (Costa Rica)	4,00 m	2,00 m	3,75 m	4,00 m.c.a
	4,00 m	4,53 m	7,50 m	27,5 m.c.a
PCH Rios das Pedras (Brasil)	8,80 m	6,86 m	10,00 m	14,46 m.c.a
PH Palomino (República Dominicana)	6,00 m	6,85 m	12,00 m	38,94 m.c.a
PH Baba (Equador)	2,80 m	7,00 m	10,00 m	6,70 m.c.a
UHE Irapé (Brasil)	7,00 m	9,40 m	15,00 m	61,65 m.c.a

Legenda: PH – Pequena Hidroelétrica; PCH – Pequenas Central Hidrelétrica; UHE – Usina Hidroelétrica ou Usina Hidrelétrica

A comporta segmento de fundo utilizada neste estudo possui largura ou vão de 6,00 m, altura de 5,00 m, raio de 10,00 m e coluna d'água máxima de 45,30 m.c.a, a qual está instalada em uma usina hidrelétrica na América Latina. A estrutura, tabuleiro e braços, desta comporta tem massa líquida de 23.853 kg, segundo os projetos finais liberados para a fabricação. Esta massa foi uma referência importante no objetivo de reduzir a massa da estrutura na fase de

otimização, mas cabe ressaltar que se sobressaiu sempre o critério do limite de tensão estipulado pela norma.

Para a estrutura da comporta segmento de fundo foram utilizados como materiais o aço ASTM A36 para a construção do paramento, braços e reforços horizontais e o aço ASTM A572 Grau 50 nas vigas horizontais e verticais, de modo que as tensões de escoamento e ruptura máximas destes aços ao carbono são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Resistência estática do aço ASTM A36 e ASTM A572 Grau 50.

Material	Tensão de escoamento σ_{esc} [MPa]	Tensão de ruptura σ_{rup} [MPa]
ASTM A36	250	400
ASTM A572 Grau 50	345	450

Com base nos coeficientes determinados pela norma NBR 8883 (2008), indicados pela Tabela 3, é possível calcular as tensões admissíveis de cada um destes materiais com base na tensão de escoamento. No entanto, segundo esta norma existem casos de carga que visam ajustar as tensões admissíveis, as quais são apresentadas na Tabela 4, de acordo com as condições de operação da comporta.

Tabela 3 - Coeficientes de correção para tensão admissível conforme NBR 8883 (2008).

Tensão	Caso de carga		
	Normal	Ocasional	Excepcional
Tensão virtual de comparação	0,67	0,75	0,84
Tensão de comparação no paramento	0,81	0,81	0,92

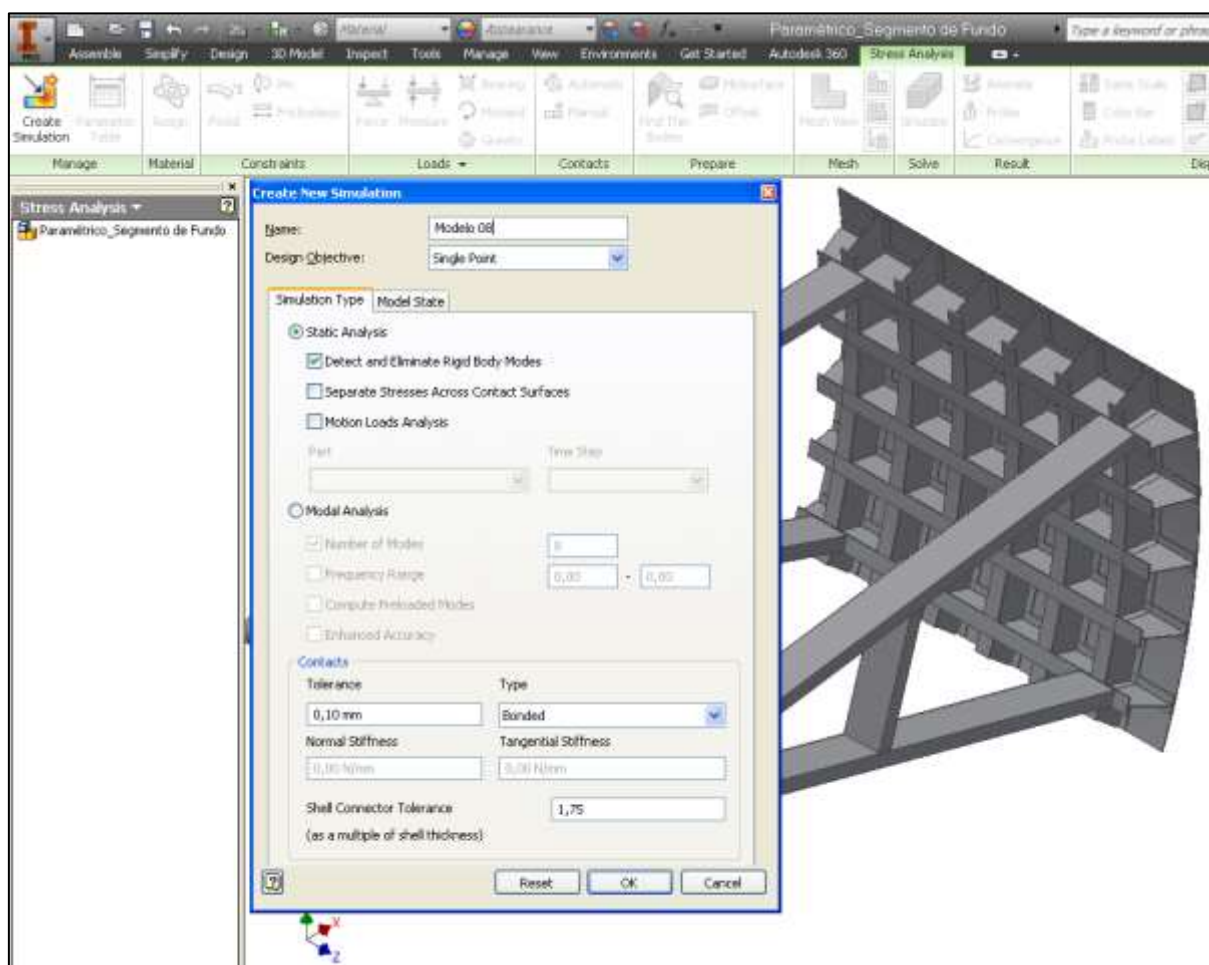
Tabela 4 - Tensão admissível em relação ao escoamento conforme NBR 8883 (2008).

Material	Tensão	Caso de carga		
		Normal	Ocasional	Excepcional
ASTM A36	Tensão virtual de comparação	167,50 MPa	187,50 MPa	210,00 MPa
ASTM A36	Tensão de comparação no paramento	202,50 MPa	202,50 MPa	230,00 MPa
ASTM A572 Gr.50	Tensão virtual de comparação	231,15 MPa	258,75 MPa	289,80 MPa
ASTM A572 Gr.50	Tensão de comparação no paramento	279,45 MPa	279,45 MPa	317,40 MPa

Ciente dos limites das tensões admissíveis para a estrutura desta comporta segmento de fundo, através do modelo 3D elaborado por meio da ferramenta paramétrica desenvolvida neste

trabalho, com as dimensões do caso selecionado para estudo, foi possível analisar as tensões e deformações da estrutura através da ferramenta de análise de elementos finitos do Autodesk Inventor 2014. O tipo de simulação selecionada para este modelo foi a estática, como ilustrado na Figura 32, a qual possibilita analisar o caso crítico desta estrutura que ocorre quando a comporta está parada na posição fechada vedando o fluxo com a pressão máxima.

