

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA DEPARTAMENTO DE EDUCAÇÃO SUPERIOR DO CEFET/RJ
ENGENHARIA MECÂNICA**

**Daniel Arruda Ferreira
João Marcos Barros Fernandes
Rodrigo Gomes da Silva**

**Análise Estrutural de um *Skid* de Transporte de um Módulo de Conexão
Vertical para uso na área de Óleo e Gás**

**RIO DE JANEIRO
2023**

Daniel Arruda Ferreira
João Marcos Barros Fernandes
Rodrigo Gomes da Silva

**Análise Estrutural Estática de um *Skid* de Transporte de um Módulo de
Conexão Vertical para uso na área de Óleo e Gás**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharéis em Engenharia Mecânica, do Departamento de Educação Superior, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

Coorientador: Hugo Santos

RIO DE JANEIRO
2023

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

F383 Ferreira, Daniel Arruda
Análise Estrutural de um Skid de Transporte de um Módulo de
Conexão Vertical para uso na área de Óleo e Gás / Daniel Arruda
Ferreira, João Marcos Barros Fernandes [e] Rodrigo Gomes da
Silva – 2023.
88f.: il (algumas color.) , enc.

Projeto Final (Graduação). Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2023.
Bibliografia: f. 86-88.
Orientador: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco.
Co-Orientador: Hugo Santos.

1. Engenharia mecânica. 2. Indústria offshore de petróleo –
Transporte. 3. Análise numérica – Processamento de dados.
4. Análise estrutural (Engenharia). I. Fernandes, João Marcos
Barros. II. Silva, Rodrigo Gomes da. III. Pacheco, Pedro Manuel
Calas Lopes (Orient.). IV. Santos, Hugo (Co-Orient.). V. Título.

CDD 620.1

AGRADECIMENTOS GERAIS

Gostaríamos de agradecer aos orientadores deste projeto, Pedro e Hugo, que trouxeram grande enriquecimento com vasto conhecimento tanto no campo acadêmico quanto no industrial, e pelo tempo e paciência despendidos para conversar, revisar, criticar e sanar dúvidas acerca do assunto desenvolvido.

Este agradecimento se estende a todos os professores que contribuíram para nossa formação ao longo de todos os anos de curso, especialmente àqueles que, com sua didática ímpar, nos levaram não apenas a aprender, mas a nos apaixonar pelo conteúdo ensinado.

Somos gratos ao CEFET/RJ por disponibilizar licenças acadêmicas dos softwares office 365 e Matlab, além do espaço e computadores disponíveis na COLAN e a da Biblioteca que disponibilizou livros e demais materiais de consulta.

Não podemos esquecer dos projetos de extensão Venturi Aerodesign e Mudrunner Baja, da COLAN, do Dunamis Pockets e CRU, que foram como uma família e fonte de motivação para seguir em frente ao longo da faculdade.

Gratidão também a TechnipFMC por nos dar acesso a documentos de engenharia e normas técnicas e ao software Orcaflex, bem como a cada engenheiro que se disponibilizou a colaborar com seus conhecimentos, Hugo, Bruno e Eduardo.

Gratidão a ESSS que disponibilizou uso do software Ansys e a computadores de alto processamento, além de disponibilizar livros para consulta acerca do método de elementos finitos, e pelo suporte oferecido pelo Roberto.

A TechnipFMC e ESSS, por proporcionarem nossas vagas de estágio e agora nossos primeiros empregos, e todo o companheirismo nos últimos meses de nossos supervisores e colegas de trabalho.

Por fim, Gratidão a nossas famílias e amigos que nos deram suporte insubstituível ao longo de todas as nossas vidas até aqui. É com muito orgulho que dizemos a vocês, conseguimos!

AGRADECIMENTOS JOÃO

Quero começar agradecendo a meus pais, Vicente e Marinês, por sempre acreditarem em mim. Vocês nunca mediram esforços para me dar educação de qualidade e me dão suporte em todas as áreas da vida. Também a minha irmã Joane, minha melhor amiga, não sei se teria cursado engenharia se você não tivesse me ensinado a resolver equações no ensino fundamental. Amo vocês demais, junto com toda a nossa família.

Sou grato pela equipe Venturi Aerodesign e COLAN que colaboraram muito para o meu desenvolvimento como engenheiro e como pessoa, e por cada pessoa incrível que conheci e amigos que fiz, Mavie, Gabriel, Zé, Túlio, Josimar, Vitor, Diogo, Ana, Lucas e tantos outros.

Agradeço aos amigos do Dunamis Pockets, especialmente André, Daniel, Hosana, Roger, Kellen, Marcella, Nicole, Lucas, Léo e toda a turma do CETUVERJ. Aprendi muito com vocês. Vocês foram meu suporte espiritual e juntos cumprimos essa etapa da missão de Jesus em nossas vidas. *Go Pockets!*

Agradeço a meus pastores, líderes, professores e amigos da Igreja ADVEC Taquara, Gabriel, Cappatto, Ygor, Fernanda, Robson, Frazão, Alexandre, e todos que me deram incentivo e me emprestaram seus ouvidos quando eu precisei. As suas palavras de esperança e conselhos têm feito muita diferença na minha vida.

Agradeço ao Professor César e a equipe de Robótica do Colégio Ferreira Viana onde pude aprender muito e ter certeza de que queria seguir com a engenharia. Lá também fiz amigos para a vida toda, Alef, Luiz e Calvelli.

Também sou grato por meus amigos da “Gang da área Nerd”, Matheus, Caio, Patrícia, Suemy e Felipe que me acompanham desde a escola.

Obrigado aos meus colegas da TechnipFMC, Alexandre, Leonardo, Igor e todo o time da Assistência técnica de controles pelas oportunidades, aprendizado e companheirismo nos últimos dois anos.

Não posso deixar de agradecer ao Daniel e ao Rodrigo, foi incrível formar esse *dream team* com vocês para fechar a faculdade com chave de ouro.

Minha maior gratidão é ao meu Senhor Jesus Cristo, quem faz toda a minha vida ter sentido e tem me presenteado com a Vida Eterna e bênção incontáveis. Nada tem valor sem você, Jesus. Faço minhas as palavras do rei Davi:

"Quem sou eu, ó Senhor Deus, e o que é minha família, para que me trouxesses até aqui? [...] Como alguém pode ser tão privilegiado, ó Senhor Deus? Que mais posso dizer sobre o modo como me honraste? Tu sabes como teu servo é de fato [...] de acordo com tua vontade, fizeste todas estas grandes coisas e as tornaste conhecidas. Ó Senhor, não há ninguém igual a ti! Jamais ouvimos falar de outro Deus como tu!"

Davi, (970 AC). I Crônicas 17:16-20, Bíblia NVT.

AGRADECIMENTOS DANIEL

Gostaria de começar esta seção, agradecendo aos meus pais, Eliana e Sergio, que sempre me apoiaram com todas as minhas decisões e não mediram esforços para garantir que tivesse todas as ferramentas para atingir os meus objetivos. Minha gratidão também se estende para toda minha família que sempre esteve presente para me apoiar nesta jornada, minhas avós, meus falecidos avôs, que não puderam presenciar o começo de minha jornada como engenheiro, mas foram essenciais na minha escolha e incentivo, às minhas tias, aos meus tios e aos meus primos Bia, Giovanna e Guido por estarem sempre ao meu lado e ajudando a expandir meus horizontes com conhecimentos de diversas áreas.

Deixo um agradecimento especial aos amigos que fiz no decorrer da faculdade, formando o Time de Elite: Daniel Utsch, Thales Queiroz, Anna Carolina Mendonça, Vitor Pastor, Victor Bittencourt, Lucas Carramona, Fábio Ramos, Yuri Regatieri, André Luiz, Társis Rezen, Italo da Silva, Thiago Coimbra, Nicholas Nogueira e Alexander de Oliveira.

Agradeço também aos membros da Venturi Aerodesign que providenciaram os melhores anos da minha formação como engenheiro, ajudando a expandir inúmeras habilidades que me ajudaram na vida pessoal e profissional.

Sou grato por todo apoio e felicidade que meus amigos de vida me trouxeram, me ajudando sempre a seguir em frente: João Pedro, Guilherme Bergman, Thiago Fernandes, Pedro Miranda, Vitor Santos, Thiago Fragoso, Alec do Couto, Guilherme Borges e Vinicius Machado

Agradeço aos meus colegas de trabalho da ESSS, em especial ao Roberto Silva, por terem me ajudado nesta etapa final da minha formação e também por terem acreditado em meu potencial como profissional.

Sou grato ao meu grupo de TCC, João Marcos e Rodrigo Gomes, tendo em vista todos os desafios que enfrentamos, verifico e confirmo que vocês tornaram este fim de curso extremamente otimizado com memórias que guardarei para o resto da vida.

Agradeço também aos nossos orientadores, Pedro Manuel e Hugo Santos, por terem nos ajudado nesta etapa tão importante de nossas vidas e agregando conhecimentos que nos ajudarão a ser profissionais melhores.

AGRADECIMENTOS RODRIGO

Agradecer envolve muito mais que palavras, mas uma vida caminhando juntos. Agradeço a Jesus por sempre estar comigo e enxergar propósito em tudo o que faço e ser o motivo de tudo.

Agradeço à minha família, que amo muito, minha mãe, Raquel, por ser um sorriso e abraço que comemora comigo as vitórias e me consola e motiva nos dias ruins, a força dessa mulher me deixa admirado, tamanha sabedoria. Eterna gratidão o meu pai, Rui, que não está entre nós, mas que foi um homem de resiliência sem fim, e são memórias dele e com ele que não me fazem desistir nas dificuldades, mas também é ele que me ajuda a ser feliz quando tem que ser feliz. Agradeço ao meu irmão, João, que com seu braço forte e amor traz o equilíbrio para minha vida, me mostra outras visões e faz-me batalhar pelo seu exemplo de vida. Com ele tive meu primeiro contato com o mundo universitário e das oportunidades que ele guarda por tudo que ele viveu.

Não posso deixar de agradecer a minha grande família, que é meu alicerce maior.

Aos meus amigos, a companhia fez a nossa força para continuar. Quantas memórias guardo participando da equipe de Baja, a Mud Runner, se eu posso falar que vou ser/sou engenheiro, é porque passei nessa equipe e fiz carreira. Memórias no IEEE, desenvolvendo projetos sustentáveis. Quantas tardes na COLAN de muitas risadas. Fiz amigos e amigas incríveis em eventos coordenados pelo professor Pedro Manuel, o Expin 48 e o Invent For the Planet, pude ver professores e alunos que pensam fora da caixa para um futuro melhor.

Quanto ao projeto final, foi uma aventura, conciliar no segundo semestre de 2023 o trabalho integral, disciplinas e projeto final 2, não foi nada fácil, mas agradeço à compreensão de vocês, Daniel e João, foi importante para eu seguir motivado e buscando aprimorar nosso projeto, vocês são pessoas incríveis. Agradeço aos nossos orientadores, Pedro Manuel e Hugo Santos.

Agradeço à minha igreja, a Igreja Batista do Meier, em que tenho laços de amizade e família preciosos, lá pude encontrar motivação para enxergar o que Deus quer de mim nesse mundo e na minha profissão.

Gostaria de agradecer aos meus colegas de trabalho na TechnipFMC que tanto me motivam e inspiram a buscar mais conhecimento e fazer com excelência o que faço.

Isso tudo é por vocês!

“Cientistas estudam o mundo como ele é,
engenheiros criam o mundo que nunca foi.”
(Kármán, Theodore)

RESUMO

FERREIRA, Daniel; FERNANDES, João; SILVA, Rodrigo. **Análise Estrutural de um Skid de Transporte de um Módulo de Conexão Vertical para uso na área de Óleo e Gás**. 2023. 43. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro, 2023.

A indústria petrolífera offshore é fundamental para o suprimento energético mundial, tanto óleo como gás. Por ser realizado em profundidades significativas, portanto, demanda o uso de tecnologias e equipamentos especializados. Para o transporte de diversos equipamentos essenciais, estruturas chamadas de *Skid* são utilizadas, facilitando o transporte e instalação. O presente trabalho avalia diferentes métodos para o modelamento da estrutura, visando, principalmente, a eficiência computacional, visto que uma gama de casos extremamente ampla requer o uso de estruturas deste tipo. Simulações da resposta do conjunto, navio e *Skid*, a ondas regulares foram realizadas através de diferentes modelos, sendo o primeiro mais simples com um grau de liberdade desenvolvido em Matlab, seguido de uma análise com o programa OrcaFlex a fim de alimentar análises secundárias, no Ansys Mechanical, ambos baseados no método de elementos finitos, gerando os resultados de distribuição das tensões em regime transiente e estático. Além disso, em cada modelo foi calculado um fator de amplificação dinâmica para comparação com coeficientes de majoração utilizados em normas vigentes. Resultados indicam que em regime de aplicação de cargas com baixa velocidade, análises estáticas podem representar adequadamente a distribuição de tensões.

Palavras-chave: Método de Elementos Finitos. Resposta Hidrodinâmica. Óleo e Gás. Transporte Offshore. Análise Estrutural.

ABSTRACT

FERREIRA, Daniel; FERNANDES, João; SILVA, Rodrigo. **Structural Analysis of a Transportation Skid of a Vertical Connection Module for use in the Oil & Gas.** 2023. 43. Course Conclusion Paper - Federal Center of Technological Education – Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2023.

The offshore oil industry is essential for the world's energy supply, both oil and gas. As it is carried out at significant depths, it requires the use of specialized technologies and equipment. For the transportation of various essential equipment, structures called *Skid* are used, facilitating transportation and installation. The present work evaluates different methods for modeling the structure, aiming mainly at computational efficiency, since a very wide range of cases requires the use of structures of this type. Simulations of the response of the set, ship and *Skid*, to regular waves were performed using different models, the first being simpler with one degree of freedom developed in Matlab, followed by an analysis with the OrcaFlex program in order to feed secondary analyzes, in Ansys Mechanical, both based on the finite element method, generating the results of stress distribution in transient and static regime. In addition, a dynamic amplification factor was calculated for each model for comparison with multiplicative coefficients used in current standards. Results indicate that in the regime of application of loads with low speed, static analyzes can adequately represent the stress distribution.

Keywords: Finite Element Method. Hydrodynamic Response. Oil & Gas. Offshore Transportation. Structural Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Equipamentos extração <i>offshore</i> . (Fonte: Henanger, Thomas, 2016).....	1
Figura 2 – Conjunto <i>Skid-MCV</i> . (Fonte: TechnipFMC, 2023).....	2
Figura 3 – Navio PLSV. (Fonte: Ferreira, 2013).....	5
Figura 4 – Construção de Onda Irregular. (Fonte: Berends, 2021).	7
Figura 5 – Dados Básicos de Ondas Regular (Fonte: Santos, 2020).....	7
Figura 6 – MCV conectado ao duto Flexível antes da instalação. (Fonte: Silva, 2021).	8
Figura 7 – Módulo de Conexão Vertical. (Pimentel, 2015).	9
Figura 8 – Tipos de Unidades de transporte <i>offshore</i> . (Fonte: DNVGL-ST-E273 – Classificação de POUs, 2016).....	10
Figura 9 – Movimentações da Embarcação e seus nomes. (fonte: BATALHA 2009).	12
Figura 10 – Direções de incidência.	12
Figura 11 – Placa com furo modelada pelo método dos elementos finitos.	14
Figura 12 – Placa com furo complexo modelada pelo método dos elementos finitos.	14
Figura 13 – Comparação entre elementos de primeira e segunda ordem, SHELL181 e SHELL281. (Fonte: Ansys Manual, 2023).	15
Figura 14 – Malha genérica feita com elementos lineares.	16
Figura 15 – Malha genérica feita com elementos quadráticos.	16
Figura 16 – Corpo de linha e perfil associado a ele para elementos de viga.	17
Figura 17 – Elementos de casca, com e sem a representação da espessura.	18
Figura 18 – Esfera modelada com elementos sólidos e seu interior.	18
Figura 19 – Geometria tetraédrica de primeira ordem, com frequência natural de 1617Hz.....	19
Figura 20 – Geometria tetraédrica de segunda ordem com frequência natural de 812Hz.....	19
Figura 21 – Curva de Capacidade do Guindaste. (Fonte: RR Guindastes, 2023).....	23
Figura 22 – Modelo Guindaste-Cabo- <i>Skid</i>	24
Figura 23 – Linha Elástica do Guindaste.....	25
Figura 24 – Sistema Massa-Mola do Guindaste.....	26
Figura 25 – Deslocamento, Velocidade e Aceleração vibratória da massa para o caso mais crítico previsto pela norma referente à classe R60.....	27
Figura 26 – Fator de Amplificação Dinâmica em função da razão entre a frequência de excitação e a frequência natural do sistema.	30
Figura 27 – Fator de Amplificação Dinâmica em função da razão entre a frequência de excitação e a frequência natural do sistema (Região de Operação).	31
Figura 28 – Limite de quebra de onda em função da amplitude e período de onda..	32
Figura 29 – Bóia 6D.	33
Figura 30 – Representação Gráfica OrcaFlex.	34

Figura 31 – Fenômeno <i>Birdcaging</i> (Fonte: Costello, 1990).....	34
Figura 32 – <i>Skid</i> no arranjo de içamento.....	35
Figura 33 – Alinhamento do CG com ponto de içamento.....	36
Figura 34 – Comparação de Movimentos Guindaste e <i>Skid</i>	38
Figura 35 – Variação dos Esforços no Link 5.	39
Figura 36 – <i>Skid</i> modelado com todos os detalhes.....	41
Figura 37 – Detalhamento de geometrias desnecessárias para a estrutura.	41
Figura 38 – Modelo otimizado do <i>Skid</i> para análise pelo MEF.....	42
Figura 39 – Modelo de <i>Skid</i> sendo convertido para casca.....	43
Figura 40 – Região com concentrador de tensões.....	45
Figura 41 – Modelo para análise de convergência.....	46
Figura 42 - Malha Quadrática Sólida, 60mm.	47
Figura 43 – Resultado de tensão, modelo sólido quadrático, vista isométrica superior, 60mm.	48
Figura 44 – Resultado de tensão, modelo sólido quadrático, vista isométrica inferior, 60mm.	48
Figura 45 – Detalhamento da região de tensões máximas, modelo sólido quadrático, 60mm.	49
Figura 46 – Malha Sólida, quadrática, 40mm.	50
Figura 47 – Vista isométrica superior, modelo sólido, quadrático, 40mm.	51
Figura 48 – Vista isométrica inferior, modelo sólido, quadrático, 40mm.	51
Figura 49 – Detalhamento da região de tensões máximas, modelo sólido quadrático, 40mm.	52
Figura 50 – Detalhamento da região crítica comum, modelo sólido quadrático, 40mm.	53
Figura 51 – Malha Sólida, quadrática, 20mm.	54
Figura 52 – Vista isométrica superior, modelo sólido quadrático, 20mm.	55
Figura 53 – Vista isométrica inferior, modelo sólido quadrático, 20mm.	55
Figura 54 – Detalhamento da região de tensões máximas, model modelo sólido quadrático, 20mm.....	56
Figura 55 – Detalhamento da região crítica comum, modelo sólido quadrático, 20mm.	56
Figura 56 – Gráfico expondo quantidade de nós frente a tamanho de elemento.	57
Figura 57 – Tensão máxima e média dos modelos sólidos.....	57
Figura 58 – Deslocamentos impostos no submodelo e sua malha.	59
Figura 59 – Distribuição de tensões no submodelo.....	60
Figura 60 – Malha modelo de casca, 40mm.....	61
Figura 61 – Modelo de casca com 40mm, vista isométrica superior.	61
Figura 62 – Modelo de casca com 40mm, vista isométrica inferior.	62
Figura 63 – Detalhamento da região de tensão máxima, casca 40mm.....	62
Figura 64 – Malha modelo de casca, 20mm.....	63
Figura 65 – Modelo de casca 20mm, vista isométrica superior.....	63

Figura 66 – Modelo de casca 20mm, vista isométrica inferior.....	64
Figura 67 – Detalhamento da região de tensão máxima, casca 20mm.....	64
Figura 68 – Malha modelo de casca, 10mm.....	65
Figura 69 – Modelo de casca 10mm, vista isométrica superior.....	65
Figura 70 – Modelo de casca 10mm, vista isométrica inferior.....	66
Figura 71 – Região de tensões máximas, casca 10mm.....	66
Figura 72 – Número de nós por tamanho de elemento, modelo de casca.....	67
Figura 73 – Tensões médias e máximas por tamanho de elemento, modelo de casca.....	67
Figura 74 – Região crítica comum, modelo de casca, 40mm.....	68
Figura 75 – Região crítica comum, modelo de casca, 20mm.....	68
Figura 76 – Região crítica comum, modelo de casca, 10mm.....	69
Figura 77 – Comparação de resultados entre modelo sólido de casca.....	69
Figura 78 – Resultado da tensão direta, modelo de elementos de viga.....	70
Figura 79 – Modelo simulado <i>Skid</i> , análise transiente.....	72
Figura 80 – Tensões no modelo transiente, vista superior.....	73
Figura 81 – Tensões no modelo transiente, vista inferior.....	73
Figura 82 – Região de máxima tensão, modelo transiente.....	74
Figura 83 – Distribuição de tensões no modelo estático majorado, vista superior....	75
Figura 84 – Distribuição de tensões no modelo estático majorado, vista inferior.....	75
Figura 85 – Distribuição de tensões no modelo estático majorado, região de máxima tensão.....	75
Figura 86 – Reação de rotação, restrição numérica.....	77
Figura 87 - Comparação entre análise transiente e estática majorada pelo FAD Simulado.....	80
Figura 88 – Comparação dos resultados entre um modelo de casca e sólidos com mesmo tamanho de elemento.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classe de equipamentos comparado com amplitude de ondas.	11
Tabela 2 – Parâmetros do sistema.....	24
Tabela 3 – Dados de cada caso testado.	37
Tabela 4 – Esforços no Cabo 5.....	39
Tabela 5 – FAD por classe de operação.	39
Tabela 6 – Comparação de Fatores de Majoração.	80

LISTA DE ABREVIATURAS

a	Amplitude Máxima
a_{max}	Aceleração Máxima de Vibração
ANM	Arvore de Natal Molhada
b	Amortecimento
B	Matriz de Amortecimento
BAP	Base Adaptadora de Produção
d	Lâmina d'Água
D	Deflexão Máxima na ponta da Viga
DAF	Dynamic Amplification Factor
DF	<i>Design Factor</i> (Fator de Projeto)
DNV	Det Norsk Veritas
E	Módulo de Elasticidade
FAD	Fator de Amplificação Dinâmica
g	Gravidade
H	Altura máxima, dobro de a
H_{max}	Altura máxima da onda
H_s	Altura Significativa da Onda
I	Momento de Inércia
K_{cabo}	Rigidez Equivalente do Cabo de Içamento
K_{eq}	Rigidez equivalente do Sistema
$K_{lança}$	Rigidez Equivalente da Lança do Guindaste
$K_{lingdas}$	Rigidez equivalente das Lingadas do <i>Skid</i>
L	Comprimento da Lança do <i>Skid</i>
M_{eq}	Massa Equivalente do Sistema
$M_{lança}$	Massa da Lança do Guindaste
M_{skid}	Massa Do conjunto <i>Skid</i> -MCV
MCV	Módulo de Conexão Vertical
MEF	Método dos Elementos Finitos

MGW	<i>Máximum Gross Weight</i> (Máximo Peso Bruto)
PLSV	<i>Pipe Laying Support Vessel</i>
r	Razão entre Frequência de Vibração e Frequência Natural (ω/ω_n)
R.A.O	<i>Response Amplitude Operator</i>
ROV	Remote Operated Vehicle
t	Instante de Tempo
T	Período da Onda
T_{max}	Período Máximo Teórico da Onda
UOP	Unidade Offshore Portátil
w_0	Distribuição de Peso da Viga (Lança do Guindaste)
X	Deslocamento Vibratório da Massa
\dot{X}	Velocidade Vibratória da Massa
\ddot{X}	Aceleração Vibratória da Massa
$Y(t)$	Deslocamento da Excitação de Base
$Y(x)$	Deflexão Vertical da Viga
$\dot{Y}(t)$	Velocidade da excitação de Base
η	Elevação da Superfície no Mar ao Longo do Tempo
ξ	Fração de Amortecimento
ω	Frequência de Vibração do Sistema
ω_n	Frequência Natural

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	3
1.2	METODOLOGIA	3
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1	OPERAÇÕES OFFSHORE	5
2.2	MÓDULO DE CONEXÃO VERTICAL (MCV)	7
2.3	UNIDADES OFFSHORE PORTÁTEIS (UOP)	9
2.4	CARREGAMENTOS CONSIDERADOS	10
2.5	MOVIMENTOS DE UMA EMBARCAÇÃO	11
2.6	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISE ESTRUTURAL	13
2.6.1	ELEMENTOS DE PRIMEIRA E SEGUNDA ORDEM	15
2.6.2	TIPOS DE ELEMENTOS POR REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA	16
2.6.3	SHEAR LOCKING	18
3	MODELAGEM DOS ESFORÇOS DINÂMICOS	21
3.1	MOVIMENTO CAUSADO PELO OCEANO	21
3.2	MODELAGEM DO SISTEMA GUINDASTE-CABO	22
3.3	ANÁLISE DE RESSONÂNCIA E AMORTECIMENTO	28
4	SIMULAÇÕES HIDRODINÂMICAS EM ELEMENTOS FINITOS	33
4.1	PRÉ-PROCESSAMENTO	33
4.2	PÓS-PROCESSAMENTO	38
5	MODELAGEM ESTRUTURAL DO SKID POR ELEMENTOS FINITOS	40
5.1	CONSIDERAÇÕES NO MODELAMENTO	40
5.2	PRÉ PROCESSAMENTO DE GEOMETRIAS	42
5.3	ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA	44
5.4	SIMULAÇÃO ESTRUTURAL COM MOVIMENTOS DO MAR	70
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
6.1	DISCUSSÃO ACERCA DO FATOR DE AMPLIFICAÇÃO DINÂMICA	78
6.2	ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DO SKID	81
7	CONCLUSÕES	83
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	85
	REFERÊNCIAS	86

1 INTRODUÇÃO

A indústria de extração petrolífera offshore se mostra um setor de alta relevância na indústria mundial. As projeções atuais indicam um grande potencial de crescimento deste setor. Tecnologias mais avançadas permitem o acesso seguro e otimizado de poços cada vez mais profundos, aumentando a capacidade produtiva e a viabilidade financeira.

Para garantir uma operação de extração eficiente do petróleo no fundo do mar são necessários diversos equipamentos de grande complexidade que são altamente sujeitos a danos se não forem propriamente manipulados. A Figura 1 apresenta alguns equipamentos típicos utilizados na extração offshore. Deste modo é requerido o uso de Unidades Offshore Portáteis (UOP), em inglês, *Portable Offshore Units - POU*, definidas de acordo com DNVGL-ST-E273 (2016), para garantir que as etapas de transporte, içamento e por fim instalação do equipamento, sejam feitas mantendo a integridade.

