

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

LEONARDO JUPPA DA SILVA

**ERROS ASSOCIADOS ÀS FORÇAS MÁXIMA E MÉDIA DURANTE A COLISÃO
DE NAVIO COM ESTRUTURA ESTÁTICA**

Joinville

2018

LEONARDO JUPPA DA SILVA

**ERROS ASSOCIADOS ÀS FORÇAS MÁXIMA E MÉDIA DURANTE A COLISÃO
DE NAVIO COM ESTRUTURA ESTÁTICA**

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Naval do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Alexandre Mikowski

Coorientador: Fredi Cenci

Joinville

2018

LEONARDO JUPPA DA SILVA

**ERROS ASSOCIADOS ÀS FORÇAS MÁXIMA E MÉDIA DURANTE A COLISÃO
DE NAVIO COM ESTRUTURA ESTÁTICA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville, 06 de Julho de 2018.

Dr. Luis Fernando Peres Calil
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Dr. Alexandre Mikowski
Orientador

Dr. André Mitsuo Kogishi
Membro
Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S. A.

Dr. Evandro Cardozo da Silva
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Rafael Machado Casali
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus familiares que sempre participaram ativamente da minha vida acadêmica durante todos estes anos, principalmente a minha mãe, Margarete, por todos o aprendizado, suporte e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Ao meu professor e orientador Alexandre Mikowski por toda ajuda, ensinamento e paciência neste período de aprendizado.

À Universidade Federal de Santa Catarina e todos os professores que contribuíram para a minha formação acadêmica.

Aos meus colegas de universidade, Nathan Claudino, Larissa Máisa Bento, Fernando Braga Pinto, Oberdan Vinícius Castro, Matheus Drissen Schulze, Diogo Graziottin Borges, Felipe Otávio Rubini, Eduardo Nishida e Guilherme Engel, pelo acompanhamento da minha jornada até este momento.

Aos meus colegas do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S. A. pelo auxílio e dicas dadas para a realização deste trabalho.

RESUMO

As forças impulsivas que um navio sofre quando este entra em contato com uma estrutura estática durante uma colisão é de grande importância para quem está estudando o desenvolvimento de proteção de pontes/píeres e navios, podendo evitar danos maiores no sistema. O objetivo deste trabalho consiste em determinar expressões para os erros associados às forças máxima e média durante a colisão de navio-estrutura, a fim de ter maior segurança ao se usar as expressões desenvolvidas por Holger Svensson em 2009, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) em 1991 e também, em 2014 o estudo feito por Miao Jilun, Wang Zhaobing e Xiao Shengxie. Para desenvolver o trabalho, primeiramente foi apresentado um breve histórico recente das colisões envolvendo embarcações, e na sequência, partiu-se para a explicação das expressões utilizadas para as forças máxima e média. A propagação de erros para variáveis independentes, ou não correlacionadas, foi utilizada para o desenvolvimento de modelos matemáticos para obter expressões de erros associados para as forças máxima e média de colisão. Cálculos numéricos foram realizados para quatro cenários, em os valores de erros das variáveis de entrada foram fixados em 2,5%, 5%, 7,5% e 10%. Como resultado dos modelos matemáticos de propagação de erros foi possível estimar intervalos de confiança para cada expressão de força máxima e média dos três modelos analisados da literatura, e que alguns casos, a variação encontrada chegou a 70%.

Palavras-chave: Forças de colisão. Estrutura estática. Propagação de erros.

ABSTRACT

The impulsive forces that a ship suffers when it comes into contact with a static structure during a collision is of great importance to anyone studying the development of protection of bridges/piers and ship, in order to prevent further damage to the system. The objective of this work is to determine expressions for the errors associated with the maximum and average forces during the ship-structure collision and thus to be safer when using the expressions developed by Holger Svensson in 2009, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) in 1991 and also in 2014, the study by Miao Jilun, Wang Zhaobing and Xiao Shengxie. To develop the work, we first presented a brief history of recent collisions involving vessels, followed by an explanation of the expressions used for maximum and average forces. The propagation of errors for independent or uncorrelated variables was used for the development of mathematical models to obtain expressions of associated errors for the maximum and average collision forces. Numerical calculations were performed for four scenarios, where error values of input variables were set at 2.5%, 5%, 7.5% and 10%. As a result of the mathematical models of error propagation it was possible to estimate confidence ranges for each expression of maximum and average force of the three models analyzed in the literature, and that in some cases, the variation found reached 70%.

Keywords: Collision force. Static structure. Propagation of errors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Acidente de embarcações no rio Amazonas.	18
Figura 2 - Acidente de embarcações no Porto de Santos – SP.	18
Figura 3 - Teste de colisão da GKSS.	20
Figura 4 - Força de impacto do primeiro teste de colisão da GKSS.	21
Figura 5 - Características das típicas curvas de força de impacto.	24
Figura 6 - Definição de carga de impacto equivalente.	26
Figura 7 - Curva relacionada ao navio de 50000 toneladas de peso morto (<i>DWT</i>).	27
Figura 8 - Relação entre força máxima de impacto e massa.	27
Figura 9 - Relação entre força máxima de impacto e peso morto.	28

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Histórico do total de perdas/acidentes de navios.	16
Gráfico 2 - Relação da força de impacto e peso morto para navio graneleiro.	22
Gráfico 3 - Força de impacto de Knott – AASHTO.	23
Gráfico 4 - Relação de <i>DWT</i> com as forças de impacto.	29
Gráfico 5 - Relação de <i>M</i> com as forças de impacto.	29
Gráfico 6 - Comparativo Google Scholar e Science Direct para o presente trabalho sem filtragem de resultados.	31
Gráfico 7 - Comparação da força máxima de colisão de Svensson e AASHTO.	35
Gráfico 8 - Comparação da força máxima de colisão de Svensson e Miao Jilun.	36
Gráfico 9 - Comparação da força máxima de colisão de AASHTO e Miao Jilun.	37
Gráfico 10 - Comparação da força média de colisão de Svensson e AASHTO.	38
Gráfico 11 - Comparação da força média de colisão de Svensson e Miao Jilun.	40
Gráfico 12 - Comparação da força média de colisão da AASHTO e Miao Jilun.	41
Gráfico 13 - Intervalo de confiança de força máxima de colisão de Svensson para uma embarcação de <i>DWT</i> igual a 50.000 toneladas.	54
Gráfico 14 - Influência do coeficiente <i>K</i> na propagação de erros de Svensson.	55
Gráfico 15 - Intervalo de confiança de força máxima de colisão da AASHTO para uma embarcação de peso morto (<i>DWT</i>) igual a 50000 toneladas.	57
Gráfico 16 - Influência do coeficiente <i>K</i> na propagação de erros da AASHTO.	57
Gráfico 17 - Intervalo de confiança de força máxima de colisão de Miao Jilun em função de <i>M</i>	59
Gráfico 18 - Influência dos coeficientes <i>K</i> 's na propagação de erros da força máxima de colisão de Miao Jilun em função de <i>M</i>	59
Gráfico 19 - Intervalo de confiança de força máxima de colisão de Miao Jilun em função de <i>DWT</i>	61
Gráfico 20 - Influência do coeficiente <i>K</i> na propagação de erros da força máxima de colisão de Miao Jilun em função de <i>DWT</i>	61
Gráfico 21 - Intervalo de confiança de força média de colisão de Miao Jilun em função de <i>M</i>	63
Gráfico 22 - Influência do coeficiente <i>k</i> na propagação de erros da força máxima de colisão de Miao Jilun em função da <i>M</i>	63

Gráfico 23 - Intervalo de confiança de força média de colisão de Miao Jilun em função de <i>DWT</i>	65
Gráfico 24 - Influência do coeficiente <i>k</i> na propagação de erros da força máxima de colisão de Miao Jilun em função de <i>DWT</i>	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Acidentes ocorridos entre os anos de 2002 a 2013.	17
Tabela 2 - Parâmetros e características das embarcações simuladas.....	25
Tabela 3 - Palavras-chave dos artigos base.	31
Tabela 4 - Dados de entrada para a análise de propagação de erros da força máxima de colisão de Svensson	53
Tabela 5 - Resultados obtidos para força máxima de colisão de Svensso.....	54
Tabela 6 - Dados de entrada para a análise de propagação de erros da força máxima de colisão da AASHTO.	56
Tabela 7 - Resultados obtidos para força máxima de colisão da AASHTO.....	56
Tabela 8 - Dados de entrada para a análise de propagação de erros da força máxima de colisão de Miao Jilun em função de M	58
Tabela 9 - Resultados da análise de propagação de erros para a força máxima de colisão em função da M de Miao Jilun.	58
Tabela 10 - Dados de entrada para a análise de propagação de erros da força máxima de colisão de Miao Jilun em função de DWT	60
Tabela 11 - Resultados obtidos para força máxima de colisão de Miao Jilun em função de DWT	60
Tabela 12 - Dados de entrada para a análise de propagação de erros da força média de colisão de Miao Jilun em função de M	62
Tabela 13 - Resultados obtidos para força média de colisão de Miao Jilun em função de M	62
Tabela 14 - Dados de entrada para a análise de propagação de erros da força média de colisão de Miao Jilun em função de DWT	64
Tabela 15 - Resultados obtidos para força média de colisão de Miao Jilun em função de DWT	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a	Comprimento da deformação/dano
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
Codesp	Companhia Docas do Estado de São Paulo
DWT	<i>Dead weight</i> (Peso morto)
ΔE	Varição da energia cinética
δX_i	Erro da grandeza de entrada
$\frac{\partial f}{\partial X_i}$	Derivada parcial de f em relação a X_i
FEA	<i>Finite Element Analysis</i> (Análise dos Elementos Finitos)
FEM	<i>Finite Element Method</i> (Método dos Elementos Finitos)
$F_{m\acute{a}x}$	Força de impacto máxima
$F_{m\acute{e}d}$	Força de impacto média
$F_{m\acute{a}x_{AASHTO}}$	Força de impacto máxima da AASHTO
$F_{m\acute{e}d_{AASHTO}}$	Força de impacto média da AASHTO
$F_{m\acute{a}x_{Miao}}$	Força de impacto máxima de Miao Jilun
$F_{m\acute{e}d_{Miao}}$	Força de impacto média de Miao Jilun
$F_{m\acute{a}x_{Svensson}}$	Força de impacto máxima de Svensson
$F_{m\acute{e}d_{Svensson}}$	Força de impacto média de Svensson
GKSS	Gesellschaft für Kernenergieverwertung na Schiffbau und Schiffahrt
M	Massa
$\nabla(G)$	Incerteza combinada de G
V	Velocidade
X_i	Grandeza de entrada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	HISTÓRICO RECENTE DE COLISÕES	16
2.2	EXPRESSÕES PARA CÁLCULO DE FORÇAS MÁXIMA E MÉDIA	19
2.2.1	Estudo de Svensson	19
2.2.2	Estudo da AASHTO	22
2.2.3	Estudo de Miao Jilun	24
3	METODOLOGIA	30
3.1	MAPEAMENTO DAS EQUAÇÕES DE FORÇA MÁXIMA E MÉDIA DE COLISÃO	30
3.2	TEORIA DA PROPAGAÇÃO DE ERROS	32
4	RESULTADO E DISCUSSÕES	34
4.1	COMPARAÇÃO ENTRE ESTUDOS DE FORÇA MÁXIMA DE COLISÃO	34
4.1.1	Comparação Svensson com AASHTO	34
4.1.2	Comparação Svensson com Miao Jilun	35
4.1.3	Comparação AASHTO com Miao Jilun	36
4.2	COMPARAÇÃO ENTRE ESTUDOS DE FORÇA MÉDIA DE COLISÃO	37
4.2.1	Comparação Svensson com AASHTO	38
4.2.2	Comparação Svensson com Miao Jilun	39
4.2.3	Comparação AASHTO com Miao Jilun	40
4.3	APLICAÇÃO DA TEORIA DOS ERROS.....	41
4.3.1	Teoria de propagação de erros aplicada às forças máximas de colisão	42
4.3.1.1	Equação de Svensson	42

4.3.1.2	Equação AASHTO	43
4.3.1.3	Equação de Miao Jilun em função de M e DWT	44
4.3.2	Teoria de propagação de erros aplicada às forças médias de colisão.....	47
4.3.2.1	Equação de Svensson	47
4.3.2.2	Equação AASHTO	48
4.3.2.3	Equação Miao Jilun em função de M e DWT	50
4.4	ANÁLISE NUMÉRICA DOS ERROS DAS EXPRESSÕES DE FORÇA MÁXIMA E MÉDIA.....	52
4.4.1	Análise da propagação de erros do estudo de Svensson	53
4.4.2	Análise da propagação de erros do estudo de AASHTO.....	55
4.4.3	Análise da propagação de erros do estudo de Miao Jilun	58
4.4.3.1	Força máxima em função de M	58
4.4.3.2	Força máxima em função de DWT	60
4.4.3.3	Força média em função de M	62
4.4.3.4	Força média em função de DWT	64
5	CONCLUSÃO	66
	REFERÊNCIA	67

1 INTRODUÇÃO

A indústria naval trouxe benefícios para os brasileiros desde os primórdios da exploração do transporte aquaviário, tendo seu ápice por volta dos anos 1980, onde ocupou o segundo lugar dentre os construtores, perdendo apenas para o Japão (TELLES, 2001). A partir dessa época o tráfego marítimo na costa brasileira só aumentou, e continua, tornando as embarcações mais sujeitas a colisões.

Muitos destes acidentes ocorrem entre embarcações e objetos estáticos (cais, píeres, rochas, pontes e plataformas), resultando em avarias e perdas de carga, danos materiais, risco à vida humana e poluição devido ao vazamento de óleo, gás ou demais compostos químicos.

Cartas náuticas tridimensionais, radares sofisticados e posicionamentos dinâmicos são formas de diminuir as possibilidades de acidentes no mar (BARBARINI, 2012). Mesmo assim, esses acidentes ainda ocorrem, como foi o caso do navio de bandeira Filipina chamado ACX Crystal, em junho de 2017, que colidiu com um navio de guerra americano e deixou sete tripulantes desaparecidos, entre os quais o comandante do navio, nas proximidades da costa do Japão (FONTDEGLÒRIA, 2017).

Um dos acidentes marítimos mais conhecidos que se tornou filme no ano de 1997, e completou mais de 100 anos, foi do navio RMS Titanic, transatlântico que transportava mais de 2 mil passageiros e colidiu com um iceberg (objeto quase-estático) no Oceano Atlântico, deixando mais de 1500 mortos (FOECKE, 1998).

Em dinâmica, uma colisão, choque ou impacto entre dois corpos, ocorre quando estes entram em contato durante breve intervalo de tempo, desenvolvendo forças impulsivas durante o contato (HIBBELER, 2004). No âmbito naval, estudos empíricos e numéricos de colisões de navios com superfície estática, foram realizados para analisar o comportamento mecânico-dinâmico das estruturas navais, com objetivo de determinar as forças máxima e média durante a colisão (AASHTO, 2009; JILUN, ZHAOBING, SHENGXIE, 2014; SVENSSON, 2009).

Conhecer as forças impulsivas durante a colisão, especificamente a força máxima e média, são de extrema importância para elaboração do projeto estrutural já nas fases iniciais, ou seja, no projeto preliminar. A força máxima e média advém de medições indiretas, ou seja,

quando o valor do mensurando é calculado a partir de operações matemáticas (ALBERTAZZI G. JR, 2008). São usadas quando não há possibilidade da medição direta (por instrumentos de medição), sendo mais atrativa do ponto de vista econômico, mas trazem incertezas que podem ser cruciais para conceber um modelo estrutural de qualidade, na fase de projeto preliminar de uma embarcação.

Dentro deste contexto, este trabalho propõe estimar o erro (ou incerteza) associado às medições indiretas das expressões matemáticas de modelos empíricos e numéricos, para cálculo de forças de colapso de navios durante colisões com estruturas estáticas, em que será empregada a teoria de propagação de erros.

1.1 OBJETIVOS

Para resolver as problemáticas de erros das medições indiretas de forças máxima e média, propõe-se neste trabalho os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo Geral

Aplicar a propagação de erros nas definições das forças máxima e média advindas de expressões empíricas e numéricas de estudos de colisões de navios com estruturas estáticas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Comparar diferentes modelos que estimam as forças máxima e média durante a colisão de navios com estruturas estáticas;
- Propor expressões para estimar os erros/incertezas das forças máxima e média dos diferentes modelos que estimam as forças durante a colisão de navios com estruturas estáticas;
- Verificar os intervalos de confiança para efetuar uma análise estatística dos modelos que estimam as forças máxima e média durante a colisão de navios com estruturas estáticas.