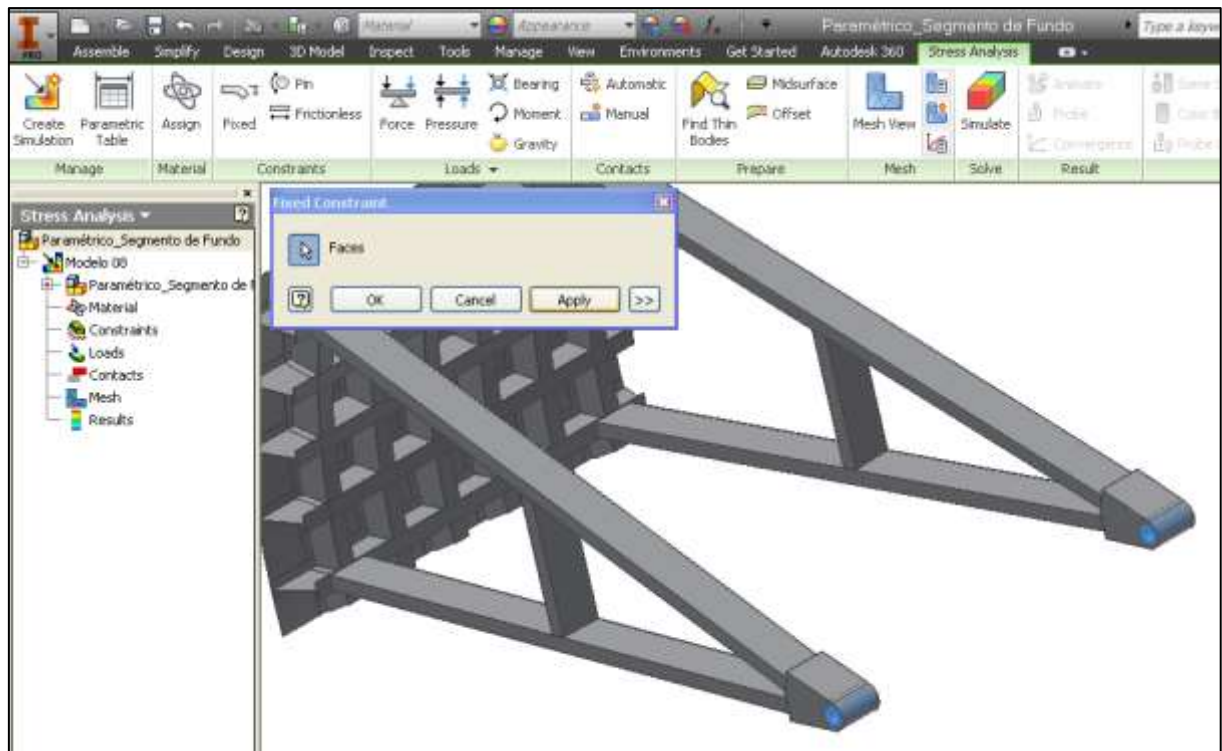
Figura 32 - Seleção do tipo de simulação para o modelo 3D.



Fonte: Próprio autor.

Esta ferramenta necessita para preparar o modelo para a simulação que o usuário selecione o material, neste caso desnecessário visto que o modelo já foi criado com os materiais pré-selecionados, insira as restrições, consideradas neste caso somente como os mancais fixos como mostrado na Figura 33, insira o carregamento, neste caso de 45,3 m.c.a, ou aproximadamente 0,453 MPa, como apresentado na Figura 34, e insira a malha de elementos finitos, a qual não foi modificado do padrão apresentado pelo software, que é destacado na Figura 29.

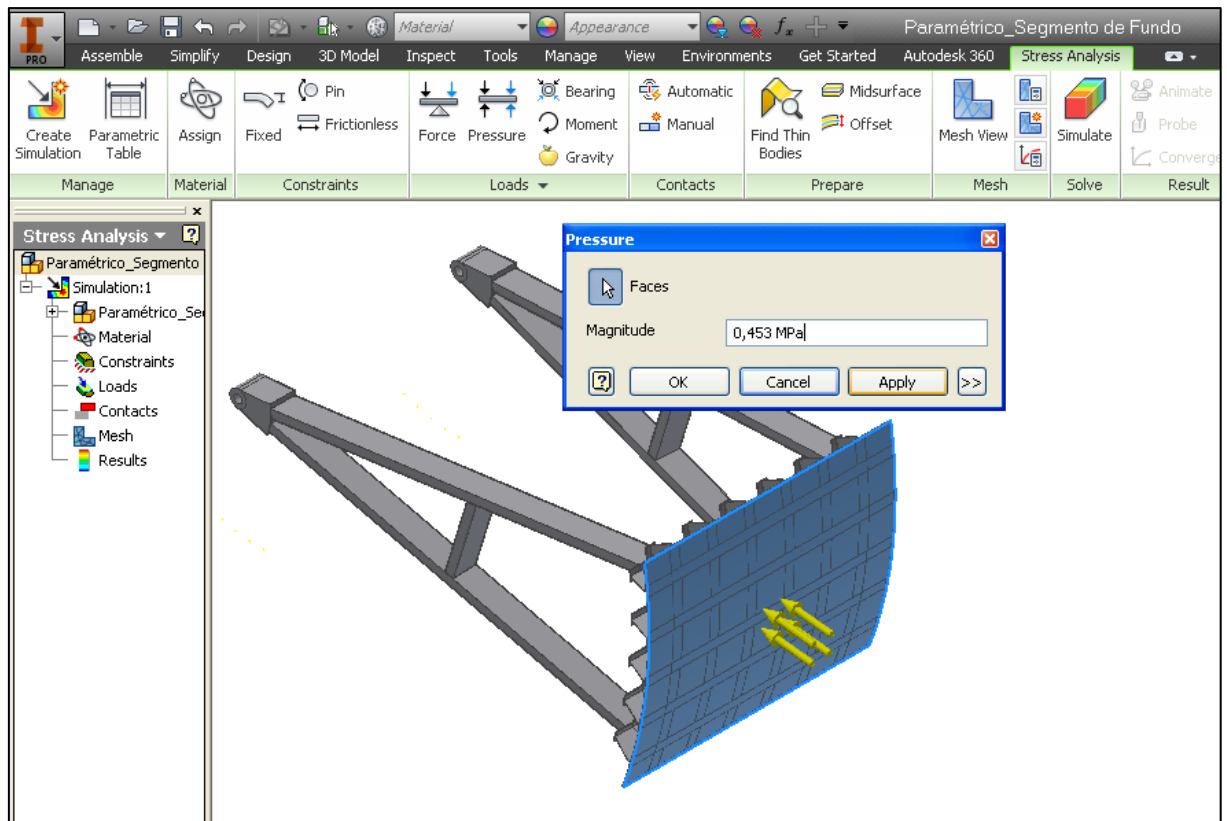
Figura 33 - Restrições para a simulação do modelo 3D.



Fonte: Próprio autor.