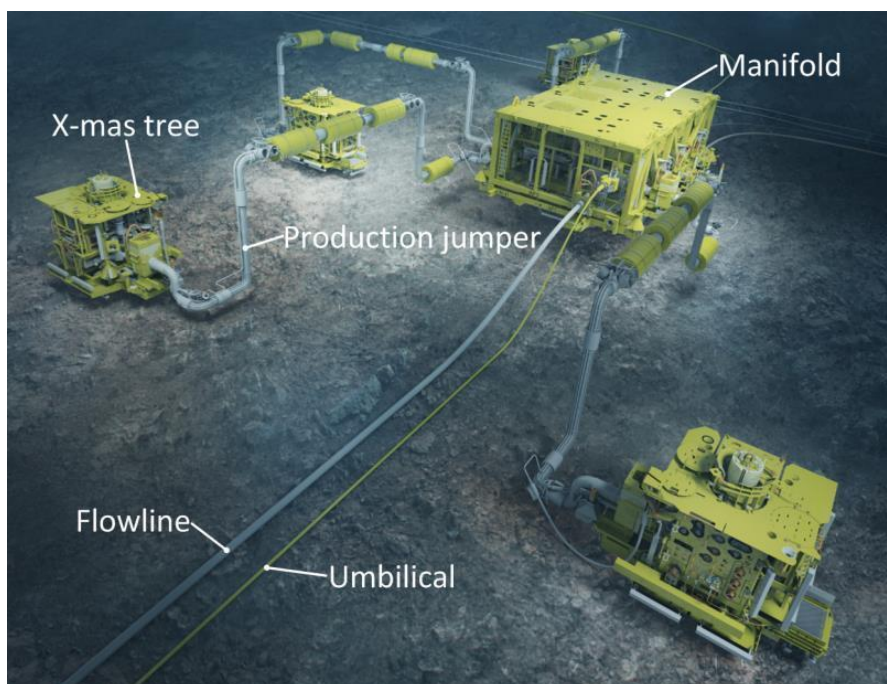


Figura 1 – Equipamentos extração offshore. (Fonte: Henanger, Thomas, 2016).

Uma destas UOPs é chamada de *Skid* e sua boa performance garante que a operação irá ser desenvolvida de maneira mais rápida e segura, em relação a um caso que ele não fosse usado. O *Skid* é submetido a carregamentos dinâmicos durante a

operação de içamento, porém, a abordagem geralmente aplicada pela indústria é o cálculo da estrutura com cargas estáticas, sendo aplicados fatores de amplificação dinâmica (FAD) advindos de normas para avaliar se ocorrerá falha por escoamento.

A Figura 2 mostra o *Skid* que será analisado neste trabalho içado por quatro eslingas, com um Módulo de Conexão Vertical (MCV) em seu interior.

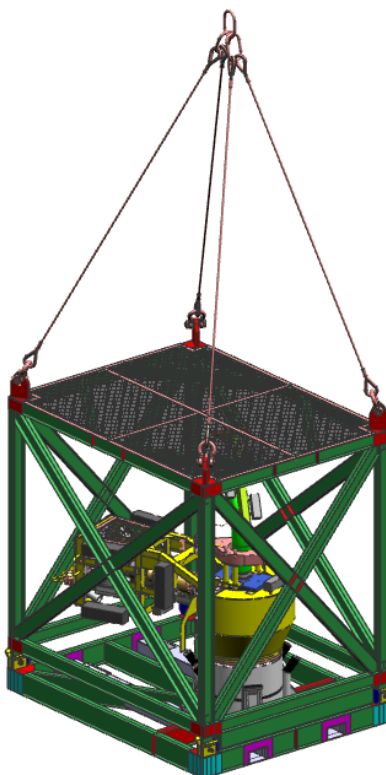


Figura 2 – Conjunto *Skid*-MCV. (Fonte: TechnipFMC, 2023).

Um modelo de onda simplificado é usado para o cálculo preliminar do Fator de Amplificação Dinâmica (FAD), com o objetivo de usar esta excitação de base em um modelo do sistema composto pelo guindaste, cabos e *Skid*, visando a obtenção de um FAD que pode ser comparado com o presente nas normas DNVGL-ST-E273 (2016) e DNV-ST-N001 (2021).

Duas vertentes do Método dos Elementos Finitos (MEF) são utilizadas neste trabalho, a primeira voltada para o estudo da resposta do navio e *Skid* às excitações causadas pelo mar utilizando o programa OrcaFlex, e a segunda, para o estudo da distribuição das tensões no *Skid*, utilizando o programa Ansys Mechanical. Estudos referentes ao efeito da malha e do tipo de elemento são conduzidos, gerando

informações importantes para otimização do modelo e redução de custo computacional.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é a comparação entre diferentes modelagens em elementos finitos da estrutura de um *Skid* de transporte, visando encontrar as possibilidades de menor custo computacional, considerando-se a fidelidade ao fenômeno físico real, da geometria e das condições de contorno aplicadas.

Para tal, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- Cálculo estrutural através do método de elementos finitos em comparação com normas vigentes.
- Estudo dos deslocamentos transmitidos para a estrutura de um *Skid* durante transporte offshore previsto por normas técnicas e artigos científicos da área para devida aplicação no modelo de elementos finitos.
- Estudo da influência da movimentação de ondas do mar através de um modelo massa mola amortecido para comparação com os fatores de amplificação dinâmica fornecidos pelas normas DNVGL-ST-E273 (2016) e DNV-ST-N001 (2021).
- Desenvolvimento de modelagens em elementos finitos para o *Skid* utilizando-se diferentes tipos de elementos.
- Análise de resultados calculados pelo método de elementos finitos e comparação dos diferentes modelos.

1.2 METODOLOGIA

A pesquisa bibliográfica foi realizada com a assistência de ferramentas de busca como Google Acadêmico, Scopus, Portal de Periódicos da CAPES bem como os repositórios de variadas universidades. Para cumprir todos os objetivos do presente trabalho, é realizada comparação dos esforços calculados com os previstos em normas. Portanto, são usadas as informações da agência certificadora DNV, acessadas através do portal Veracity, com acesso disponibilizado pela TechnipFMC.

Foi desenvolvido um código em MatLab® para modelar a onda imposta ao navio e seus impactos, por meio de sistemas massa-mola, para permitir o desenvolvimento de análises com diferentes parâmetros.

O início da modelagem numérica se dá no programa OrcaFlex, que é baseado no método dos elementos finitos, no qual é possível criar contextos ambientais do meio offshore. Com isso é possível estimar o comportamento do navio e o do *Skid* içado, e realizar o devido tratamento dos dados para posterior utilização ou para comparação.

Por fim, para a modelagem numérica da estrutura em regime estático e dinâmico, será usado o programa de elementos finitos Ansys® Mechanical. Os deslocamentos utilizados como entrada para o modelo dinâmico foram obtidos a partir da simulação do navio no programa OrcaFlex. O principal método para a simplificação numérica da estrutura se dá pela comparação dos resultados de tensão com diferentes modelos com variados graus de refino de malha e representação geométrica, como por exemplo, a representação de chapas como corpos bidimensionais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção estão descritas informações essenciais para o entendimento fundamental sobre os assuntos comentados no decorrer do presente trabalho. Deste modo, fundamentos básicos sobre elementos finitos e procedimentos comuns à indústria *Subsea* são explicitados, visando uma maior facilidade do entendimento do querido leitor.

2.1 OPERAÇÕES OFFSHORE

Para a realização de operações visando a exploração petrolífera, se mostra necessário o conhecimento de como o ambiente se comporta. Diante disso, se torna essencial saber o comportamento marítimo que está sendo trabalhado. Juntamente a isso, os reflexos desse comportamento no barco, normalmente utilizado para transporte e instalação de equipamentos, chamado de PLSV (do inglês *Pipe Laying Support Vessel*), Figura 3, devem ser estudados para que possam ser conhecidos as condições que os equipamentos transportados e operados em alto mar estão expostos.



Figura 3 – Navio PLSV. (Fonte: Ferreira, 2013).

As condições ambientais geram carregamentos, associados aos efeitos de ondas e ventos, sendo as ocorrências desses fenômenos de caráter aleatório. Por

conta dessas características, faz-se necessário a utilização de simplificações estatísticas.

De acordo com CHAKRABARTI (2005), o modelo de ondas regulares é um caminho eficiente para representar os carregamentos no meio offshore, pois gera resultados conservadores aceitáveis. Outra forma de estudo de ondas é pelo modelo irregular, no entanto esse segundo se mostra mais complexo e exige alto poder computacional.

É necessário abordar sobre os dois tipos de modelagem de onda, porém é importante pontuar que, segundo CHAKRABARTI (2005), são 2 parâmetros que definem uma onda, o período e a altura, sendo que a lâmina d'água afeta esses dois. A onda regular, possui características que não mudam a cada período que ocorre na onda, mantendo seus parâmetros constantes, sendo, portanto, previsível o seu comportamento. As ondas regulares podem ter como base, de acordo com CHAKRABARTI (2005), os modelos Airy e senoidal. O modelo abordado neste trabalho possui a forma de uma curva senoidal, descrita pela equação 1.

$$\eta = a \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (1)$$

As ondas irregulares podem ser representadas pela soma de ondas regulares, Figura 4, de períodos diferentes. Seu processamento demanda grande poder computacional e tempo, o que muitas vezes não é factível para a realidade das operações offshore.

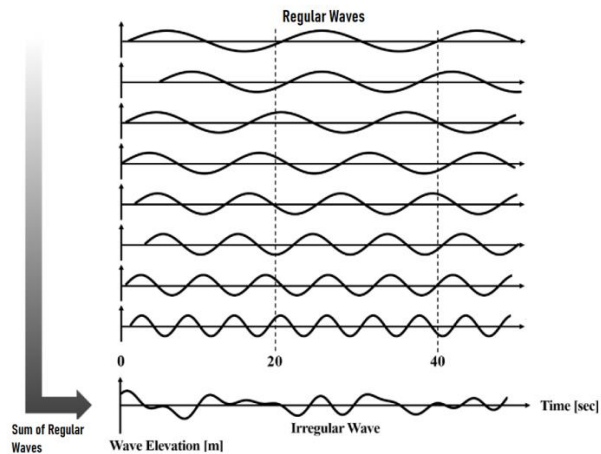


Figura 4 – Construção de Onda Irregular. (Fonte: Berends, 2021).

Na Figura 5 são identificados parâmetros importantes para a caracterização da onda, sendo T o período da onda, H que é o dobro da amplitude a , η a elevação da superfície no mar ao longo do tempo e d que se refere à lâmina d'água.

O equipamento de interesse pertencente a um PLSV que será considerado no contexto do presente trabalho é o guindaste principal. Será avaliado se o seu comportamento tem influência nos carregamentos sobre a carga que está sendo transportada.

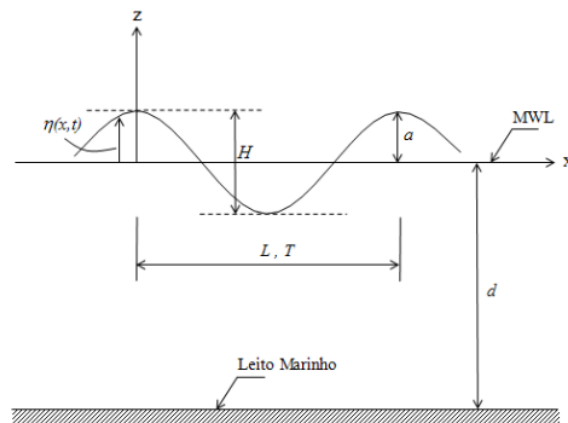


Figura 5 – Dados Básicos de Ondas Regular (Fonte: Santos, 2020).

2.2 MÓDULO DE CONEXÃO VERTICAL (MCV)

O módulo de conexão vertical é um equipamento que permite a conexão entre a extremidade final do duto flexível ou umbilical, por meio de seus conectores, e o poço,

Figura 6. Um duto flexível é uma das formas mais otimizadas que se tem de extrair petróleo segundo CHARNAUX (2008), pois permite melhor arranjo submarino de dutos e equipamentos, utilizando menores distâncias e com menor tempo de instalação. Apesar de se ter maior custo na fabricação, o seu processo de instalação se mostra mais econômico. Sua composição geralmente se dá por camadas desacopladas, tendo cada uma sua função.



Figura 6 – MCV conectado ao duto Flexível antes da instalação. (Fonte: Silva, 2021).

O navio PLSV realiza a descida do MCV e o encaixa no ponto de acoplamento (*hub*) da Base Adaptadora de Produção (BAP) da árvore de Natal Molhada (ANM). Este equipamento possui alguns cuidados que devem ser levados em conta durante o lançamento, como por exemplo a carga suportada em seu flange e o ângulo de entrada no *hub* da BAP.

O MCV é composto pelo flange que é a forma de realizar a ligação da linha com o MCV. O “pescoço de ganso” (*gooseneck*), é um elemento que tem a função de melhorar o posicionamento do flange de conexão frente à necessidade de estar conectado com um duto flexível assentado no solo, Figura 7. Este elemento suporta os esforços durante a instalação. Nesse equipamento também há o painel de controle operado pelo ROV (*Remote Operated Vehicle*) quando o equipamento já está instalado, para certificar que irá operar de maneira correta.

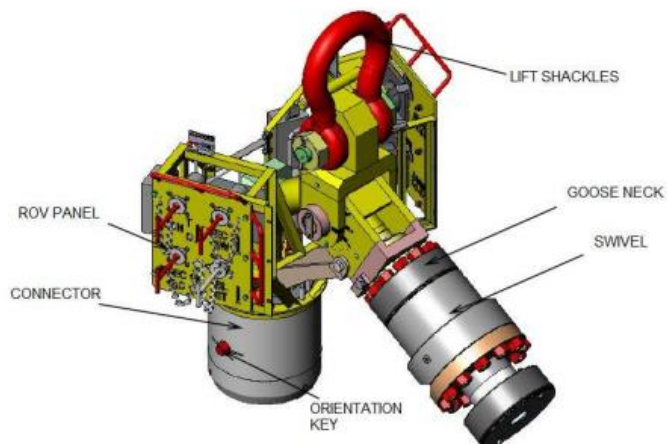


Figura 7 – Módulo de Conexão Vertical. (Pimentel, 2015).

2.3 UNIDADES OFFSHORE PORTÁTEIS (UOP)

Segundo a norma DNVGL-ST-E273 (2016), as UOPs são unidades designadas para transporte e içamento offshore, único ou repetitivo, podendo também ser projetado para içamento submarino.

Um *Skid* é classificado como uma UOP de tipo A, por ser constituído apenas de estruturas primárias, geralmente vigas “I” e chapas, funcionam como uma embalagem para equipamentos de maior valor, para facilitar seu içamento, fixação e proteger contra colisões diretas (possui um *crash frame*), como mostra a Figura 8. Além disso o *Skid* não é fixado de forma permanente ao equipamento que se deseja transportar.

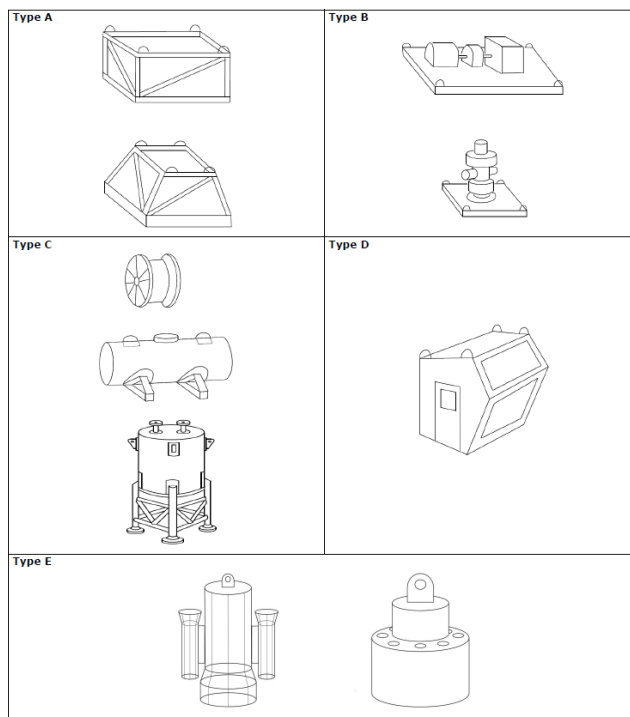


Figura 8 – Tipos de Unidades de transporte offshore. (Fonte: DNVGL-ST-E273 – Classificação de POU, 2016).

A DNVGL-OS-C101 (2017) define que UOPs devem ser projetadas considerando-se os carregamentos ambientais mais severos a que a estrutura possa estar sujeita. No caso de transporte em uma embarcação em alto mar distante da costa, os principais carregamentos ambientais são cargas dinâmicas induzidas por ondas e cargas de vento.

2.4 CARREGAMENTOS CONSIDERADOS

De acordo com as normas vigentes, diversos carregamentos deverão ser considerados para este estudo, podendo variar de intensidade de acordo com a classe da operação, definida pela norma, como pode ser visto na Tabela 1. Além disso o parâmetro de risco varia com a massa do equipamento a ser transportado.

Os carregamentos propriamente ditos, são os gerados pelo ambiente de operação, podendo ser forças inerciais, ventos, terremotos, efeitos de marés e gelo DNVGL-OS-C101 (2017). Além disso, combinações de carregamentos podem ocorrer.

Tabela 1 – Classe de equipamentos comparado com amplitude de ondas.

Classe do Equipamento	Amplitude de onda
Classe R60	Hs = 6,0m
Classe R45	Hs = 4,5m
Classe R30	Hs = 3,0m
Classe R00	Hs = 0,0m

Fonte: DNVGL-ST-E273 – Classificação de POUs, 2016.

Estas classes de equipamentos são usadas para determinar qual será o Fator de Projeto, do inglês *Design Factor* (DF), calculado a partir da massa bruta máxima ou MGW – do inglês *Maximum Gross Weight*. Além do fator de projeto utilizado para a estrutura, a norma DNV-ST-N001 (2021) traz o fator de amplificação dinâmica (FAD) que deve ser aplicado no dimensionamento do conjunto de içamento. Segundo o capítulo 16 desta norma:

“Carregamentos dinâmicos devem ser aplicado para levar em consideração efeitos dinâmicos globais provenientes de movimentações da embarcação, rigidez da lança, cabos e amarrações, movimentação do guindaste e carregamentos de vento.”

A situação do estudo se dá em um *lift-off*, içamento no próprio convés do navio da estrutura carregada, em que se considera somente carregamentos de onda, condição mais crítica. Para tal, é usado um modelo de onda regular para simular o sistema em condição de mar e as amplificações de acelerações existentes no sistema de içamento do *skid*.

2.5 MOVIMENTOS DE UMA EMBARCAÇÃO

Para compreensão do contexto naval, é necessário entender as movimentações de uma embarcação, que são os graus de liberdade em que ela pode se movimentar. Além de existir a movimentação ao longo dos eixos X, Y e Z, *Surge*, *Sway* e *Heave*, respectivamente, há também a movimentação em torno dos mesmos, o *Roll*, *Pitch* e *Yaw*, respeitando a mesma ordem dos eixos citados, como é mostrado na Figura 9.

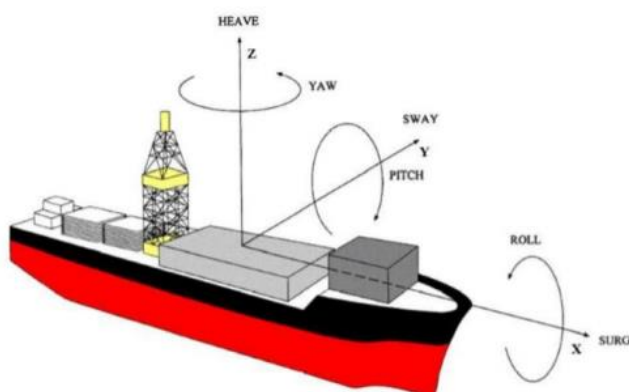


Figura 9 – Movimentações da Embarcação e seus nomes. (fonte: BATALHA 2009).

Em cada direção do navio pode ser identificada a angulação existente na incidência da onda, na Figura 10 está representado o sistema de referência utilizado para o presente trabalho.

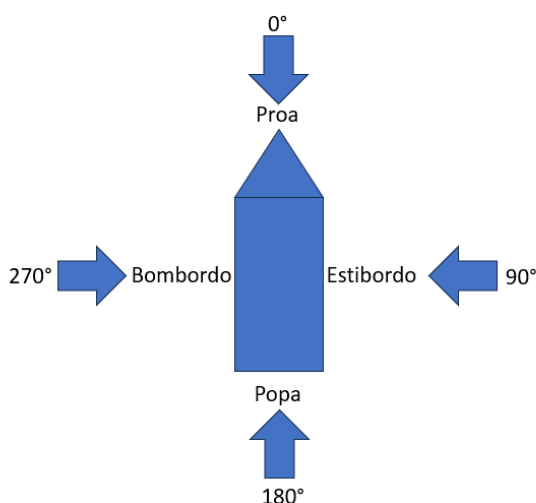


Figura 10 – Direções de incidência.

No software OrcaFlex, é utilizado o *Response Amplitude Operator (R.A.O)* que é o comportamento designado de um determinado navio frente a uma onda incluindo todos os equipamentos e guindaste presentes nele. Outros fatores que são utilizados são as propriedades de rigidez dos cabos utilizados e do guindaste, pois são essas as ferramentas comumente utilizadas nas operações do navio.

2.6 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISE ESTRUTURAL

Para a solução de diversos problemas na engenharia, são empregadas análises numéricas, a fim de complementar outros tipos de análises, permitindo um entendimento mais completo do componente sendo estudado. Uma destas abordagens, é o Método dos Elementos Finitos, o qual, divide o domínio em componentes facilmente solucionáveis. A precisão deste método é diretamente relacionada ao nível de discretização aplicado, ficando a cargo do usuário o nível de precisão frente aos requerimentos de projeto. Uma das vantagens do MEF é a possibilidade de obter rapidamente resultados de geometrias complexas ou em condições extremas. Na Figura 11 é mostrado um simples exemplo de placa com furo, com uma resolução de elementos menor, enquanto na Figura 12 é mostrado a obtenção de resultados até mesmo em uma placa com um furo complexo.

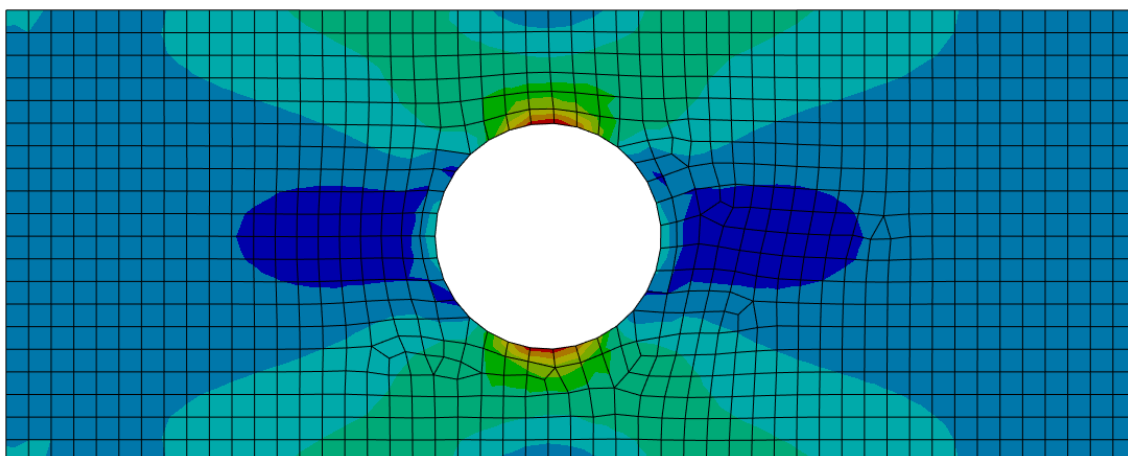


Figura 11 – Placa com furo modelada pelo método dos elementos finitos.

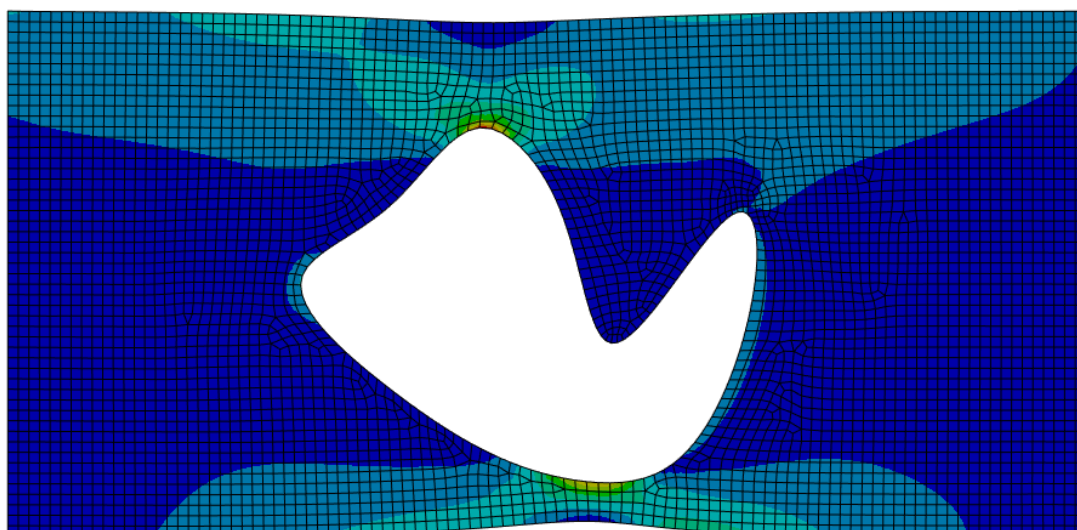


Figura 12 – Placa com furo complexo modelada pelo método dos elementos finitos.

Deste modo, o MEF complementa muito bem aos métodos analítico e experimental, facilitando a obtenção de resultados relevantes mais detalhados, frente ao método analítico e a análise de componentes complexos de maneira rápida e barata, frente ao método experimental.

De acordo com ADAMS (2008) podemos considerar, para uma análise estrutural, os nós de um elemento como sendo conectados por uma mola, de modo que as deformações serão causadas como resposta de uma força aplicada. Em uma

análise estrutural, resultados como tensões e deformações serão obtidos baseados no comportamento simples de um elemento, com o uso de funções de suavização, como comentado por SEGERLIND (1972).

2.6.1 Elementos de primeira e segunda ordem

Os elementos usados no MEF são formados de nós, pontos nos quais a delimitação do elemento estará presente, onde são calculados os resultados desejados. Tendo em vista as diferentes formulações de elementos que estão disponíveis para o MEF, existem também considerações geométricas que são mais gerais para as diferentes formulações. De acordo com ADAMS (2008), elementos podem ser lineares, quadráticos ou até mesmo de terceiro grau. Para a maioria das análises que são conduzidas usando o MEF, a principal escolha será entre elementos de primeira e segunda ordem, também chamados de elementos lineares e quadráticos, respectivamente, mostrados na Figura 13.

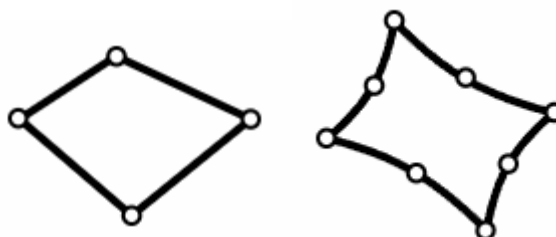


Figura 13 – Comparação entre elementos de primeira e segunda ordem, SHELL181 e SHELL281. (Fonte: Ansys Manual, 2023).

A influência desta mudança é vista pela quantidade adicional de nós que teremos à disposição. Elementos lineares possuem nós apenas nas extremidades das arestas enquanto em elementos de segunda ordem, é feita a adição de um nó no meio de cada aresta. Geometricamente, esta diferença permite que elementos quadráticos consigam ter arestas com uma melhor aproximação geométrica, frente a elementos de primeira ordem. Contudo, essa representação mais fiel é acompanhada de um custo computacional maior, sendo, em parte, contrabalanceado pela menor quantidade de elementos para se obter uma boa representação geométrica.

Deste modo fica a cargo do usuário determinar qual o grau ideal dos elementos que compõem a malha, para melhor representar seu caso. Esta diferença na quantidade dos nós é mostrada em mais detalhes nas Figuras 14 e 15.