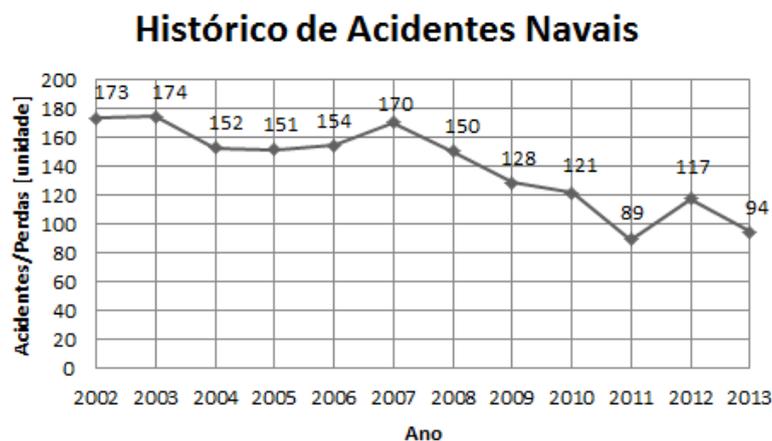
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão abordados conceitos essenciais para entendimento dos próximos capítulos. Primeiramente um histórico recente de colisão no mundo observando o fenômeno envolvido na colisão. Posteriormente são expostos os estudos dos autores das equações de força de colisão, tanto máxima quanto média.

2.1 HISTÓRICO RECENTE DE COLISÕES

Com mais de 90% do comércio mundial estimado para ser transportado pelo mar, a segurança dos navios e das rotas marítimas internacionais são fundamentais para a saúde da economia global (SPECIALTY, 2014). Segundo a revista Allianz (2014), a maior parte das perdas (colisão, naufrágio, explosões, entre outros) estão concentradas na China, Indonésia, Coréia do Sul, Filipinas e Japão. As maiores perdas/acidentes estão em navios do tipo graneleiro, pesqueiro e carga geral. Esses números vêm diminuindo no decorrer dos anos devido ao fato do desenvolvimento tecnológico voltado a área naval (cartas náuticas tridimensionais, sonares, radares e posicionamentos dinâmico) como mostra o Gráfico 1.

Gráfico 1 - Histórico do total de perdas/acidentes de navios.



Fonte: Adaptado de Allianz (2014, p. 4).

A Tabela 1 mostra diferentes tipos de acidentes que ocorreram de 2002 à 2013.

Tabela 1 - Acidentes ocorridos entre os anos de 2002 a 2013.

ANO	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	TOTAL
Colisão (envolvendo navio)	19	20	12	26	23	17	11	13	10	3	5	1	160
Colisão (paredes)	2	2	3	5	2	2	1	1	0	0	2	0	20
Naufrágio	48	63	75	57	64	70	75	61	65	43	55	69	745
Fogo/explosão	35	21	20	16	19	17	16	14	11	7	12	11	199
Danos (furo e rachadura no casco)	22	12	5	8	4	11	4	7	4	3	5	0	85
Desaparição	0	0	1	3	1	1	0	0	1	0	0	0	7
Falha mecânica	16	13	9	8	11	14	8	6	4	6	12	2	109
Pirataria	0	0	1	1	0	1	0	1	2	0	0	0	6
Encalhado	22	35	25	24	29	35	34	23	22	27	25	11	312
Outros	9	8	1	3	1	2	1	2	2	0	1	0	30
TOTAL	173	174	152	151	154	170	150	128	121	89	117	94	1673

Fonte: Allianz (2014).

Para exemplificar como ainda ocorrem colisões, Silva (2017) relatou o acontecido em agosto de 2017, onde um navio do Mercosul que seguia para Manaus transportando contêineres colidiu com uma balsa (comboio fluvial) da empresa Bertolini nas proximidades da cidade de Óbidos, no rio Amazonas. De acordo com a Capitania Fluvial de Santarém, haviam 11 pessoas a bordo. A Figura 1 demonstra os estragos causados em ambas as

embarcações. Como a diferença do peso morto ou dead weight (*DWT*) entre as embarcações é alta, quem mais sofreu estruturalmente foi a embarcação de menor porte.

Figura 1 - Acidente de embarcações no rio Amazonas.



Fonte: Silva (2017).

Também recentemente, Santos, G1 (2015) notificou o acidente entre dois navios, que colidiram no canal de acesso ao Porto de Santos – SP. De acordo com informações da Companhia Docas do Estado de São Paulo (Codesp), um dos navios deixava o porto e outro entrava. A colisão ocasionou pequenos danos nas embarcações, como mostrado da Figura 2.

Figura 2 - Acidente de embarcações no Porto de Santos – SP.



Fonte: Santos, G1 (2015).

Colisão, choque, impacto ou batida somente ocorre quando dois ou mais corpos entram em contato durante um breve intervalo de tempo, desenvolvendo por consequência,

forças impulsivas (HIBBELER, 2004). Pode-se classificar de duas formas, colisão central e oblíqua. Na colisão no canal de acesso ao Porto de Santos – SP, essas forças impulsivas causaram danos à estrutura, mas não trouxeram avarias ao navio. Como embarcações têm a massa muito grande, mesmo em baixas velocidades a quantidade de movimento e a força de impacto são relativamente altas, sendo compostas de material metálico na sua grande maioria, colisões elásticas são quase extintas nesse cenário. As colisões de navio em estruturas estáticas foram estudadas por diferentes pesquisadores e as expressões matemáticas desenvolvidas serão apresentadas.

2.2 EXPRESSÕES PARA CÁLCULO DE FORÇAS MÁXIMA E MÉDIA

Nesta seção serão apresentados os estudos que originaram as expressões de forças máxima e média de colisão utilizada para a estimativa de erro. Que serão apresentadas em ordem cronológica. Primeiramente as expressões de Svensson, feitas em 2009, seguido das expressões da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), em 2009 e por fim, as de Jilun, Zhaobing e Shengxie, em 2014 .

2.2.1 Estudo de Svensson

Em vários países, investigações gerais sobre colisões de navios com estruturas estáticas (pontes e píeres) foram realizadas devido a numerosos acidentes do passado (SAUL; SVENSSON, 1982). Segundo o artigo *On the theory of ship collision against bridge piers*, a mecânica de impacto pode ser subdividida em mecânica interna e externa.

A mecânica de impacto externa pode ser subdividida em teoria de impacto para corpos livres, investigação da influência da água circundante (massa adicional) e na estimativa da porção de energia de impacto elástica. A influência da água circundante é aproximada através da introdução de uma massa suplementar hidrodinâmica. Svensson (2009) afirmam que esta massa suplementar pode ser considerada constante com cerca de 5% do deslocamento do navio. Embora a porção esmagadora da energia de impacto seja transformada em calor através de deformação plástica e trabalho de fricção superficial, uma menor parte da energia também é convertida em trabalho de deformação elástica e energia hidrostática, como o trabalho de afundamento. Essas porções (deformação elástica e energia hidrostática) podem, no entanto, ser desconsideradas.

A mecânica interna de impacto depende, essencialmente, dos elementos estruturais envolvidos no impacto. Por isso, cada embarcação possui uma deformação diferente, considerando que sejam idênticas externamente, mas de diferente configuração interna.

Segundo Svensson (2009), foram realizadas medições em testes de colisão na maior parte no Japão, Itália e Alemanha Ocidental, com o objetivo de desenvolver proteção contra colisões para navios nucleares, dessa forma foi concebida a expressão para cálculo de força de impacto. Na Alemanha Ocidental, a *Gesellschaft für Kernenergieverwertung na Schiffbau und Schiffahrt GmbH (GKSS)* e a *Howaldtswerke - Deutsche Werft AG*, realizaram nos anos 1967 a 1976 um total de 24 testes de colisão com 12 pares de modelos de navios com uma escala de 1:7,5 e 1:12. Foram examinados modelos de navio de passageiros com linha fixa (liners), petroleiros e navios contêineres de capacidade até 195 mil toneladas. Na Figura 3, é mostrada a fotografia de um dos testes realizados pela GKSS, com embarcação do tipo graneleira de proa bulbosa. Colocou-se essa embarcação em certa altura, para que quando colidisse, seja atingida a velocidade adequada. Posteriormente, media-se a deformação externa (casco do navio) e interna (componentes estruturais do navio).

Figura 3 - Teste de colisão da GKSS.



Fonte: Svensson (2009, p. 22).

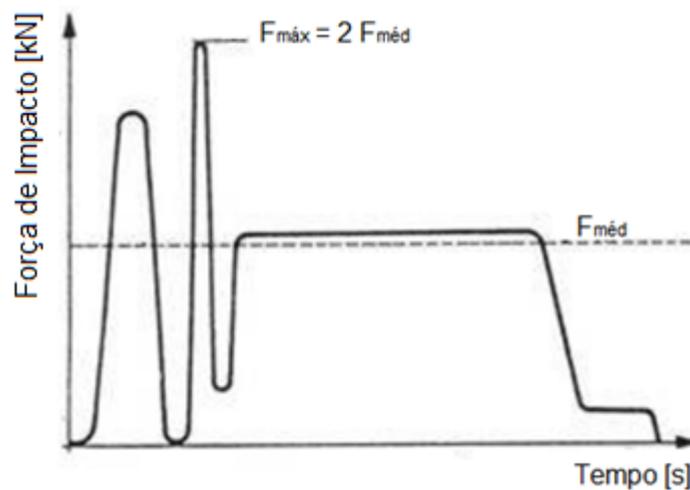
A partir das medições das deformações, Svensson estimaram que a força de impacto média ($F_{méd}$) é a diferença entre a energia cinética no início e no fim do impacto (ΔE), dado

em Joule, dividido pelo comprimento da deformação/dano (a), dado em metros, como mostrado na Equação (1).

$$F_{méd} = \Delta E / a \quad (1)$$

Segundo Saul e Svensson (1982) a força média de colisão é aproximadamente constante durante o choque do navio com a estrutura estática e a força máxima de colisão ($F_{máx}$) é duas vezes a força média, Figura 4.

Figura 4 - Força de impacto do primeiro teste de colisão da GKSS.



Fonte: Adaptado de Saul e Svensson (1982, p. 34).

Nos testes de colisão da GKSS foi descoberto que a força máxima de impacto de um determinado navio dependerá do tamanho, do tipo de proa e da energia cinética. Por fim, para um navio graneleiro, a força de impacto efetiva máxima contra uma estrutura estática é regida pela Equação (2).

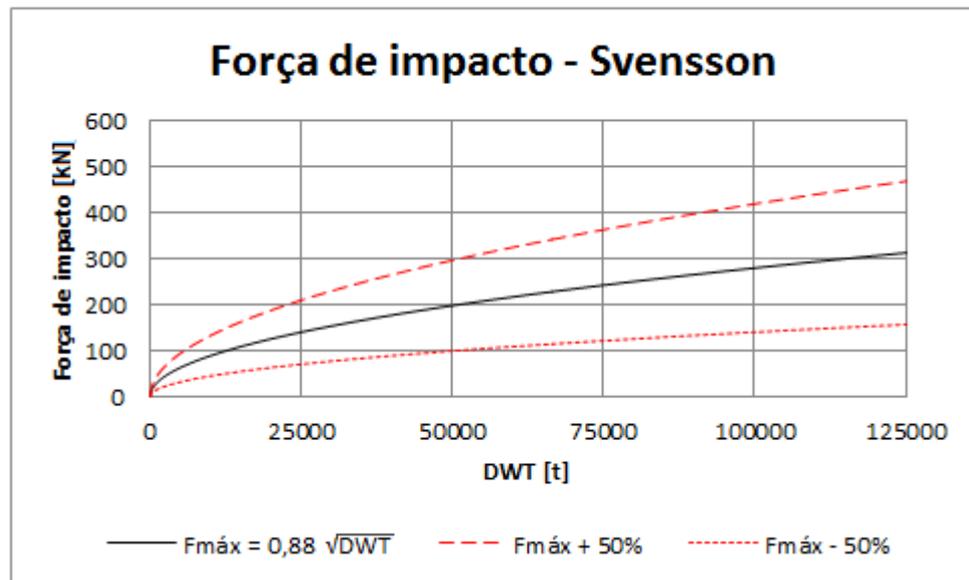
$$F_{máx} = 0,88\sqrt{DWT} \pm 50\% \quad (2)$$

Onde o peso morto (DWT) é dado em toneladas. E a força média é a metade, como na Equação (3).

$$F_{méd} = \frac{0,88\sqrt{DWT} \pm 50\%}{2} \quad (3)$$

O Gráfico 2 ilustra a força máxima do estudo de Svensson, juntamente com seus limites inferiores e superiores.

Gráfico 2 - Relação da força de impacto e peso morto para navio graneleiro.



Fonte: Adaptado de Svensson (2009, p. 35).

2.2.2 Estudo da AASHTO

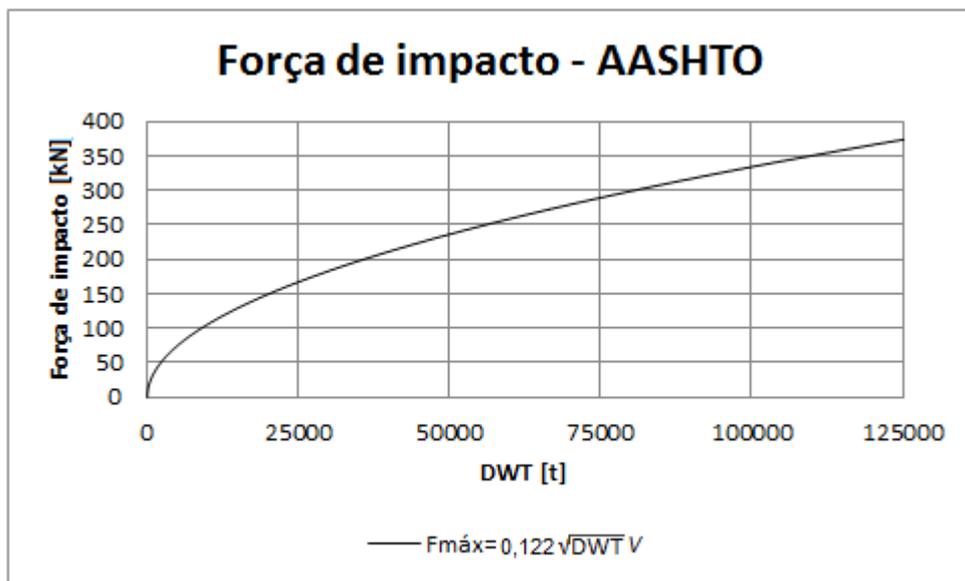
Segundo Holger Svensson (2009) no artigo *Protection of bridge piers against ship collision*, em 1980, um cargueiro colidiu com um píer desprotegido em Sunshine Skyway Bridge - Tampa Bay, na costa oeste da Flórida, EUA. Cerca de 400 metros da ponte tiveram danos permanentes e 38 pessoas morreram. Como resultado desta tragédia, estudos foram iniciados nos EUA pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), para desenvolver uma expressão para uso de engenheiros de ponte na avaliação de estruturas para colisão de embarcações. O investigador principal foi Michael A.

Como naquela época Svensson já havia publicado seu estudo, houve um aprimoramento da faixa de dispersão de $\pm 50\%$, que era muito grande, usando a fração de mais 20% de $0,88\sqrt{DWT}$, resultando na mudança do valor 0,88 para 0,98. Além disso adicionado um fator $V/8$ para explicar a relação da força com a energia cinética, ou seja, com

o aumento da velocidade maior será a força de colisão, tanto máxima, como média. Após esse processo, a equação resulta em um fator de 0,122 que multiplica a raiz do peso morto (DWT) e a velocidade (V), Equação (4). Essa equação foi feita com o intuito de dimensionar os pilares (elemento estrutural da ponte) para resistir a carga de colisão, o resultado é mostrado no Gráfico 3.

$$F_{m\acute{a}x} = 0,122\sqrt{DWT} V \quad (4)$$

Gráfico 3 - Força de impacto de Knott – AASHTO.



Fonte: Adaptado Svensson (2009, p. 22).

E a Equação (5) é a força média de colisão, metade da força máxima, e dada por:

$$F_{m\acute{e}d} = \frac{0,122\sqrt{DWT} V}{2} \quad (5)$$

Onde a velocidade (V) é dada em metro por segundo e o peso morto (DWT) em tonelada.

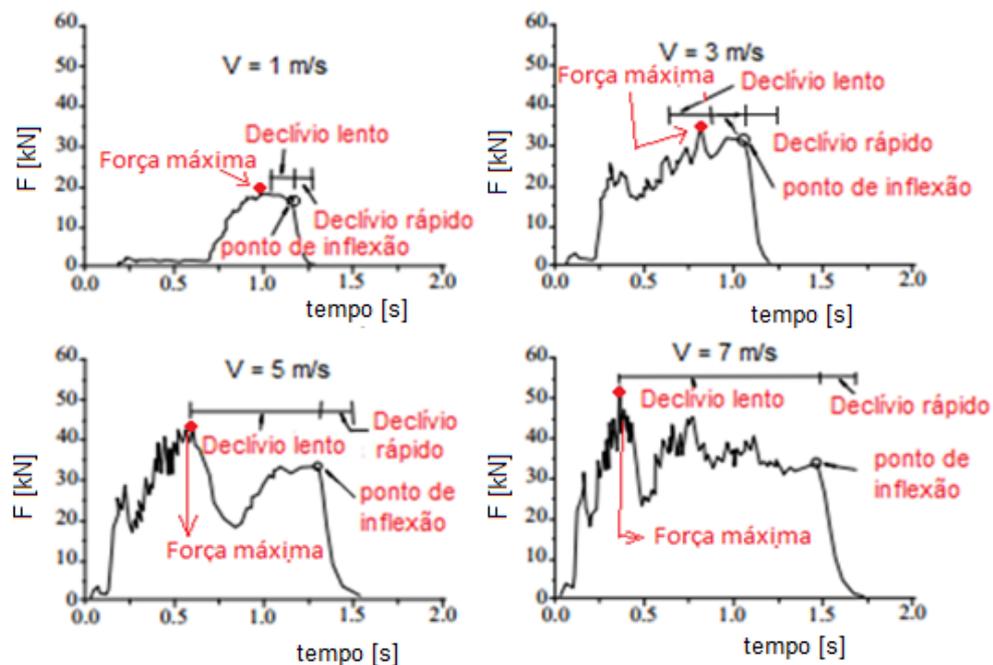
2.2.3 Estudo de Miao Jilun

A colisão de embarcação com qualquer tipo de estrutura é um estudo multidisciplinar e muito complexo de mensurar, pois deve-se ter conhecimento nas áreas de engenharia de estruturas (pontes, píeres, cais e demais estruturas), engenharia naval, dinâmica de colisão e mecânica dos fluídos (JILUN; ZHAOBING; SHENGXIE, 2014).