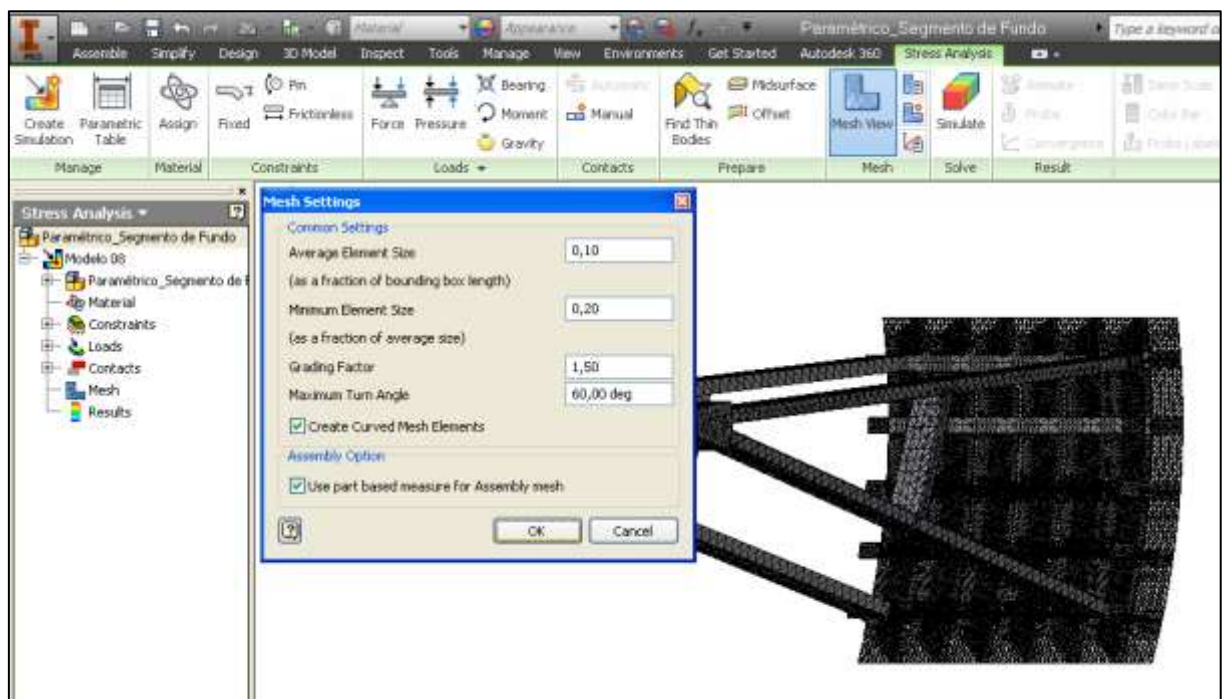
O processo de análise estrutural neste trabalho se limitou ao uso da ferramenta de simulação disponível no software Autodesk Inventor 2014, sem a intenção de concluir sobre a configuração da malha de elementos finitos, porém alguns testes foram executados variando a dimensão dos elementos, o que varia consequente o número de nós, para testar a variação dos resultados e ocorreram alguns erros devido provavelmente pela deficiência do computador utilizado neste trabalho. Da mesma forma nenhum refinamento pontual da malha foi realizado, pois o projeto é relativo a uma estrutura robusta que a princípio dispensa, em função do histórico industrial, qualquer preocupação pontual com alguma parte em especial.

Figura 34 - Carregamento do modelo 3D.



Fonte: Próprio autor.

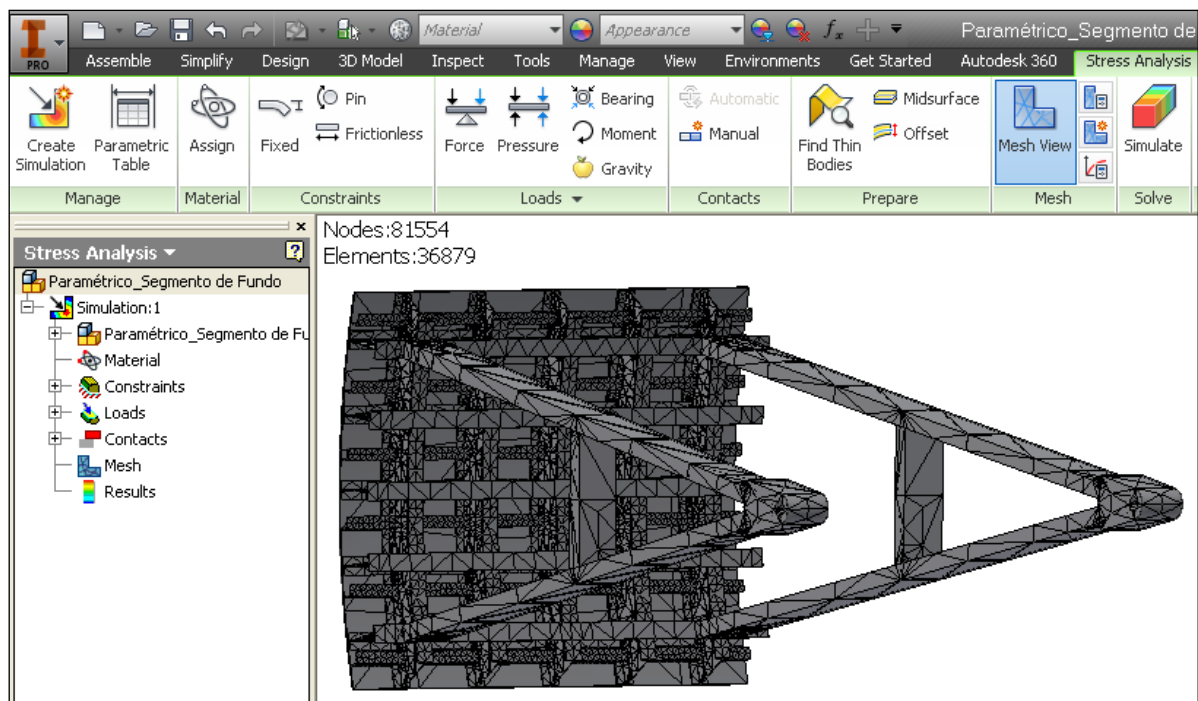
Figura 35 - Propriedades da malha de elementos finitos no modelo 3D.



Fonte: Próprio autor.

A partir de um modelo 3D é possível realizar simulações mecânicas de forma dinâmica e estática, sendo este o modo selecionado para simular a comporta segmento de fundo em sua condição crítica, ou seja, na posição fechada, onde o carregamento sobre a estrutura é igual a toda a pressão hidráulica de coluna d'água do reservatório. Este cálculo poderia ser realizado em outros softwares, mas com a possibilidade e a oportunidade de tornar a ferramenta ainda mais completa também foi utilizado o Autodesk Inventor 2014 neste processo, de tal maneira que a Figura 36 mostra a interface de simulação deste software em um dos modelos 3D da estrutura durante a fase de testes realizados na malha de elementos finitos.

Figura 36 - Malha de elementos finitos no modelo para simulação.



Fonte: Próprio autor.

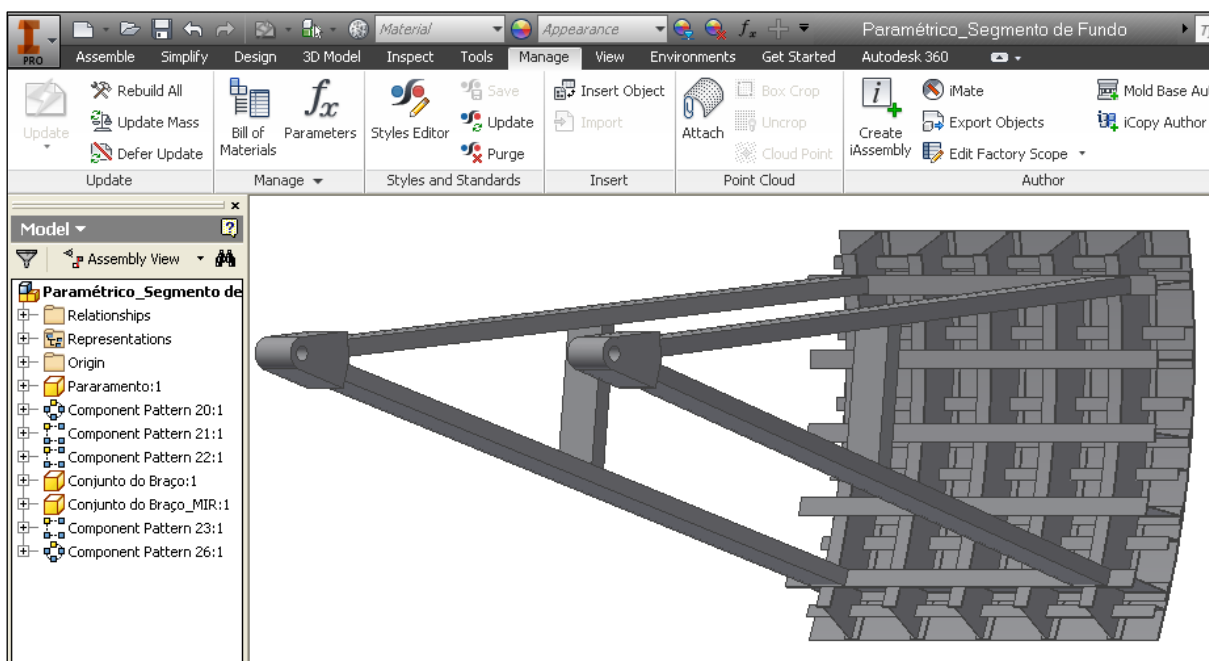
Contudo, após inseridas estas condições para a simulação, o modelo 3D pode ser submetido as simulações que têm tempos de processamento variáveis em função da capacidade de processamento do computador e da complexidade do modelo e da configuração da malha. Referente a este último caso cabe ressaltar que o tipo de configuração utilizada não determina o tamanho do elemento finitos e por consequência a quantidade de nós, sendo esta definição realizada de forma automática pelo software de acordo com o modelo, ou seja, dois objetos similares com dimensões diferentes terão quantidade de elementos e nós diferentes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 MODELO PARAMÉTRICO