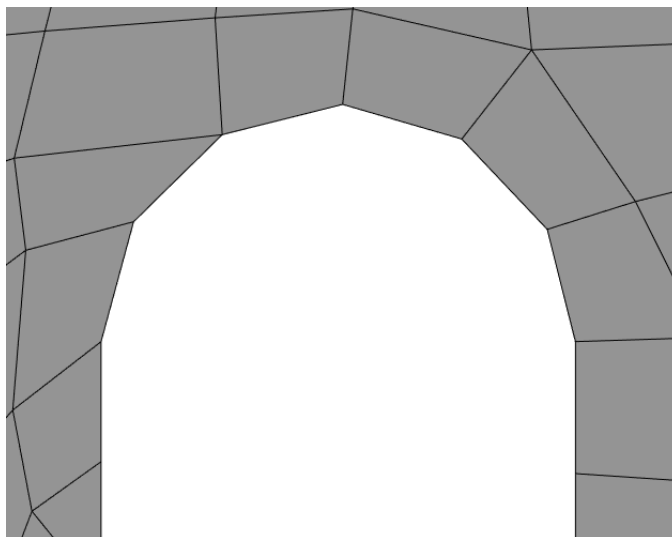


Figura 14 – Malha genérica feita com elementos lineares.

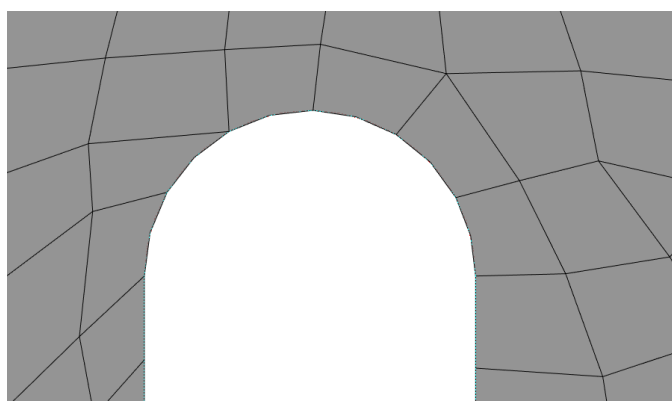


Figura 15 – Malha genérica feita com elementos quadráticos.

2.6.2 TIPOS DE ELEMENTOS POR REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA

Dependendo do tipo de análise desejada, é interessante a definição do tipo adequado de elemento, para a geometria considerada, ADAMS (2008) lista 3 tipos principais de elementos, sendo eles:

Elementos de Viga são elementos desenvolvidos para a representação de estruturas nas quais duas dimensões são muito menores que uma principal, um caso

clássico, que dá o nome ao tipo de elementos, são vigas, mas também são representados cabos e tubos com esta formulação. Sua principal vantagem é o baixíssimo custo computacional, frente aos outros tipos de elementos, por serem representados por uma linha, com as propriedades definidas por seções transversais constantes. Uma das principais desvantagens deste tipo de elemento é o pré-processamento mais extenso quando comparado com elementos de casca e sólidos, necessitando também da definição correta da orientação da seção transversal. Outro ponto importante é a precisão baixa para tensões em regiões de concentração de tensões. Na Figura 16 é mostrada uma geometria de linha e sua representação dentro do Ansys Mechanical.

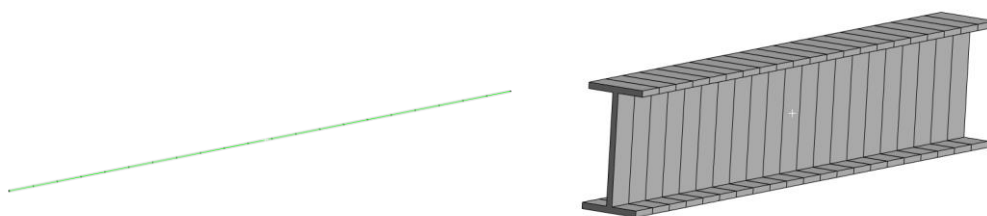


Figura 16 – Corpo de linha e perfil associado a ele para elementos de viga.

Elementos de casca são utilizados quando a geometria considerada possui uma espessura constante e muito menor que a largura e comprimento, geralmente com a espessura sendo um décimo das outras dimensões. A representação de apenas duas dimensões no elemento de casca permite uma eficiência computacional considerável frente aos elementos sólidos, quando utilizados em geometrias adequadas. Possui uma necessidade de pré-processamento menor que elementos de viga, porém ainda se faz necessário. Na Figura 17, é mostrada uma geometria que pode ser modelada com elementos de casca.

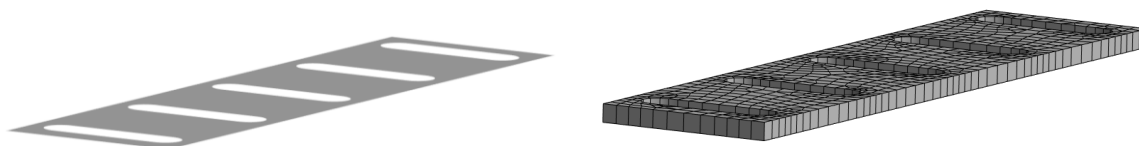


Figura 17 – Elementos de casca, com e sem a representação da espessura.

Elementos Sólidos são os mais próximos da representação real de uma estrutura, pois poderemos representar de fato todas as 3 dimensões da geometria. Como pode ser inferido, o principal fator que deixa os elementos sólidos menos interessantes para uma análise é o custo computacional muito maior, quando comparado com os outros tipos de elementos. Por não ter limitações geométricas para seu uso, elementos sólidos são de uso muito mais geral que os citados anteriormente, limitados apenas pelo seu grande custo computacional. Na Figura 18 é mostrada uma geometria que deve ser representada com elementos sólidos.

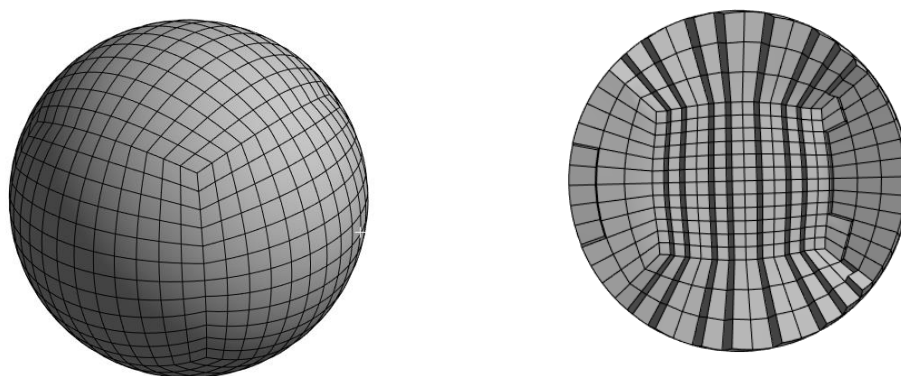


Figura 18 – Esfera modelada com elementos sólidos e seu interior.

2.6.3 SHEAR LOCKING

De acordo com CHILLERY (2013), o fenômeno do *Shear Locking* é causado pela inabilidade dos elementos lineares de representar corretamente cargas de flexão, devido à falta de nós no meio dos elementos. Este efeito é exacerbado quando está

presente apenas um elemento na espessura da malha, para representar flexão. Uma maneira de mitigar os efeitos do *Shear Locking* é pelo refino da malha.

Elementos Tetragonais de primeira ordem são especialmente suscetíveis a este efeito, potencializado pelo seu formato. Portanto, de maneira geral, elementos lineares precisam de cuidados adicionais, por exemplo, um maior refino de malha, para evitar estes problemas. Nas Figuras 19 e 20 é mostrado um simples teste, no qual temos uma viga engastada, com apenas os movimentos referentes a flexão irrestritos, sendo comparado o primeiro modo de vibração, em uma análise modal. Fica claro que, para um mesmo tamanho de malha, formada de elementos tetragonais, temos frequências naturais radicalmente diferentes, sendo a Figura 19 referente a malha composta de elementos lineares e a Figura 20 de elementos quadráticos, com a malha linear tendo seu primeiro modo com 1617Hz e a malha quadrática com 812Hz.

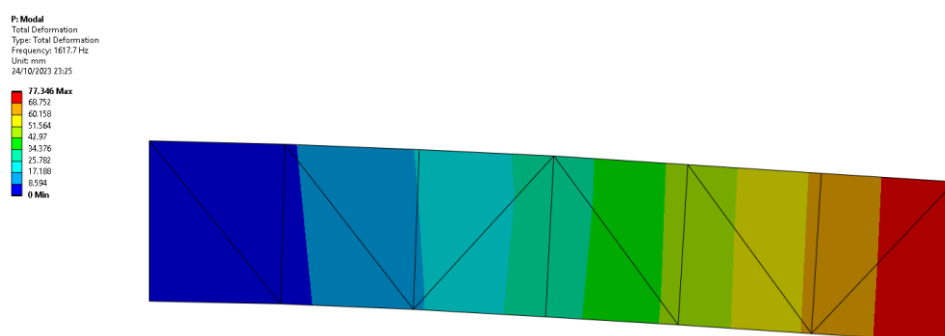


Figura 19 – Geometria tetraédrica de primeira ordem, com frequência natural de 1617Hz.

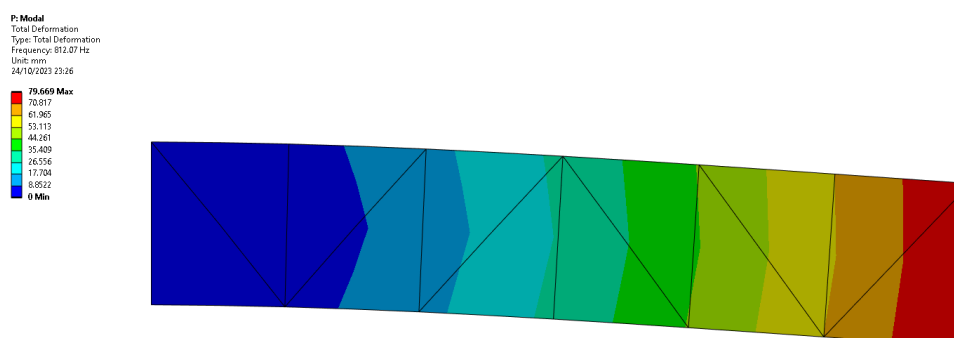


Figura 20 – Geometria tetraédrica de segunda ordem com frequência natural de 812Hz.

3 MODELAGEM DOS ESFORÇOS DINÂMICOS

A fim de compreender os carregamentos dinâmicos presentes em uma operação de içamento *offshore*, foi realizado um estudo utilizando diferentes metodologias considerando os carregamentos gerados pelas ondas do mar e os fatores de projeto e de amplificação dinâmica propostos pelas normas DNV-GL 2.7-3 (2016) e DNV-ST-N001 (2021) que visam garantir a integridade da estrutura em questão.

Primeiramente, foi realizada uma modelagem de onda senoidal simples excitando um modelo de um grau de liberdade equivalente à estrutura içada pelo guindaste do navio, seguida de um estudo de ganho segundo o método fornecido por RAO (1990). Os resultados deste foram posteriormente comparados com uma análise dinâmica pelo método de elementos finitos, feita no software OrcaFlex, com uso de um modelo simplificado do sistema contendo o navio, cabos e uma representação do *Skid* carregado com o MCV.

3.1 MOVIMENTO CAUSADO PELO OCEANO

Um dos fatores mais importantes para o presente trabalho se dá na forma da transferência do movimento das ondas para a embarcação, que gera acelerações no equipamento içado. Para determinar a maneira que os carregamentos decorrentes de movimentos marítimos são transferidos ao *Skid*, modelagens de elevação de ondas desenvolvidas no trabalho de SANTOS (2020) foram usadas juntamente com os dados fornecidos pela norma DNV-RP-C205 (2019), adotada como referência.

Foi empregada uma simplificação da geometria e frequência de onda marítima como uma função senoidal. Tal consideração permite uma fácil adaptação do código utilizado para diferentes amplitudes e frequências de onda, baseando-se apenas na frequência dominante no mar. Foi considerado no estudo uma onda regular em função de se tratar de um estudo preliminar para avaliar a performance de diversas metodologias. Esta abordagem apresenta uma maior facilidade na análise dos fenômenos envolvidos, além disso, o processamento computacional e analítico é mais simples em comparação à onda irregular.

3.2 MODELAGEM DO SISTEMA GUINDASTE-CABO

Este trabalho se limita ao estudo do comportamento mecânico do *Skid* em operação de içamento. Foram realizadas simplificações referentes ao guindaste e ao cabo utilizado. Os dois elementos são considerados como molas e suas rigidezes determinadas por suas características mecânicas, relacionadas as geometrias e materiais.

Para a modelagem do guindaste foi considerada sua configuração de maior criticidade. Este estado foi estabelecido pelo diagrama de capacidade do guindaste. A Figura 21 representa uma curva genérica de capacidade de um guindaste, sendo válida para o caso estudado. O diagrama ilustra a capacidade de operação do guindaste, para diferentes condições de angulação com a vertical e comprimento da extensão da lança. Quando a sua lança e a angulação são diminuídas, a capacidade de carga aumenta. A configuração de maior extensão e maior angulação do guindaste representa a condição mais crítica, aproximando-se de uma representação de uma viga horizontal engastada, permitindo o estudo do posicionamento de maior amplitude dos deslocamentos transmitidos até o *Skid*.

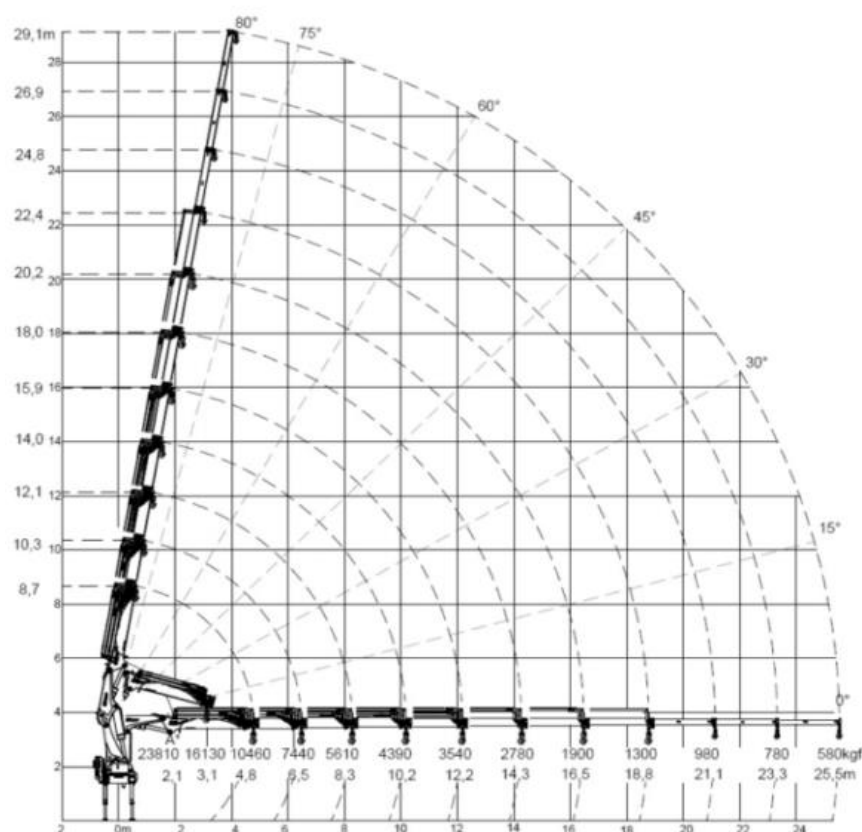


Figura 21 – Curva de Capacidade do Guindaste. (Fonte: RR Guindastes, 2023).

O cabo usado influencia a dinâmica do conjunto. Em condições normais de operação, o içamento do *Skid* faz o uso da classe mais elevada de guindaste disponível, pela natureza frágil e importante do equipamento transportado. Tendo como referência os manuais do guindaste, é utilizado o cabo Bridon Hydra 7500 DYFORM®, BRIDON (2013), que mais se equipara aos utilizados neste tipo de operação. O catálogo indica uma rigidez axial equivalente para o cabo de 140 MN/m.

A estrutura do guindaste foi considerada como sendo composta de uma viga caixão de seção quadrada mono engastada, como mostra a Figura 22. Uma excitação de base é aplicada no engaste, representando o movimento das ondas, e na extremidade do guindaste o *Skid* está conectado suspenso pelo cabo, representado por uma mola.

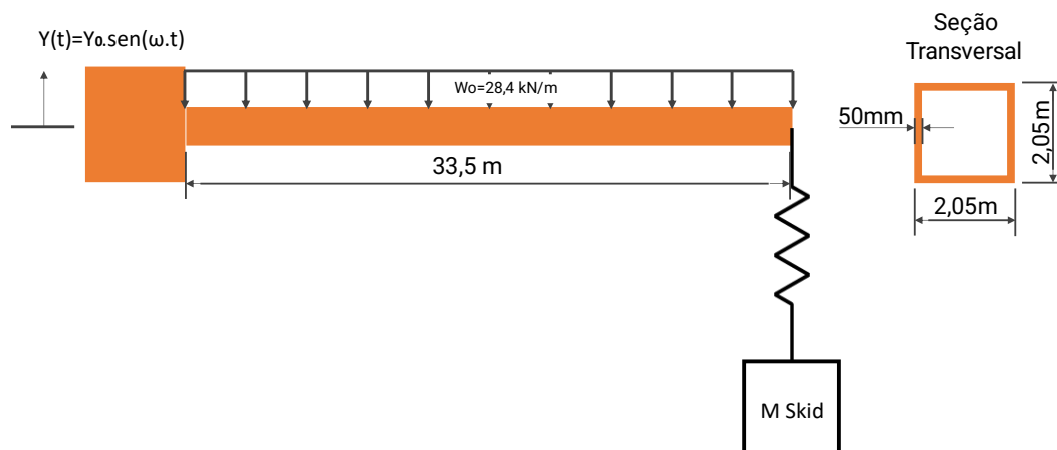


Figura 22 – Modelo Guindaste-Cabo-Skid.

Os parâmetros utilizados para a análise do sistema são compostos pela massa do Skid (M_{Skid}), massa da lança ($M_{lan\c{c}a}$), comprimento da lança (L), peso da lança por unidade de comprimento (w_0) e a aceleração da gravidade (g). Para a análise são considerados os valores da Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros do sistema.

M_{Skid}	$M_{lan\c{c}a}$	L	w_0	g
11 Ton	97 Ton	33,5 m	28,4 kN/m	9,81 m/s ²

Para o estudo do efeito dinâmico do carregamento das ondas no sistema guindaste-cabo, foi desenvolvido um sistema massa-mola-amortecedor equivalente com um grau de liberdade. Para tal, utilizando-se o método da superposição apresentado por HIBBELER (2010), foi obtida a equação da linha elástica da viga mostrada na Figura 23, considerando como carregamento a superposição do seu peso próprio e da massa do conjunto Skid-MCV:

$$Y(x) = \frac{w_0 x^2}{24EI} (6L^2 + x^2 - 4Lx) + \frac{M_{Skid} g}{6EI} (3Lx^2 - x^3) \quad (2)$$

$$Y(L) = D$$



Figura 23 – Linha Elástica do Guindaste.

Em seguida foi obtida a massa e a rigidez equivalentes do sistema através das relações obtidas por RAO (1990):

$$M_{eq} = 0,23 \times M_{lan\c{c}a} + M_{Skid} \quad (3)$$

$$K_{lan\c{c}a} = \frac{3EI}{L^3} \quad (4)$$

A partir dos dados obtidos foi possível construir um sistema simplificado, através de três molas em série, representando, respectivamente, o guindaste, o cabo de içamento e as lingadas do *Skid*, estas duas últimas obtidas no catálogo BRIDON (2011). A partir deste momento foram unidas as considerações usadas para a determinação da excitação de base e da rigidez global do sistema, permitindo a criação de um modelo simplificado da movimentação imposta ao *Skid*, como mostrado na Figura 24.

$$K_{lan\c{c}a} = 4,3 \times 10^6 \frac{N}{m}$$

$$K_{Cabo} = 14,0 \times 10^7 \frac{N}{m}$$

$$K_{lingadas} = 2,9 \times 10^7 \frac{N}{m}$$

$$K_{eq} = 4,0 \times 10^6 \frac{N}{m} \text{ (Rigidez Equivalente do sistema)}$$

O impacto do amortecimento no comportamento da estrutura pode ser avaliado com a utilização de diferentes valores, o que foi desenvolvido em uma seção posterior do presente trabalho. Inicialmente são usados valores recomendados por PAZ (2004).

Para encontrar a frequência de vibração considera-se um período de onda de 12 segundos, considerando a distribuição de probabilidade de ocorrência observada em RIBEIRO et al (2005).

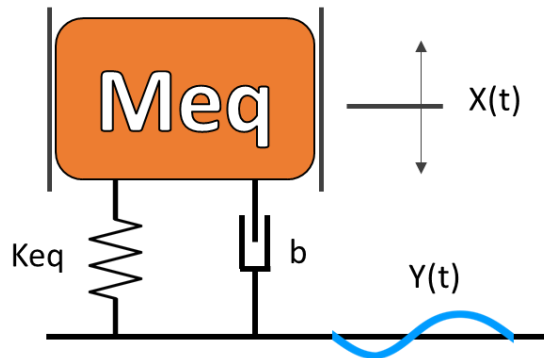


Figura 24 – Sistema Massa-Mola do Guindaste.

Para o sistema de um grau de liberdade, as equações de posição e velocidade são dadas por (RAO, 1990):

$$Y(t) = Y_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \quad (5)$$

$$\dot{Y}(t) = Y_0 \cdot \omega \cdot \text{cos}(\omega \cdot t) \quad (6)$$

A equação do movimento vibratório de um sistema amortecido com excitação de base é dada por RAO (1990).

$$M_{eq} \cdot \ddot{X} + B \cdot \dot{X} + K_{eq} \cdot X = B \cdot \dot{Y}(t) + K_{eq} \cdot Y(t) \quad (7)$$

Para solução desta equação diferencial foi utilizada a rotina ODE45 PERÔNICA et al (2022), do pacote de simulações MatLab, a qual é baseada no método de Runge-Kutta. Primeiro a equação de 2ª ordem é transformada em um sistema com duas equações de 1ª ordem. Em seguida o sistema de equações é colocado na forma matricial no pacote computacional MatLab.

Este método utiliza o seguinte equacionamento,

$$\dot{X} = A \cdot Y + B \cdot U \quad (8)$$

onde

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K_{eq}}{M_{eq}} & -\frac{B}{M_{eq}} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{M_{eq}} & \frac{B}{M_{eq}} & \frac{K}{M_{eq}} \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} -M_{eq} \cdot g \\ Y \\ \dot{Y} \end{bmatrix}$$

O procedimento numérico gera o vetor Y , que contém duas linhas com os valores de X e \dot{X} . Derivando também numericamente os pontos de \dot{X} são obtidos os valores de \ddot{X} . Com isso podemos encontrar as forças atuantes no sistema.

A Figura 25, gerada pelo programa Matlab, apresenta o deslocamento, a velocidade e a aceleração na direção vertical para a configuração usual do sistema, de acordo com a amplitude de onda definida pelo caso mais crítico da norma DNVGL-ST-E273 (2016), referente à classe R60.

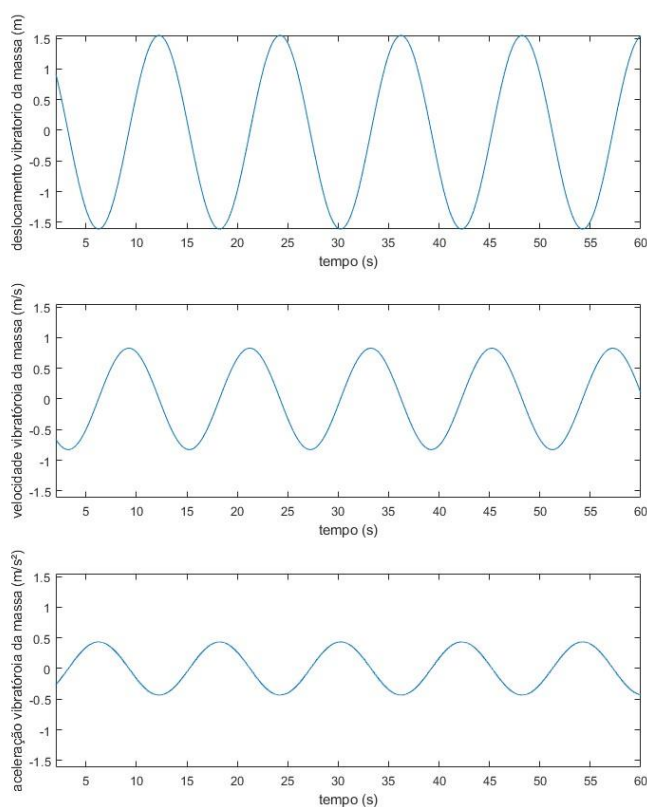


Figura 25 – Deslocamento, Velocidade e Aceleração vibratória da massa para o caso mais crítico previsto pela norma referente à classe R60.

Para obter um FAD comparável ao encontrado na simulação transiente em elementos finitos, considera-se a aceleração máxima gerada pelas ondas.

$$a_{max} = 0,43 \text{ m/s}^2$$

somado à aceleração da gravidade $g = 9,81\text{m/s}^2$, e dividindo g por esta aceleração total.

$$FAD = \frac{a_{max} + g}{g} \quad (9)$$

O valor encontrado para o FAD, de 1,04, é equivalente a 60% do encontrado pela norma. Isso pode ser justificado pelo fato de a norma considerar mais fatores, como por exemplo, a rigidez do *rigging* e o guindaste, o que pode resultar em valores mais conservadores.

3.3 ANÁLISE DE RESSONÂNCIA E AMORTECIMENTO

Visando enriquecer a compreensão dos carregamentos envolvidos, foi feito um modelo numérico para obtenção do ganho na amplitude do movimento ondulatório transmitido ao *Skid*, para ser comparado com os fatores de projeto e de amplificação dinâmica, fornecidos pelas normas DNVGL-ST-E273 (2016) e DNV-ST-N001 (2021).

Os valores selecionados de acordo com a classe de operação R60 foram selecionados por representar um caso mais crítico.

A equação de ganho segundo RAO (1990) é dada por:

$$\frac{X}{Y} = \left[\frac{1 + (2\xi r)^2}{(1 - r^2) + (2\xi r)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

onde ξ representa a fração de amortecimento, e r a razão entre a frequência da excitação e a frequência natural da estrutura. Y é a excitação de base, e X é o deslocamento da massa. Logo X/Y representa o ganho na amplitude da onda, que pode ser comparado ao fator de amplificação dinâmica (FAD) das normas.

Comparando com os valores definidos pelas normas, os fatores de amplificação encontrados analiticamente são muito baixos na faixa do período considerado. No entanto, se avaliarmos um caso mais crítico teórico onde nos aproximamos em 70% da ressonância, podemos chegar a valores próximos aos valores da norma, que são conservadores de acordo com BÓDALO (2013).

O fator que mais dificulta encontrar valores que retratem bem a realidade pela abordagem analítica do problema é a definição de um coeficiente de amortecimento

equivalente para a estrutura do guindaste, pois deve considerar a influência do amortecimento gerado pelo mar, pelo material e geometria do próprio guindaste e do navio. Segundo WITZ (1995), o amortecimento pode ser equacionado considerando-se a influência do fluxo de energia gerado pelas ondas (amortecimento potencial), a influência da separação de fluido ao redor do corpo (navio) gerando arrasto e uma componente estrutural dinâmica do guindaste. Ainda assim esses valores devem ser medidos ou estimados através de modelos físicos.

Como concluem CLAUSS et al (1990), analisando modelos em escala, todos os movimentos ressoantes do navio são altamente amortecidos, e efeitos de acoplamento ou ressonância são desprezíveis no movimento vertical embora deva ser considerado para outros movimentos.

Logo, como mostra a literatura, os valores de amortecimento só podem ser obtidos de forma satisfatória através de medições empíricas, pois há diversas influências que dificultam sua modelagem matemática. Sendo assim, comparando com os outros métodos de cálculo é possível encontrar fatores dentro da ordem de grandeza, um pouco menos conservadores para as estimativas utilizadas.