A Figura 5 mostra como a dinâmica de impacto de embarcação com uma parede rígida (curva de impacto) tem efeito não linear e varia com a velocidade do navio, sendo relativamente complexa de ser reproduzida matematicamente. Vale ressaltar que a publicação de Jilun, Zhaobing e Shengxie (2014) não foi publicado em periódico especializado da área da engenharia naval e contém um provável erro de prefixo do sistema internacional, em seu artigo “The basic impact load model on deep water pier-ship collision”, que trazem valores de força em meganewton (MN), quando supomos que ao certo, seria quilonewton (kN), portanto, no decorrer do trabalho, será usado valores em quilonewton.

É visível 3 estágios: ascensão, declívio suave antes que o corpo se rompa e o declívio rápido (depois do ponto de inflexão) durante o período de ruptura.

Figura 5 - Características das típicas curvas de força de impacto.



Fonte: Adaptado de Miao Jilun; Wang Zhaobing; Xiao Shengxie. (2014, p. 317).

O estágio de ascensão é onde o contato está iniciando, portanto, a força impactante é ainda relativamente baixa e se dá em curto período de tempo. Depois que a estrutura começa a romper, haverá uma ampla gama de superfície em contato, e é nesse momento que a força de impacto aumentará e chegará a seu ápice. Com a distorção elástica e plástica do material que compõe o navio, juntamente com a flexão do próprio, o estágio de subida diminui. O estágio de declínio aumenta com a elevação da velocidade. Por fim, a força cairá rapidamente com a separação dos corpos. De acordo com as curvas de impactos, Jilun, Zhaobing e Shengxie. (2014) percebe que a força de colisão (impacto) apresenta mudanças complexas e difíceis de serem estudadas, mas há sempre um único pico (força máxima de colisão).

Com o crescimento da tecnologia, as análises de elementos finitos (Finite Element Analysis - FEA) vêm se desenvolvendo ainda mais. O problema de colisão de navio-estrutura teve maior facilidade de ser desenvolvido com o auxílio dessa tecnologia, já que nela é possível descrever com precisão as formas geométricas complexas. Então para desenvolver a expressão de força máxima de colisão, Jilun, Zhaobing e Shengxie (2014) utilizou do Método de Elementos Finitos (Finite Element Method - FEM), variando as embarcações e a velocidade de colisão. Para a simulação feita por Jilun, Zhaobing e Shengxie (2014) foram analisadas as seguintes embarcações vistas na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros e características das embarcações simuladas.

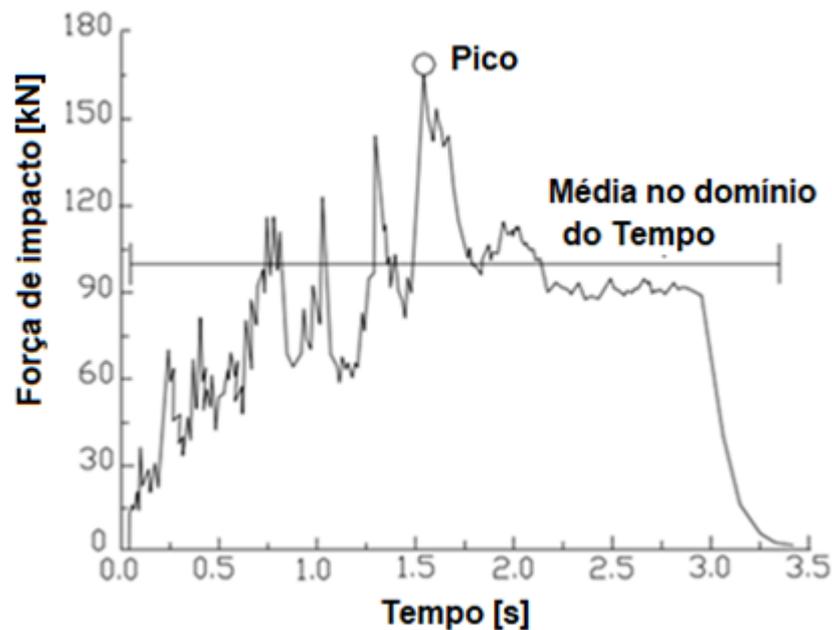
Peso Morto - DWT [t]	3000	5000	5000	12000	52300
Deslocamento [t]	3962	6710	7700	16700	62000
Comprimento - L [m]	99,9	109,0	137,0	190,0	86,8
Comprimento entre perpendiculares (L_{pp}) [m]	94,0	99,8	128,0	182,0	83,0
Boca moldada [m]	16,8	19	22,4	32,26	16,2
Calado moldado [m]	7,8	7,7	11,0	17,2	4,7
Pontal [m]	6,1	5,0	7,8	12,2	2,8
Altura da proa H_s [m]	11,0	11,0	12,0	20,0	7,0
Coefficiente de Bloco C_b	0,696	0,776	0,746	0,854	0,837
Tipo da proa	Bulbosa	Bulbosa	Tipo V	Bulbosa	Bulbosa

Fonte: Adaptado de Miao Jilun; Wang Zhaobing; Xiao Shengxie. (2014, p. 320).

Após a criação da malha que melhor se adapta ao estudo feito e gerado os resultados da simulação, chegou-se ao comportamento da força de impacto em função do tempo, conforme representado na Figura 6. Na qual a força média no domínio do tempo é dada pela definição de impulso, como representado pela Equação (6).

$$F_{méd} = Impulso/tempo \quad (6)$$

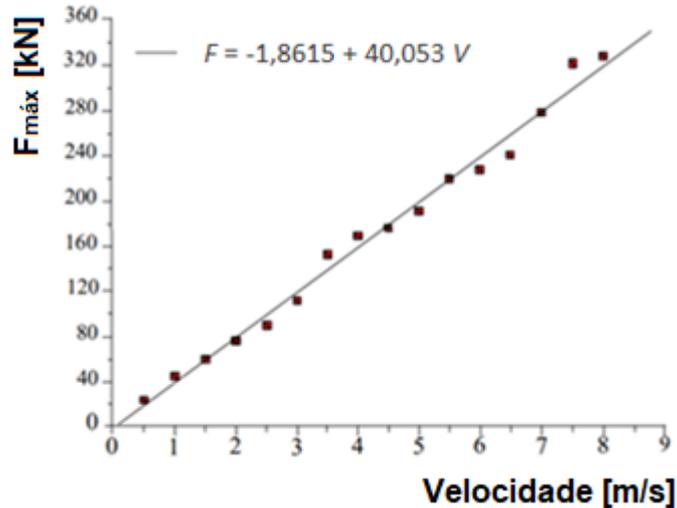
Figura 6 - Definição de carga de impacto equivalente.



Fonte: Adaptado de Miao Jilun; Wang Zhaobing; Xiao Shengxie. (2014, p. 321).

Jilun, Zhaobing e Shengxie (2014) conclui que a força de impacto estático equivalente é aumentada com o aumento da velocidade, Figura 7. As forças de impacto máximas de diferentes experimentos crescem linearmente. Então, a equação da reta ($F = -1,8615 + 40,053V$) pode ser usada para conferência.

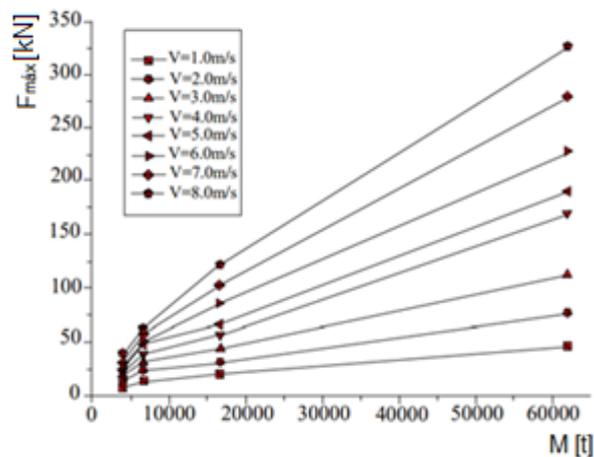
Figura 7 - Curva relacionada ao navio de 50000 toneladas de peso morto (*DWT*).



Fonte: Adaptado de Miao Jilun; Wang Zhaobing; Xiao Shengxie. (2014, p. 321).

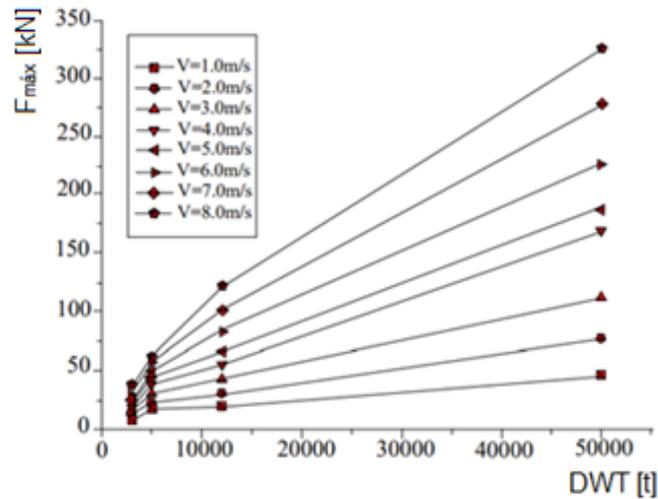
Segundo Jilun, Zhaobing e Shengxie. (2014), ao atingir uma certa velocidade, quanto mais pesado o navio, mais energia cinética possui, a força impactante será maior e o tempo de duração mais longo. As Figuras 8 e 9 revelaram a relação entre a força máxima pela massa e pelo *DWT*, respectivamente, em várias velocidades. A partir delas, pode-se concluir que ao atingir uma velocidade estável, com o aumento da massa do navio, a força de impacto máxima estará aumentando, mas os dados não indicam uma relação linear.

Figura 8 - Relação entre força máxima de impacto e massa.



Fonte: Adaptado de Miao Jilun; Wang Zhaobing; Xiao Shengxie. (2014, p. 322).

Figura 9 - Relação entre força máxima de impacto e peso morto.



Fonte: Adaptado de Miao Jilun; Wang Zhaobing; Xiao Shengxie. (2014, p. 322).

Como a relação entre a força de impacto máxima e a massa do navio não segue um modelo linear, tampouco a de DWT , Jilun Zhaobing e Shengxie (2014) aproximaram a curva por uma função da forma exponencial, chegando as Equações (7) e (8) para a força máxima de colisão em função da massa (M) e do peso morto (DWT), respectivamente

$$F_{máx} = 0,017M^{0,7}V \quad (7)$$

e

$$F_{máx} = 0,031DWT^{0,66}V \quad (8)$$

em que $F_{máx}$ é a força máxima de colisão dada em quilonewton (kN), massa (M) do objeto da colisão dado em tonelada (t), peso morto (DWT) do navio dado em tonelada (t) e a velocidade (V) de impacto dado em metros por segundo (m/s).

Da mesma forma, é possível determinar a força média de colisão entre o navio e a parede rígida, dado em kN, chegando-se as Equações (9) e (10), as quais são função da massa (M) e do peso morto (DWT), respectivamente.

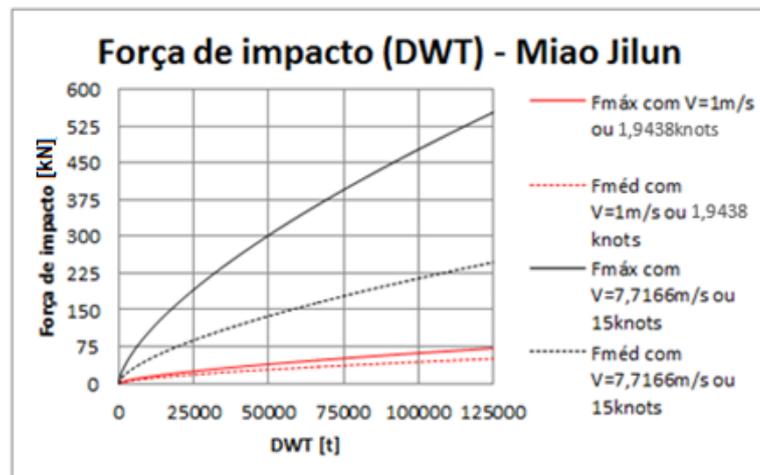
$$F_{méd} = (0,01V + 0,0062)M^{0,66} \quad (9)$$

e

$$F_{méd} = (0,016V + 0,0117)DWT^{0,64} \quad (10)$$

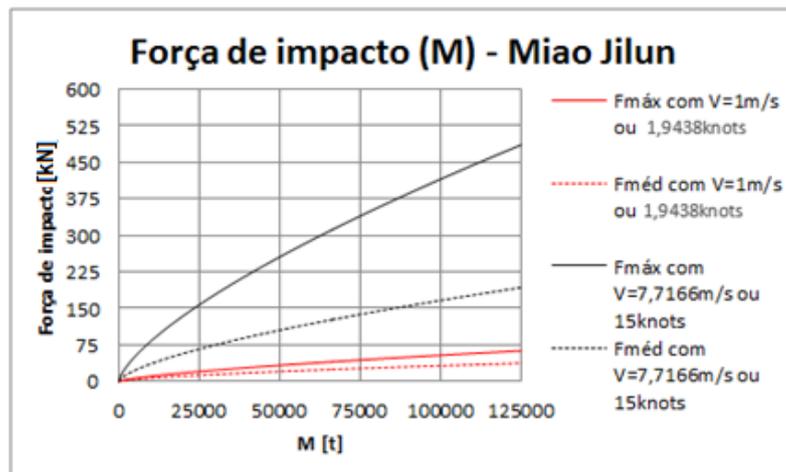
Portanto, para melhor visualização dos resultados das equações de forças média e máxima é apresentado o gráfico que relaciona DWT com forças de impacto em duas velocidades distintas, 1 m/s (1,9438 knots) e aproximadamente 7,2 m/s (15 knots), onde a linha contínua representa a força máxima e a tracejada a força média, Gráfico 4 e o mesmo para o gráfico que relaciona M com forças de impacto, Gráfico 5.

Gráfico 4 - Relação de DWT com as forças de impacto.



Fonte: O Autor (2018).

Gráfico 5 - Relação de M com as forças de impacto.



Fonte: O Autor (2018).

É observado que com o aumento da velocidade, houve um aumento da força de impacto, como mostrado na teoria de Jilun, Zhaobing e Shengxie. (2014).

3 METODOLOGIA

Em primeiro instante será apresentado como chegou-se as equações de força máxima e média de colisão de navio com estrutura estática. Posteriormente a apresentação da teoria de erros propagados.

3.1 MAPEAMENTO DAS EQUAÇÕES DE FORÇA MÁXIMA E MÉDIA DE COLISÃO

Com o intuito de mapear na literatura equações de força máxima e média de colisão foi realizada a revisão bibliográfica em duas ferramentas de pesquisas, sendo elas, Google Scholar e Science Direct, para isso foram selecionados 3 artigos bases:

- *The basic impact load model on deep water pier-ship collision* escrito no *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research* pelos autores Miao Jilun, Wang Zhaobing e Xiao Shengxie (2014);
- *Protection of bridge piers against ship collision* escrito pelo autor Holger Svensson (2009);
- *On the theory of ship collision against bridge piers* escrito pelos autores Reiner Saul e Holger Svensson (1982).

Em cada artigo há palavras-chave que facilitam a busca pelos mesmos. Combinando algumas dessas palavras-chave foi possível buscar por mais informações, tanto em livros, quanto em artigos, as quais relacionam o assunto estudado. Na qual a Tabela 3 mostra as palavras-chave dos artigos selecionados, que facilitaram à busca de novas referências.