Utilizando o modelo 3D parametrizado desenvolvido através do illogic no software Autodesk Inventor 2014 para comportas segmento de fundo, foi criado, com base em caso real, um modelo com as dimensões de largura (vão) de 6,00 m, altura de 5,00 m e raio de 10,00 m, com base em caso real para avaliarmos a ferramenta e também a estrutura já construída. Este modelo, apresentado na Figura 37, possibilita os estudos de interferência e integração com os demais componentes da comporta e da estrutura civil do local de instalação deste equipamento, além de viabilizar o cálculo estrutural.

Figura 37 - Modelo 3D da comporta segmento de fundo.



Fonte: Próprio autor.

4.2 CÁLCULO ESTRUTURAL EM ELEMENTOS FINITOS

Tomando como referência a massa de 23.853 kg da estrutura de uma comporta segmento de fundo que já foi projetada e construída para fundamentar este estudo, foram realizadas uma série de simulações otimizando manualmente as características da estrutura com o objetivo de reduzir sua massa, por meio de modificações nas espessuras, dimensões e quantidades das vigas e reforços, além da espessura do paramento. Para representar este processo onde o modelo

sofreu várias alterações e teve sua tensão máxima e massa medidas, alguns dos registros são apresentados na Tabela 5, dentre os quais está modelo 8 que foi selecionado como o ideal para esta aplicação e pode ser comparado como caso real já apresentado.

Tabela 5 -Resultados do processo de otimização da estrutura da comporta.

Modelo	Modificações no modelo original	Tensão Máx. (MPa)	Deslocamento (mm)	Massa (kg)
1	Modelo base (similar ao projeto construído).	110,3	4,001	24.731
2	Redução da espessura do paramento.	154,1	5,203	21.502
3	Redução do número de vigas horizontais.	282,8	11,644	21.983
4	Redução do número de vigas verticais.	196,7	7,112	22.659
5	Alteração do tipo de reforço horizontal.	117,5	4,221	23.890
6	Redução da espessura do paramento e aumento das dimensões dos reforços horizontais.	121,7	4,852	22.046
7	Redução das espessuras do paramento, das vigas horizontais e verticais e aumento das dimensões dos reforços horizontais.	144,3	5,091	19.786
8	<i>Redução das espessuras do paramento, das vigas horizontais, das vigas verticais e dos braços e aumento das dimensões dos reforços horizontais.</i>	186,1	6,328	18.893

A seleção do modelo 8 se deu por que o valor da tensão máxima obtida, 186,1 MPa, é muito próximo ao menor dentre os limites admissíveis de 187,5 MPa, sendo necessário um tempo significativamente grande para buscar otimizar ainda mais esta estrutura. Além disso, como os componentes, perfis laminados e chapas de aço carbono, desta comporta seguem padrões dimensionais provavelmente em alguns casos a redução das dimensões podem ser excessivas aumentando a tensão acima do admissível, como ocorreu em alguns dos modelos simulados.

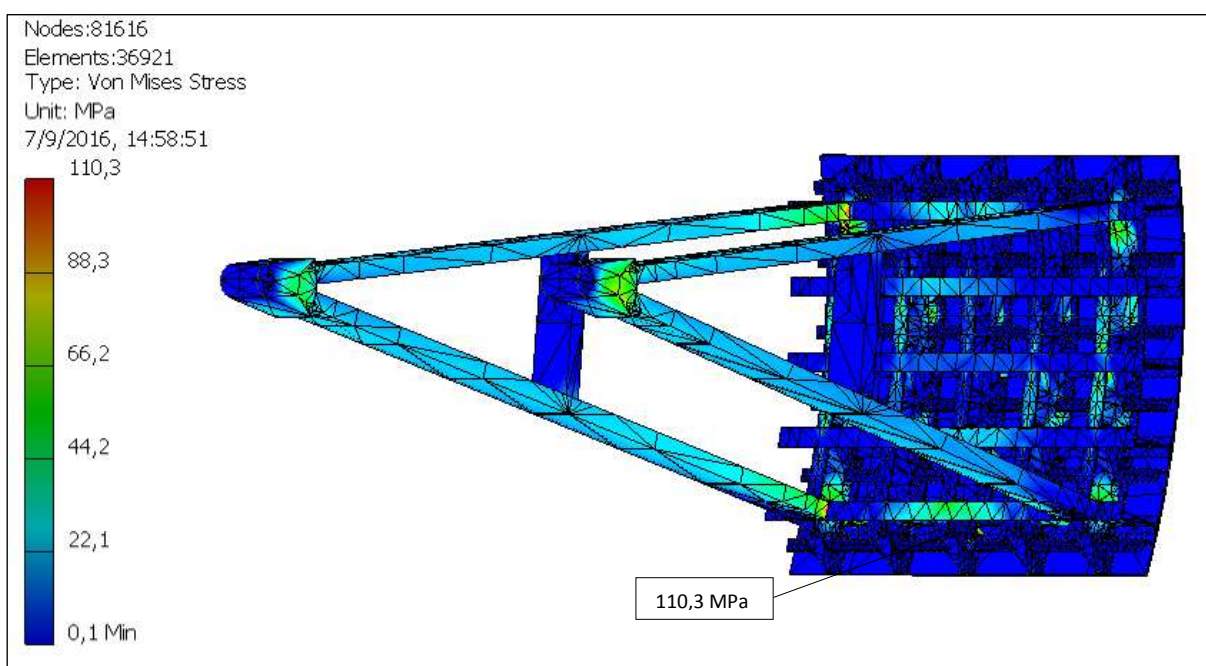
Além da tensão, o deslocamento da estrutura também é um fator crítico que necessita de análise e por este motivo foi incluído neste projeto como um critério para a avaliação técnica dos modelos, pois a norma NBR 8883 (2008) não define um limite admissível ou qualquer outro tipo de relação exata para este caso. Entretanto, a norma orienta que a deformação da estrutura

não comprometa a estanqueidade e durabilidade das vedações, a movimentação e o apoio da comporta, mas diante da falta de um critério para quantizar o limite da deformação admissível em projetos, na indústria é utilizado o critério de 1mm de deslocamento para uma viga de 750mm, ou simplesmente 1/750, o qual é superior aos 6,328 mm em uma viga de 6000 mm, ou aproximadamente 1/948, do modelo 8 e dos demais modelos com exceção do modelo 4.

4.2.1. Valores de Tensão de Von Mises

Para analisar a estrutura dos modelos desenvolvidos durante o processo de otimização da estrutura da comporta segmento de fundo, foi realizada a análise estrutural em elementos finitos utilizando o software Autodesk Inventor 2014, para obter e analisar os valores de tensão de Von Mises e deslocamento. Para ilustrar graficamente os resultados apresentados na Tabela 5, foram selecionados três dos modelos desenvolvidos no processo de otimização, sendo estes o 1, 6 e 8, cujos valores de tensão são apresentados respectivamente nas Figuras 38, 39 e 40.

Figura 38 - Tensões de Von Mises no modelo 1 da comporta segmento de fundo.