Considerando apenas a influência do material, RADOIČIĆ (2013) e PAZ (2004) fornecem valores de aproximadamente 5% para a fração de amortecimento para estruturas de concreto e aço estrutural como é o caso do guindaste. Para fins de comparação, uma curva com fração de amortecimento em 25% foi gerada para observar o comportamento de um possível aumento no amortecimento por outros fatores já citados.

A Figura 26 apresenta as curvas para o Fator de Amplificação Dinâmica (FAD) para as razões de amortecimento de 5% e 25% em função da razão entre a frequência de excitação e a frequência natural do sistema.

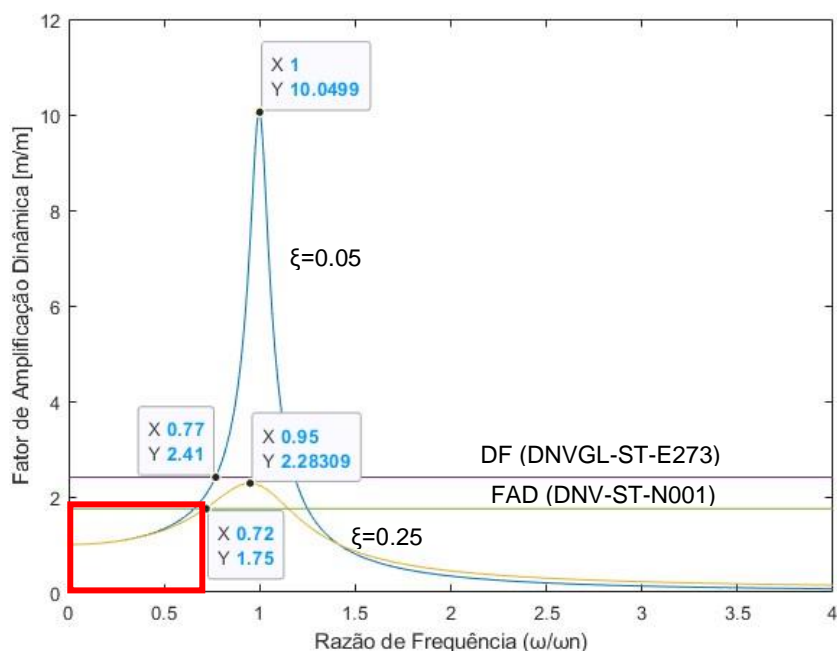


Figura 26 – Fator de Amplificação Dinâmica em função da razão entre a frequência de excitação e a frequência natural do sistema.

As retas horizontais representam os valores encontrados segundo as normas, sendo verde o fator de amplificação dinâmica para içamento com lingadas de aço (1,75) e a reta roxa o fator de projeto (2,41) para UOPs de classe R60 (situação mais crítica), que são parâmetros de comparação.

A curva em azul considera o caso em que ξ (fração de amortecimento) é de 5%, enquanto a curva amarela considera um ξ de aproximadamente 25%.

Vale esclarecer que o Fator de Projeto (DF) previsto pela norma DNVGL-ST-E273 (2016) é maior que o FAD previsto pela norma DNV-ST-N001 (2021) pois considera outros fatores de projeto além dos carregamentos dinâmicos, sendo um valor mais conservador.

Na Figura 27 é possível observar em mais detalhes a região de operação do caso estudado, ou seja, proximidades do ponto de operação onde o período é igual a 12s ($\omega/\omega_n = 0,05$).

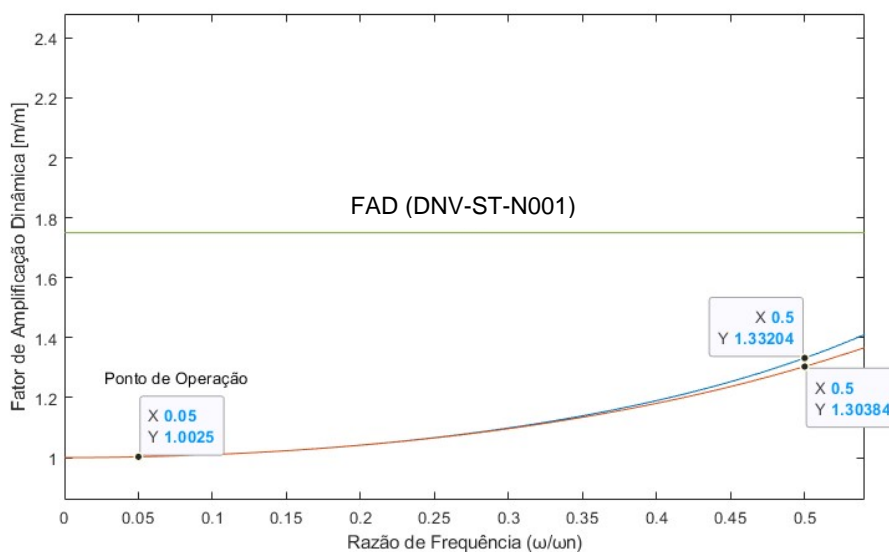


Figura 27 – Fator de Amplificação Dinâmica em função da razão entre a frequência de excitação e a frequência natural do sistema (Região de Operação).

Através deste gráfico observa-se que em até 50% da frequência natural, a fração de amortecimento tem pouca influência.

Valores mais elevados são encontrados nos pontos onde as curvas de ganho interceptam a reta do FAD (DNV-ST-N001), sendo 65% e 70% da ressonância para 5% e 25% de fração de amortecimento respectivamente.

No entanto, segundo MASSIE (2001) existe uma relação entre comprimento e altura de onda máximo de $1/7$, pois acima desse valor as ondas quebram, o que invalidaria o modelo para casos com período menor que 5,5s, para o qual $r=0,12$. A região em cor azul da Figura 28 mostra os períodos válidos para a relação entre amplitude e período de onda.

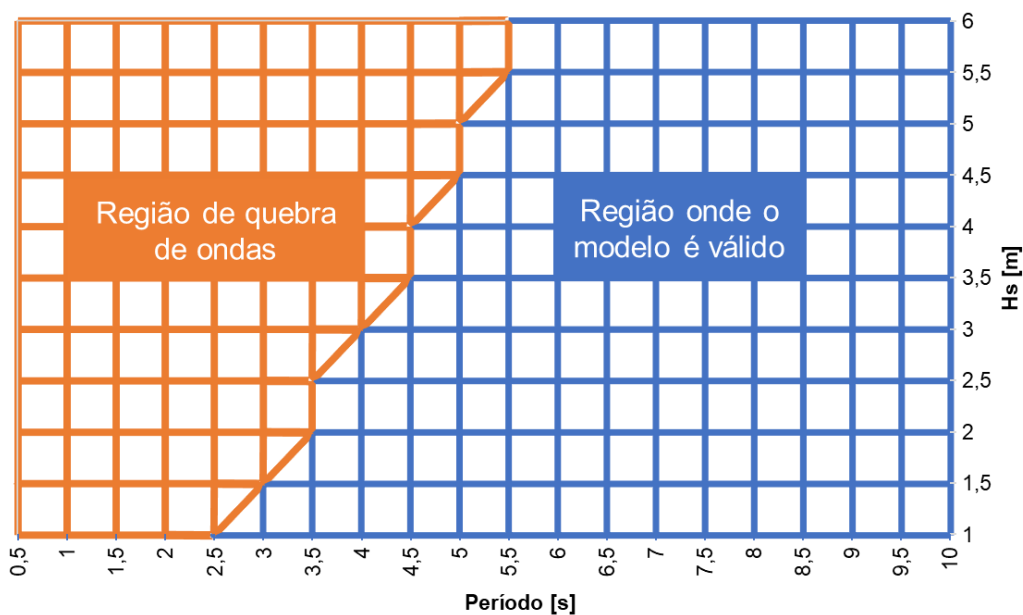


Figura 28 – Limite de quebra de onda em função da amplitude e período de onda.

Para o caso selecionado (R60), segundo dados estatísticos das bacias brasileiras os casos mais críticos consideram períodos em torno de 12s, o que resulta em $r=0,05$.

Pode-se concluir assim, que, para ondas regulares, não é factível pensar em casos que se aproximem da ressonância, e o FAD encontrado por esse método, 1,0025, é desprezível frente a outros possíveis carregamentos sofridos pelo equipamento içado.

4 SIMULAÇÕES HIDRODINÂMICAS EM ELEMENTOS FINITOS

Nesta seção são conduzidas simulações que permitem o entendimento mais aprofundado sobre a resposta do navio e, por consequência, do *Skid*, frente as excitações do oceano. Para tal, é utilizado o programa OrcaFlex, que funciona pelo método de elementos finitos, utilizando elementos de viga unidimensionais, focado na análise hidrodinâmica da estrutura. Foi utilizada a licença da TechnipFMC para o presente projeto final.

4.1 PRÉ-PROCESSAMENTO

Para o presente projeto, foi modelada a situação que envolve um Navio PLSV, cabos e um *skid*, este último representado por uma boia 6D, mostrado na Figura 29, que é uma forma do software representar um corpo qualquer com diferentes formatos. Para a boia 6D é possível determinar as propriedades de massa e hidrodinâmicas, no presente projeto não será considerada a última citada.

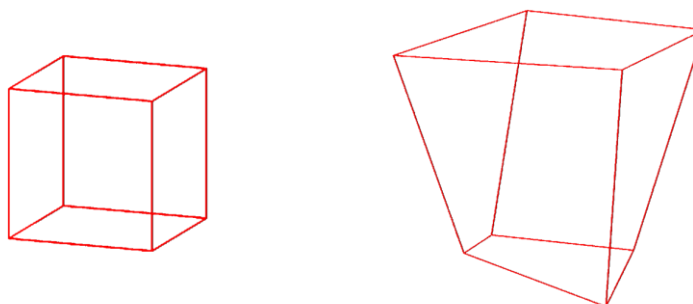


Figura 29 – Bóia 6D.

A posição do guindaste é a mais aproximada da realidade, ou seja, na lateral esquerda e antes do centro de gravidade do Navio, que fica no centro do navio, em relação a proa, como pode ser visto na Figura 30. Nessa mesma figura há duas opções de representação gráfica do OrcaFlex.

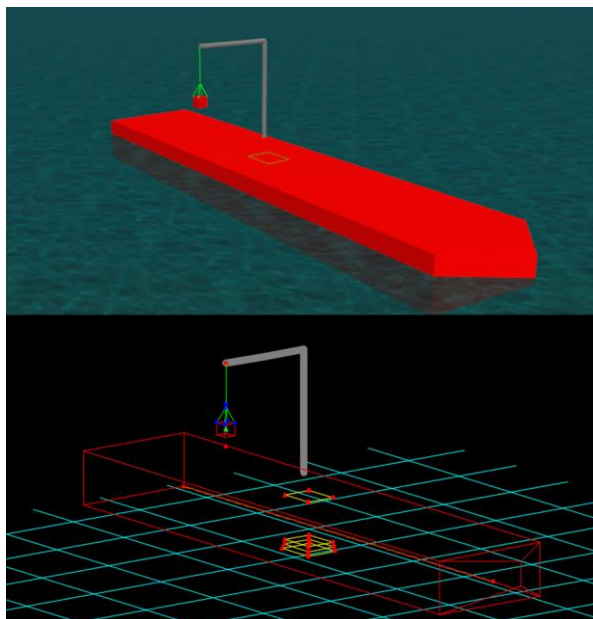


Figura 30 – Representação Gráfica OrcaFlex.

O presente projeto final é sobre uma análise da operação de *lift-off*. Para essa operação certas simplificações devem ser consideradas, pois alguns elementos que são considerados nas situações reais não estarão presentes. Como exemplo há o uso de cabos guias, análise de compressão dos cabos (*Birdcaging*) e a restrição de mar para análises de acelerações horizontais.

O fenômeno *Birdcaging*, Figura 31, de acordo com COSTELLO (1990), é quando um elemento de cabo de aço sofre esforços de compressão e suas cordas se afastam e fazem determinado trecho ter um aumento de diâmetro, se assemelhando a uma gaiola de pássaro. No presente trabalho não há estudo sobre esse fenômeno.



Figura 31 – Fenômeno *Birdcaging* (Fonte: Costello, 1990).

As condições ambientais são impostas por meio da escolha de um período de onda, altura, velocidade de vento e a velocidade de corrente, sendo desconsiderado os dois últimos. Quanto aos equipamentos do navio, foram utilizados modelos já

prontos que envolvem presença de um guindaste genérico, os cabos foram modelados como “links”, mostrados na Figura 32, e então foi configurado uma rigidez por meio de catálogos comerciais BRIDON (2013). Para o cabo principal, link5, foi utilizada a rigidez de 140 MN/m e para os cabos das eslingas, os outros, foi considerada de 28,9 MN/m.

O recurso *Link* do OrcaFlex em que se considera como cabo, pode ser configurado tendo uma rigidez única e comprimento fixo, desse modo, se é aplicado um carregamento no mesmo será notada uma tensão, podendo aumentar ou diminuir se o valor do carregamento seguir com o mesmo comportamento. A outra forma de configuração é quando seu comportamento busca manter uma tensão previamente configurada, tendo então um ajuste de comprimento, podendo crescer ou diminuir se o valor do carregamento seguir com o mesmo comportamento. Foi usada a primeira configuração citada no presente projeto.

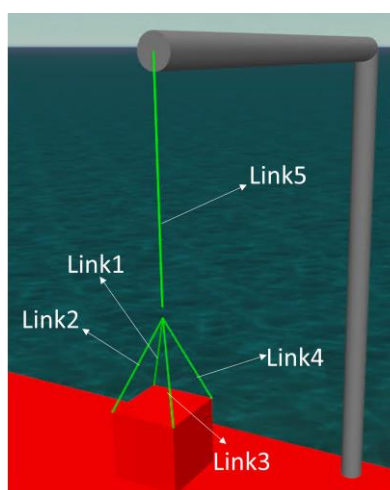


Figura 32 – *Skid* no arranjo de içamento.

O ponto de içamento do *Skid* foi posicionado de acordo com o que ocorre nas operações usuais, em que há uma descentralização dele em relação ao centro de volume do *Skid*, buscando estar alinhando com o centro de massa sendo representado por uma pequena Boia 6D laranja, mostrado na Figura 33.

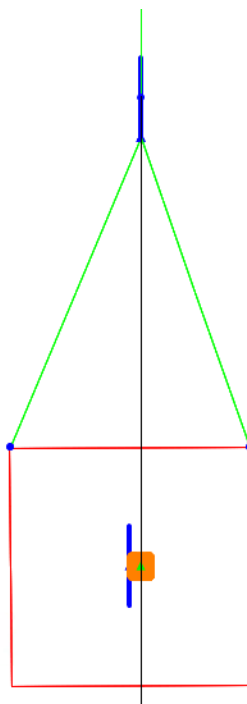


Figura 33 – Alinhamento do CG com ponto de içamento.

Foram estudados alguns casos de altura de ondas do mar relacionados ao transporte de POU, considerando as classes de operação dadas na norma DNVGL-ST-E273 (2016).

Nessa norma são tratadas as seguintes variáveis, H_s e H_{max} , sendo a primeira referente à uma altura significativa que é dada pelo média do terço maior de uma distribuição de ondas, e a segunda representa o valor que deve ser de fato considerado de acordo com a equação 11.

$$H_{max} = H_s \cdot 1,9 \quad (11)$$

Outro fator que deve ser analisado são os períodos a serem considerados de acordo com o H_s fornecido pela norma. Nas análises desenvolvidas foram consideradas valores obtidos da norma DNV-RP-C205 (2019), dados do departamento de instalações da TechnipFMC e de acordo com RIBEIRO (2004). Por meio de cálculos da norma, equação 12, foi obtido um valor de período, T_{max} de 7,2 segundos, que se mostrou não condizente com a frequência de ocorrência nas bacias brasileiras, que ficam entre 8 e 13 segundos.

$$T_{max} = 2,94 \cdot \sqrt{H_s} \quad (12)$$

Diante disso, de acordo com RIBEIRO (2004), buscou-se analisar o comportamento das ondas de maneira estatística de acordo com as características que ocorrem na Bacia de Campos. Para fim de comparação, foram avaliadas as diferentes classes de operação presente na norma, sendo elas R30, R45, R60 de acordo com a Tabela 3 para uma mesma direção de incidência no navio.

Tabela 3 – Dados de cada caso testado.

<i>Classes</i>	<i>H_{max} [m]</i>	<i>Direção [°]</i>	<i>Período [s]</i>
R30	5,7	0	12
R45	8,55	0	13
R60	11,4	0	12

Com o objetivo de tornar evidente a influência do RAO do navio, foi feita uma comparação do caso R45 para os períodos (T) de 8 segundos até 13 segundos, com um incremento de 1 segundo, mostrado na Figura 34. Vale ressaltar que a posição do navio representa também a movimentação da base do guindaste que está fixamente acoplada ao mesmo. Com esses resultados é possível observar que com a variação do período o navio adquire e transfere para o *Skid* diferentes comportamentos, em que para os períodos de 8, 11, 12 e 13 segundos a movimentação vertical é praticamente idêntica, com uma variação de 1%, para os demais períodos as movimentações verticais já apresentam uma diferença maior, em média de 10%.

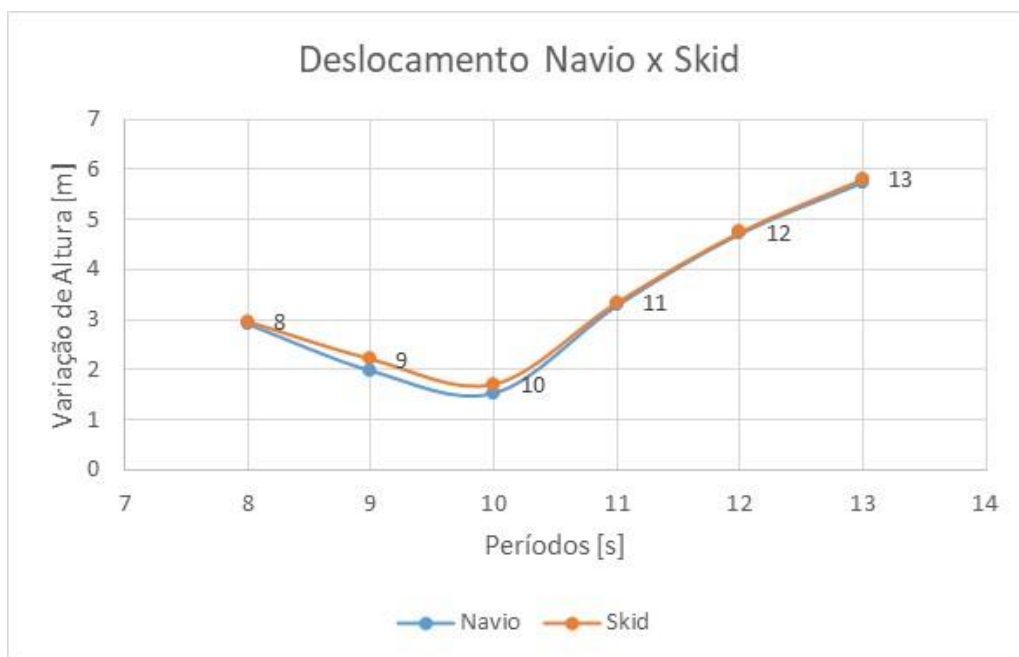


Figura 34 – Comparação de Movimentos Guindaste e Skid.

4.2 PÓS-PROCESSAMENTO

Para analisar o caso em questão, é processada uma análise em que durante 400 segundos são simuladas a passagem de ondas e como todo o sistema reage. Foi analisado o *Link5* pois suas componentes são majoritariamente verticais, facilitando seu estudo durante a análises posteriores. Na Figura 35 é possível observar a variação máxima de tensão que o cabo está sofrendo num intervalo específico de tempo da simulação.

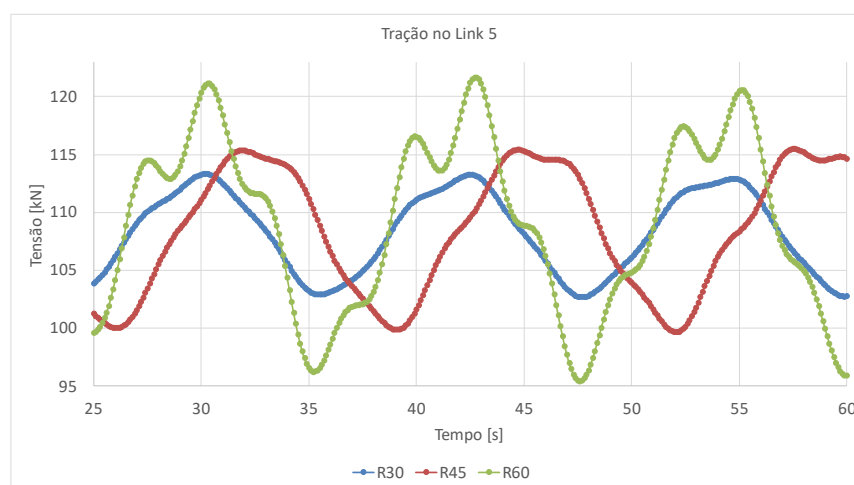


Figura 35 – Variação dos Esforços no Link 5.

Com esses resultados foi possível extrair as tensões máximas e mínimas que o Link5 é submetido, mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Esforços no Link5.

<i>Classes</i>	<i>Max [kN]</i>	<i>Min [kN]</i>
R30	113,3	95,4
R45	117,0	98,8
R60	121,6	102,4

Com esses valores médios foi possível determinar o FAD médio que está sendo aplicado nos cabos, presentes na Tabela 5, com isso será possível comparar com os valores gerados pelo Ansys.

Tabela 5 – FAD por classe de operação.

<i>Classes</i>	<i>FAD</i>
R30	1,05
R45	1,08
R60	1,13

Com estes dados, é possível extrair os pontos de deslocamento vertical da boia 6D, *Skid*, e com isso ser utilizado no Ansys Mechanical, fazendo o processo oposto de impor uma movimentação, dada em pontos, para depois extrair os esforços que são obtidos. Com essa manipulação foi possível realizar comparações com os valores de FAD obtidos nas demais modelagens apresentadas.

5 MODELAGEM ESTRUTURAL DO *SKID* POR ELEMENTOS FINITOS

Foram realizadas duas análises no Ansys Mechanical, uma simulação dinâmica transiente com dados de deslocamentos sofridos pelo *Skid*, modelado no OrcaFlex, para a obtenção de um FAD simulado e por fim uma simulação estática equivalente com o FAD simulado considerado como um coeficiente de majoração para a aceleração da gravidade.

De acordo com ADAMS (2008) a malha de MEF é a simplificação da geometria de entrada, de modo que simplificações serão feitas para preservar a qualidade da malha frente ao custo computacional. Modificações como a remoção de arredondamentos e pequenas geometrias são essenciais para garantir a qualidade da malha, que por sua parte, terá um impacto direto na qualidade dos resultados.

5.1 CONSIDERAÇÕES NO MODELAMENTO

Componentes modelados por completo para o desenho de estruturas, raramente estão com um nível de detalhes que não comprometem o custo computacional de uma análise em MEF da geometria. O modelo utilizado para o presente trabalho foi importado, sendo feito originalmente para a criação de desenhos técnicos, porém, a maior parte dos componentes modelados não contribuem estruturalmente para o *Skid*. Componentes como parafusos detalhados, pequenas correntes e gravações geram uma grande carga computacional, muitas vezes considerável, sem contribuir para o aumento da qualidade dos resultados da análise. Deste modo, foi realizado um passo chamado de limpeza do modelo, visando remover estes detalhes e geometrias que podem ser representadas de maneira menos refinada. Nas figuras 36 e 37 estão apresentados estes componentes acessórios.

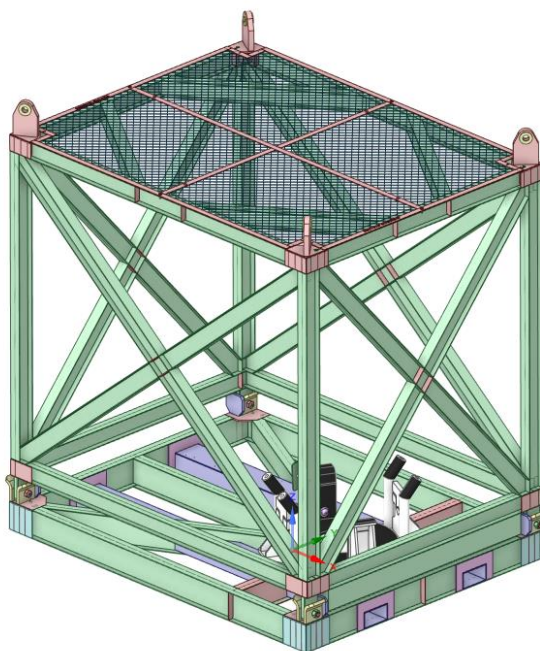


Figura 36 – Skid modelado com todos os detalhes.

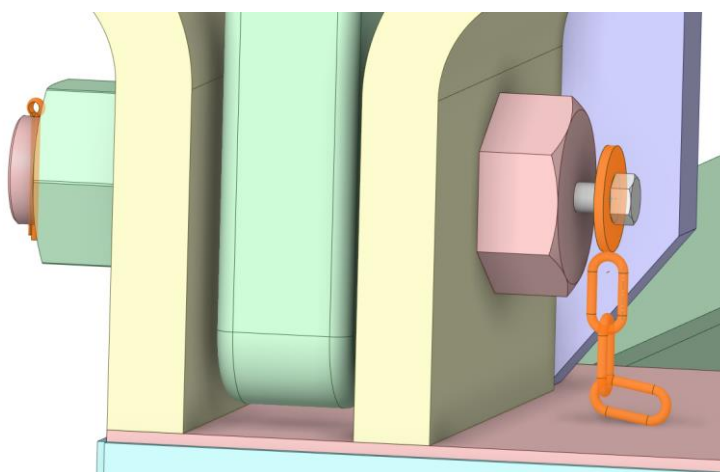


Figura 37 – Detalhamento de geometrias desnecessárias para a estrutura.

O modelo foi limpo para conter apenas o essencial para a performance estrutural do *Skid*. Parafusos utilizados na análise puderam ser simplificados com a inclusão de juntas virtuais, permitindo a mesma liberdade de movimento, porém tendo um impacto muito menor no custo computacional. Na Figura 38 é mostrado o componente depois do processo de limpeza.

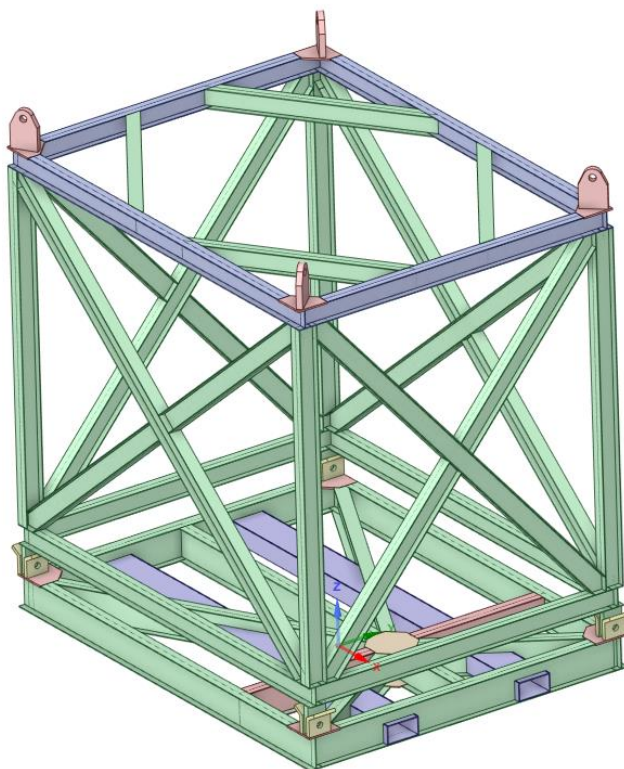


Figura 38 – Modelo otimizado do *Skid* para análise pelo MEF.