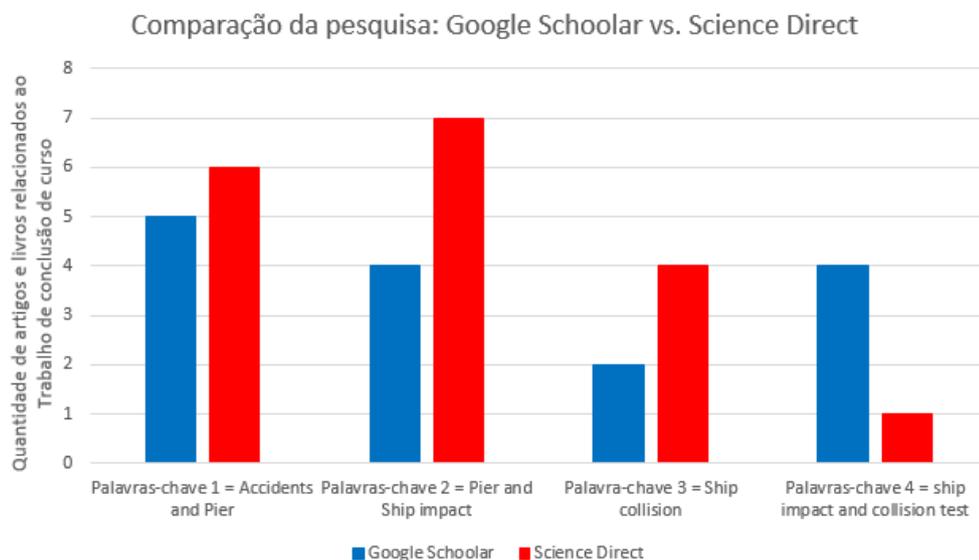
Tabela 3 - Palavras-chave dos artigos base.

Artigos	The basic impact load model on deep water pier-ship collision	Protection of bridge piers against ship collision	On the theory of ship collision against bridge piers
1	Pier	impact forces	collision energy
2	ship impact	collision tests	accidents
3	load	structural protection	impact mechanics
4	finite element method	formula for the impact forces	impact against a stiff pier
5	-	ship collision	-

Fonte: O Autor (2018).

Ao utilizar as ferramentas de pesquisas já citadas, foi criado um gráfico de barras comparando os resultados das buscas sem uma filtragem das referências utilizadas no trabalho, apenas garantindo que não há repetição de referências, Gráfico 6. No eixo horizontal encontram-se as palavras-chave com maior sentido (combinadas ou não) para busca e no eixo vertical a quantidade de resultados encontrados com a pesquisa bibliográfica.

Gráfico 6 - Comparativo Google Scholar e Science Direct para o presente trabalho sem filtragem de resultados.



Fonte: O Autor (2018).

Ao todo foram encontrados 33 estudos, entre artigos e livros, que mostram a dinâmica de colisão de embarcações e neles citam a importância das equações de força máxima e média de colisão. Nesses estudos as equações de Svensson, Miao Jilun e AASHTO são investigadas e aplicadas, e assim, filtrando ainda mais esses resultados, chegou-se as referências citadas no decorrer deste trabalho.

Em seguida, já com os equacionamentos de força de colisão, foi realizado um comparativo, com o intuito de mostrar semelhanças entre os resultados das forças máximas e médias dos diferentes estudos.

3.2 TEORIA DA PROPAGAÇÃO DE ERROS

“Os objetivos da teoria de erros consistem em determinar o melhor valor possível para a grandeza a partir das medições e determinar quanto o melhor valor obtido pode ser diferente do valor verdadeiro” (VUOLO, 2005). De acordo com Armando Albertazzi Gonçalves Júnior e André Rodrigues de Souza (2008) e Vuolo (2005), a Equação (11) estima o erro combinado de uma grandeza $G = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$.

$$\nabla^2(G) = \left(\frac{\partial f}{\partial X_1} \delta X_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial X_2} \delta X_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial X_n} \delta X_n\right)^2 \quad (11)$$

em que $\nabla^2(G)$ é o quadrado da incerteza combinada determinada por medição indireta, f é a função que relaciona G com as grandezas de entrada, $\frac{\partial f}{\partial X_i}$ é a derivada parcial da função f em relação à grandeza de entrada X_i e por fim, δX_i é a incerteza da grandeza de entrada. O modelo matemático para propagação de erros foi utilizado nas equações de força máxima e média de colisão, para posteriormente ser gerado o intervalo de confiança. Os valores de erros das variáveis (ou grandezas de entrada) foram definidos como 2,5%, 5%, 7,5% e 10%.

O cálculo para mensurar o intervalo de confiança foi feito para uma embarcação com peso morto (DWT) de 50.000 toneladas e o mesmo valor, para quando a função é dependente da massa. Outro dado de entrada, é a velocidade da embarcação (para o estudo da AASHTO e de Miao Jilun), assumido como 15 knots (7,72 m/s). Substituindo os dados de entrada na teoria de propagação de erros, se obtêm o intervalo de confiança.

Por último é estudada a influência do coeficiente K no valor do erro propagado (valor que multiplica a incerteza da grandeza de entrada relativa, ou seja, $\frac{\delta X_i}{X_i}$). Esse coeficiente foi criado com o intuito de quantificar a influência de cada erro relativo da variável de entrada no resultado final do erro propagado, isto é, quanto maior o valor de K , mais influência terá sobre o resultado final do erro propagado da função. Sabe-se que a somatória de todos os K 's da equação da teoria de propagação equivale a 100%, portanto, com um regra de 3 simples, se obtêm a influência percentual de cada K no resultado do erro propagado da função de força de colisão.

4 RESULTADO E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão abordados os desenvolvimentos feitos usando a teoria de propagação de erros. Serão aplicados nos estudos de forças máxima e média de colisão entre embarcação e estrutura estática. Começando com o comparativo entre as equações para cálculo de força máxima, seguido do comparativo das equações de força média e a aplicação da teoria de propagação de erros nas 8 equações (4 forças máxima e 4 forças média). Além disso é feita a análise estatística do intervalo de confiança.

4.1 COMPARAÇÃO ENTRE ESTUDOS DE FORÇA MÁXIMA DE COLISÃO

Com todas as equações já mostradas no Capítulo 2, é possível fazer um comparativo entre os estudos, para saber em que ponto se iguala e qual das funções exerce maior valor absoluto de força máxima.

4.1.1 Comparação Svensson com AASHTO

Igualando as Equações (2) e Equação (4), como mostrado a seguir:

$$F_{máx_{Svensson}} = F_{máx_{AASHTO}} \quad (12)$$

ou

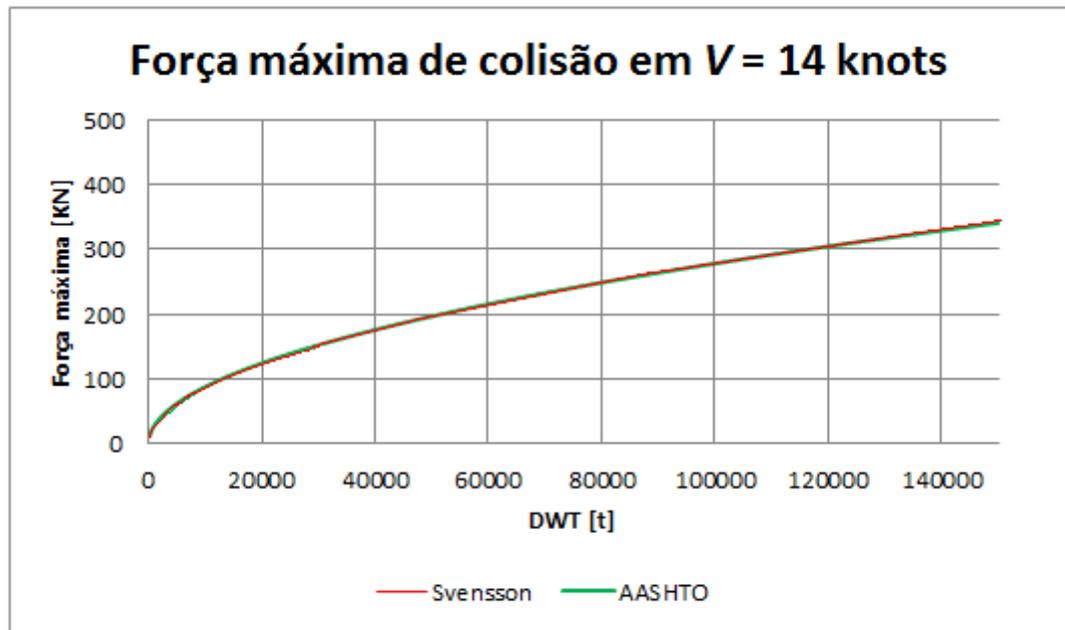
$$0,88\sqrt{DWT} = 0,122\sqrt{DWT} V \quad (13)$$

Desenvolvendo a igualdade acima, chega-se ao resultado

$$V \cong 7,213 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cong 14 \text{ knots.}$$

Conclui-se que em $V = 14$ knots a função que descreve força máxima do estudo de Svensson se iguala a função de força máxima do estudo da AASHTO, em todos os valores de DWT , como mostra o Gráfico 7.

Gráfico 7 - Comparação da força máxima de colisão de Svensson e AASHTO.



Fonte: O Autor (2018).

4.1.2 Comparação Svensson com Miao Jilun

Seguindo o mesmo raciocínio anterior, é feita a igualdade entre as Equações (2) e Equação (8), como mostrado:

$$F_{m\acute{a}x_{Svensson}} = F_{m\acute{a}x_{Miao}} \quad (14)$$

ou

$$0,88 \sqrt{DWT} = 0,031 DWT^{0,66} V \quad (15)$$

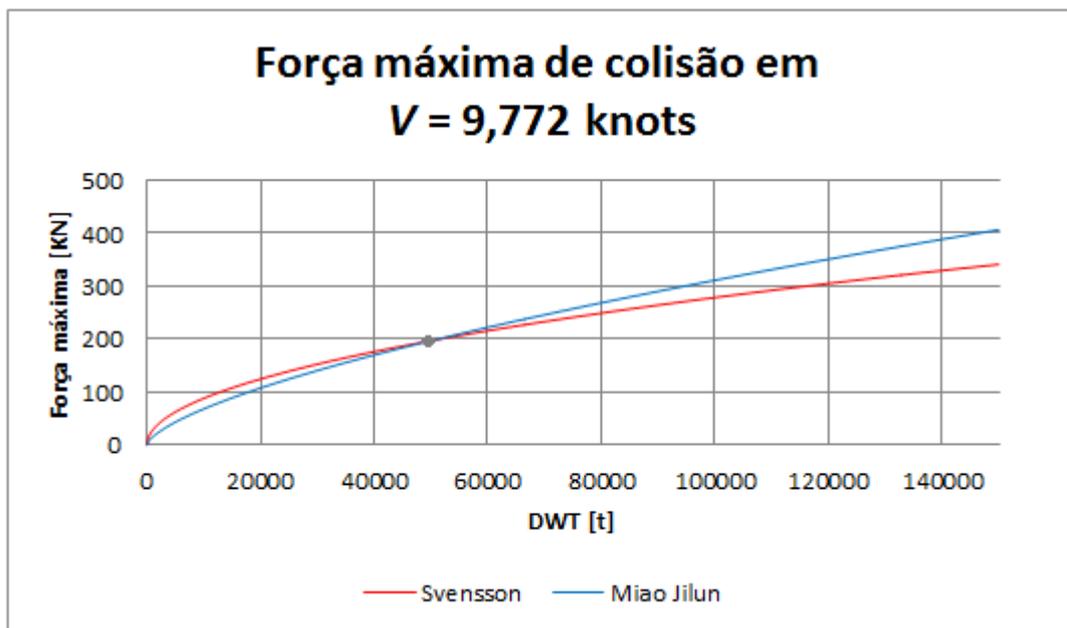
Chega-se à seguinte equação.

$$V \cong 28,387 DWT^{-0,16} \quad (16)$$

Portanto, as curvas dos estudos de Svensson e de Miao Jilun nunca vão se igualar, apenas se cruzarão em um único ponto de *DWT*. Como, por exemplo, em uma embarcação de *DWT* de 50.000 toneladas. A força do estudo de Miao Jilun e de Svensson apenas serão iguais se a colisão ocorrer com a embarcação a velocidade de 9,772 knots, conforme cálculo abaixo e Gráfico 8.

$$V = 28,387(50.000)^{-0,16} \cong 5,027 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cong 9,772 \text{ knots}$$

Gráfico 8 - Comparação da força máxima de colisão de Svensson e Miao Jilun.



Fonte: O Autor (2018).

4.1.3 Comparação AASHTO com Miao Jilun

Igualando as funções que definem a força máxima de colisão do estudo da AASHTO, Equação (4) e a força máxima do estudo de Miao Jilun, Equação (8), tem-se o seguinte desenvolvimento:

$$F_{m\acute{a}x_{AASHTO}} = F_{m\acute{a}x_{Miao}} \quad (17)$$

ou

$$0,122 \sqrt{DWT} V = 0,031 DWT^{0,66} V \quad (18)$$

Como a velocidade V está em ambos os lados da igualdade, é possível chegar em apenas um valor de DWT , como mostrado na sequência.

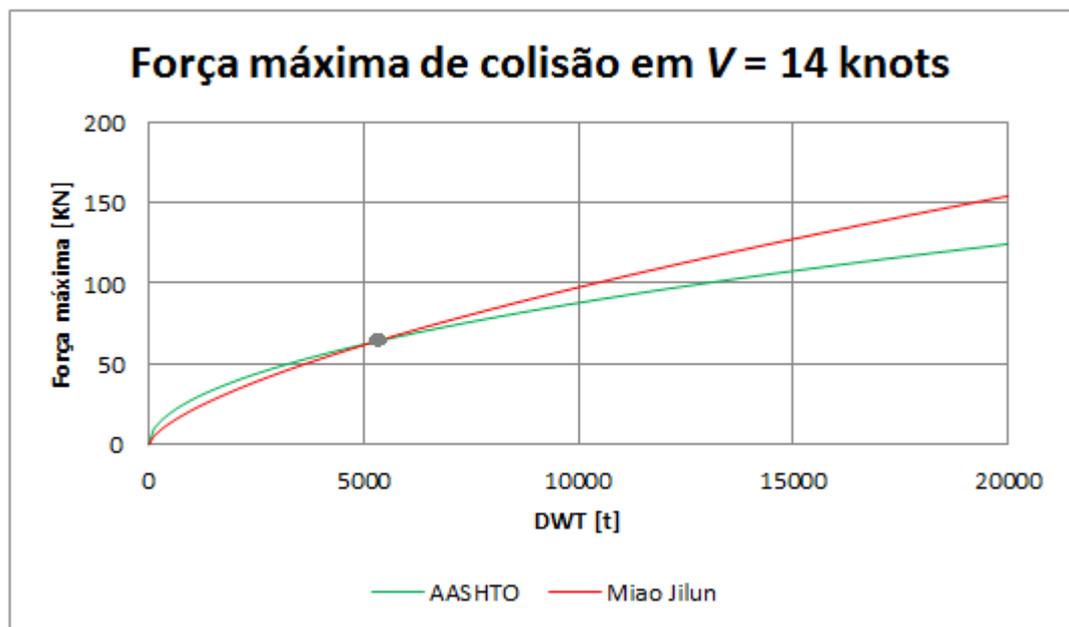
$$0,122 \sqrt{DWT} = 0,031 DWT^{0,66} \quad (19)$$

Resolvendo a igualdade acima, tem-se:

$$DWT \cong 5232,98 \text{ toneladas}$$

Isto significa que, independente da velocidade da embarcação, a força máxima de Miao Jilun e AASHTO sempre serão iguais para uma embarcação de DWT de 5.232,98 toneladas. O Gráfico 9 mostra essa intersecção para uma velocidade de 14 knots.

Gráfico 9 - Comparação da força máxima de colisão de AASHTO e Miao Jilun.



Fonte: O Autor (2018).

4.2 COMPARAÇÃO ENTRE ESTUDOS DE FORÇA MÉDIA DE COLISÃO

Da mesma forma que foi feito as comparações dos estudos de força máxima de colisão anteriormente, são feitos os estudos de força média de colisão, os quais são desenvolvidos aos pares novamente.

4.2.1 Comparação Svensson com AASHTO

Igualando as funções que descrevem as forças média de colisão de Svensson, Equação (3) e da AASHTO, Equação (5).

$$F_{méd_{Svensson}} = F_{méd_{AASHTO}} \quad (20)$$

ou

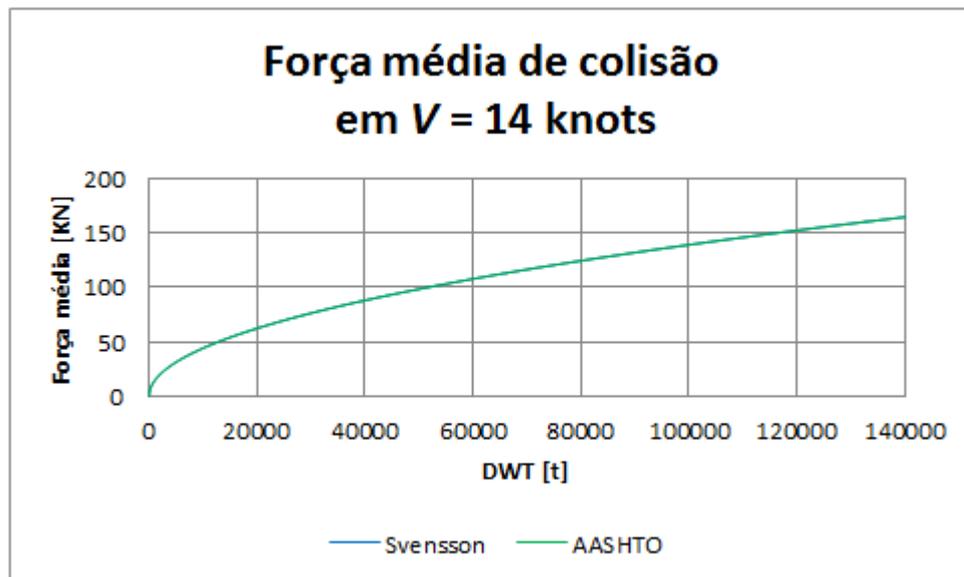
$$\frac{0,88 \sqrt{DWT}}{2} = \frac{0,122 \sqrt{DWT} V}{2} \quad (21)$$

Resolvendo a igualdade, tem-se:

$$V \cong 7,213 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 14 \text{ knots}$$

Portanto, em $V = 14$ knots a força média do estudo de Svensson se iguala a força média do estudo da AASHTO em todos os valores de DWT , Gráfico 10. Esta foi a mesma conclusão tomada ao se desenvolver a igualdade de força máxima de colisão.