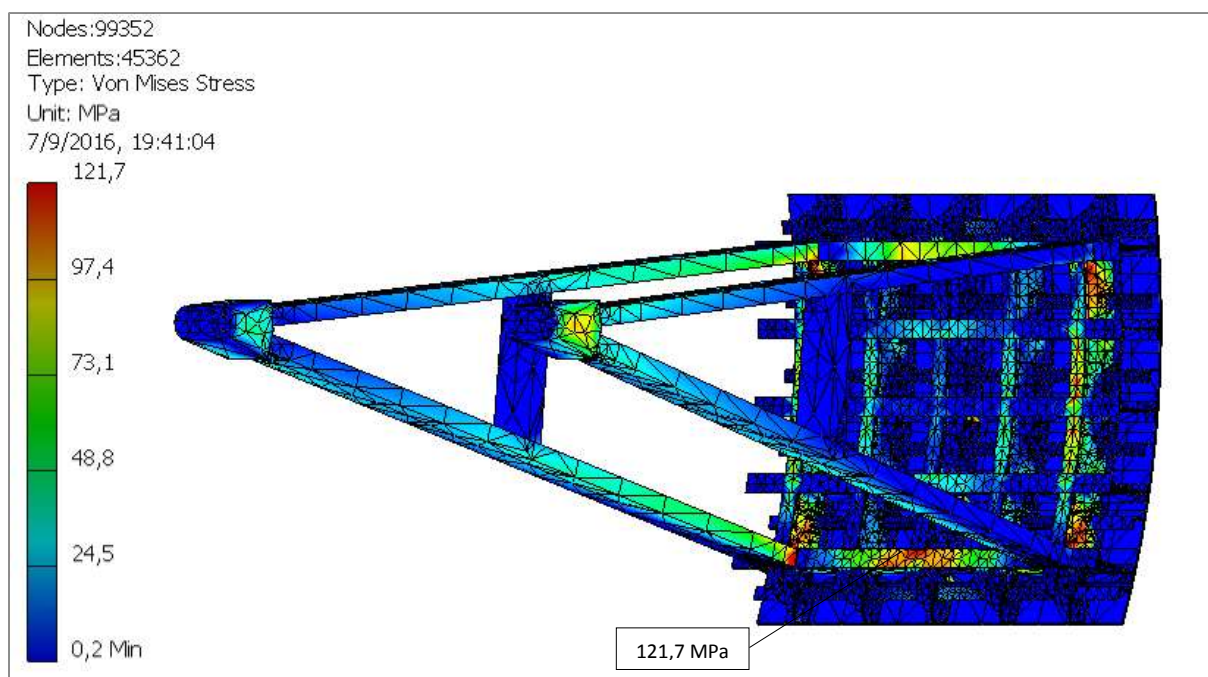


Fonte: Próprio autor.

O modelo 1, que foi projetado com base no projeto da estrutura da comporta que foi utilizada como referência para este estudo e já foi construída, possui a tensão máxima muito inferior a tensão admissível o que sugere um projeto conservador e inspira a busca de ações

para otimizar o projeto e reduzir sua massa. Da distribuição de tensões, se observa que o ponto de máxima tensão desta estrutura se localiza na viga horizontal inferior, a qual forma o pórtico “Pi” (II) inferior com as vigas inferiores dos braços, sendo este um comportamento normal e esperado para a estrutura, entretanto neste modelo não estão visíveis grandes regiões com concentração de tensões elevadas, acima de 80 MPa, para este caso, o que confirma a tese de que a estrutura está superdimensionada.

Figura 39 - Tensões de Von Mises no modelo 6 da comporta segmento de fundo.



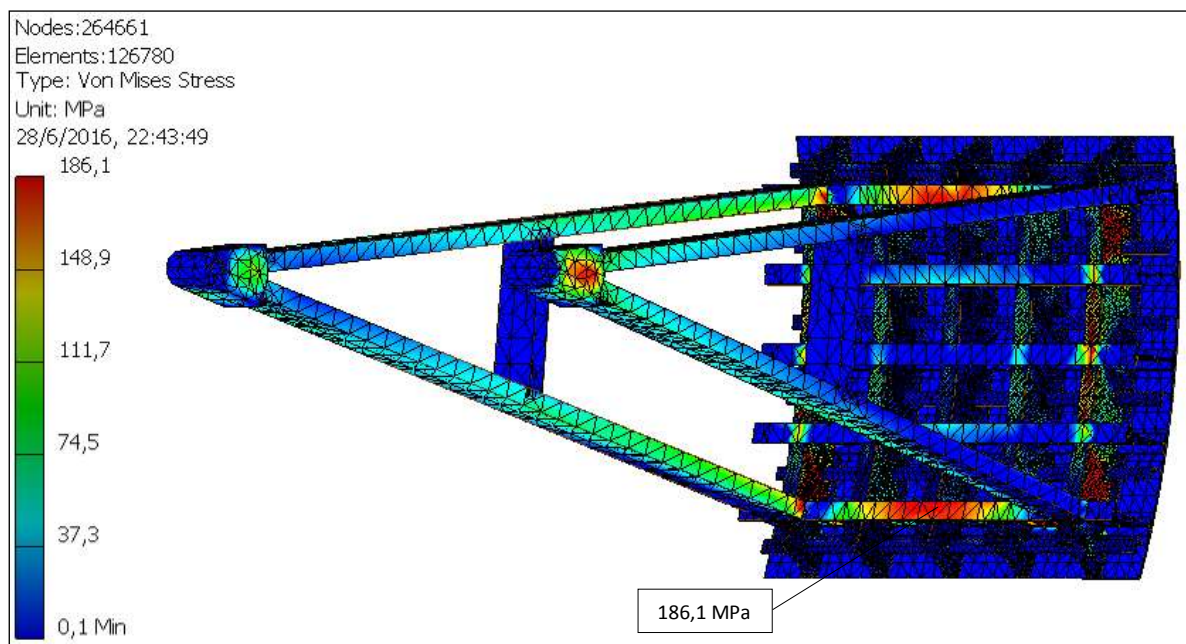
Fonte: Próprio autor.

No modelo 6, as alterações no paramento e nos reforços horizontais provocaram o aumento da tensão máxima para 121,7 MPa, que representa cerca de 10,3% com relação ao modelo 1, e se pode observar o aumento automático e independente da quantidade de elementos e consequente de nós, visto que foi mantido o padrão de análise e variado somente as dimensões do modelo. Com relação a pontos de máxima tensão, estes se localizam principalmente nas vigas horizontais e verticais externas, que formam juntamente com as vigas braços pórticos conhecidos como “A” e “Pi” (II), sendo estes os pórticos principais e a base da comporta recebendo por isso a maior concentração de tensão.

Neste caso cabe ressaltar que se tornaram visíveis as regiões de concentrações elevadas de tensão, fato que indica o avanço do processo de otimização quando comparado ao modelo desenvolvido inicialmente. Além disso, os já mencionados pórticos “A” e “Pi” estão mais

visíveis e fáceis de serem identificados com o aumento das tensões nas vigas horizontais e verticais das extremidades do paramento e nas vigas dos braços.

Figura 40 - Tensões de Von Mises no modelo8 da comporta segmento de fundo.



Fonte: Próprio autor.