Outro ponto importante para a análise em questão é a consideração do guindaste como sendo um corpo rígido. O comportamento desta estrutura possui características complexas, como por exemplo, compensadores de movimentos, atuação de pistões para amortecimento e incertezas referentes à construção. Por estes motivos, evitando-se a inclusão de incertezas ao presente trabalho, considerou-se apenas os deslocamentos aplicados à ponta do cabo utilizado para o içamento do *Skid*.

5.2 PRÉ PROCESSAMENTO DE GEOMETRIAS

Como descrito anteriormente, a limpeza da geometria é um passo essencial para garantir uma boa base para o estudo pelo MEF. Na maior parte dos casos, deseja-se uma malha completamente composta de hexaedros ou quadriláteros, no caso de cascas. Para o modelamento do *Skid*, foram realizados cortes na geometria,

para guiar a geração de malha, aumentando a qualidade, ao custo de um maior tempo de pré-processamento.

O presente trabalho busca também avaliar quais são os tipos de elementos mais vantajosos para o modelamento do *Skid*. Portanto, nesta seção serão detalhados os procedimentos e passos necessários para a conversão de modelos Sólidos para casca e viga.

A criação do modelo de casca foi realizada com a assistência do programa SpaceClaim, pela possibilidade de uso da ferramenta Midsurface, focada na redução de tempo necessário para conversão de geometrias sólidas para casca. Na Figura 39 é mostrado o *Skid* durante o processo de conversão, sendo necessária a revisão do modelo para identificar as normais das novas faces que substituirão os sólidos.

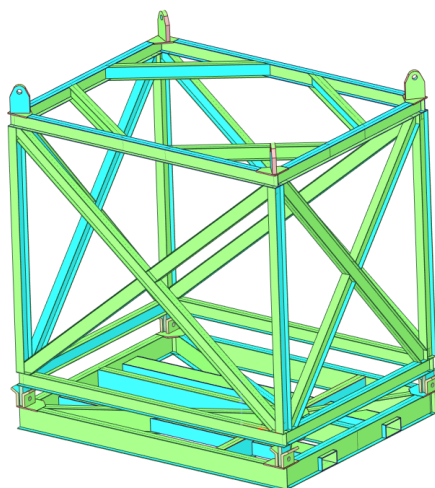


Figura 39 – Modelo de *Skid* sendo convertido para casca.

Modelos de casca possuem algumas ferramentas adicionais facilitando o pré-processamento para seu bom funcionamento. A principal delas é a possibilidade de conectar diretamente corpos de casca próximos, atuando a nível de malha, através do recurso *batch connections*. Este pré-processamento, para se obter um bom modelo de casca, possui uma considerável vantagem do ponto de vista da qualidade dos resultados gerados e custo computacional. A diferença na quantidade de nós entre os elementos sólidos e de casca é causada por dois principais fatores, cascas possuem apenas um nó em sua “espessura”, mesmo assim, permitindo o uso de contatos, calculados a partir da distância até o nó e pelo fato que sua formulação usualmente é

linear, ou seja, possuem nós apenas nos vértices dos elementos, por serem muito menos suscetíveis ao efeito do *Shear Locking*, presente apenas em deformações no plano, diferente dos elementos sólidos. Por este motivo, faz sentido utilizar uma discretização mais elevada para elementos de casca, evitando problemas de *Shear Locking*, ao mesmo tempo que aumenta a qualidade dos resultados, possuindo, mesmo assim, uma quantidade menor de nós no modelo.

5.3 ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA

Um dos passos mais importantes para a confiabilidade do modelo gerado pelo MEF é a determinação do tamanho ideal dos elementos utilizados. Uma malha com elementos muito pequenos pode gerar resultados marginalmente mais precisos, porém com custo computacional proibitivo. Em contrapartida, uma malha grosseira demais pode não ser capaz de capturar os efeitos locais impostos na estrutura.

O objetivo da análise de convergência desenvolvida é determinar os modelos mais eficientes computacionalmente para o *Skid*. Portanto, variações de até 15% das tensões nas regiões críticas serão consideradas como aceitáveis, sendo um valor de convergência comum entre as boas práticas da aplicação do MEF. Elementos sólidos quadráticos e de casca linear serão considerados, por serem os mais versáteis e eficientes computacionalmente, tendo em vista os efeitos de *Shear Locking*, para sólidos lineares e ganho pequeno de precisão para elementos de casca quadráticos.

Para a realização da análise de convergência, será utilizada uma geometria do *Skid*, após o processo de limpeza, em uma análise estática. Para as restrições de movimentação da geometria, o *Skid* será suportado pelas eslingas, estas por sua vez, estarão conectadas a um ponto fixo no espaço, alinhado com o Centro de Gravidade da montagem, no mesmo ponto que elas estariam conectadas ao cabo principal, que as conectariam do guindaste. Os carregamentos sofridos pela geometria serão causados exclusivamente pela força peso, sem majoração na aceleração da gravidade, uma massa pontual foi associada a geometria utilizada para o apoio do MCV, com seu centro de massa baseado em dados do componente real.

De modo geral, o modelo apresenta uma região com claros indícios de singularidade, ou seja, tensões que aumentam conforme o refino de malha aumenta, sendo mostrada na Figura 40, como exemplo. Tendo em vista a presença deste

fenômeno em todos os modelos, esta região será desconsiderada pelas baixas tensões observadas no resto deste componente.

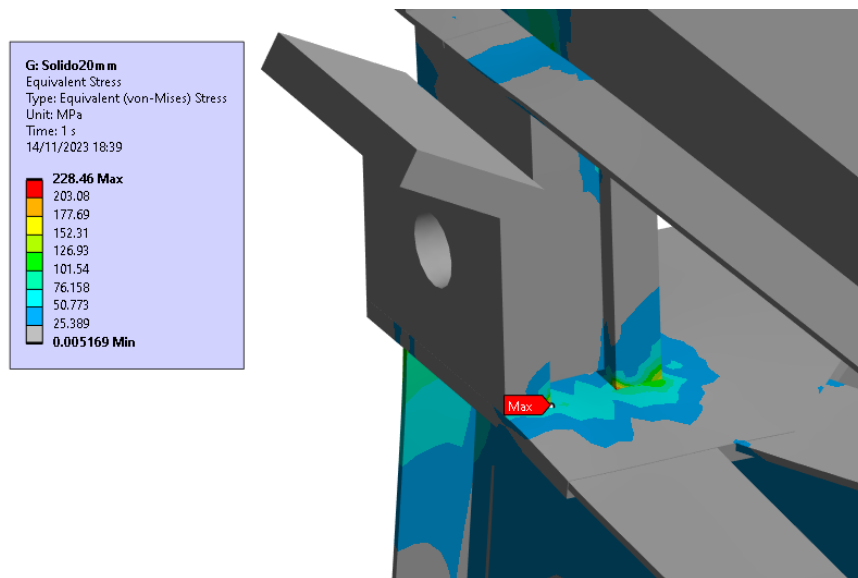


Figura 40 – Região com concentrador de tensões.

Na Figura 41 é mostrado o modelo que será considerado para a análise de convergência, possuindo carregamento estático, sem coeficientes de majoração e apoiado pelas eslingas. Uma restrição de rotações e deslocamentos laterais foi aplicada ao modelo, visando a estabilidade da análise, tendo em vista que, a análise estática é altamente suscetível a erros devido a pequenos carregamentos não restritos, neste caso, rotações ao redor do ponto de fixação das eslingas. Para facilitar a interpretação dos dados, a escala das legendas será normalizada.

E: Solido60 m m
Static Structural
Time: 1. s
14/11/2023 18:12

- A** Standard Earth Gravity: 9806.6 mm/s²
- B** Remote Displacement
- C** Remote Displacement 2

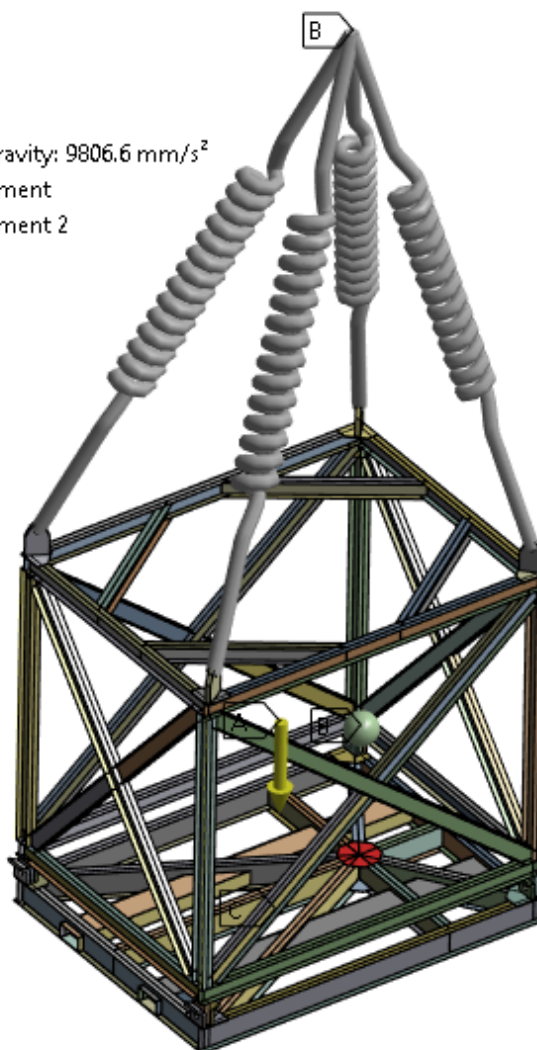


Figura 41 – Modelo para análise de convergência.

O primeiro tipo de elemento a ser estudado será o Sólido, permitindo uma melhor comparação com os elementos de casca, mostrados posteriormente. Na Figura 42 é mostrada a primeira malha, composta por elementos de 60mm.

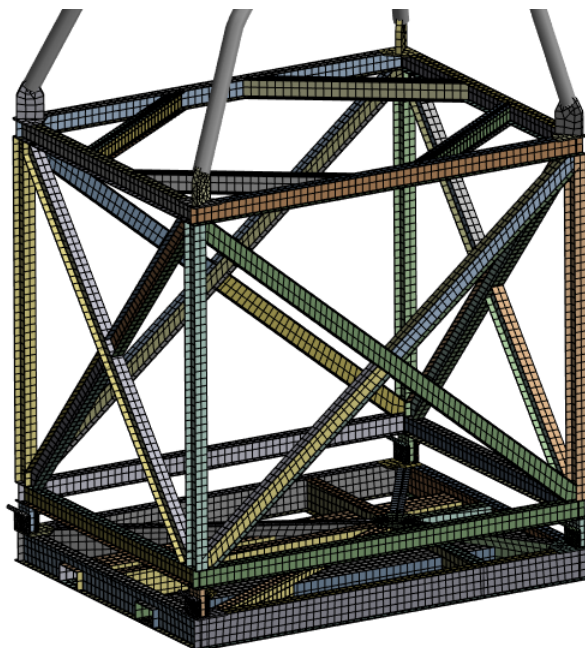


Figura 42 - Malha Quadrática Sólida, 60mm.

Foram gerados os seguintes resultados de tensão de Von Mises, mostrados nas Figuras de 43 a 45 considerando diferentes ângulos, com a última figura focada na região de tensões máximas. Este modelo de apresentação dos dados será utilizado para todos os modelos na análise de convergência.

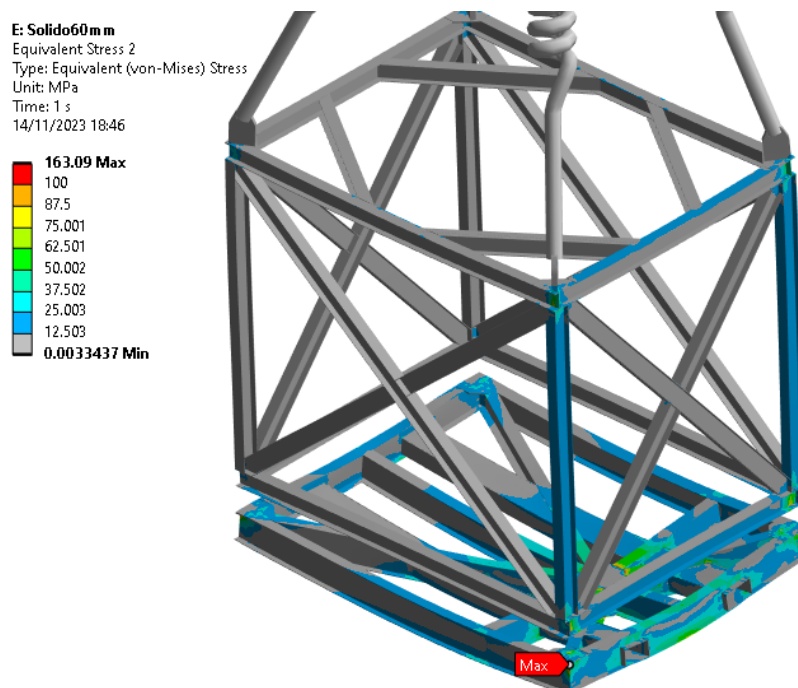


Figura 43 – Resultado de tensão, modelo sólido quadrático, vista isométrica superior, 60mm.

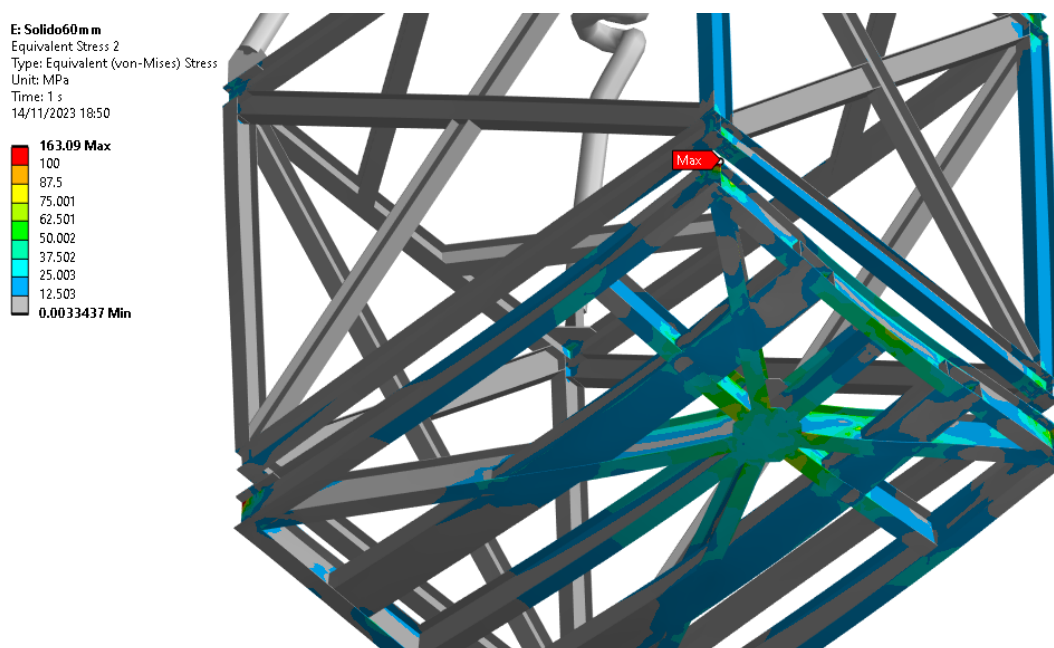


Figura 44 – Resultado de tensão, modelo sólido quadrático, vista isométrica inferior, 60mm.

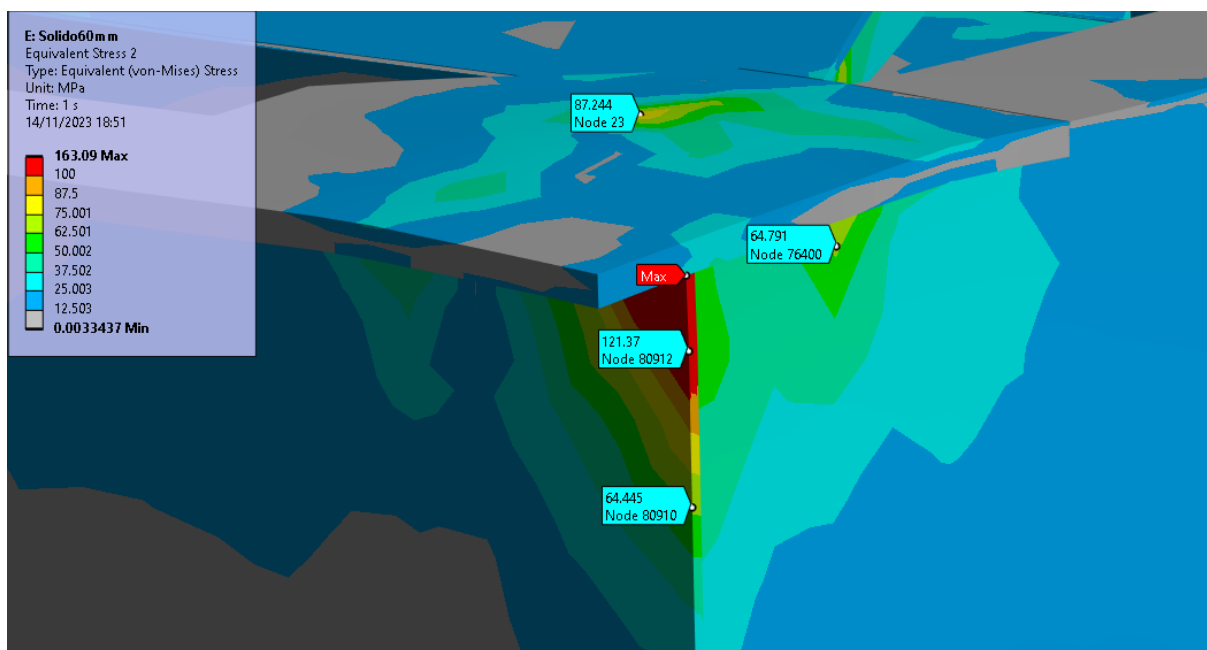


Figura 45 – Detalhamento da região de tensões máximas, modelo sólido quadrático, 60mm.

Em seguida, o tamanho de malha foi modificado para 40mm, gerando uma diferença considerável na regularidade dos elementos e na quantidade de nós da simulação. Na Figura 46 é mostrada a malha gerada.



Figura 46 – Malha Sólida, quadrática, 40mm.

Seguindo as mesmas cargas e restrições detalhadas anteriormente, os resultados podem ser visualizados através das Figuras 47 a 49.

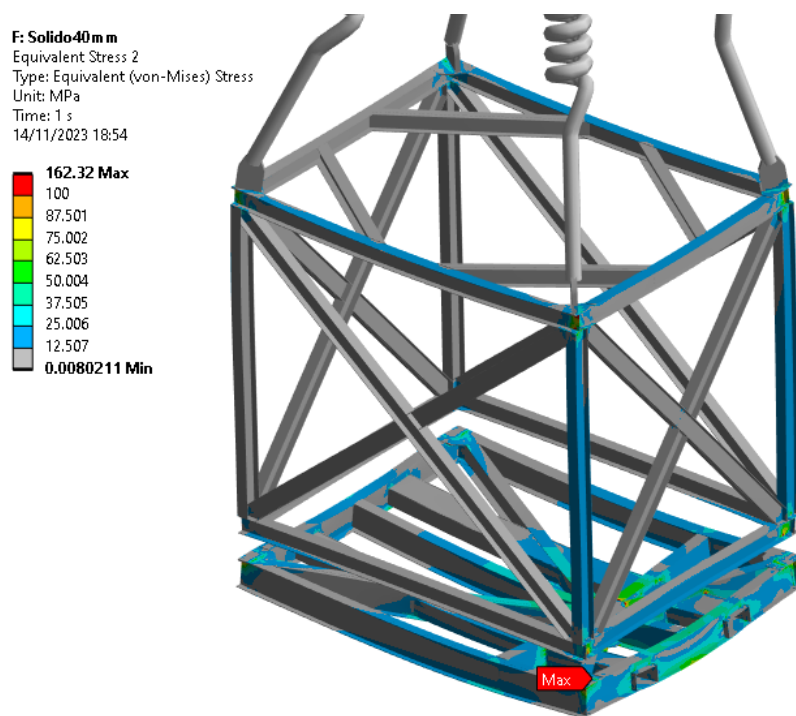


Figura 47 – Vista isométrica superior, modelo sólido, quadrático, 40mm.

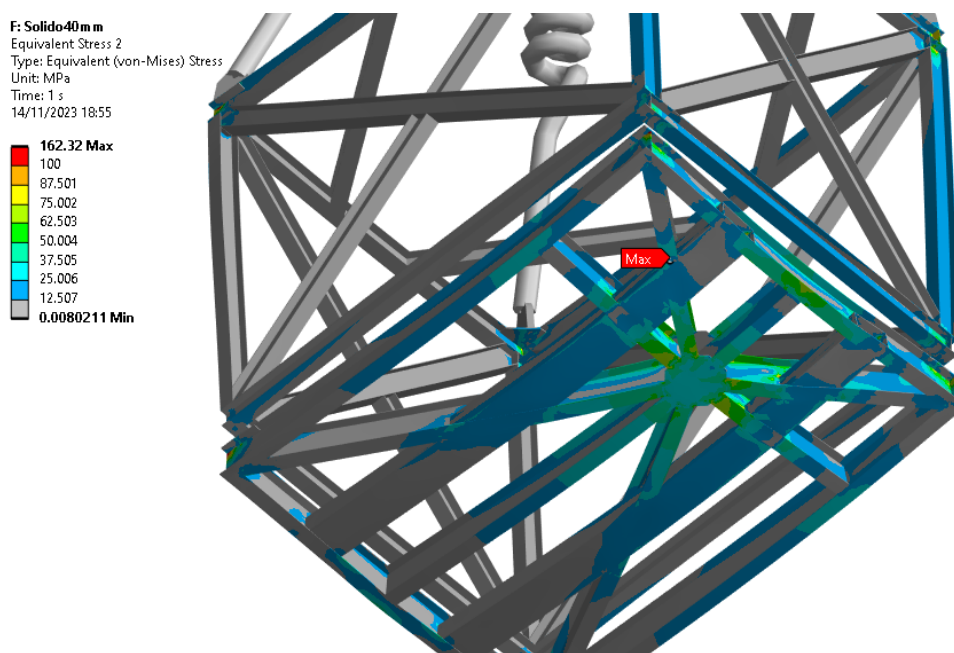


Figura 48 – Vista isométrica inferior, modelo sólido, quadrático, 40mm.

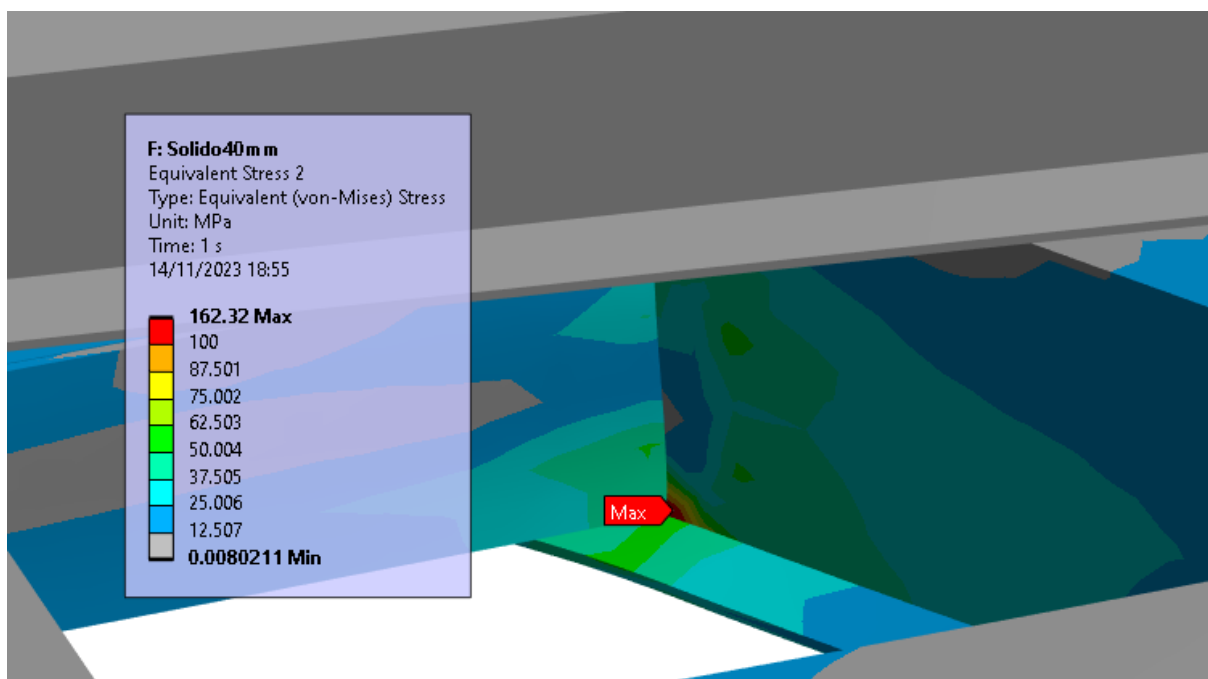


Figura 49 – Detalhamento da região de tensões máximas, modelo sólido quadrático, 40mm.

Tendo em vista os resultados altamente concentrados do modelo sólido de 40mm, o perfil de tensões na região crítica do modelo de 60mm será estudada, sendo mostrado na Figura 50. Como esta é uma região crítica para todos os modelos, esta será usada para a melhor comparação em geometrias semelhantes, facilitando a avaliação da malha.

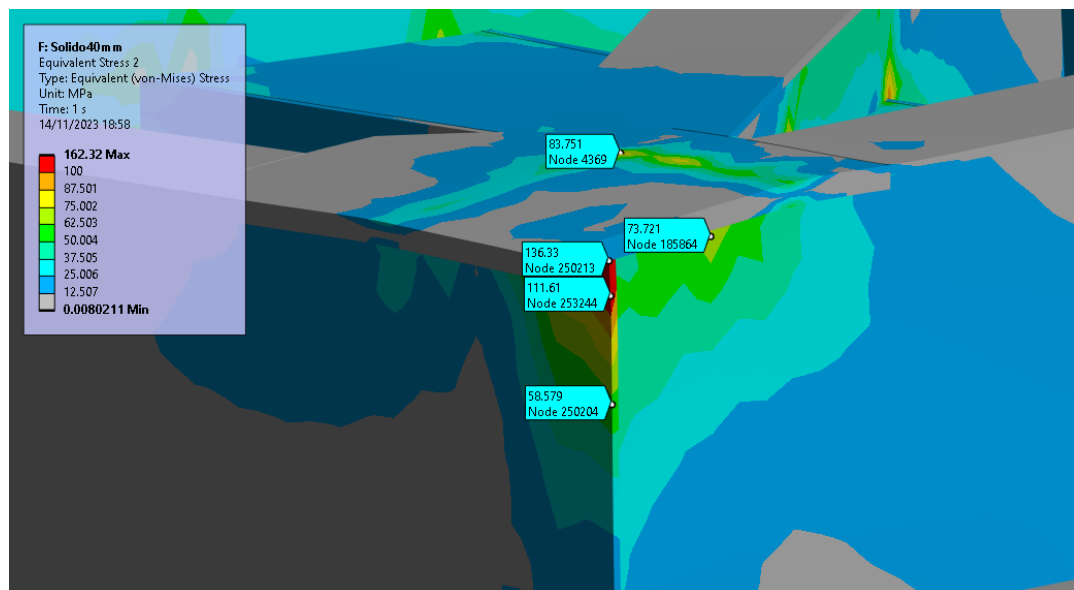


Figura 50 – Detalhamento da região crítica comum, modelo sólido quadrático, 40mm.