Gráfico 10 - Comparação da força média de colisão de Svensson e AASHTO.



Fonte: O Autor (2018).

Novamente ambas linhas do gráfico acima estão sobrepostas, portanto é visível apenas uma das cores, como o acontecido na igualdade de força máxima de Svensson e AASHTO.

4.2.2 Comparação Svensson com Miao Jilun

Igualando as funções que definem a força média de colisão do estudo de Svensson, Equação (3) e a força média do estudo de Miao Jilun, Equação (10), tem-se o seguinte desenvolvimento.

$$F_{méd_{svensson}} = F_{méd_{Miao}} \quad (22)$$

ou

$$\frac{0,88 \sqrt{DWT}}{2} = (0,016 V + 0,0117) DWT^{0,64} \quad (23)$$

Ao isolar a velocidade V , tem-se a seguinte expressão.

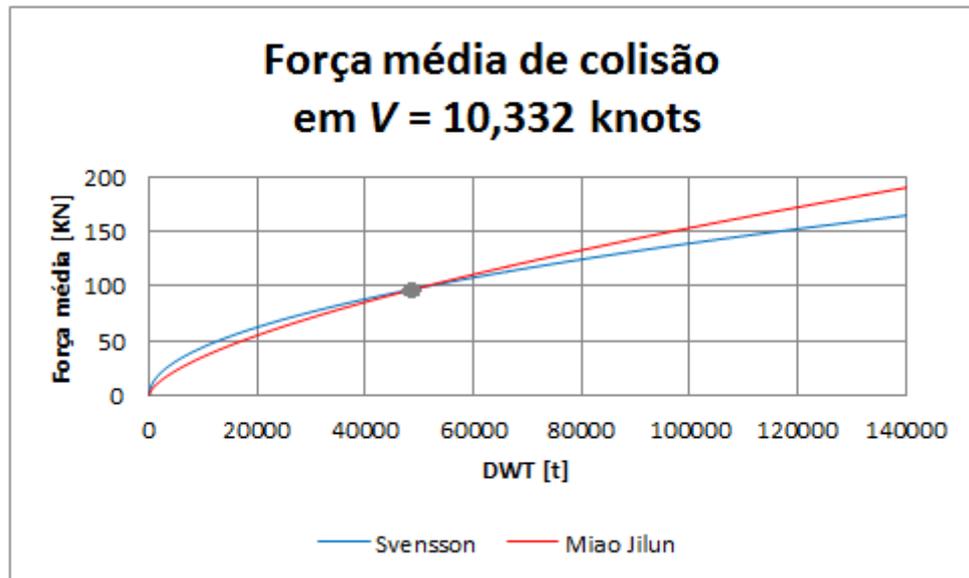
$$V \cong 27,5 DWT^{-0,14} - 0,73125 \quad (24)$$

As curvas dos estudos de Svensson e de Miao Jilun nunca irão se igualar, apenas terão o mesmo valor em um único ponto de DWT .

Em uma embarcação de DWT de 50.000 toneladas, por exemplo, a força média de colisão do estudo de Svensson e Miao Jilun apenas vão se igualar se a colisão ocorrer com a embarcação a uma velocidade de 10,332 knots, cálculo na sequência e Gráfico 11.

$$V = 27,5(50.000)^{-0,14} - 0,73125 = 5,315 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 10,332 \text{ knots}$$

Gráfico 11 - Comparação da força média de colisão de Svensson e Miao Jilun.



Fonte: O Autor (2018).

4.2.3 Comparação AASHTO com Miao Jilun

Por fim, é igualado a Equação (5) com a Equação (10), as quais são desenvolvidas a seguir.

$$F_{méd_{AASHTO}} = F_{méd_{Miao}} \quad (25)$$

ou

$$\frac{0,122\sqrt{DWT}V}{2} = (0,016V + 0,0117)DWT^{0,64} \quad (26)$$

Novamente isolada a velocidade V, chega-se à seguinte equação.

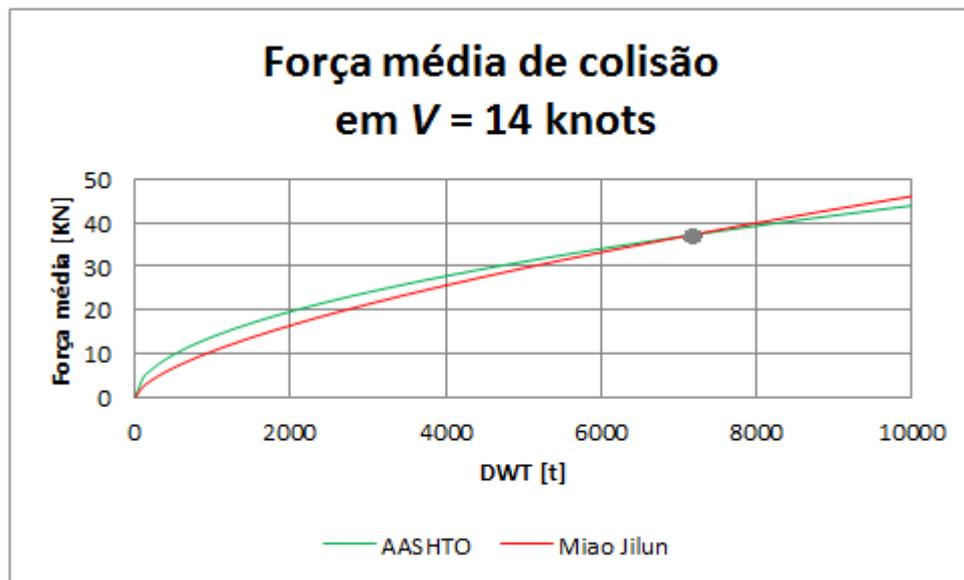
$$V = \frac{0,0117}{0,061 DWT^{-0,14} - 0,016} \quad (27)$$

Do desenvolvimento, tira-se a conclusão que as curvas dos estudos da AASHTO e de Miao Jilun nunca vão se igualar, apenas se interceptam em um único ponto de DWT e em velocidade específica. Mas em modos reais, essa intersecção é quase inexistente, como

mostrado na situação de uma embarcação navegando a 14 knots = 7,202 m/s, em que é preciso que a embarcação tenha 7105,1 toneladas de *DWT*. O que é um número muito baixo para embarcações mercantes já que nos estudos foram testados embarcações graneleiras (*DWT* muito mais alto). Demonstração do cálculo na sequência, juntamente com o Gráfico 12.

$$7,202 = \frac{0,0117}{0,061 DWT^{-0,14} - 0,016} \rightarrow DWT \cong 7105,1 \text{ toneladas}$$

Gráfico 12 - Comparação da força média de colisão da AASHTO e Miao Jilun.



Fonte: O Autor (2018).

Com tudo, tem-se todas as igualdades de força de colisão, que trazem pontos importantes em cada equação. Seguindo à aplicação de erros propagados em cada expressão de força máxima e média de colisão de navio com estrutura estática.

4.3 APLICAÇÃO DA TEORIA DOS ERROS

Ao se combinar diversas grandezas em uma função (contínua e derivável) é possível estimar a incerteza combinada, tanto correlacionada como não-correlacionada. Será tratado nesta seção apenas medições não correlacionadas, em que as expressões de forças de colisão máxima e média são foco deste estudo.

Com o conhecimento adquirido na Seção 3.2 será possível encontrar a equação de estimativa de erro de todas as expressões de força máxima e média de colisão, tratadas neste estudo.

4.3.1 Teoria de propagação de erros aplicada às forças máximas de colisão

4.3.1.1 Equação de Svensson

Cada termo da equação desenvolvida por Svensson pode ter possíveis erros associados as medições indiretas. Portanto, para dimensionar essas incertezas (erros), o processo é iniciado com a mudança da constante, para uma variável qualquer, como mostrado na equação a seguir.

$$F_{m\acute{a}x} = 0,88 \sqrt{DWT} = \alpha \sqrt{DWT} \quad (28)$$

Resultando em uma função dependente de α e DWT .

$$F_{m\acute{a}x} = F_{m\acute{a}x}(\alpha, DWT) \quad (29)$$

Aplicando o cálculo de propagação de erro, na equação (28), obtemos:

$$\nabla^2 F_{m\acute{a}x} = \left(\frac{\partial F_{m\acute{a}x}}{\partial \alpha} \delta \alpha \right)^2 + \left(\frac{\partial F_{m\acute{a}x}}{\partial DWT} \delta DWT \right)^2 \quad (30)$$

Calculando as derivadas parciais de $F_{m\acute{a}x}$ em relação a α e DWT , encontra-se:

$$\frac{\partial F_{m\acute{a}x}}{\partial \alpha} = \sqrt{DWT} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{\alpha} \quad (31)$$

e

$$\frac{\partial F_{m\acute{a}x}}{\partial DWT} = \frac{\alpha}{2\sqrt{DWT}} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{2DWT} \quad (32)$$

Substituindo os resultados obtidos, Equações (31) e (32) na Equação (30), podemos representar o erro relativo quadrático, Equação (33) e o erro, Equação (34), respectivamente dados por:

$$\left(\frac{\nabla F_{m\acute{a}x}}{F_{m\acute{a}x}}\right)^2 = K_1 \left(\frac{\delta\alpha}{\alpha}\right)^2 + K_2 \left(\frac{\delta DWT}{DWT}\right)^2 \quad (33)$$

e

$$\nabla F_{m\acute{a}x} = F_{m\acute{a}x} \sqrt{K_1 \left(\frac{\delta\alpha}{\alpha}\right)^2 + K_2 \left(\frac{\delta DWT}{DWT}\right)^2} \quad (34)$$

em que $K_1 = 1$ e $K_2 = \frac{1}{4}$.

4.3.1.2 Equação AASHTO

O mesmo procedimento foi realizado para a equação AASHTO, em que trocou-se o valor da constante por uma variável, já que nesta pode haver possíveis valores de erros associados as medições indiretas , com expressão:

$$F_{m\acute{a}x} = 0,122\sqrt{DWT}V = \gamma\sqrt{DWT}V \quad (35)$$

resultando uma função dependente de três variáveis, ou seja,

$$F_{m\acute{a}x} = F_{m\acute{a}x}(\gamma, DWT, V) \quad (36)$$

Aplicando a teoria de propagação de erros, para a Equação (35), temos:

$$\nabla^2 F_{m\acute{a}x} = \left(\frac{\partial F_{m\acute{a}x}}{\partial \gamma} \delta\gamma\right)^2 + \left(\frac{\partial F_{m\acute{a}x}}{\partial DWT} \delta DWT\right)^2 + \left(\frac{\partial F_{m\acute{a}x}}{\partial V} \delta V\right)^2 \quad (37)$$

As derivadas parciais são dadas por:

$$\frac{\partial F_{m\acute{a}x}}{\partial \gamma} = \sqrt{DWT}V = \frac{F_{m\acute{a}x}}{\gamma}, \quad (38)$$

$$\frac{\partial F_{m\acute{a}x}}{\partial DWT} = \frac{\gamma}{2\sqrt{DWT}}V = \frac{F_{m\acute{a}x}}{2DWT} \quad (39)$$

e

$$\frac{\partial F_{m\acute{a}x}}{\partial V} = \gamma\sqrt{DWT} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{V}. \quad (40)$$

O erro relativo quadrático e o erro são, respectivamente, dados por:

$$\left(\frac{\nabla F_{m\acute{a}x}}{F_{m\acute{a}x}}\right)^2 = K_3 \left(\frac{\delta\gamma}{\gamma}\right)^2 + K_4 \left(\frac{\delta DWT}{DWT}\right)^2 + K_5 \left(\frac{\delta V}{V}\right)^2 \quad (41)$$

e

$$\nabla F_{m\acute{a}x} = F_{m\acute{a}x} \sqrt{K_3 \left(\frac{\delta\gamma}{\gamma}\right)^2 + K_4 \left(\frac{\delta DWT}{DWT}\right)^2 + K_5 \left(\frac{\delta V}{V}\right)^2} \quad (42)$$

em que $K_3 = K_5 = 1$ e $K_4 = \frac{1}{4}$.

4.3.1.3 Equação de Miao Jilun em função de M e DWT

Com a equação descrita por Miao Jilun, foi necessário fazer a troca de constante para uma variável por duas vezes, já que ambas constantes são possíveis acumuladoras de erros. Primeiramente é resolvida a problemática de erros para a função de força máxima dependente da massa da embarcação, como mostrado na sequência.

$$F_{m\acute{a}x} = 0,017M^{0,7}V = \omega M^\sigma V \quad (43)$$

resultando numa função de força máxima de colisão dependente de quatro variáveis, conforme a função:

$$F_{m\acute{a}x} = F_{m\acute{a}x}(\omega, M, \sigma, V) \quad (44)$$

Ao aplicar a teoria de propagação de erros na Equação (43), chegou-se em:

$$\nabla^2 F_{m\acute{a}x} = \left(\frac{\partial F_{m\acute{a}x}}{\partial \omega} \delta \omega \right)^2 + \left(\frac{\partial F_{m\acute{a}x}}{\partial M} \delta M \right)^2 + \left(\frac{\partial F_{m\acute{a}x}}{\partial \sigma} \delta \sigma \right)^2 + \left(\frac{\partial F_{m\acute{a}x}}{\partial V} \delta V \right)^2 \quad (45)$$

As derivadas parciais de cada termo de força máxima são dadas por:

$$\frac{\partial F_{m\acute{a}x}}{\partial \omega} = M^\sigma V = \frac{F_{m\acute{a}x}}{\omega} , \quad (46)$$

$$\frac{\partial F_{m\acute{a}x}}{\partial M} = \omega \sigma M^{\sigma-1} V = \frac{\sigma}{M} F_{m\acute{a}x} , \quad (47)$$

$$\frac{\partial F_{m\acute{a}x}}{\partial \sigma} = \omega V M^\sigma \ln(M) = \sigma \frac{\ln(M)}{\sigma} F_{m\acute{a}x} \quad (48)$$

e

$$\frac{\partial F_{m\acute{a}x}}{\partial V} = \omega M^\sigma = \frac{F_{m\acute{a}x}}{V} . \quad (49)$$

Vale ressaltar, que derivando parcialmente a função de força máxima em relação a σ , foi necessário multiplicar por ele mesmo no numerador e denominador, para que futuramente seja possível encontrar o erro relativo de σ . Substituindo as derivadas, Equações (46) a (49), na Equação (45), encontramos o erro relativo quadrático e o erro, respectivamente, e dados por:

$$\left(\frac{\nabla F_{m\acute{a}x}}{F_{m\acute{a}x}} \right)^2 = K_6 \left(\frac{\delta \omega}{\omega} \right)^2 + K_7 \left(\frac{\delta M}{M} \right)^2 + K_8 \left(\frac{\delta \sigma}{\sigma} \right)^2 + K_9 \left(\frac{\delta V}{V} \right)^2 \quad (50)$$

e

$$\nabla F_{m\acute{a}x} = F_{m\acute{a}x} \sqrt{K_6 \left(\frac{\delta \omega}{\omega} \right)^2 + K_7 \left(\frac{\delta M}{M} \right)^2 + K_8 \left(\frac{\delta \sigma}{\sigma} \right)^2 + K_9 \left(\frac{\delta V}{V} \right)^2} \quad (51)$$

em que $K_6 = K_9 = 1$, $K_7 = \sigma^2$ e $K_8 = [\sigma \ln(M)]^2$.