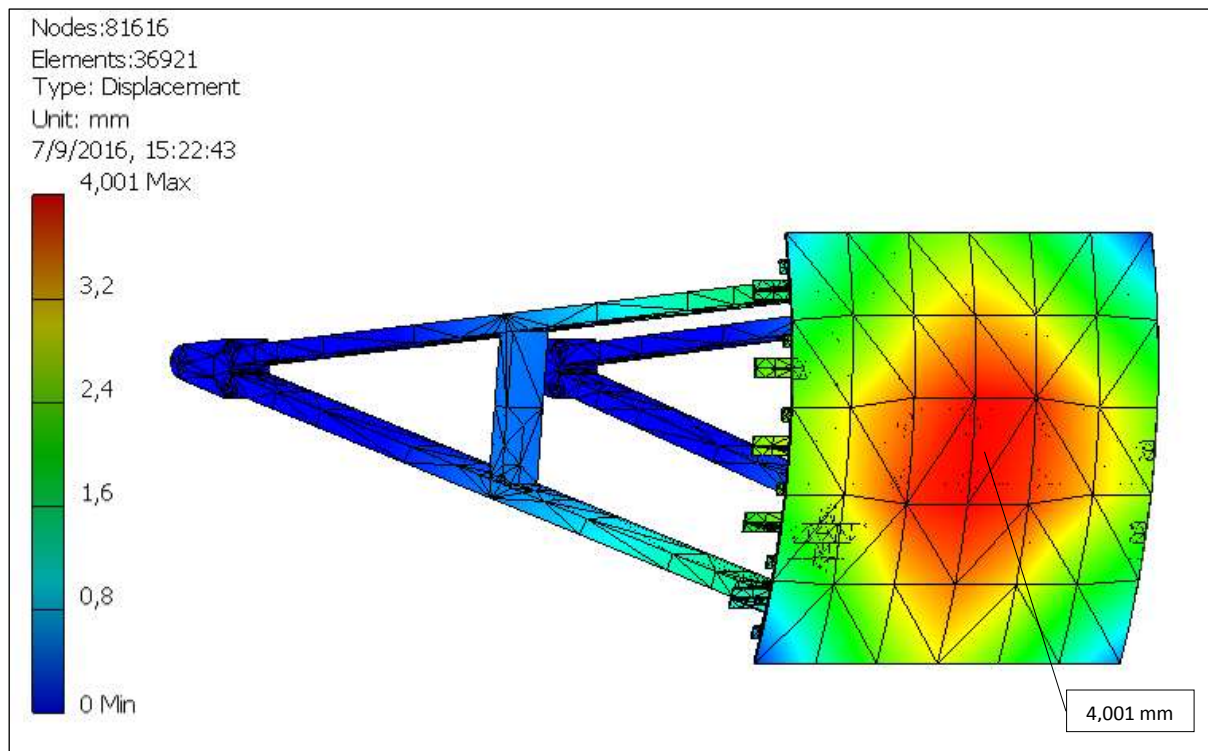
Já no modelo 8, foram aplicadas todas alterações possíveis de provocar o aumento da tensão máxima observando como referência o menor dentre os limites admissíveis de tensão de 187,5 MPa, apresentado na Tabela 4, na configuração definida para esta comporta para reduzir a massa da estrutura, o que causou o aumento da tensão máxima para 186,1 MPa, que é 68,7% maior comparado ao modelo 1. Entretanto, não houve alterações nas regiões de concentração de tensão comparadas ao modelo 6, mas é possível observar um novo aumento da quantidade de elementos e nós, sendo este um comportamento diretamente proporcional à tensão máxima, de tal forma que o aumento da tensão máxima é acompanhado por um aumento no número de elementos e nós.

4.2.1. Valores de Deslocamento

Além da tensão de Von Mises, foi analisada a deformação da estrutura também através do método dos elementos finitos, sendo estes resultados conjugados com a análise de tensões, ou seja, para todos os modelos simulados o software Autodesk Inventor 2014 apresenta os resultados de tensão e deformação como um padrão. Desta forma, os mesmos modelos 1, 6 e 8,

que já foram referência para a apresentação dos resultados das tensões, foram utilizados para ilustrar a deformação conforme apresentam as Figura 41, 42 e 43.

Figura 41 - Deformação no modelo 1 da comporta segmento de fundo.

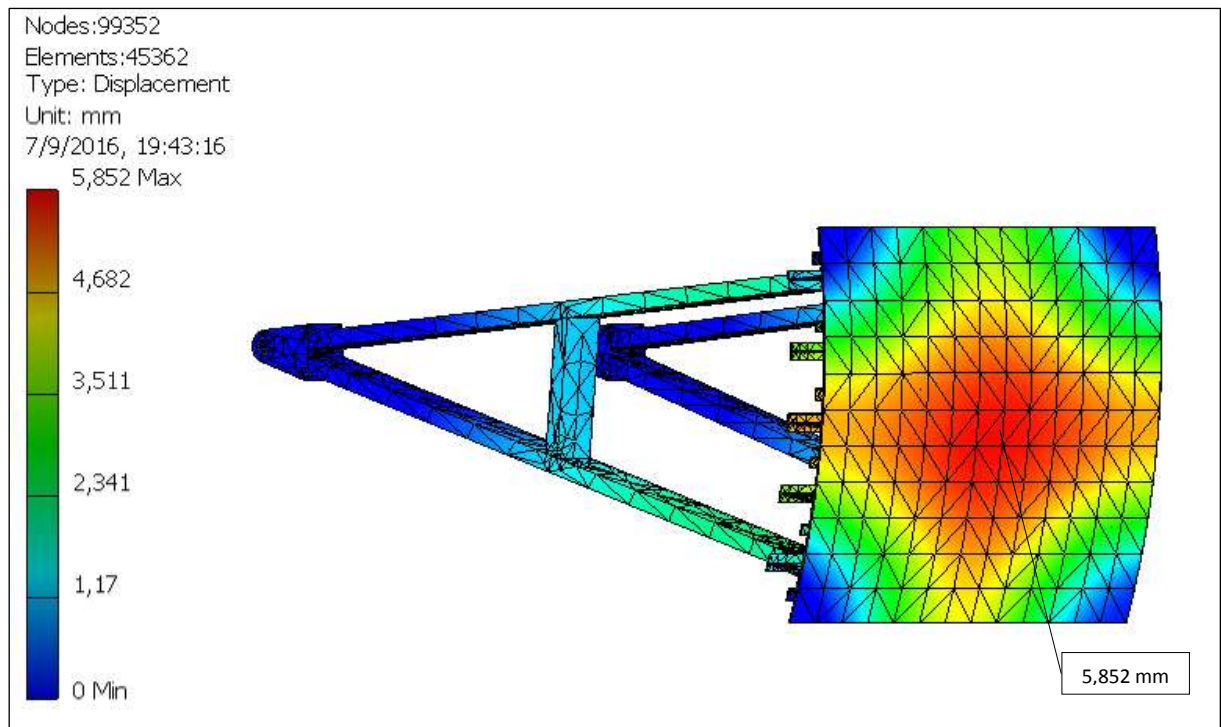


Fonte: Próprio autor.

O modelo 1, que foi o ponto de partida para o processo de otimização, apresenta com nítida concentração da deformação na região central do paramento, o que era previsível, pois a pressão aplicada no modelo é distribuída uniformemente e produz o efeito de uma ação pontual como pode ser observado. De qualquer forma, o deslocamento máximo de 4,001 mm obtido neste caso é relativamente pequeno, da ordem de $1/1499,6$ considerando a largura da comporta como referência, tornando aceitável e um indício de que o projeto da estrutura está bastante robusta.