Por fim, como indicam as boas práticas para a análise de convergência, serão feitas no mínimo 3 malhas, progressivamente mais refinadas, finalizando com 20mm, sendo mostrada na Figura 51.

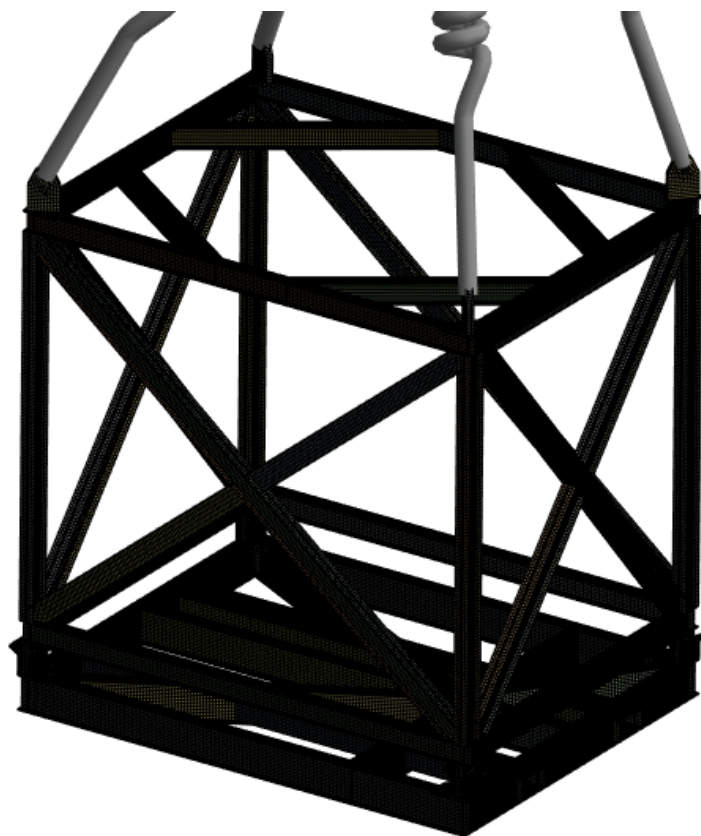


Figura 51 – Malha Sólida, quadrática, 20mm.

Fica claro que com 20mm de tamanho de elemento, temos uma diferença muito grande entre as dimensões dos componentes e da malha gerada. A qualidade geral dos elementos é excepcional, porém com aproximadamente oito vezes o número de elementos que o modelo com 60mm. Nas Figuras 52 a 55 são mostrados os resultados de tensão em duas vistas além do detalhamento da região de tensão máxima.

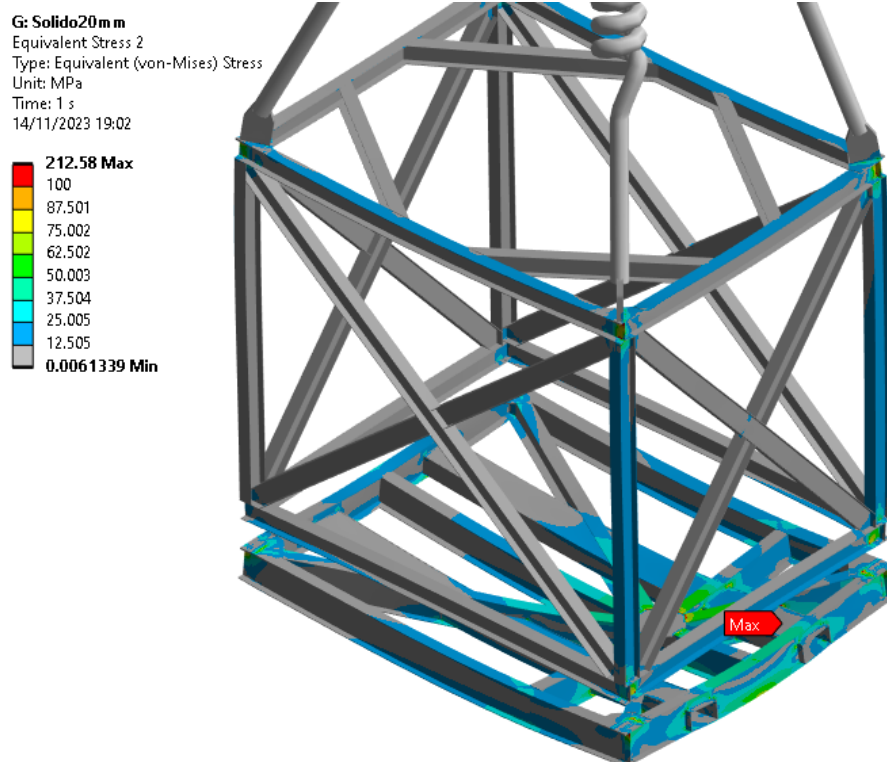


Figura 52 – Vista isométrica superior, modelo sólido quadrático, 20mm.

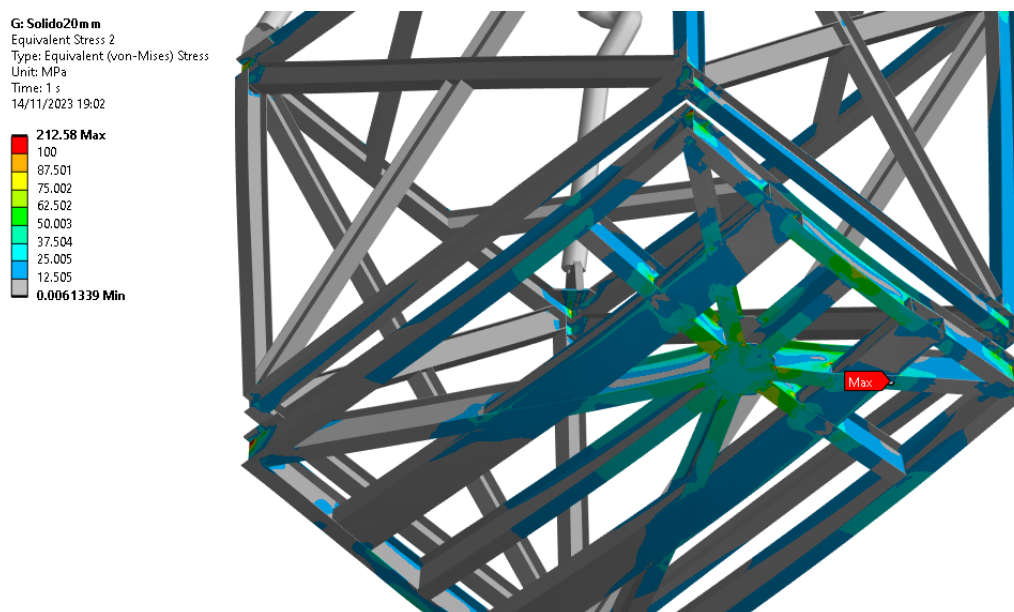


Figura 53 – Vista isométrica inferior, modelo sólido quadrático, 20mm.

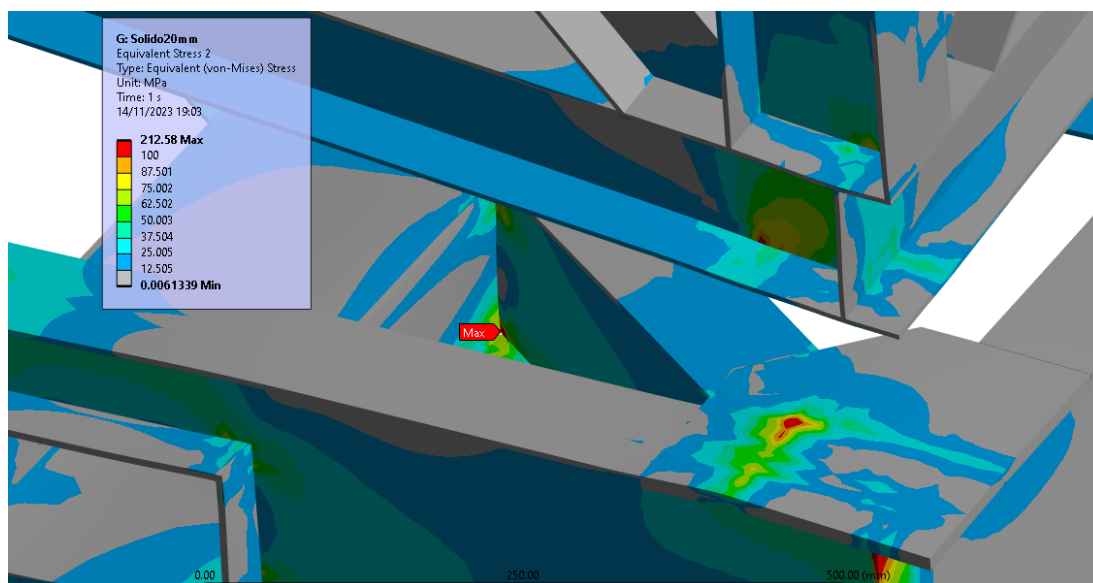


Figura 54 – Detalhamento da região de tensões máximas, model modelo sólido quadrático, 20mm.

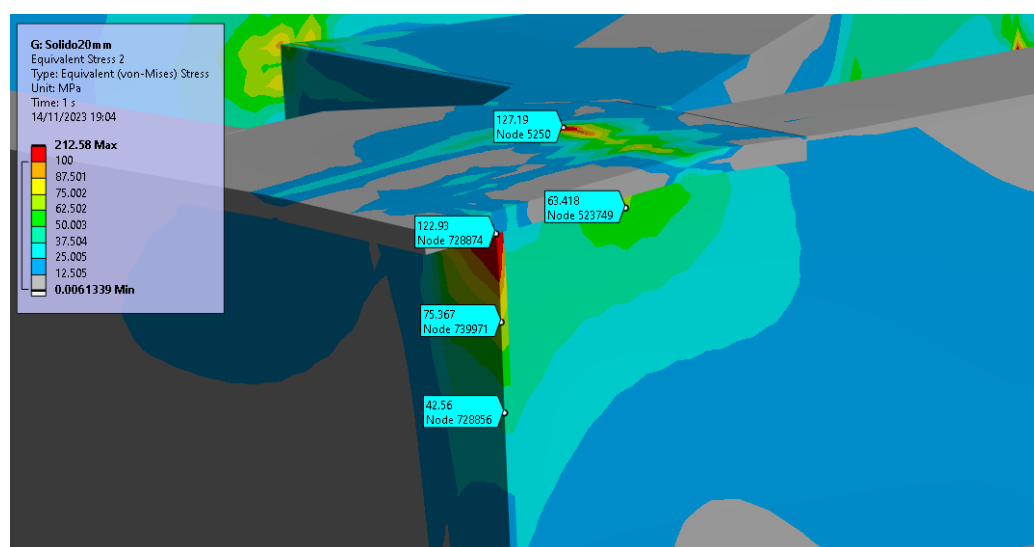


Figura 55 – Detalhamento da região crítica comum, modelo sólido quadrático, 20mm.

Comparando os resultados dos diferentes modelos, tendo em vista a enorme diferença entre quantidade de nós, é possível concluir que, para uma malha sólida de segunda ordem, 40mm é o tamanho que consegue balancear a representação física, sem comprometer fortemente o custo computacional da análise. Para o modelo de 20mm existe uma forte tendência de elevar excessivamente as tensões em regiões

altamente concentradas. Nas Figuras 56 e 57 são mostrados o número de nós dos modelos e a tensão máxima e média

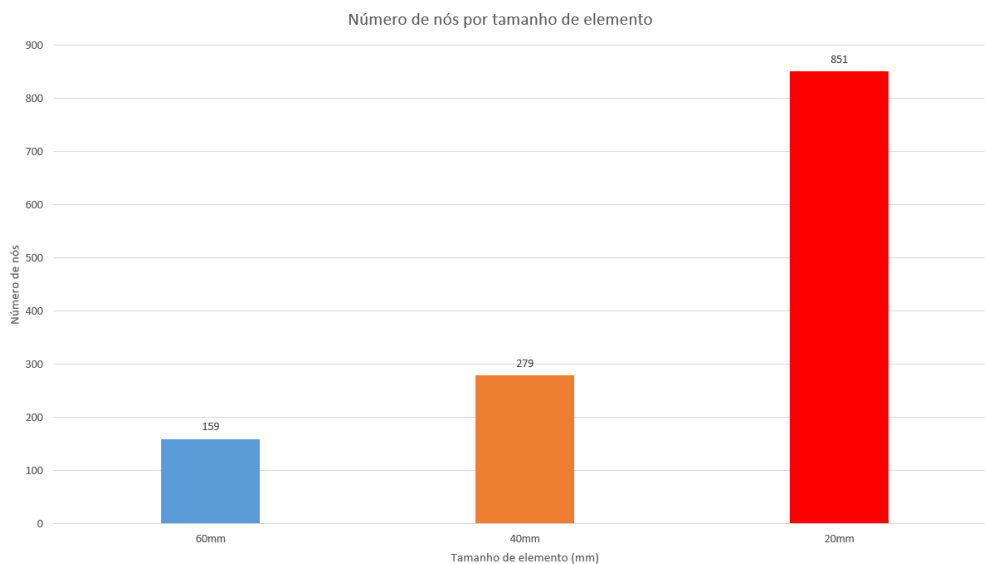


Figura 56 – Gráfico expando quantidade de nós frente a tamanho de elemento.

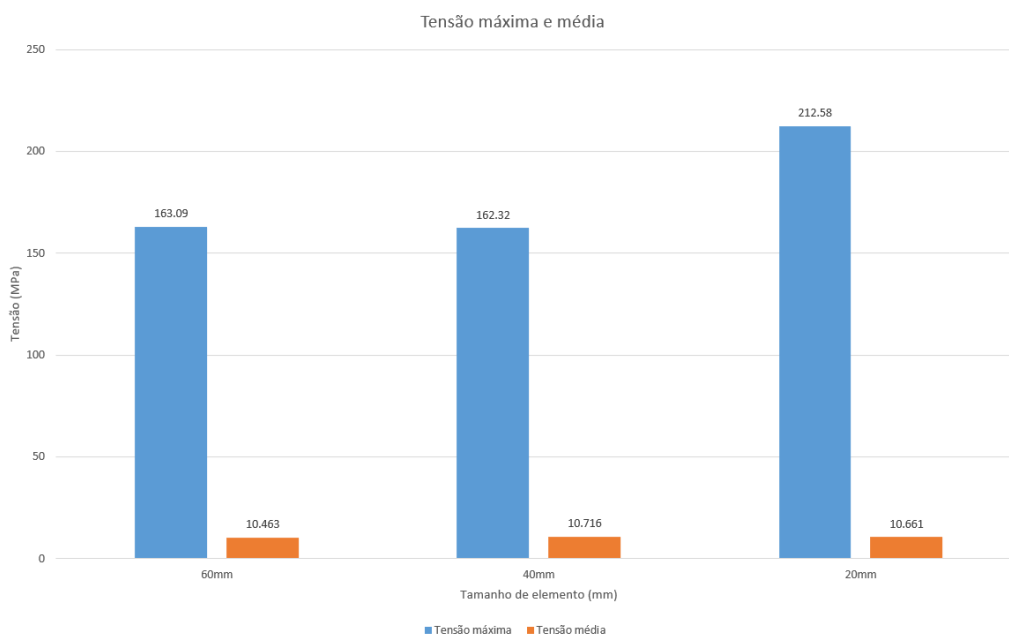


Figura 57 – Tensão máxima e média dos modelos sólidos.

O refino adicional de malha não representou um grande ganho de precisão frente ao custo computacional. Tendo em vista que o refino adicional gerou um aumento das tensões em regiões concentradas, criando a necessidade de um maior

pós-processamento para determinar corretamente quais são as regiões de singularidade ou não, o modelo de 40mm representa de maneira mais equilibrada a estrutura, pois as tensões médias estão dentro do envelope de 15% considerado.

Uma das boas práticas para a criação de uma malha para o MEF, indica que se deve utilizar pelo menos 2 elementos na espessura de um componente, para capturar corretamente a distribuição das tensões no decorrer da espessura. Para a criação de tal modelo, sem a necessidade de um pré-processamento extensivo, foi necessário um elemento com metade do tamanho da espessura.

Visando estudar o impacto de uma malha tão refinada, foi construído um Submodelo, ou seja, a simulação de apenas uma pequena parte da estrutura, com deslocamentos baseados em uma malha mais grosseira. Na Figura 58 é mostrado o deslocamento importado da simulação no modelo reduzido.

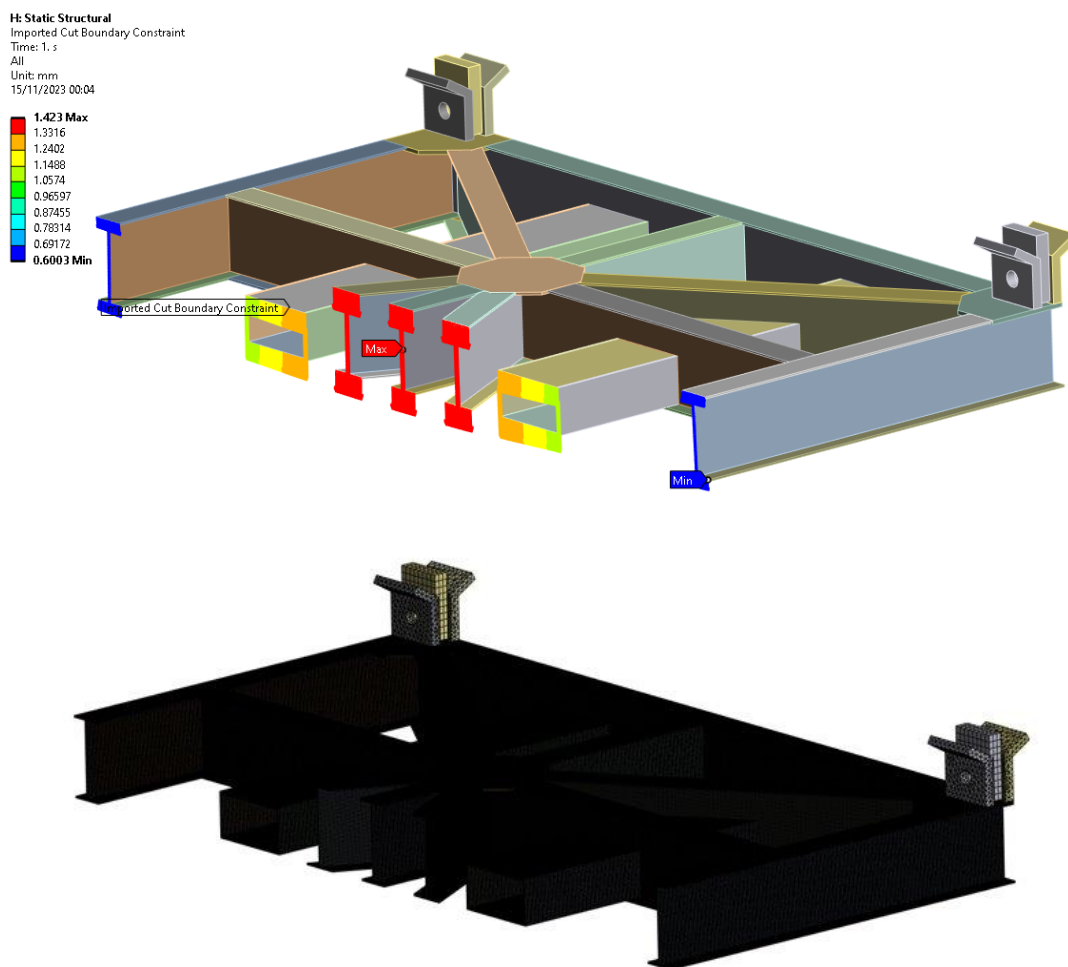


Figura 58 – Deslocamentos impostos no submodelo e sua malha.

Na Figura 59 é mostrada a distribuição de tensões na região crítica, comum a todos os modelos com elementos sólidos. Tendo em vista a forte tendência de o Submodelo gerar erros consideráveis próximos à região de corte, os resultados de tensões máximas são desconsiderados, assim como em regiões que claramente apresentam singularidades.

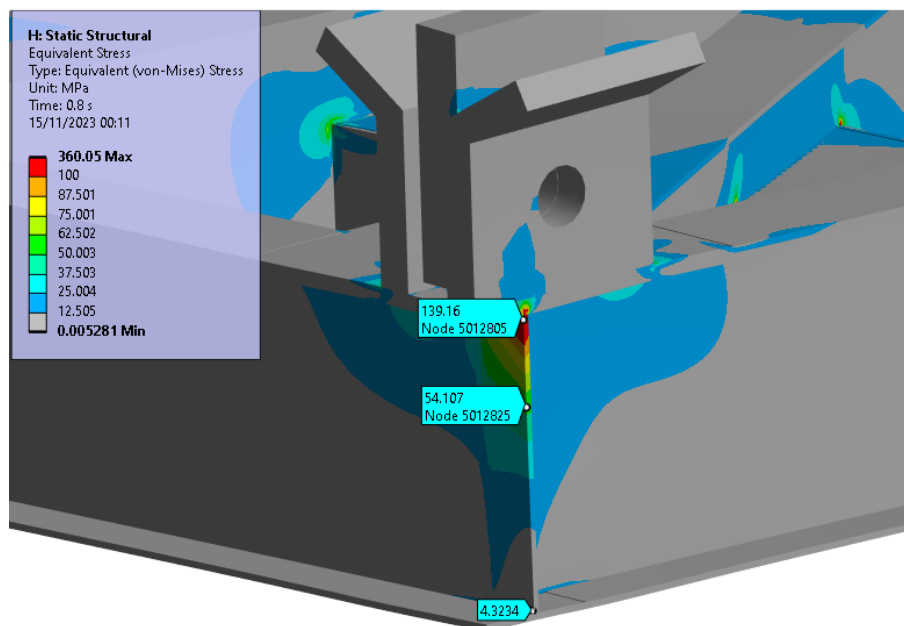


Figura 59 – Distribuição de tensões no submodelo.

Apesar dos resultados serem refinados, o modelo com dois elementos na espessura se mostra muito custoso computacionalmente ou com a necessidade de um grande investimento de pré-processamento. O submodelo citado, mesmo sendo apenas uma pequena parte da estrutura completa possui 6 milhões de nós e necessitou de 7 horas para ser processado, além de mais de 100GB de memória RAM, gerando resultados extremamente próximos de modelos mais simples.

A estrutura do *Skid* possui características de modelamento que permitem a boa representação dela através de corpos de casca. As vigas que compõe o *Skid* são corpos com uma espessura muito pequena em relação ao comprimento e largura, sem mudanças de espessura de chapa em uma mesma superfície. Apesar da necessidade de um pré-processamento adicional, como detalhado anteriormente, o custo computacional da análise pode sofrer uma redução considerável, ao mesmo tempo que, com o tamanho de elemento adequado, mantém-se a fidelidade da análise.

A escolha de tamanho de elemento para cada um dos passos de convergência utilizado para o modelo de casca foi levemente menor que os mesmos passos para o modelo sólido, visto que como é de primeira ordem, a boa prática indica uma densidade maior de elementos para capturar corretamente a distribuição de tensões.

O rol de elementos utilizados será de 40mm, 20mm e 10mm respectivamente, completamente composto de elementos de casca. Na Figura 60 está o modelo gerado

com 40mm de tamanho de elementos, com os resultados de tensão mostrados nas Figuras 61 a 63.

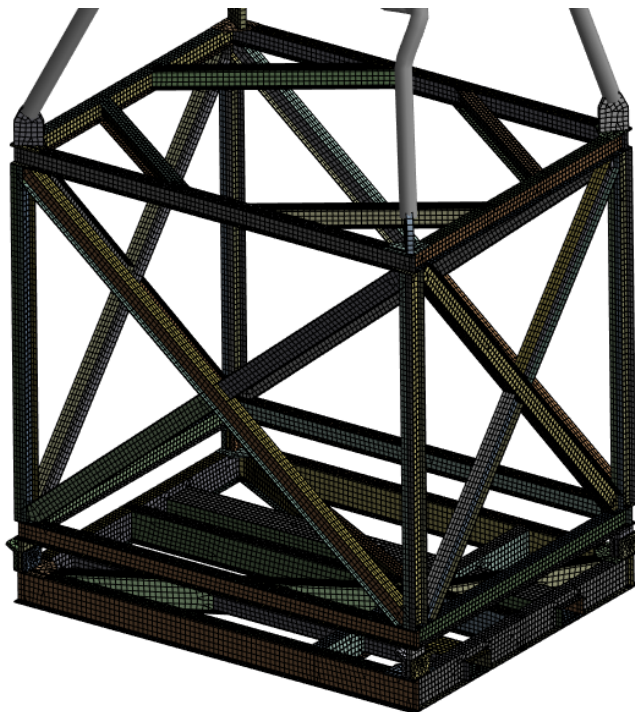


Figura 60 – Malha modelo de casca, 40mm.

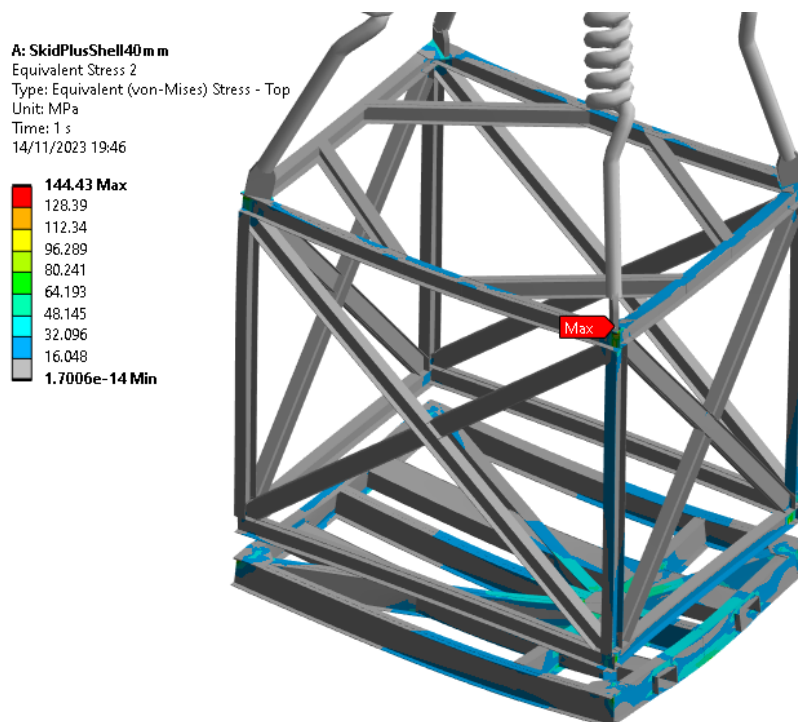


Figura 61 – Modelo de casca com 40mm, vista isométrica superior.