O processo se repete com a equação de Miao Jilun em função de DWT . As variáveis e constantes da equação de força (possíveis acumuladoras de erros), são substituídas por variáveis quaisquer.

$$F_{máx} = 0,031DWT^{0,66}V = \beta DWT^{\tau}V \quad (52)$$

De forma análoga, chega-se a uma função de quatro variáveis.

$$F_{máx} = F_{máx}(\beta, DWT, \tau, V) \quad (53)$$

Aplicando o método de propagação de erros, chega-se no formato descrito a seguir.

$$\nabla^2 F_{máx} = \left(\frac{\partial F_{máx}}{\partial \beta} \delta \beta \right)^2 + \left(\frac{\partial F_{máx}}{\partial DWT} \delta DWT \right)^2 + \left(\frac{\partial F_{máx}}{\partial V} \delta V \right)^2 + \left(\frac{\partial F_{máx}}{\partial \tau} \delta \tau \right)^2 \quad (54)$$

As derivadas parciais dos termos da força máxima são dados por:

$$\frac{\partial F_{máx}}{\partial \beta} = DWT^{\tau}V = \frac{F_{máx}}{\beta}, \quad (55)$$

$$\frac{\partial F_{máx}}{\partial DWT} = \beta \tau DWT^{\tau-1}V = \tau \frac{F_{máx}}{DWT}, \quad (56)$$

$$\frac{\partial F_{máx}}{\partial V} = \beta DWT^{\tau} = \frac{F_{máx}}{V} \quad (57)$$

e

$$\frac{\partial F_{máx}}{\partial \tau} = \beta V DWT^{\tau} \ln(DWT) = \frac{\tau F_{máx} \ln(DWT)}{\tau}. \quad (58)$$

Mais uma vez é necessário que faça a multiplicação de τ no numerador e no denominador para futuramente aparecer o erro relativo, isso foi feito com a derivada parcial de força máxima em relação a τ , como visto na Equação (58). Substituindo as derivadas, Equações (55) a (58), na Equação (54), encontra-se o erro relativo quadrático e o erro, respectivamente, conforme expressões:

$$\left(\frac{\nabla F_{m\acute{a}x}}{F_{m\acute{a}x}}\right)^2 = K_{10} \left(\frac{\delta\beta}{\beta}\right)^2 + K_{11} \left(\frac{\delta DWT}{DWT}\right)^2 + K_{12} \left(\frac{\delta V}{V}\right)^2 + K_{13} \left(\frac{\delta\tau}{\tau}\right)^2 \quad (59)$$

e

$$\nabla F_{m\acute{a}x} = F_{m\acute{a}x} \sqrt{K_{10} \left(\frac{\delta\beta}{\beta}\right)^2 + K_{11} \left(\frac{\delta DWT}{DWT}\right)^2 + K_{12} \left(\frac{\delta V}{V}\right)^2 + K_{13} \left(\frac{\delta\tau}{\tau}\right)^2} \quad (60)$$

em que $K_{10} = K_{12} = 1$, $K_{11} = \tau^2$ e $K_{13} = [\tau \ln(DWT)]^2$.

4.3.2 Teoria de propagação de erros aplicada às forças médias de colisão

Nesta subsecção, o mesmo desenvolvimento será feito para as forças médias de colisão, ou seja, o intuito é obter expressões que descrevam o erro das expressões que determinam as forças médias.

4.3.2.1 Equação de Svensson

Sabe-se que a força média de colisão desenvolvida por Svensson, é a metade do pico máximo de colisão, visto na teoria do Capítulo 2. Portanto, o desenvolvimento da propagação da força média de colisão ficará muito parecido com o de força máxima.

Para dar início ao processo, o termo constante da equação receberá o valor de uma variável qualquer, a não ser denominador 2, já que ele faz parte da teoria realizada por Svensson, e a expressão fica:

$$F_{m\acute{e}d} = \frac{0,88\sqrt{DWT}}{2} = \frac{\varphi\sqrt{DWT}}{2} \quad (61)$$

em que a expressão ficará dependendo de duas variáveis, tanto de DWT , quanto φ .

$$F_{m\acute{e}d} = F_{m\acute{e}d}(\varphi, DWT) \quad (62)$$

Aplicando a teoria de propagação de erros, para a Equação (61), tem-se:

$$\nabla^2 F_{méd} = \left(\frac{\partial F_{méd}}{\partial \varphi} \delta \varphi \right)^2 + \left(\frac{\partial F_{méd}}{\partial DWT} \delta DWT \right)^2 \quad (63)$$

em que cada derivada parcial é dada por:

$$\frac{\partial F_{méd}}{\partial \varphi} = \frac{1}{2} \sqrt{DWT} = \frac{F_{méd}}{\varphi} \quad (64)$$

e

$$\frac{\partial F_{méd}}{\partial DWT} = \frac{\alpha}{4\sqrt{DWT}} = \frac{F_{méd}}{2DWT} \quad (65)$$

Ao manipular a Equação (63) com as derivadas calculadas, respectivamente representadas pelas Equações (64) e (65), chega-se nos resultados mostrados na Equação (66) e Equação (67).

$$\left(\frac{\nabla F_{méd}}{F_{méd}} \right)^2 = k_1 \left(\frac{\delta \varphi}{\varphi} \right)^2 + k_2 \left(\frac{\delta DWT}{DWT} \right)^2 \quad (66)$$

e

$$\nabla F_{méd} = F_{méd} \sqrt{k_1 \left(\frac{\delta \varphi}{\varphi} \right)^2 + k_2 \left(\frac{\delta DWT}{DWT} \right)^2} \quad (67)$$

em que $k_1 = 1$ e $k_2 = \frac{1}{4}$.

4.3.2.2 Equação AASHTO

Equacionando a força média de colisão da AASHTO, sabe-se que, assim como a de Svensson, ela é a metade da força máxima. Foi substituído o valor da constante da equação por uma variável qualquer.

$$F_{méd} = \frac{0,122\sqrt{DWT}V}{2} = \frac{\vartheta \sqrt{DWT}V}{2} \quad (68)$$

Neste caso, a força média da AASHTO é função de três variáveis, como mostrado abaixo, ou seja, três possíveis fontes de erros.

$$F_{méd} = F_{méd}(\varnothing, DWT, V) \quad (69)$$

Aplicado a teoria de propagação de erros, resultará na seguinte expressão.

$$\nabla^2 F_{méd} = \left(\frac{\partial F_{méd}}{\partial \varnothing} \delta \varnothing \right)^2 + \left(\frac{\partial F_{méd}}{\partial DWT} \delta DWT \right)^2 + \left(\frac{\partial F_{méd}}{\partial V} \delta V \right)^2 \quad (70)$$

As derivadas parciais são:

$$\frac{\partial F_{méd}}{\partial \varnothing} = \frac{1}{2} \sqrt{DWT V} = \frac{F_{méd}}{\varnothing} , \quad (71)$$

$$\frac{\partial F_{méd}}{\partial DWT} = \frac{\gamma}{4\sqrt{DWT}} V = \frac{F_{méd}}{2DWT} \quad (72)$$

e

$$\frac{\partial F_{méd}}{\partial V} = \frac{1}{2} \varnothing \sqrt{DWT} = \frac{F_{méd}}{V} . \quad (73)$$

Substituindo as derivadas, Equações (71) a (73), na Equação (70), encontra-se o erro relativo quadrático e o erro, respectivamente, dados por:

$$\left(\frac{\nabla F_{méd}}{F_{méd}} \right)^2 = k_3 \left(\frac{\delta \varnothing}{\varnothing} \right)^2 + k_4 \left(\frac{\delta DWT}{DWT} \right)^2 + k_5 \left(\frac{\delta V}{V} \right)^2 \quad (74)$$

e

$$\nabla F_{méd} = F_{méd} \sqrt{k_3 \left(\frac{\delta \varnothing}{\varnothing} \right)^2 + k_4 \left(\frac{\delta DWT}{DWT} \right)^2 + k_5 \left(\frac{\delta V}{V} \right)^2} \quad (75)$$

em que $k_3 = k_5 = 1$, $k_4 = \frac{1}{4}$.

4.3.2.3 Equação Miao Jilun em função de M e DWT

Para as equações de força médias de colisão desenvolvidas por Miao Jilun o processo se assemelha, tanto em função da massa M , quanto a equação em função do peso morto DWT . Inicia-se o processo com a mudança das constantes, para uma variável qualquer, como mostrado na equação a seguir.

$$F_{méd} = (0,01V + 0,0062)M^{0,66} = (\rho V + \epsilon)M^i \quad (76)$$

Então, a partir desse momento, a função de força média dependerá de cinco variáveis.

$$F_{méd} = F_{méd}(\rho, V, \epsilon, M, i) \quad (77)$$

Aplicado a teoria de propagação de erros, o equacionamento abaixo ilustra esse processo.

$$\begin{aligned} \nabla^2 F_{méd} = & \left(\frac{\partial F_{méd}}{\partial \rho} \delta \rho \right)^2 + \left(\frac{\partial F_{méd}}{\partial \epsilon} \delta \epsilon \right)^2 + \left(\frac{\partial F_{méd}}{\partial M} \delta M \right)^2 + \left(\frac{\partial F_{méd}}{\partial V} \delta V \right)^2 \\ & + \left(\frac{\partial F_{méd}}{\partial i} \delta i \right)^2 \end{aligned} \quad (78)$$

As derivadas parciais são:

$$\frac{\partial F_{méd}}{\partial \rho} = VM^i = F_{méd} \frac{V}{(\rho V + \epsilon)}, \quad (79)$$

$$\frac{\partial F_{méd}}{\partial \epsilon} = M^i = \frac{F_{méd}}{(\rho V + \epsilon)}, \quad (80)$$

$$\frac{\partial F_{méd}}{\partial M} = iM^{i-1}(\rho V + \epsilon) = i \frac{F_{méd}}{M}, \quad (81)$$

$$\frac{\partial F_{méd}}{\partial V} = \rho M^i = \rho \frac{F_{méd}}{(\rho V + \epsilon)} \quad (82)$$

$$\frac{\partial F_{méd}}{\partial i} = M^i \ln(M)(\rho V + \epsilon) = F_{méd} \ln(M) . \quad (83)$$

Manipulando os termos, chega-se nos seguintes resultados para o erro relativo quadrático e o erro, respectivamente, dados por:

$$\left(\frac{\nabla F_{méd}}{F_{méd}}\right)^2 = k_6 \left(\frac{\delta \rho}{\rho}\right)^2 + k_7 \left(\frac{\delta \epsilon}{\epsilon}\right)^2 + k_8 \left(\frac{\delta M}{M}\right)^2 + k_9 \left(\frac{\delta V}{V}\right)^2 + k_{10} \left(\frac{\delta i}{i}\right)^2 \quad (84)$$

e

$$\nabla F_{méd} = F_{méd} \sqrt{k_6 \left(\frac{\delta \rho}{\rho}\right)^2 + k_7 \left(\frac{\delta \epsilon}{\epsilon}\right)^2 + k_8 \left(\frac{\delta M}{M}\right)^2 + k_9 \left(\frac{\delta V}{V}\right)^2 + k_{10} \left(\frac{\delta i}{i}\right)^2} , \quad (85)$$

em que $k_6 = \left[\frac{V\rho}{(\rho V + \epsilon)}\right]^2$, $k_7 = \left[\frac{\epsilon}{(\rho V + \epsilon)}\right]^2$, $k_8 = \left[\frac{\rho V}{(\rho V + \epsilon)}\right]^2$, $k_9 = (i)^2$ e $k_{10} = [\ln(M)i]^2$.

Como apresentado no começo da subseção, o processo é repetido para a força média de colisão de Miao Jilun em função de DWT , em que as novas constantes serão substituídas por variáveis quaisquer, e a função fica:

$$F_{méd} = (0,016V + 0,0117)DWT^{0,64} = (\theta V + \phi)DWT^j \quad (86)$$

e

$$F_{méd} = F_{méd}(\theta, V, \phi, DWT, j) \quad (87)$$

A forma da teoria de propagação de erros, neste caso, é dada por:

$$\begin{aligned} \nabla^2 F_{méd} = & \left(\frac{\partial F_{méd}}{\partial \theta} \delta \theta\right)^2 + \left(\frac{\partial F_{méd}}{\partial \phi} \delta \phi\right)^2 + \left(\frac{\partial F_{méd}}{\partial DWT} \delta DWT\right)^2 + \left(\frac{\partial F_{méd}}{\partial V} \delta V\right)^2 \\ & + \left(\frac{\partial F_{méd}}{\partial j} \delta j\right)^2 , \end{aligned} \quad (88)$$

em que as derivadas parciais são:

$$\frac{\partial F_{méd}}{\partial \theta} = VDWT^j = F_{méd} \frac{V}{(\theta V + \phi)} , \quad (89)$$

$$\frac{\partial F_{m\acute{a}x}}{\partial \phi} = DWT^j = \frac{F_{m\acute{e}d}}{(\theta V + \phi)}, \quad (90)$$

$$\frac{\partial F_{m\acute{a}x}}{\partial DWT} = DWT^{j-1}j(\theta V + \phi) = F_{m\acute{e}d} \frac{j}{DWT}, \quad (91)$$

$$\frac{\partial F_{m\acute{a}x}}{\partial V} = \theta DWT^j = F_{m\acute{e}d} \frac{\theta}{(\theta V + \phi)} \quad (92)$$

e

$$\frac{\partial F_{m\acute{a}x}}{\partial j} = DWT^j \ln(DWT)(\theta V + \phi) = F_{m\acute{e}d} \ln(DWT). \quad (93)$$

Após realização das devidas manipulações, substituindo os valores das derivadas parciais, Equações (89) a (93), os resultados são mostrados nas Equações (94) e (95), erro relativo quadrático e erro, respectivamente, como segue:

$$\left(\frac{\nabla F_{m\acute{e}d}}{F_{m\acute{e}d}}\right)^2 = k_{11} \left(\frac{\delta\theta}{\theta}\right)^2 + k_{12} \left(\frac{\delta\phi}{\phi}\right)^2 + k_{13} \left(\frac{\delta DWT}{DWT}\right)^2 + k_{14} \left(\frac{\delta V}{V}\right)^2 + k_{15} \left(\frac{\delta j}{j}\right)^2 \quad (94)$$

e

$$F_{m\acute{e}d} = F_{m\acute{e}d} \sqrt{k_{11} \left(\frac{\delta\theta}{\theta}\right)^2 + k_{12} \left(\frac{\delta\phi}{\phi}\right)^2 + k_{13} \left(\frac{\delta DWT}{DWT}\right)^2 + k_{14} \left(\frac{\delta V}{V}\right)^2 + k_{15} \left(\frac{\delta j}{j}\right)^2} \quad (95)$$

em que $k_{11} = \left[\frac{V\theta}{(\theta V + \phi)}\right]^2$, $k_{12} = \left[\frac{\phi}{(\theta V + \phi)}\right]^2$, $k_{13} = (j)^2$, $k_{14} = \left[\frac{\theta V}{(\theta V + \phi)}\right]^2$ e $k_{15} = [\ln(DWT)j]^2$.

4.4 ANÁLISE NUMÉRICA DOS ERROS DAS EXPRESSÕES DE FORÇA MÁXIMA E MDIA

Nesta etapa será abordado o tratamento das equações de propagação de erros, que resultará em um intervalo de confiança e um erro absoluto para cada estudo de força máxima e mdia de colisão. Além disso, será apresentado um gráfico das constantes utilizadas na propagação de erros, que mostra qual tem maior influência no resultado final, assumindo que o erro de cada variável é igual.

4.4.1 Análise da propagação de erros do estudo de Svensson

Sabe-se que a equação de propagação de erros para a força máxima e a força média de colisão são dadas pelas Equações (96) e (97), respectivamente.

$$\left(\frac{\nabla F_{m\acute{a}x}}{F_{m\acute{a}x}}\right)^2 = K_1 \left(\frac{\delta\alpha}{\alpha}\right)^2 + K_2 \left(\frac{\delta DWT}{DWT}\right)^2 \quad (96)$$

e

$$\left(\frac{\nabla F_{m\acute{e}d}}{F_{m\acute{e}d}}\right)^2 = k_1 \left(\frac{\delta\varphi}{\varphi}\right)^2 + k_2 \left(\frac{\delta DWT}{DWT}\right)^2 \quad (97)$$

Com valores de $K_1=k_1=1$ e $K_2=k_2=\frac{1}{4}$, ambas as equações são similares, já que os valores das constantes K são iguais. Portanto, com o mesmo erro relativo das variáveis $\frac{\delta x_i}{x_i}$, o valor do erro propagado será o mesmo. Sabendo disso, a análise de propagação de erros será feita apenas para a força máxima de colisão, e esse valor se estende para a força média. Os dados de entrada são apresentados na Tabela 4. Primeira coluna representando o peso morto (DWT) e a segunda coluna representando o cálculo de força máxima de Svensson, Equação (2).

Tabela 4 - Dados de entrada para a análise de propagação de erros da força máxima de colisão de Svensson

DWT [t]	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]
50000,00	196,77

Fonte: O Autor (2018).

Os resultados obtidos, são apresentados na Tabela 5.