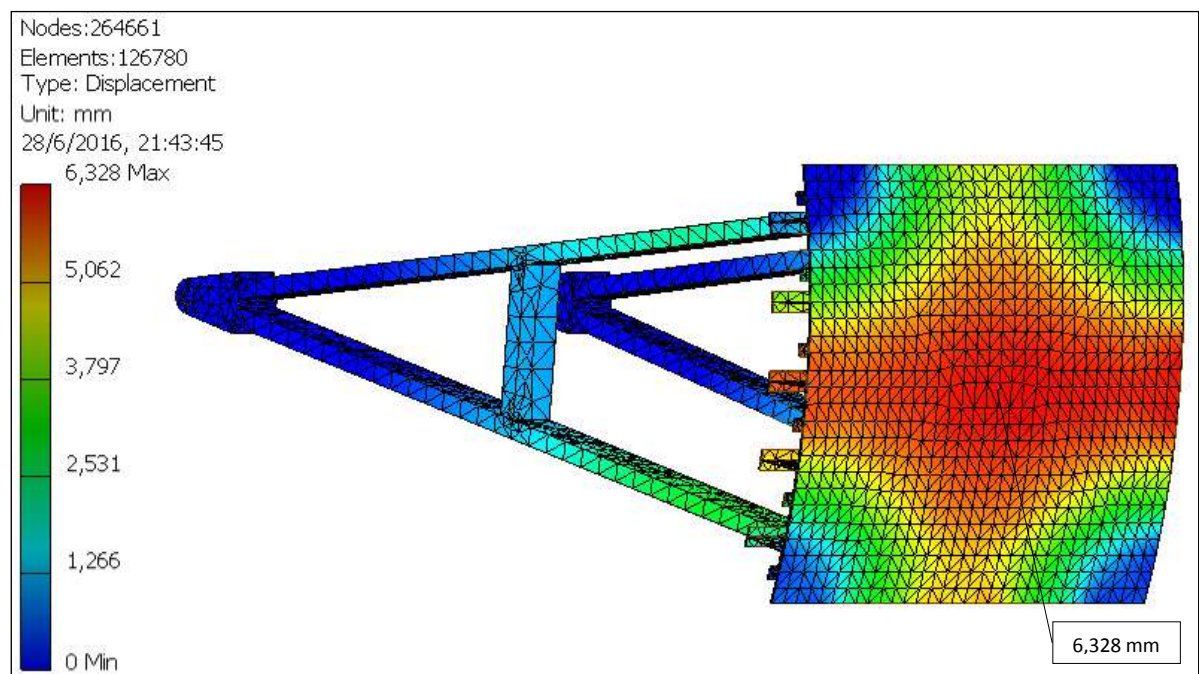
No modelo 6, o qual foi otimizado a partir do modelo 1, a deformação máxima se manteve na mesma região, sendo o deslocamento máximo de 5,582 mm, que corresponde a $1/1074,9$, que é aproximadamente 39,5% maior que o deslocamento obtido na simulação do modelo 1. Além deste aumento na deformação máxima houve um aumento na região que concentra os maiores valores de deslocamento se estendendo até as extremidades intermediárias do tabuleiro, mas que de forma alguma afeta a funcionalidade da comporta se fosse projetada utilizando este modelo.

Figura 42 - Deformação no modelo 6 da comporta segmento de fundo.



Fonte: Próprio autor.

Figura 43 - Deformação no modelo 8 da comporta segmento de fundo.



Fonte: Próprio autor.

Já no modelo 8, há claramente uma região de maior deformação de não restringe ao centro, mas se estende em proporção similar às extremidades laterais do tabuleiro da comporta,

o que é resultado da otimização da estrutura. Quanto ao máximo deslocamento encontrado de 6,328 mm, valor 58,2% maior que o obtido no modelo 1, que está localizado na mesma região dos demais modelos, este representa uma proporção de 1/948 que é aceitável e que no caso deste equipamento não causa nenhum tipo de falha na estanqueidade ou em seu funcionamento.

4.2.2. Massa da estrutura da comporta

A redução da massa do modelo da estrutura da comporta foi o objetivo do processo de otimização apresentado, sendo a redução do custo um fator desejado e associado diretamente a redução da massa. A consulta desta propriedade da estrutura foi realizada no software para cada um dos modelos após a análise estrutural, de tal forma que a Figura 44 apresenta a massa do modelo 8 que é o resultado final deste processo.

Este modelo selecionado para o projeto da estrutura da comporta segmento de fundo possui uma massa de 18.893,31 kg, que é 20,8% inferior aos 23.853 kg do projeto utilizado para a fabricação desta comporta, a qual se encontra em operação. Esta diferença expressiva pode ser atribuída ao uso da tecnologia e de ferramentas mais robustas no processo apresentado neste trabalho que as utilizadas no projeto do equipamento fabricados a alguns anos atrás, o qual pode ser comparado ao modelo 1, e neste caso é possível afirmar, a partir dos resultados apresentados de tensão e deformação, que esta estrutura é bastante robusta e reforçada e não apresenta risco de falha estrutural.

Figura 44 - Massa do modelo da comporta segmento de fundo.



Fonte: Próprio autor.

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O modelo parametrizado desenvolvido para criar modelos 3D da estrutura de comportas segmento de fundo foi testado e validado com sucesso. Esta ferramenta customizada para uso na indústria possibilita uma redução significativa de tempo e custos com a engenharia de projeto, sendo que um modelo pode ser criado em um tempo de aproximadamente 5 minutos.

Para mensurar os ganhos obtidos com o uso desta ferramenta é necessário comparar, com base nas características deste projeto, o gasto em horas engenharia através dos métodos convencionais, que é de aproximadamente 450 horas para a estrutura composta por tabuleiros e braços, com o gasto em horas utilizando o modelo parametrizado e o software Autodesk Inventor 2014, que é de aproximadamente 40 horas. Diante das estimativas de tempo apresentadas, a redução prevista de aproximadamente 91% nas horas gastas para o projeto da estrutura, o que viabiliza e justifica o uso desta ferramenta nos projetos de comportas segmento de fundo, além de incentivar o uso desta metodologia no desenvolvimento de ferramentas semelhantes para outros equipamentos.

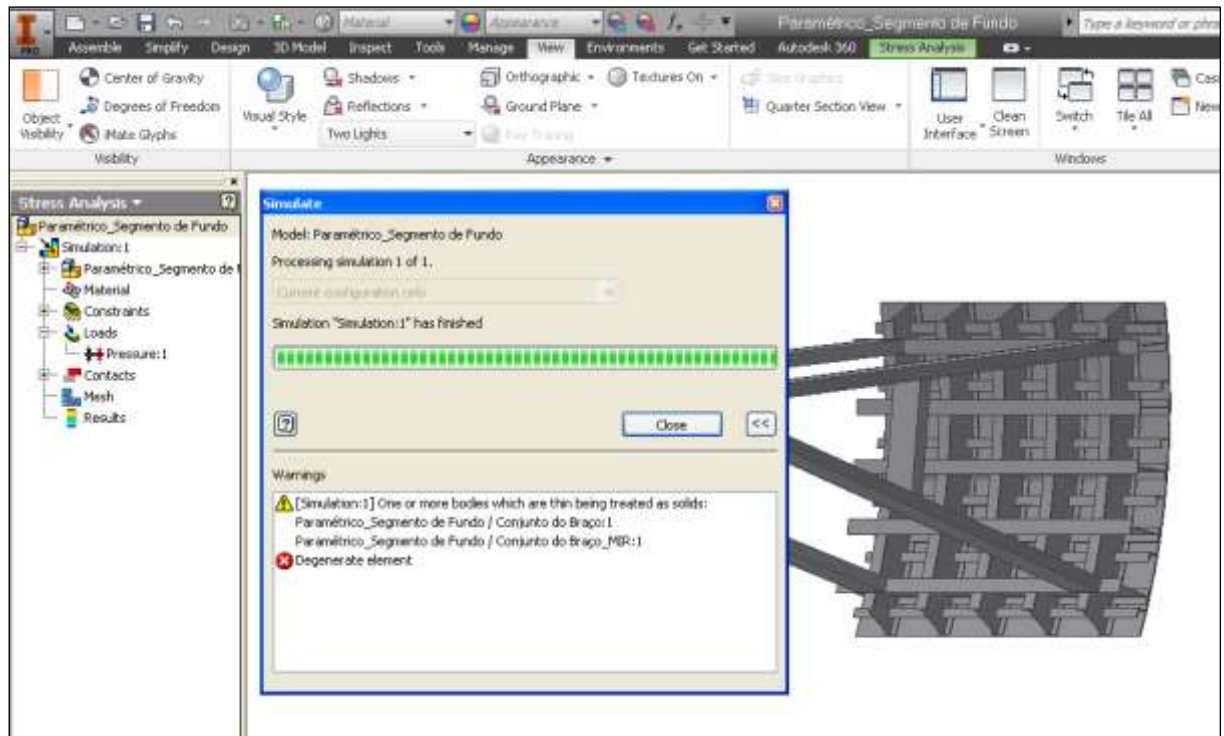
Com relação a tensão máxima no modelo 8 de 186,1 MPa, este resultado é 0,75% inferior a tensão admissível de 187,5 MPa para o aço carbono ASTM A36, sendo que já existe no cálculo desta tensão admissível um coeficiente de segurança. Para a deformação, neste mesmo modelo, o deslocamento máximo foi de 6,328 mm, que equivale a aproximadamente 0,1% ou 1/948 com relação a largura de 6000 mm da comporta, sendo este resultado satisfatório e inferior ao limite convencionado na indústria para esta estrutura de 1/750.