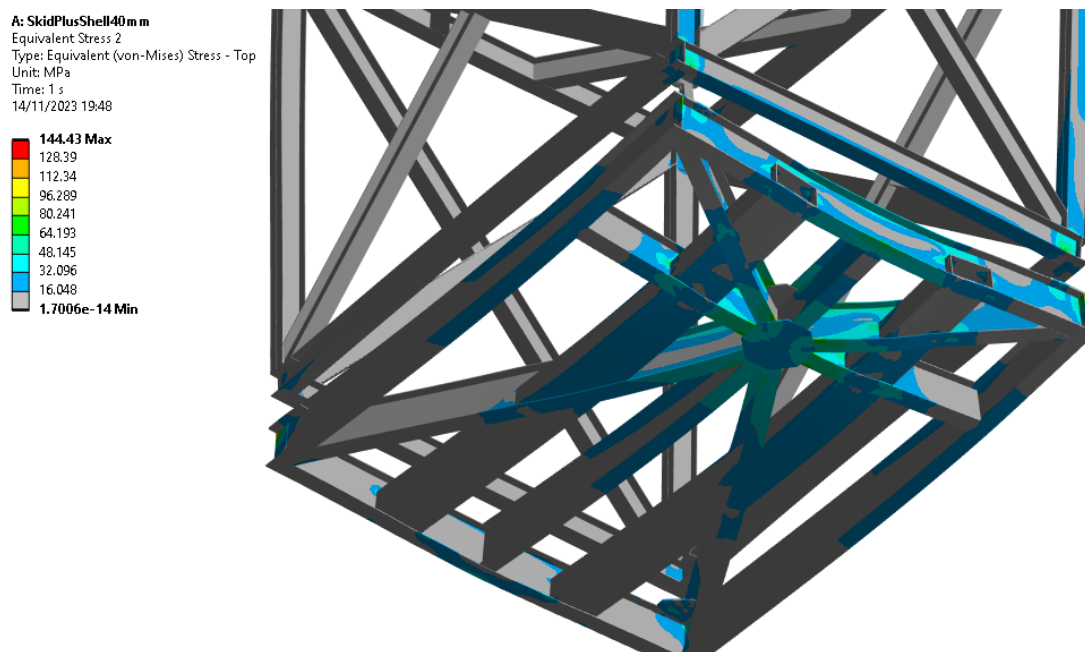


Figura 62 – Modelo de casca com 40mm, vista isométrica inferior.

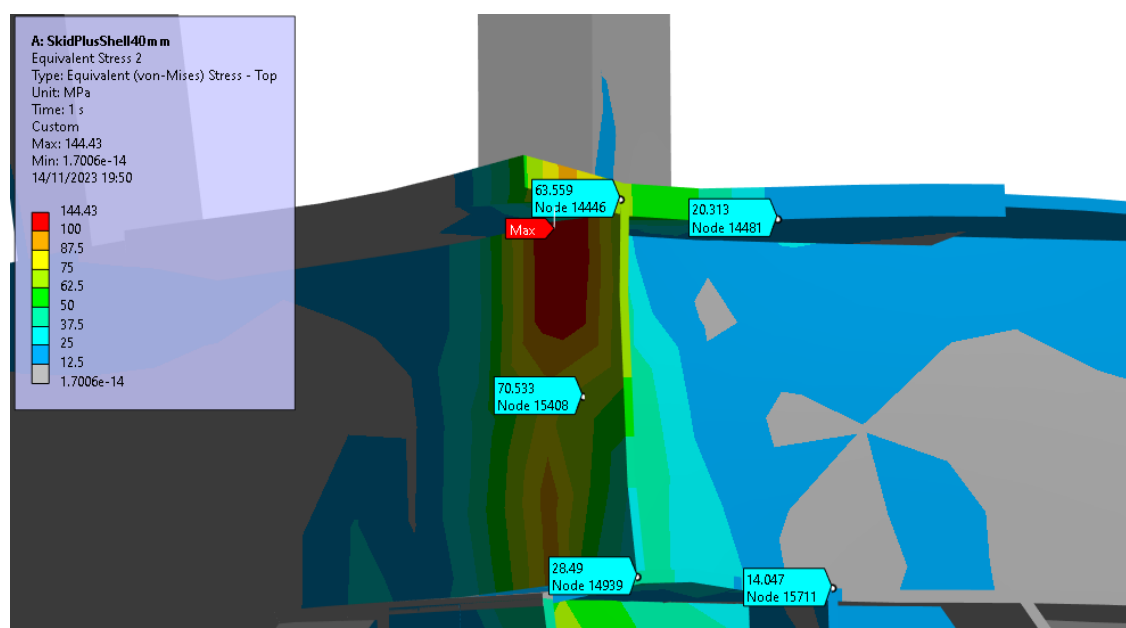


Figura 63 – Detalhamento da região de tensão máxima, casca 40mm.

Nas Figuras 64 até 67 são mostrados os resultados para os elementos de casca com 20mm de tamanho de elemento, assim como sua malha.

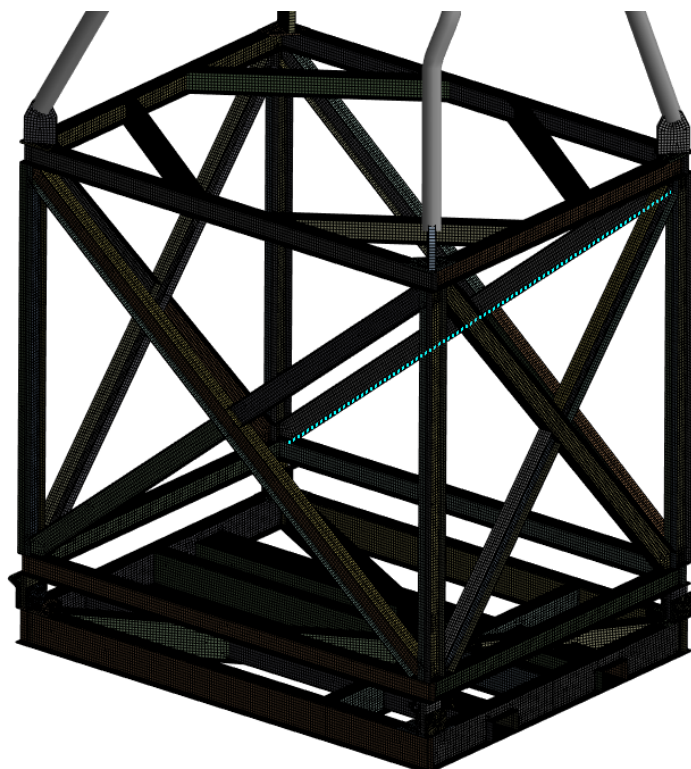


Figura 64 – Malha modelo de casca, 20mm.

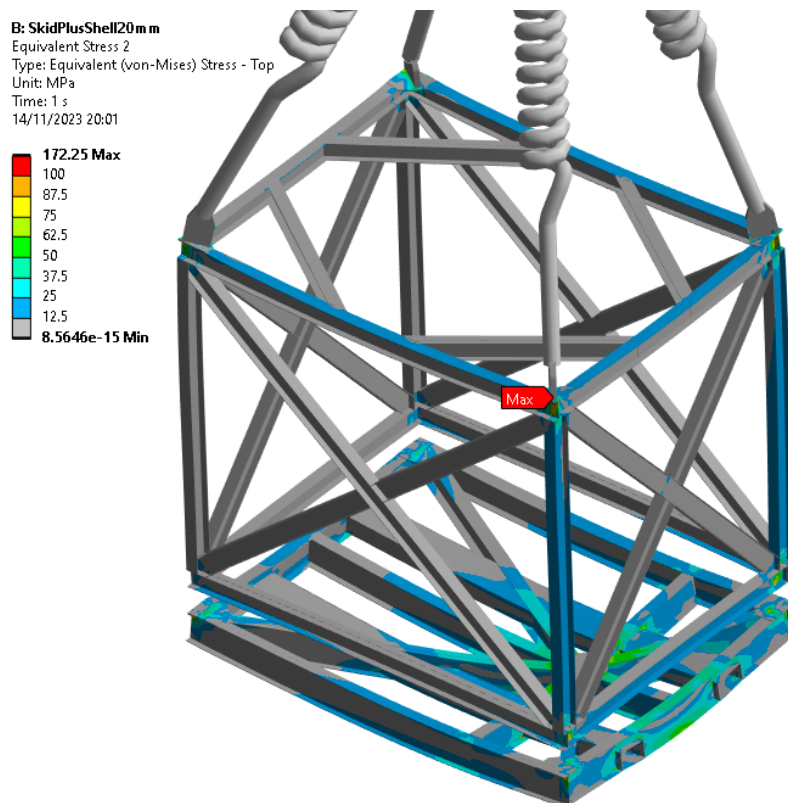


Figura 65 – Modelo de casca 20mm, vista isométrica superior.

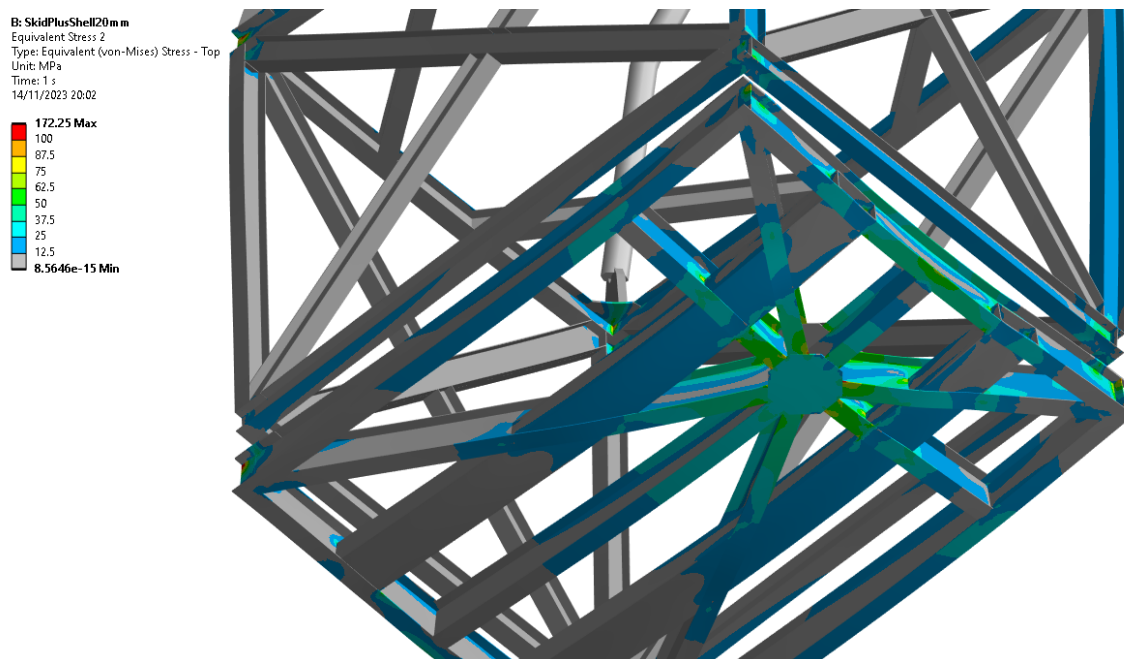


Figura 66 – Modelo de casca 20mm, vista isométrica inferior.

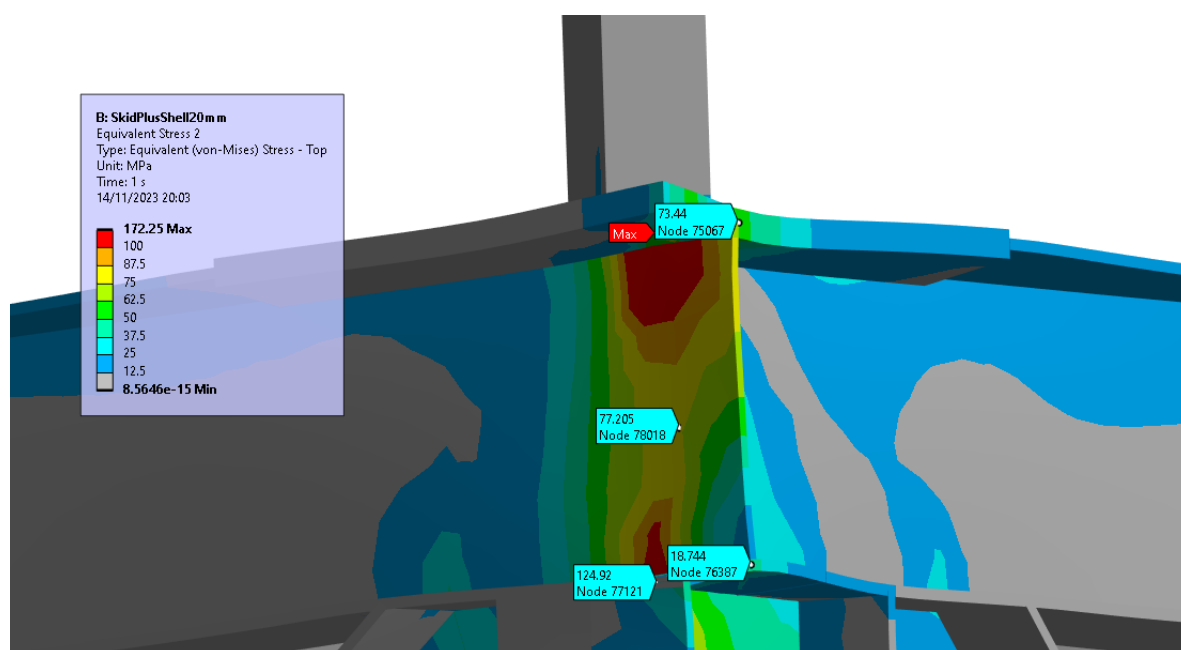


Figura 67 – Detalhamento da região de tensão máxima, casca 20mm.

Nas Figuras 68 a 71 são ilustrados a malha gerada e os resultados de tensões para elementos de casca com 10mm, respectivamente.

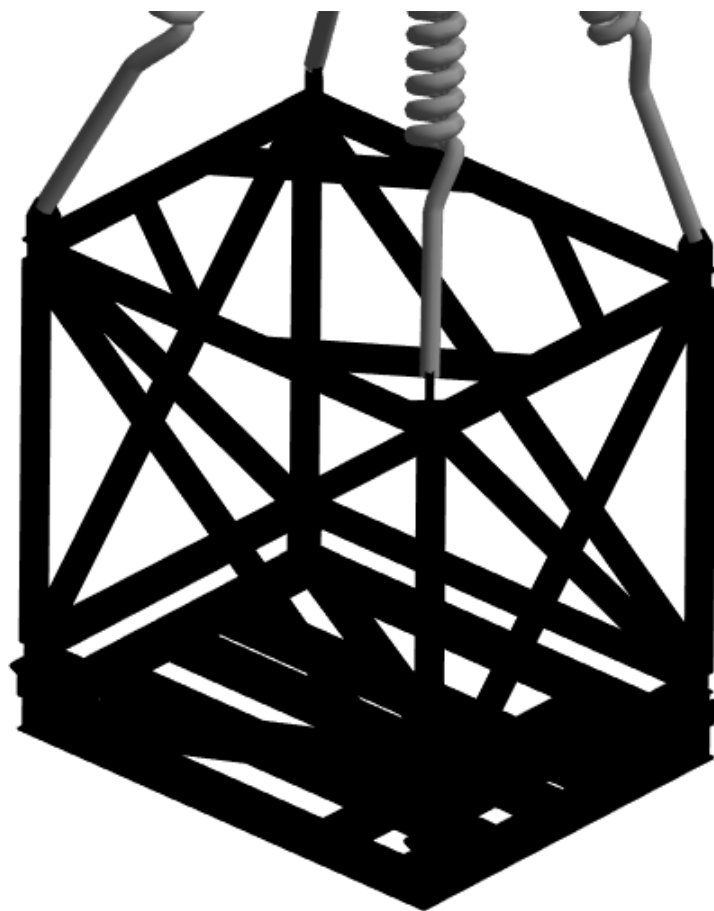


Figura 68 – Malha modelo de casca, 10mm.

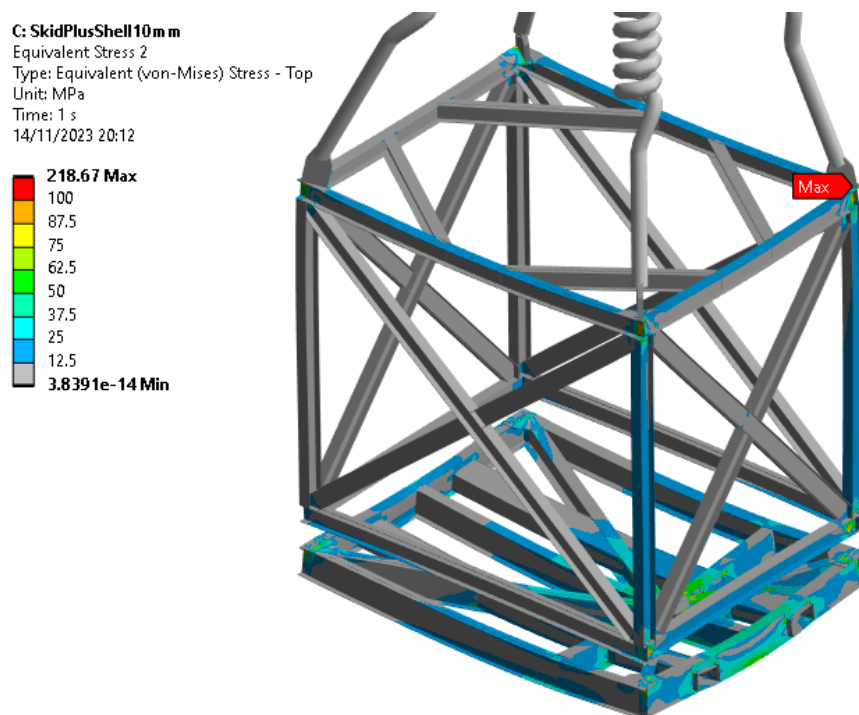


Figura 69 – Modelo de casca 10mm, vista isométrica superior.

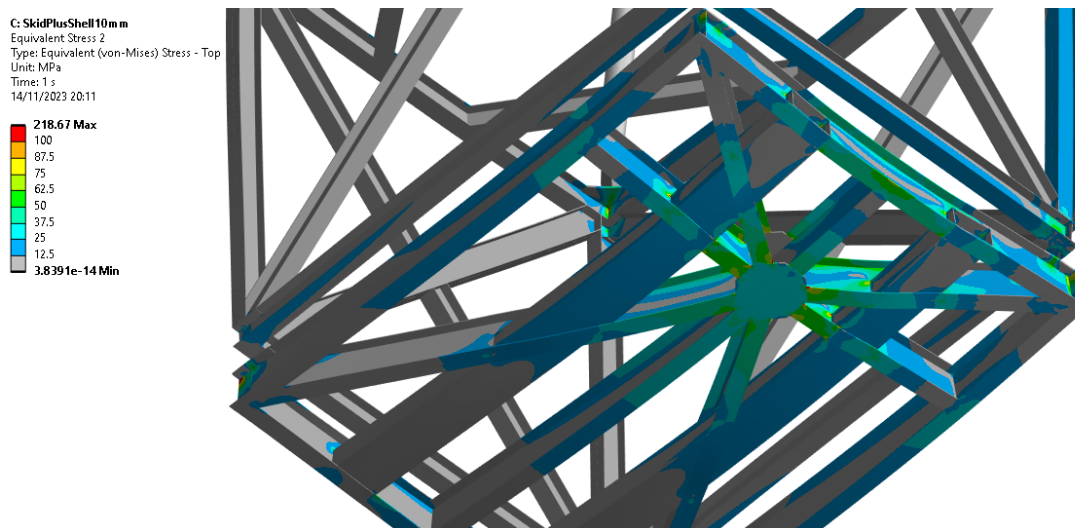


Figura 70 – Modelo de casca 10mm, vista isométrica inferior.

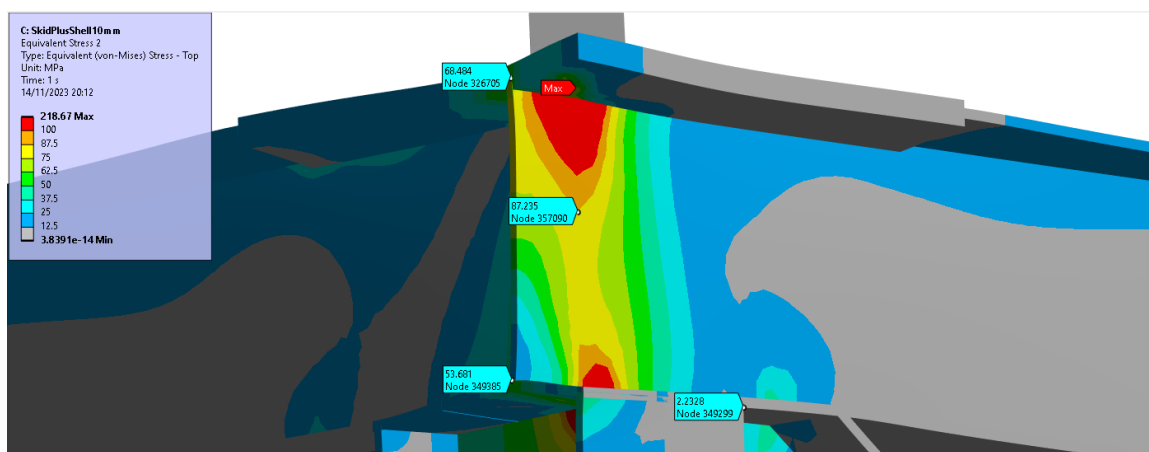


Figura 71 – Região de tensões máximas, casca 10mm.

Nas Figuras 72 e 73 são mostradas as relações entre quantidade de elementos, tensão máxima e média.

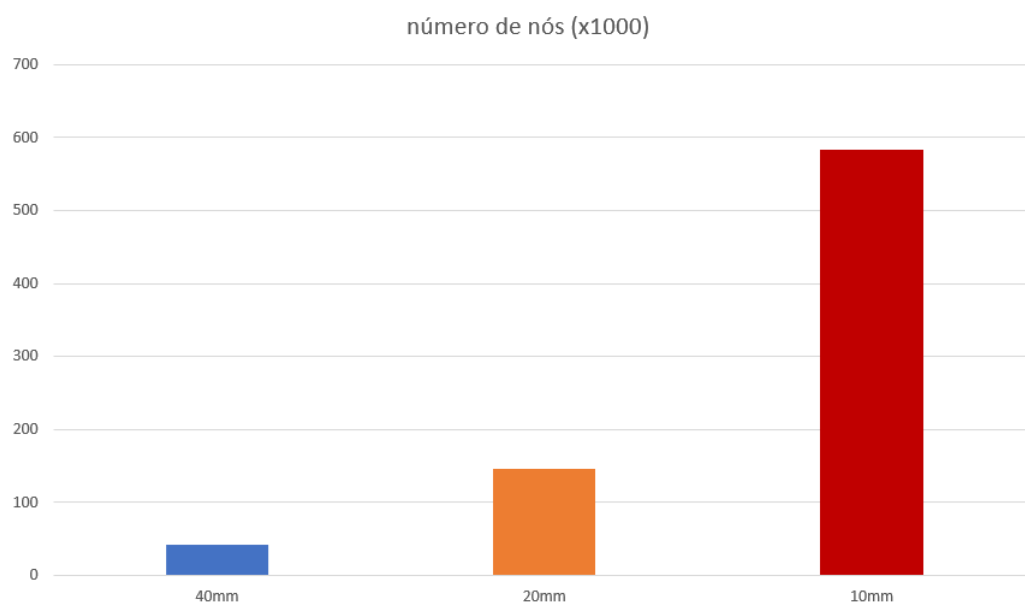


Figura 72 – Número de nós por tamanho de elemento, modelo de casca.

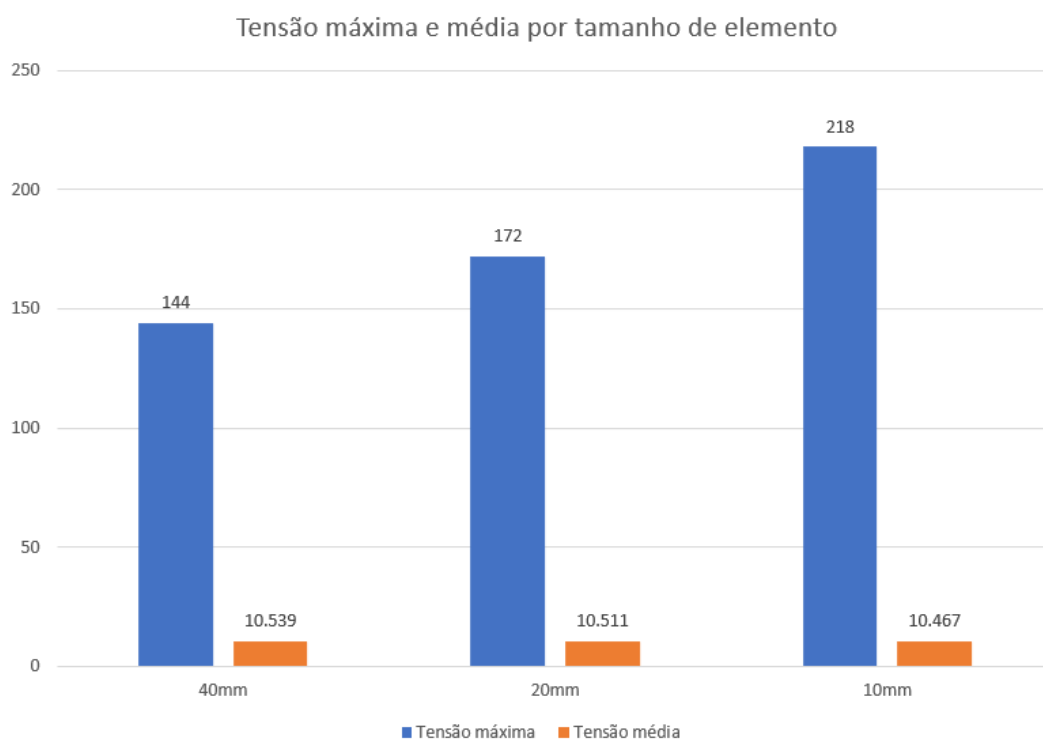


Figura 73 – Tensões médias e máximas por tamanho de elemento, modelo de casca.

A análise de convergência do modelo de casca gerou resultados de tensão máxima que não se encaixam no envelope de convergência, porém, o comportamento geral da estrutura se apresentou regular. Como indicado por ADAMS (2008), a análise

de convergência pela regularidade do comportamento da estrutura é aceitável, caso não seja atingida a convergência baseada em valores específicos. O modelo com tamanho de malha de 20mm capturou resultados de concentradores de tensões próximos ao modelo de 10mm, porém, com um número de nós consideravelmente menor. Nas Figuras 74 a 76 são mostrados resultados de uma região crítica de tensões entre os três modelos de casca apresentados.

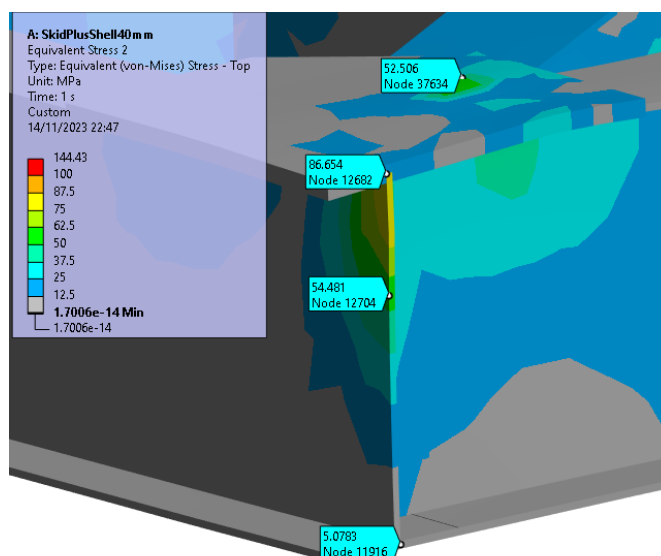


Figura 74 – Região crítica comum, modelo de casca, 40mm.

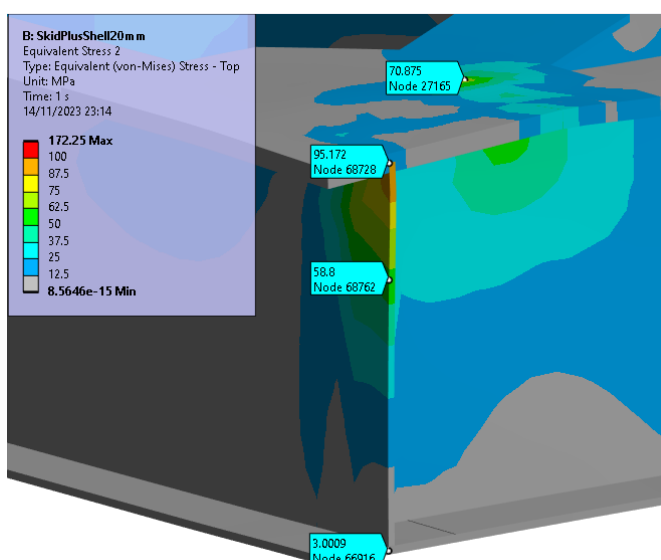


Figura 75 – Região crítica comum, modelo de casca, 20mm.