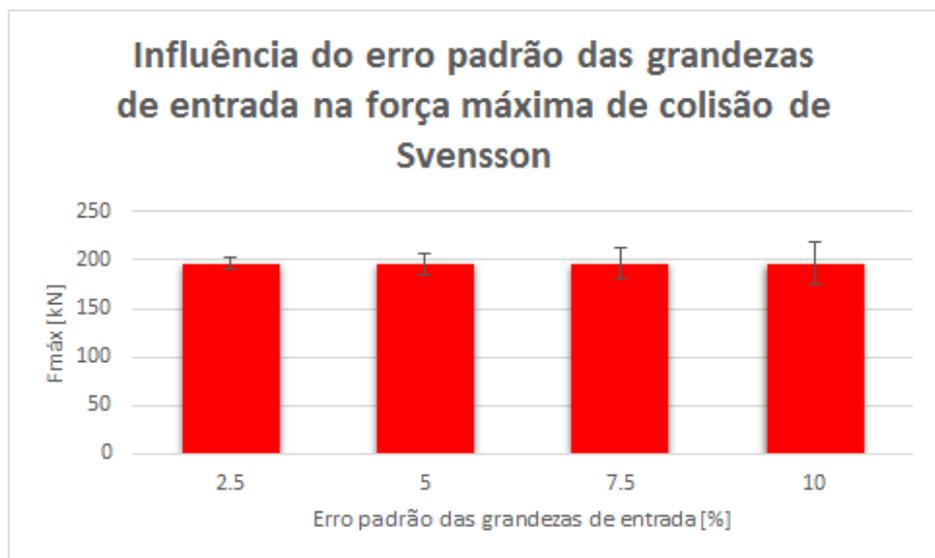
Tabela 5 - Resultados obtidos para força máxima de colisão de Svensso.

Erro [%]	$\left(\frac{\delta\alpha}{\alpha}\right)$	$\left(\frac{\delta DWT}{DWT}\right)$	$F_{m\acute{a}x} \pm \nabla F_{m\acute{a}x}$	$\left(\frac{\nabla F_{m\acute{a}x}}{F_{m\acute{a}x}}\right) 100$ [%]
2,50	0,025	0,025	196,77 \pm 5,50	2,80
5,00	0,050	0,050	196,77 \pm 11,00	5,59
7,50	0,075	0,075	196,77 \pm 16,50	8,39
10,00	0,100	0,100	196,77 \pm 22,00	11,18

Fonte: O Autor (2018).

Pode-se observar que o erro propagado é maior que o erro admitido para cada variável de entrada. O gráfico de barras a seguir mostra o intervalo de confiança da força máxima de colisão, para uma embarcação de *DWT* igual a 50.000 toneladas.

Gráfico 13 - Intervalo de confiança de força máxima de colisão de Svensson para uma embarcação de *DWT* igual a 50.000 toneladas.



Fonte: O Autor (2018).

Na Tabela 5, pode ser observado, que para a embarcação estudada com um erro padrão das variáveis de 5%, o valor de força máxima de colisão é 196,77 kN e varia de mais ou menos 11,00 kN.

Com o intuito de mostrar qual coeficiente K têm maior influência no resultado da propagação de erros, foi construído um Gráfico (14). A soma dos valores de todos os K 's representa 100%, portanto cada K tem uma influência no valor total.

Gráfico 14 - Influência do coeficiente K na propagação de erros de Svensson.



Fonte: O Autor (2018).

Como mostra o gráfico, o valor do coeficiente K_1 tem elevada influência no valor do erro propagado, representando 80%.

4.4.2 Análise da propagação de erros do estudo de AASHTO

Da mesma maneira que aconteceu com os valores dos coeficientes da propagação de erros de Svensson, os valores dos coeficientes para força máxima e média da AASHTO são iguais, ou seja, $K_3 = k_3 = 1$, $K_4 = k_4 = \frac{1}{4}$, $K_5 = k_5 = 1$. Isto mostra que a análise de propagação de erros feita para força máxima de colisão se estende também, para a força média de colisão. Portanto, será feita apenas a análise de propagação de erros para determinar o intervalo de confiança, apenas para a força máxima de colisão.

Os dados de entrada possuem os seguintes valores, ilustrados na Tabela 6, onde o valor da terceira coluna é encontrado pela Equação (4).

Tabela 6 - Dados de entrada para a análise de propagação de erros da força máxima de colisão da AASHTO.

DWT [t]	V [m/s]	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]
50000,00	7,72	210,49

Fonte: O Autor (2018).

Aplicando os dados de entrada na formulação de propagação de erros, Equação (41), tem-se os seguintes resultados, na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados obtidos para força máxima de colisão da AASHTO.

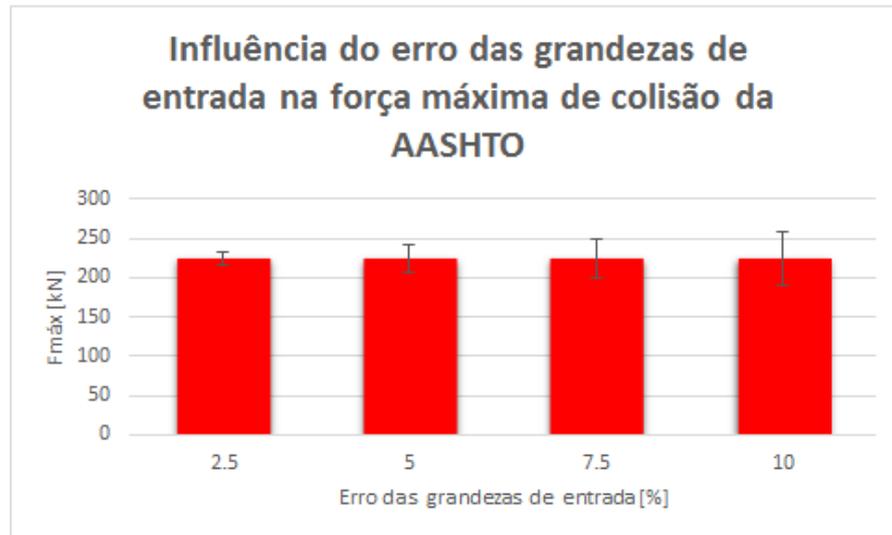
Erro [%]	$\left(\frac{\delta\gamma}{\gamma}\right)$	$\left(\frac{\delta DWT}{DWT}\right)$	$\left(\frac{\delta V}{V}\right)$	$F_{m\acute{a}x} \pm \nabla F_{m\acute{a}x}$	$\left(\frac{\nabla F_{m\acute{a}x}}{F_{m\acute{a}x}}\right) 100$ [%]
2,50	0,025	0,025	0,025	210,49 \pm 7,89	3,75
5,00	0,050	0,050	0,050	210,49 \pm 15,79	7,50
7,50	0,075	0,075	0,075	210,49 \pm 23,68	11,25
10,00	0,100	0,100	0,100	210,49 \pm 31,57	15,00

Fonte: O Autor (2018).

Pode-se observar que o erro propagado é maior que o erro admitido para cada variável de entrada, assim como ocorreu no estudo de Svensson. O gráfico de barras a seguir mostra o intervalo de confiança da força máxima de colisão da AASHTO, para uma embarcação de DWT igual a 50.000 toneladas.

Na Tabela 7, pode ser observado que para a embarcação estudada com um erro relativo das variáveis de 5%, o valor de força máxima de colisão é 210,49 kN com uma variação de 15,79 kN para mais e para menos. Para visualização gráfica, foi realizado o Gráfico 15.

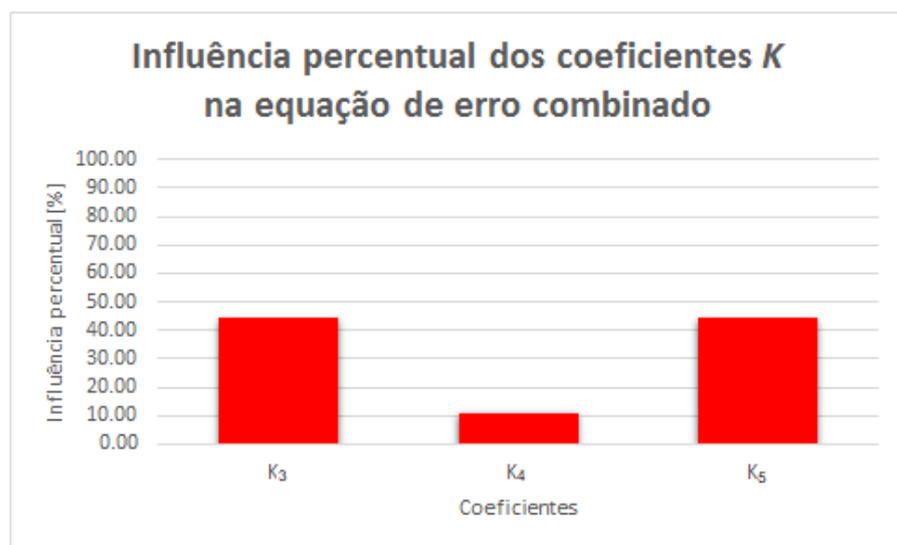
Gráfico 15 - Intervalo de confiança de força máxima de colisão da AASHTO para uma embarcação de peso morto (*DWT*) igual a 50000 toneladas.



Fonte: O Autor (2018).

Têm maior influência no resultado da propagação de erros, os coeficientes K_3 e K_5 como mostrado no Gráfico 16 a seguir, com um total de 44,44%.

Gráfico 16 - Influência do coeficiente K na propagação de erros da AASHTO.



Fonte: O Autor (2018).

4.4.3 Análise da propagação de erros do estudo de Miao Jilun

Ao fazer a análise da propagação de erros de Miao Jilun, pode-se perceber que cada coeficiente K têm um valor diferente. Portanto, para cada força, ou seja, força máxima em função de M , força máxima em função de DWT , força média em função da M e força média em função de DWT , será analisada separadamente.

4.4.3.1 Força máxima em função de M

A fim de determinar o valor do erro propagado, os dados de entrada da formulação de propagação de erros, Equação (50), tem-se os seguintes resultados. Tabela 8.

Tabela 8 - Dados de entrada para a análise de propagação de erros da força máxima de colisão de Miao Jilun em função de M .

M [t]	$F_{máx}$ [kN]	V [m/s]
50000,00	255,36	7,72

Fonte: O Autor (2018).

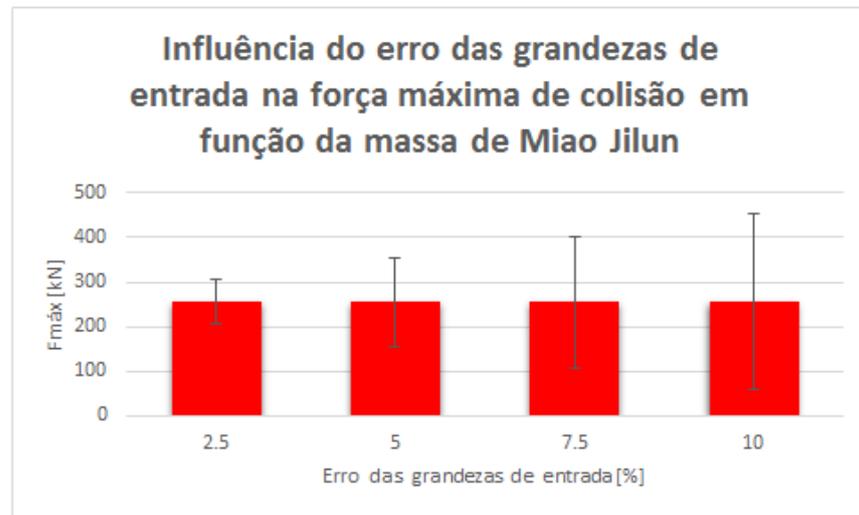
A análise é feita também nos quatro cenários, variando o erro das variáveis de entrada. Os resultados são mostrados para uma embarcação de 50.000 toneladas a uma velocidade de 15 knots (7,72 m/s), Tabela 9, que resultou no intervalo de confiança mostrado no Gráfico 17

Tabela 9 - Resultados da análise de propagação de erros para a força máxima de colisão em função da M de Miao Jilun.

Erro [%]	$\left(\frac{\delta\omega}{\omega}\right)$	$\left(\frac{\delta M}{M}\right)$	$\left(\frac{\delta\sigma}{\sigma}\right)$	$\left(\frac{\delta V}{V}\right)$	$F_{máx} \pm \nabla F_{máx}$	$\left(\frac{\nabla F_{máx}}{F_{máx}}\right) 100$ [%]
2,50	0,025	0,025	0,025	0,025	255,36 \pm 49,39	19,34
5,00	0,050	0,050	0,050	0,050	255,36 \pm 98,78	38,68
7,50	0,075	0,075	0,075	0,075	255,36 \pm 148,17	58,02
10,00	0,100	0,100	0,100	0,100	255,36 \pm 197,56	77,36

Fonte: O Autor (2018).

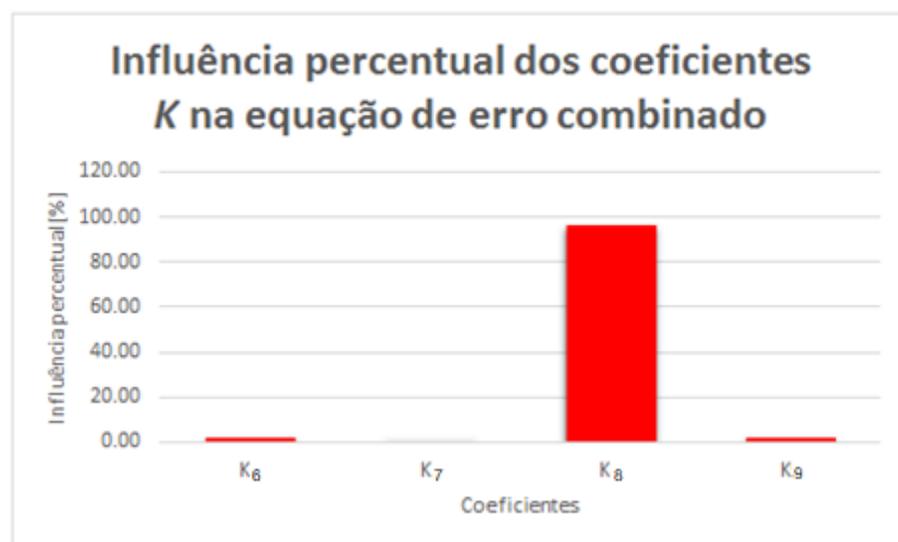
Gráfico 17 - Intervalo de confiança de força máxima de colisão de Miao Jilun em função de M .



Fonte: O Autor (2018).

Destaca-se que o intervalo de confiança é grande, se comparado com os demais estudos. Para determinar qual coeficiente K têm maior influência na propagação do erro, o Gráfico 18 foi criado.

Gráfico 18 - Influência dos coeficientes K 's na propagação de erros da força máxima de colisão de Miao Jilun em função de M .



Fonte: O Autor (2018).

Como pode ser observado no gráfico de barras a cima, para um valor constante de erro das variáveis de entrada, a constante K_g têm a maior influência, com um total de 95,84%.

4.4.3.2 Força máxima em função de DWT

O mesmo procedimento foi feito para a Equação (59). Os dados de entrada são mostrados na sequência. Tabela 10. O valor da terceira coluna é resultado do cálculo da Equação (8).

Tabela 10 - Dados de entrada para a análise de propagação de erros da força máxima de colisão de Miao Jilun em função de *DWT*.

<i>DWT</i> [t]	<i>V</i> [m/s]	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]
50000,00	7,72	302,05

Fonte: O Autor (2018).

Aplicando os dados na Equação (59), tem-se o resultado, na Tabela 11.

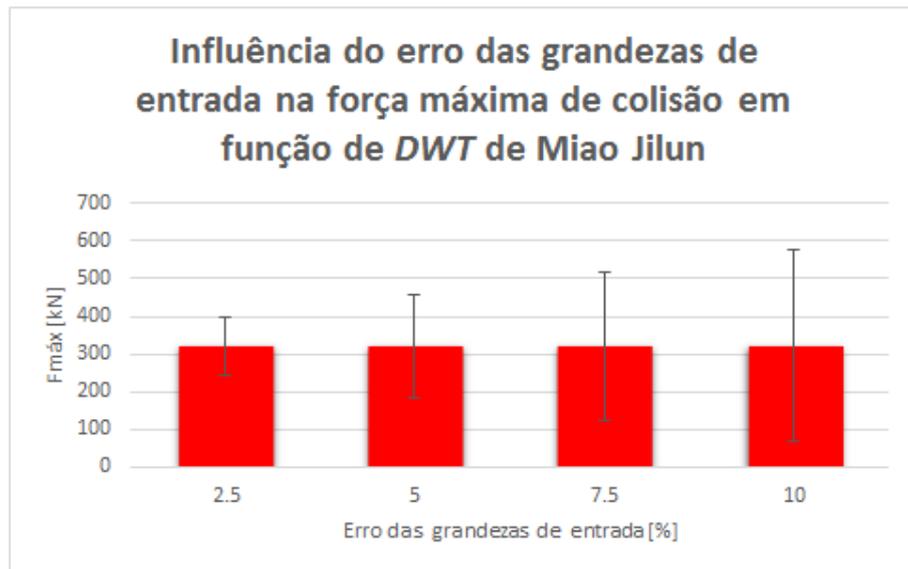
Tabela 11 - Resultados obtidos para força máxima de colisão de Miao Jilun em função de *DWT*.

Erro [%]	$\left(\frac{\delta\beta}{\beta}\right)$	$\left(\frac{\delta DWT}{DWT}\right)$	$\left(\frac{\delta V}{V}\right)$	$\left(\frac{\delta\tau}{\tau}\right)$	$F_{m\acute{a}x} \pm \nabla F_{m\acute{a}x}$	$\left(\frac{\nabla F_{m\acute{a}x}}{F_{m\acute{a}x}}\right) 100$ [%]
2,50	0,025	0,025	0,025	0,025	302,05 ± 75,60	24,04
5,00	0,050	0,050	0,050	0,050	302,05 ± 128,53	42,55
7,50	0,075	0,075	0,075	0,075	302,05 ± 183,71	60,82
10,00	0,100	0,100	0,100	0,100	302,05 ± 238,66	79,01

Fonte: O Autor (2018).