Contudo, a redução em 20,8% da massa líquida do equipamento pode ser obtida a partir da otimização do modelo 3D até 18.893,31 kg, valor muito menor que os 23.853 kg do equipamento fabricado. Além de reduzir custos de material em função da redução da massa, o projeto desenvolvido também reduz os custos com a fabricação, pois utiliza vigas e reforços em perfis laminados que necessitam apenas de corte.

Diante destes resultados satisfatórios, cabe ressaltar que o desenvolvimento desde a pesquisa inicial até a conclusão foi executado em um período de aproximadamente 24 meses, sendo a maior parte deste tempo dedicada ao estudo, desenvolvimento e principalmente testes da parametrização através do ilogic. Esta ferramenta é muito completa, eficiente e com potencial para desenvolvimentos ainda mais complexos que o apresentado neste trabalho, porém uma série de erros e problemas, como a falha na simulação apresentada na Figura 45,

ocorreram, consumindo além do tempo, investimentos em equipamentos e demais recursos necessários para a conclusão deste projeto.

Figura 45 - Malha de elementos finitos no modelo para simulação.



Fonte: Próprio autor.

5 CONCLUSÕES

A aplicação do ilogic foi um diferencial para a conclusão deste trabalho que poderia ter maiores dificuldades para chegar a um resultado final se fosse realizado com outras ferramentas similares do software Autodesk Inventor 2014. Através desta ferramenta, a programação de parâmetros, ou seja, a parametrização tem inúmeras possibilidades que permitiram o desenvolvimento apresentado neste trabalho, além de modelos parametrizados completos e complexos.

O modelo paramétrico desenvolvido foi testado e aprovado para o projeto de comportas segmento de fundo reduzindo significativamente as horas de engenharia para as atividades de cálculo, estudos e projeto do conjunto da estrutura em aproximadamente 91%. Com a aplicação desta ferramenta o departamento de engenharia pode ganhar mais produtividade reduzindo o tempo de projeto, o que garante uma vantagem competitiva na negociação de novos negócios para a empresa.

A partir das vantagens geradas por esta ferramenta, o trabalho pode ser avaliado como um exemplo de desenvolvimento para aumentar a autonomia da engenharia com uma ferramenta padronizada para as necessidades específicas do equipamento evitando a adaptação de ferramentas disponíveis no mercado, o uso de métodos empíricos ou de relações de equivalência entre projeto. Com isso, o mesmo projeto pode e deve ser replicado para os demais tipos de comportas, além de outros equipamentos como os vários tipos de válvulas.

Referente ao cálculo estrutural, utilizando a ferramenta de elementos finitos integrada ao software Autodesk Inventor 2014 foi possível obter resultados satisfatórios e com agilidade, pois mesmo o processo de otimização do modelo pode ser realizado de maneira simples sem a necessidade de utilizar um outro software, para o qual seria necessário exportar o modelo. Além disso, o cálculo estrutural utilizando o método de elementos finitos garantiu maior confiabilidade aos resultados reduzindo expressivamente a probabilidade de erros, sendo que neste caso específico foram obtidos 186,1 MPa e 6,328 mm para a tensão máxima de Von Mises e deslocamento máximo da estrutura resultante da otimização.

Contudo, a redução da massa líquida na estrutura da comporta segmento de fundo chegou a 20,8% com relação a comporta utilizada como referência para este estudo, o que é muito significativa e indica que algumas empresas utilizam métodos de cálculo que super dimensionam suas estruturas. Juntamente com a redução de massa e a consequente redução de custos, houve uma redução de custos com a fabricação com o uso de perfis laminados nas vigas

e reforços, sendo o somatório de reduções um fator preponderante para viabilizar futuros negócios para este equipamento.

5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

A aplicação de modelos paramétricos para outras comportas e outros equipamentos pode ajudar as empresas a aumentar a competitividade no mercado garantindo redução de custos com o projeto, da mesma forma o desenvolvimento de ferramentas customizadas podem ser aplicadas a outros produtos e ferramentas para obtenção de resultados similares aos deste trabalho.

Contudo, a utilização de um mesmo software para a modelagem, cálculo estrutural e elaboração dos desenhos para fabricação de forma automática é uma possibilidade de projeto utilizando o software Autodesk Inventor, porém este projeto tem um nível de complexidade e demanda maiores estudos do que o desenvolvido neste trabalho. Este projeto seria um avanço tecnológico e produziria reduções ainda maiores nos custos e tempo dos projetos mecânicos, mas diante da possibilidade de executar tal nível de parametrização e otimização, o trabalho em conjunto da universidade com profissionais da indústria seria muito importante e produziria resultados interessantes para ambas as partes em um tempo menor.

6 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. F. S. **Desenvolvimento de uma ferramenta paramétrica em linguagem APDL para cálculo de um pórtico rolante**. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

BACALTCHUK S., J. **Sugestão para Alternativas de Estudos de Viabilidade de Usinas Hidrelétricas**. VI Simpósio Brasileiro Sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas. Belo Horizonte, 2008.

DANESHMAND, F; ADAMOWSKI, J; LIAGHAT, T. **Bottom outlet dam flow: physical and numerical modeling**. Proceedings of the ICE - Water Management, Volume 167, Issue 3, March 2013. p. 176-184.

DIN 19704: Hydraulic Steel Structures – Part 1 Design analysis. Berlin: DEUTSCHE INSTITUTE NORMEN. - DIN, 1998. 28p.

ERBISTI, P. C. F. **Comportas Hidráulicas**. 2ª edição. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2002, 394p.

GRANDO, J. P. **Projeto Estrutural e Parametrização do projeto de uma comporta segmento utilizando o método dos elementos finitos**. Guaratinguetá, 2012. 160p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

HERCOS, L. R. P. **Projeto Estrutural e Parametrização de uma Comporta Deslizante Utilizando o Software Inventor**. 2015. 115f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ISHII, N. ANAMI, K. KNISELY, C. W. **Retrospective Consideration of a Plausible Vibration Mechanism for the Failure of the Folsom Dam Tainter Gate**. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, p. 314-345, vol. 3, nº. 4, Outubro de 2014.

LEWIS, J. **Hydraulic gates and valves in free surface flow and submerged outlets**. 1ª edição. Londres: Editora Thomas Telford, 1995, 238p.

LOPES, P. M. B. G. S. **Parametrização e Otimização de equipamentos hidromecânicos em elementos finitos**. 2002. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

MARTINS, J. R. S. **Construções Hidráulicas - Projeto de Barragens**, 2010. Disponível em: <www.phd.poli.usp.br/LeArq.aspx?id_arq=11766>. Acesso em: 27-09-2015.

NBR 8883. Cálculo e fabricação de comportas hidráulicas. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2008. 42p.

NBR 7259. Comportas hidráulicas - Terminologia. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. - ABNT, 2001. 16p.

SCHREIBER, G. P. **Usinas hidrelétricas**. São Paulo: Edgard Blücher, 1978. 238 p.

SHIH, R. H. **Parametric Modeling with Autodesk Inventor 2015**. Mission, KS: SDC Publications, 2014.

SOUZA, Z; FUCHS, R. D; SANTOS, A. H. M. **Centrais Hidro e Termoeletricas**. São Paulo: Edgard Blücher, 1983. 242 p.

TODD, R. V. **Spillway Tainter Gate Failure at Folsom Dam, California**. Waterpower '99: Hydro's Future: Technology, Markets, and Policy. Las Vegas: ASCE, 1999. p. 1-10.

WAGUESPACK, C. **Mastering Autodesk Inventor 2014 and Autodesk Inventor LT 2014**. Indiana: Autodesk Official Press, 2013.

www.gerdau.com/br/pt/productservices/products/Document%20Gallery/perfil-estrutural-Tabela-de-bitolas.pdf. Acesso em: 22-01-2016.