Novamente o intervalo de confiança ficou relativamente grande, quando comparado com as equações de Svensson e AASHTO. Mostrado na Gráfico 19.

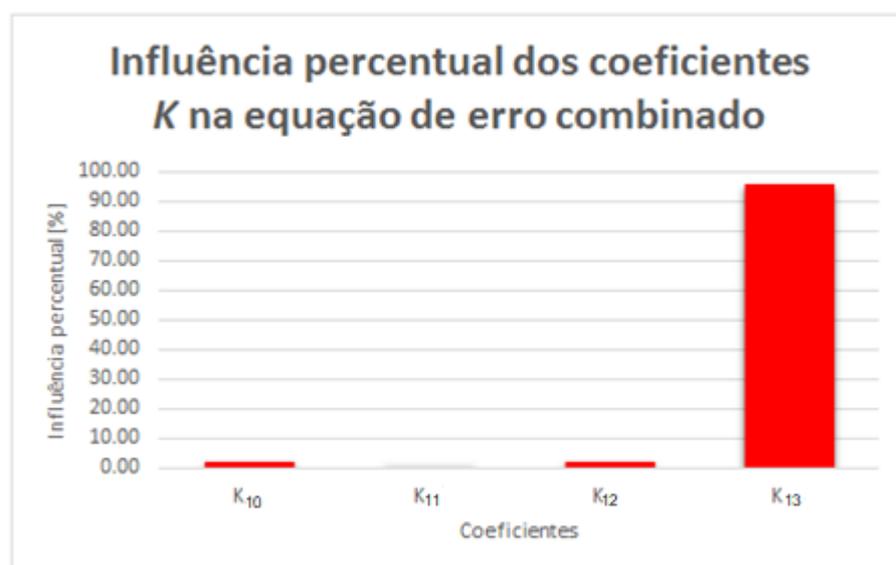
Gráfico 19 - Intervalo de confiança de força máxima de colisão de Miao Jilun em função de *DWT*.



Fonte: O Autor (2018).

Por fim, é apresentado o Gráfico 20, na qual mostra a influência do coeficiente K no resultado da propagação de erro.

Gráfico 20 - Influência do coeficiente K na propagação de erros da força máxima de colisão de Miao Jilun em função de *DWT*.



Fonte: O Autor (2018).

O coeficiente que comanda o valor de erro propagado, considerando que os erros das variáveis de entrada são iguais, é K_{13} , com um total de 95,44%.

4.4.3.3 Força média em função de M

Para a Equação (84), os dados de entrada são mostrados na sequência. Tabela 12. O valor da terceira coluna é resultado da aplicação da Equação (9).

Tabela 12 - Dados de entrada para a análise de propagação de erros da força média de colisão de Miao Jilun em função de M .

M [t]	V [m/s]	$F_{méd}$ [kN]
50000,00	7,72	105,27

Fonte: O Autor (2018).

Com os resultados apresentados na Tabela 13.

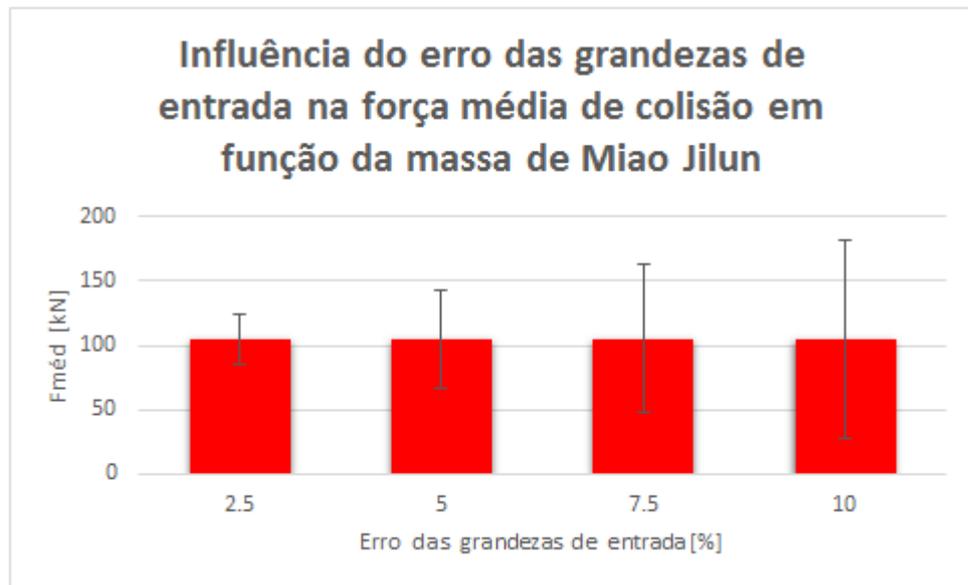
Tabela 13 - Resultados obtidos para força média de colisão de Miao Jilun em função de M .

Erro [%]	$\left(\frac{\delta\rho}{\rho}\right)$	$\left(\frac{\delta\epsilon}{\epsilon}\right)$	$\left(\frac{\delta M}{M}\right)$	$\left(\frac{\delta V}{V}\right)$	$\left(\frac{\delta i}{i}\right)$	$F_{máx} \pm \nabla F_{máx}$	$\left(\frac{\nabla F_{máx}}{F_{máx}}\right) 100$ [%]
2,50	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	105,27 \pm 19,19	18,23
5,00	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	105,27 \pm 38,37	36,45
7,50	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	105,27 \pm 57,56	54,68
10,00	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	105,27 \pm 76,75	72,90

Fonte: O Autor (2018).

É mostrado no Gráfico 21 os valores de força média acompanhada do intervalo de confiança, para todos os valores de erro das variáveis de entrada considerados.

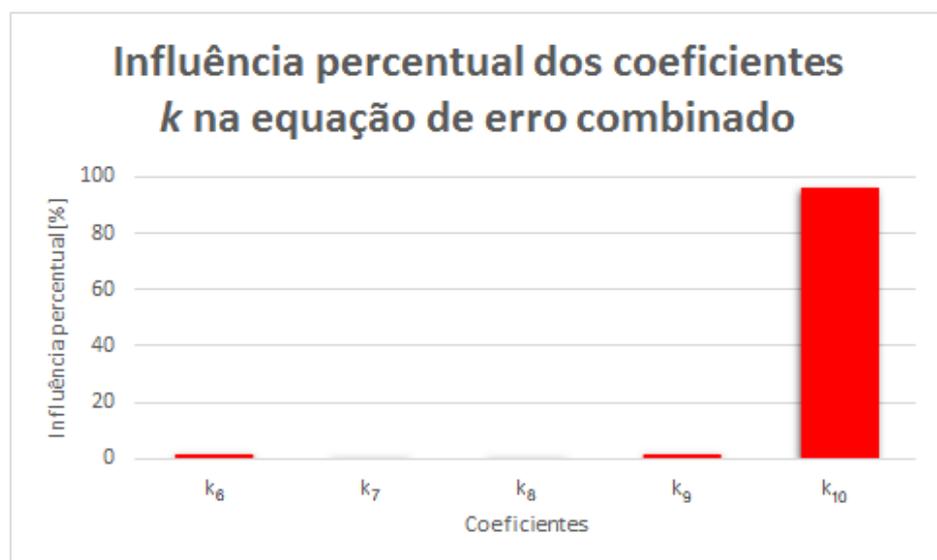
Gráfico 21 - Intervalo de confiança de força média de colisão de Miao Jilun em função de M .



Fonte: O Autor (2018).

Então no Gráfico 22, é possível representar a influência do coeficiente k na propagação do erro.

Gráfico 22 - Influência do coeficiente k na propagação de erros da força máxima de colisão de Miao Jilun em função da M .



Fonte: O Autor (2018).

Portanto, o coeficiente que mais tem influência no erro propagado é k_{10} , com um total de 95,95%, se considerado que o erro das variáveis de entradas são iguais.

4.4.3.4 Força média em função de *DWT*

Para a Equação (94), os dados de entrada são mostrados na sequência, na Tabela 14. O resultado da terceira coluna é feito pela aplicação da Equação (10).

Tabela 14 - Dados de entrada para a análise de propagação de erros da força média de colisão de Miao Jilun em função de *DWT*.

<i>DWT</i> [t]	<i>V</i> [m/s]	$F_{méd}$ [kN]
50000,00	7,72	137,47

Fonte: O Autor (2018).

Com os resultados apresentados na Tabela 15.

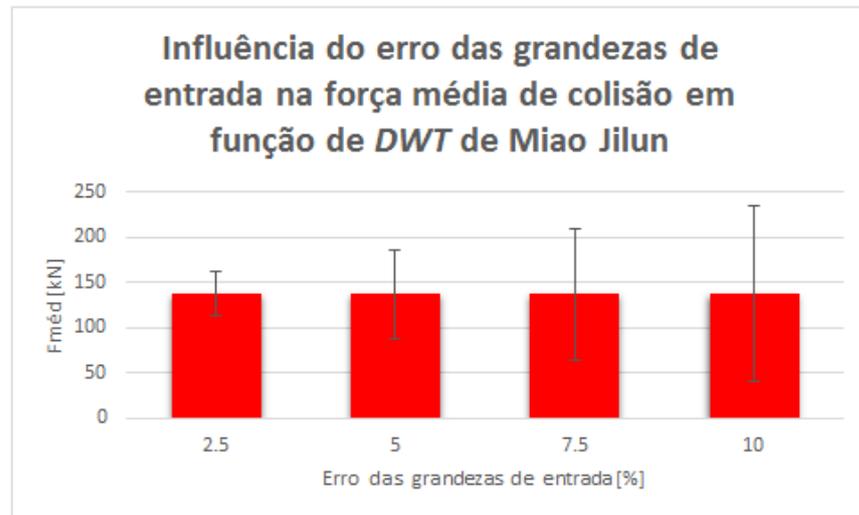
Tabela 15 - Resultados obtidos para força média de colisão de Miao Jilun em função de *DWT*.

Erro [%]	$\left(\frac{\delta\theta}{\theta}\right)$	$\left(\frac{\delta\phi}{\phi}\right)$	$\left(\frac{\delta DWT}{DWT}\right)$	$\left(\frac{\delta V}{V}\right)$	$\left(\frac{\delta j}{j}\right)$	$F_{máx} \pm \nabla F_{máx}$	$\left(\frac{\nabla F_{máx}}{F_{máx}}\right) 100$ [%]
2,50	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	137,47 ± 24,31	17,68
5,00	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	137,47 ± 48,62	35,37
7,50	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	137,47 ± 72,93	53,05
10,00	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	137,47 ± 97,24	70,74

Fonte: O Autor (2018).

É mostrado no Gráfico 23 os valores de força média acompanhada do intervalo de confiança, para todos os valores de erro das variáveis de entrada considerados.

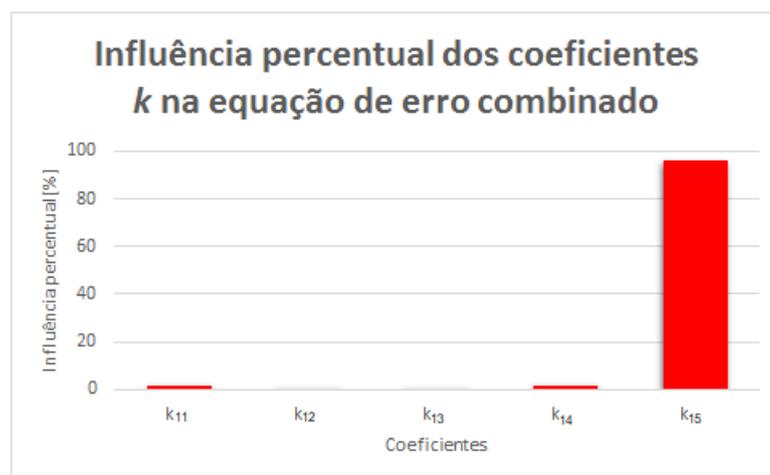
Gráfico 23 - Intervalo de confiança de força média de colisão de Miao Jilun em função de *DWT*.



Fonte: O Autor (2018).

Então no Gráfico 24 é possível representar a influência do coeficiente k na propagação do erro.

Gráfico 24 - Influência do coeficiente k na propagação de erros da força máxima de colisão de Miao Jilun em função de *DWT*.



Fonte: O Autor (2018).

Tem-se que o coeficiente k_{15} tem maior influência no valor do erro propagado, com um total de 95,83%, se o valor do erro nas variáveis de entrada são iguais.

5 CONCLUSÃO

A partir dos cálculos, comparações e mapeamentos realizados neste estudo e das análises dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- Ao se comparar as funções de força de colisão, seja ela máxima ou média desenvolvida por Svensson e pela AASHTO, descobriu-se que em 14 knots as funções têm todos os valores de força iguais, independente do peso morto da embarcação.

- Com a comparação entre Miao Jilun e Svensson, os gráficos de força média e máxima de colisão se cruzarão em um único ponto de peso morto (DWT).

- A força máxima de Miao Jilun e AASHTO sempre serão iguais para uma embarcação de peso morto igual a 5232,98 toneladas. Já para a força média, haverá intersecção das curvas dos estudos apenas em um único ponto de peso morto numa velocidade específica.

- No estudo de Miao Jilun, tanto para força máxima de colisão, quanto para média, o valor do erro propagado é muito maior, se comparado com os estudos de Svensson e AASHTO, para um valor de erro igual em todas as variáveis de entrada.

- É possível estimar um intervalo de confiança para todos os estudos de força de colisão de embarcações com estrutura estática, a partir da expressão de erro propagado.

Com base no conhecimento adquirido no decorrer do trabalho, sugere-se que para possíveis trabalhos futuros seja feito uma pesquisa minuciosa na literatura, para encontrar novas equações empíricas e numéricas de força de colisão e também aplicar o teorema de propagação de erros. Sugere-se, por fim, como neste estudo os valores do erro de cada variável de entrada foram considerados iguais e aumentando de 2,5%, pode-se apresentar o mesmo estudo, com os valores reais de erro das variáveis de entrada, e assim, ter o conhecimento real do erro propagado.

REFERÊNCIAS

AASHTO. **Guide Specifications and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Briedges**. 2 ed. 201 p. Washington, 2009.

ALBERTAZZI G. JR, Armando; SOUZA, André Rodrigues de. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. Barueri: Manole, 2008.

BARBARINI, Luiz Henrique Maiorino. **Análise de risco para embarcações com sistemas de alarmes com foco nos fatores humanos e organizacionais**. 2012. 220 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

FOECKE, Tim. **Metallurgy of the RMS Titanic**. 1998. 18 p. Metallurgy Division, U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, Minnesota, 1998.

FONTDEGLÒRIA, Xavier. **EL PAÍS: O Jornal Global**. Espanha, jun. 2017. Disponível em: <https://brasil.elpais.com/brasil/2017/06/17/internacional/1497677011_962162.html>. Acesso em: 02 set. 2017.

HIBBELER, Russell C.. **Engineering Mechanics: Dynamics**. 10. ed. Toronto: Pearson Education, 2004. 2 v. Tradução de: Mário Alberto Tenan.

JILUN, Miao; ZHAOBING, Wang; SHENGXIE, Xiao. The basic impact load model on deep water pier-ship collision. **Journal of Chemical and Pharmaceutical Research**.China, p. 316- 326. jun. 2014.

SANTOS, G1.**G1 GLOBO: Santos e região**. Santos: Grupo Globo, 2015. Disponível em: <<http://glo.bo/1R8h5T7>>. Acesso em: 29 out. 2017.

SAUL, Reiner , SVENSSON, Holger.: **On the theory of ship collision against bridge piers**. IABSE Proceedings P-51/82, pp. 29–40. feb 1982.

SILVA, Adonias. **G1 GLOBO: Santarém e região**. Santarém: Grupo Globo, 2017. Disponível em: <<https://g1.globo.com/pa/santarem-regiao/noticia/empurrador-de-balsa-naufraga-apos-bater-com-navio-no-rio-amazonas-e-deixa-desaparecidos.ghtml>>. Acesso em: 29 out. 2017.

SPECIALTY, Allianz Global Corporate &. Safety and Shipping. **Allianz Global**, Munich, v. 1, n. 1, p.1-32, mar. 2014. Annual. Disponível em: <<http://www.agcs.allianz.com/assets/PDFs/Reports/Shipping-Review-2014.pdf2>>. Acesso em 24 out. 2017.

SVENSSON, Holger. **Protection of bridge piers against ship collision**. 2009. Disponível em: <http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/puentes_hormigon/sdr561.pdf>. Acesso em: 02 set. 2017.

TELLES, Pedro Carlos da Silva. **História da construção naval no Brasil**. Rio de Janeiro: LAMN; FEMAR, 2001.

VUOLO, J. H. **Fundamento da Teoria dos Erros**. 2. ed. [S.l.]: Blucher, 2005. 240p.