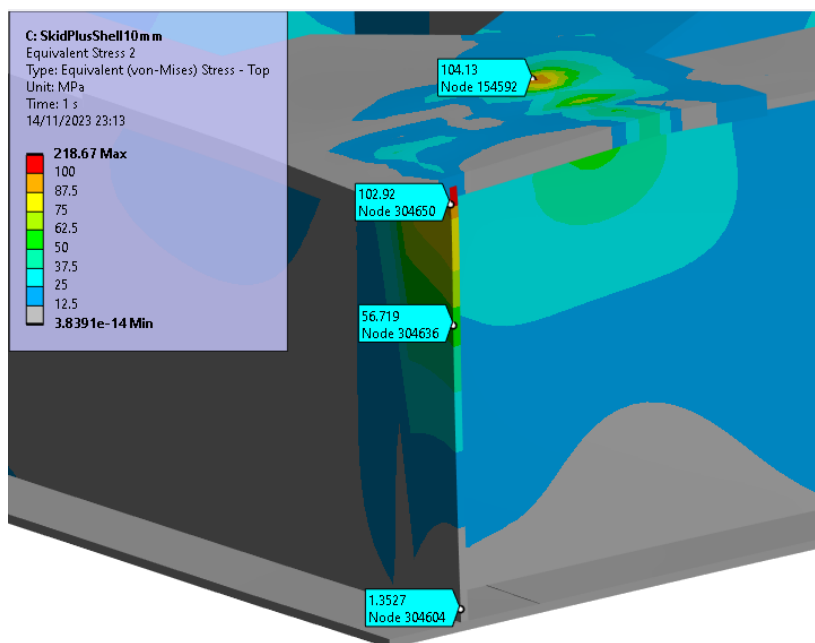


Figura 76 – Região crítica comum, modelo de casca, 10mm.

Com as análises de convergência de ambos os modelos realizada, foi possível realizar uma comparação entre os modelos de casca e sólido, com tamanho de malha igual, sendo mostrado na Figura 77.

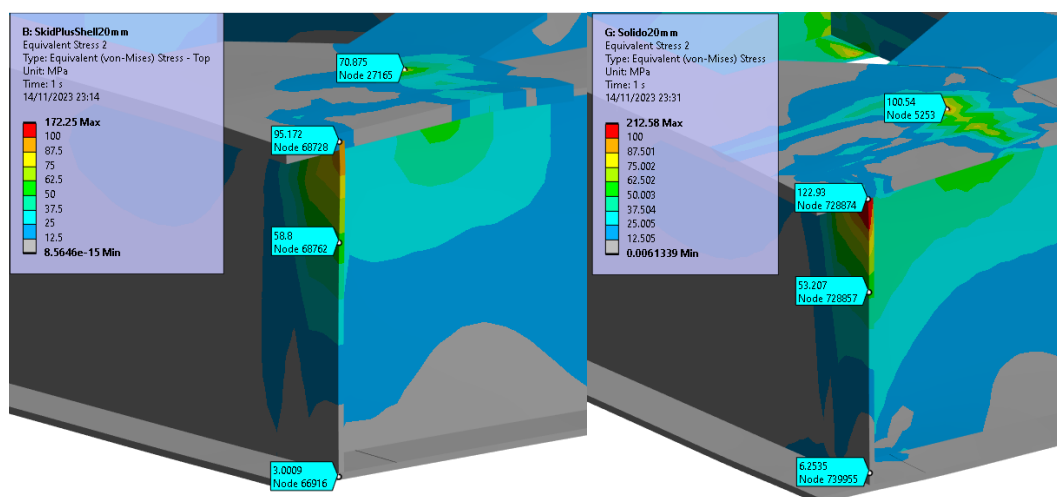


Figura 77 – Comparação de resultados entre modelo sólido de casca.

Portanto, a distribuição de tensões do modelo de casca e sólido possui uma diferença de tensões máxima de 25%, porém, com uma redução de 82% da

quantidade de nós. Deste modo, o modelo de casca com 20mm de tamanho de elemento se mostrou capaz de capturar razoavelmente bem a distribuição de tensão do equipamento, mantendo um custo computacional acessível.

O componente estudado, em sua forma principal não possui dimensões elevadas e apesar de ser construído de vigas, a utilização de elementos de viga traz alguns problemas para a análise, principalmente a falta de resultados localizados. Como é perceptível pelos modelos de casca e sólido, pequenas regiões de concentradores de tensões são os principais pontos problemáticos da análise. Na Figura 78 é mostrado o modelo composto de elementos de viga, no qual não é possível obter o mesmo nível de discretização de outros tipos de elementos.

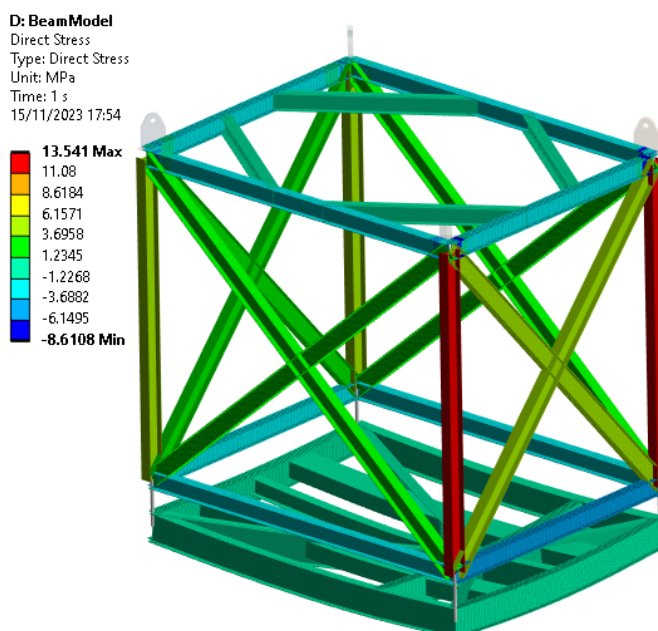


Figura 78 – Resultado da tensão direta, modelo de elementos de viga.

5.4 SIMULAÇÃO ESTRUTURAL COM MOVIMENTOS DO MAR

As tensões dinâmicas previstas em norma possuem como objetivo guiar o dimensionamento de estruturas que suportam cargas variadas sem o risco de falha inesperada. Nesta seção é simulado o comportamento dinâmico do *Skid*, com deslocamentos obtidos a partir do movimento vertical, também chamado de movimento de *heave*, obtido pelo modelo previamente citado no OrcaFlex, no caso de mar mais crítico previsto em norma, ou seja, R60, caracterizado por ondas senoidais

com altura significativa de 6 metros. A simulação foi conduzida com o modelo criado no Ansys Mechanical, nos ambientes estático e dinâmico. Ao fim do estudo foi determinado um FAD simulado, levando-se em conta as cargas dinâmicas de fato sofridas pelo *Skid*, permitindo a simulação estática do equipamento, reduzindo consideravelmente o custo computacional de análises futuras.

Os cabos serão considerados como sendo molas, tendo em vista o comportamento exclusivamente em tração, esta hipótese simplificadora representa de maneira adequada o comportamento, sendo também uma prática comum à indústria, tendo similaridade aos elementos *link* utilizados no Orcaflex. Os coeficientes de elasticidade foram obtidos no catálogo da fabricante. Como observado na análise de convergência, o modelo de casca, com elementos de 20mm, será utilizado por seu bom balanço de precisão e custo computacional.

Na Figura 79 é mostrado o modelo transiente, no qual temos um cabo adicional considerado, representado o cabo do guindaste, consideravelmente mais rígido que o presente nas eslingas. Para melhor representar como os movimentos causados pelo oceano são transmitidos até o *Skid* e equiparando com os dados obtidos no *OrcaFlex*, os deslocamentos impostos serão aplicados na ponta do cabo do guindaste. Deste modo, a movimentação do *Skid* considera que o mesmo, nos momentos iniciais está solto, sendo movimentado apenas pelos deslocamentos impostos na ponta do cabo do guindaste. Todos os carregamentos considerados são causados pelo peso do próprio equipamento e aceleração causada pelos deslocamentos impostos. A análise transiente foi conduzida com um passo de tempo de 0,05 segundos, a fim de capturar corretamente os deslocamentos importados do OrcaFlex. Para a estabilidade do modelo, restrições associadas a geometrias pouco críticas determinadas pela análise de convergência do *Skid* foram impostas, restringindo movimentos laterais e rotações. Os efeitos provenientes destas restrições são avaliados junto aos resultados obtidos.

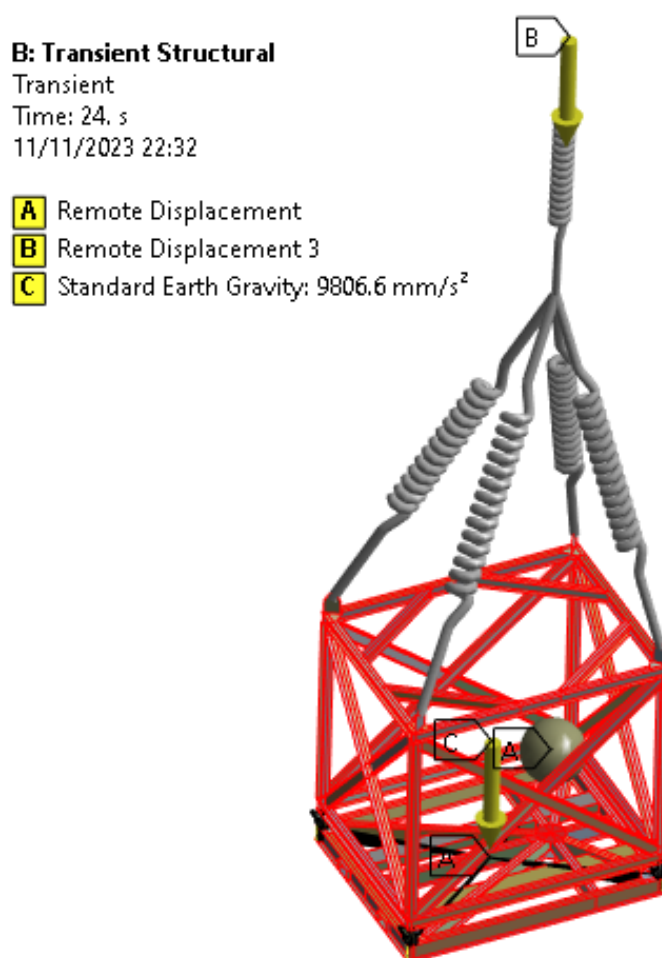


Figura 79 – Modelo simulado *Skid*, análise transiente.

Na Figura 80 a 82, é mostrado o resultado das tensões atuantes no modelo transiente, em 3 vistas diferentes, sendo uma focada na região de tensões máximas. A reação máxima no cabo principal, é de 110,3KN, quando em equilíbrio. As cargas causadas pelo peso, em condições estáticas, é de 101,2KN, observando-se uma diferença de 8,994% ou aproximadamente 9%.

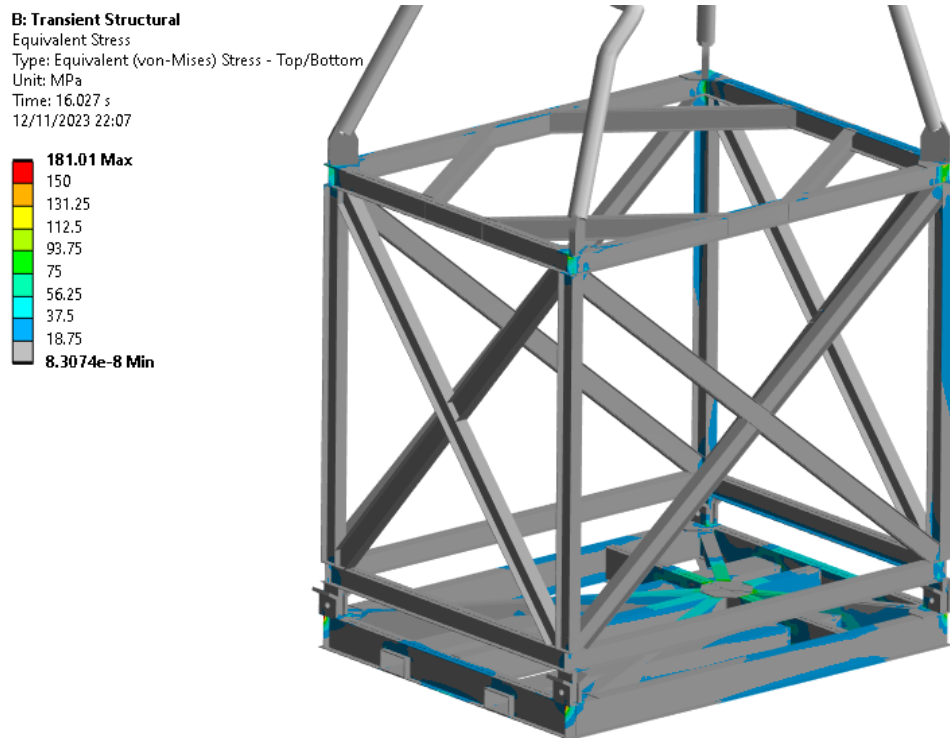


Figura 80 – Tensões no modelo transiente, vista superior.

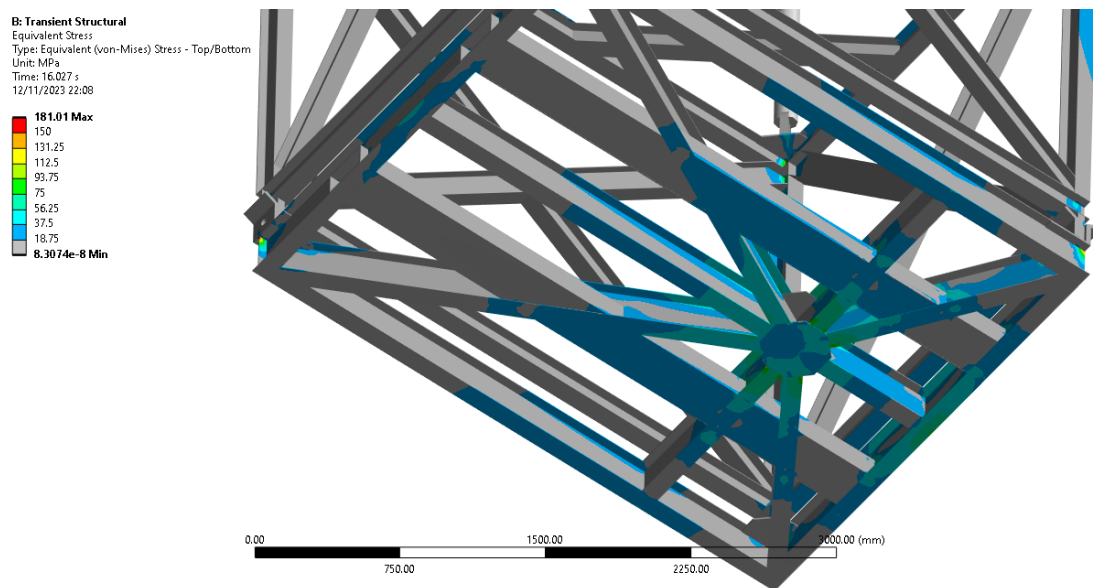


Figura 81 – Tensões no modelo transiente, vista inferior.

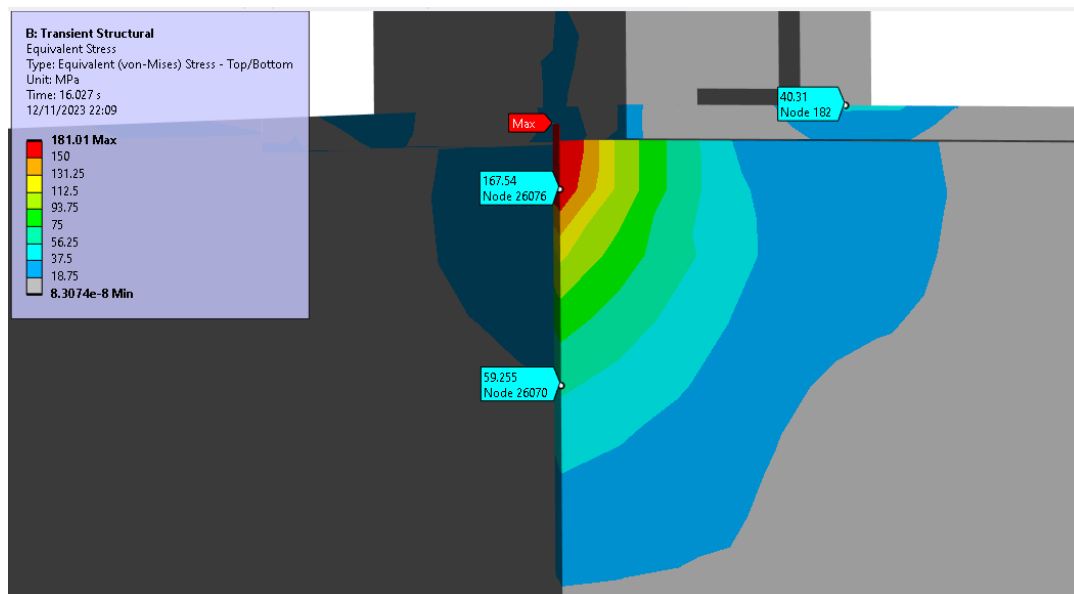


Figura 82 – Região de máxima tensão, modelo transiente.

Com a diferença na reação no cabo do guindaste, obtido a partir da força peso do *Skid* e o pico em uma simulação transiente no regime crítico, ou seja, R60, foi obtido o FAD Simulado. Com este dado, foi realizada uma análise estática, com a aceleração da gravidade multiplicada pelo FAD Simulado. Deste modo, foi aplicada uma aceleração de $10,7\text{m/s}^2$ ao modelo, a fim de comparar as tensões obtidas e estudar com mais detalhes se a variação da aceleração causada pelo movimento oceânico gera carregamentos inerciais que não são corretamente representados em uma análise estática. Nas Figuras 83 a 85 estão expostos os resultados da análise estática, com o coeficiente de majoração aplicado à aceleração da gravidade.

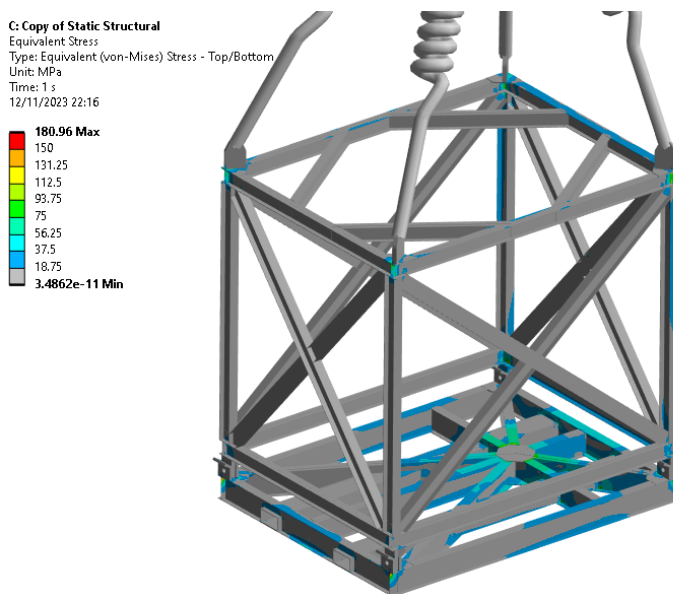


Figura 83 – Distribuição de tensões no modelo estático majorado, vista superior.

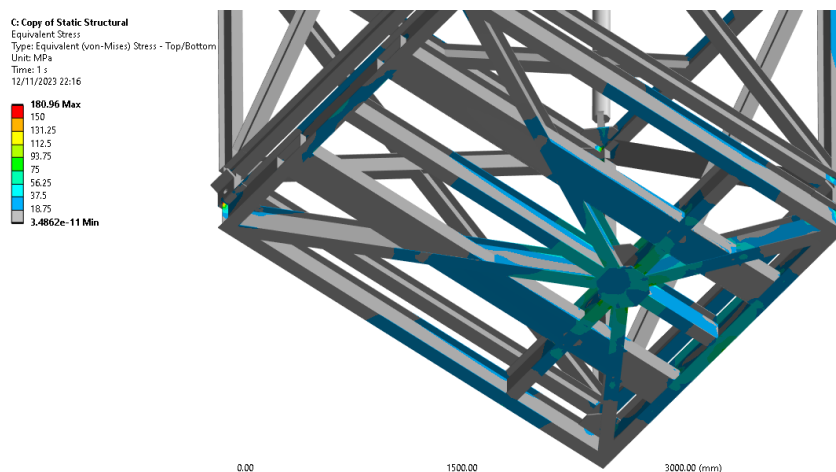


Figura 84 – Distribuição de tensões no modelo estático majorado, vista inferior.

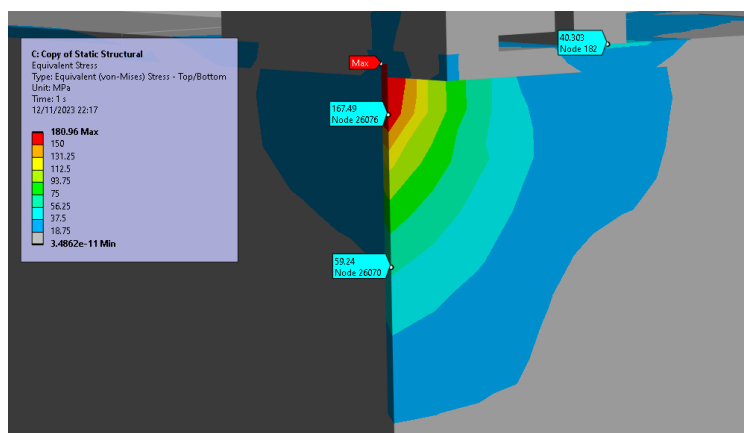


Figura 85 – Distribuição de tensões no modelo estático majorado, região de máxima tensão.

A análise em questão possui uma considerável compatibilidade com simplificações estáticas, devido à sua relativa semelhança a um caso quasi-estático, com a frequência de excitação consideravelmente menor que a primeira frequência natural do conjunto, como mostrado por CHILLERY (2013), devido ao alto período de excitação do oceano. Deste modo, a abordagem da simplificação das cargas dinâmicas como fatores de majoração são uma boa alternativa para a simplificação do modelo. Deslocamentos realizados com períodos menores, mais próximos à frequência natural, podem não possuir a mesma compatibilidade com os métodos mostrados neste trabalho, porém, carregamentos oceânicos em geral, estão próximos aos simulados no presente trabalho.

Devido à simplificação do modelo, para um caso estático, o tempo de simulação sofreu uma redução considerável. Utilizando a mesma configuração computacional, a simulação estática foi solucionada em apenas 50 segundos, enquanto a simulação transiente necessitou de 1 hora e 12 minutos. O grande tempo de solução do modelo transiente também se dá pela necessidade de um longo tempo de simulação, tendo em vista que se faz necessária a simulação de pelo menos 2 períodos de onda, ou seja, pelo menos 24 segundos, devido às instabilidades nos momentos iniciais. Um ponto adicional que deve ser considerado é a necessidade de uma licença de maior nível do pacote computacional para acesso à análise transiente, inferindo um custo adicional à análise inicial.

Como comentado anteriormente, as análises realizadas necessitaram de restrições adicionais para garantir a estabilidade. De modo geral, as reações se mostraram extremamente pequenas, visto que o posicionamento dos cabos foi determinado usando-se o centro de massa calculado pelo programa. A reação máxima sofrida pela restrição de estabilização foi 300N.m ao redor do eixo X no modelo transiente, sendo dissipada em uma geometria relativamente grande, não comprometendo os resultados. Na Figura 86 está indicada a direção da reação de momento sofrida pela restrição numérica, assim como as geometrias associadas ao deslocamento de estabilização imposto no centro da geometria do *Skid*, todos os modelos apresentaram a mesma direção de reação dos momentos.

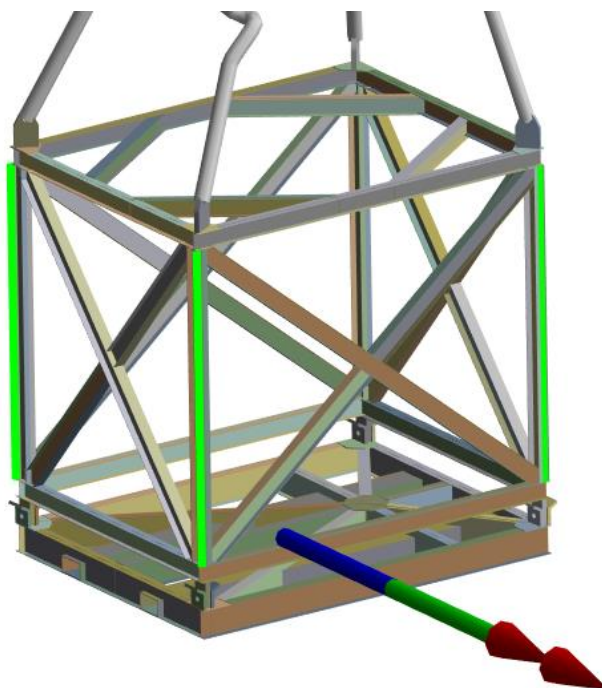


Figura 86 – Reação de rotação, restrição numérica.

As forças de reação em todos os modelos, de modo geral, foram extremamente baixas, com os maiores valores estando novamente no modelo transiente, com 27N em -X e 27N em +Y.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dois aspectos principais são discutidos neste capítulo: as diferentes abordagens para se obter aproximações do Fator de Amplificação Dinâmica, e a análise de convergência do modelo do *Skid*, através da avaliação do custo computacional, influenciado pelo tamanho e tipo de elemento, a fim de obter uma modelagem otimizada.

6.1 DISCUSSÃO ACERCA DO FATOR DE AMPLIFICAÇÃO DINÂMICA

Cada modelo desenvolvido no trabalho apresentou uma forma diferente de calcular um FAD. O primeiro modelo, que considera um sistema de um grau de liberdade traz duas abordagens complementares, através da aceleração sofrida pelo *Skid* em resposta a uma excitação de base senoidal e da análise do ganho na amplitude pela ressonância, esta última apresentando valores desprezíveis comparados à ordem de grandeza do valor obtido pelas normas e pelos outros métodos.

Através da análise de ressonância também foi possível concluir que o amortecimento do sistema tem pouca influência na resposta do *Skid* às excitações sofridas. Tal parâmetro pôde ser suprimido nas análises posteriores pelo método de elementos finitos.

O FAD obtido através da razão entre a aceleração máxima sofrida pelo *Skid* em resposta a excitação de base e a aceleração da gravidade do modelo de um grau de liberdade, tem valor próximo aos fatores de majoração obtidos nas simulações em elementos finitos. Embora apresente valores mais baixos que estes, com diferença percentual menor que 10%. Tal diferença pode ser explicado devido a contribuição de fatores não considerados como a influência da embarcação e pela relação não-linear entre a aceleração e as tensões presentes na estrutura.

A análise hidrodinâmica em elementos finitos, através do programa OrcaFlex, que considerou uma embarcação e guindaste rígidos para uma análise mais completa, foi a que apresentou valores de FAD mais elevados, obtidos através das reações medidas nas eslingas e cabos que conectam o *Skid* ao guindaste. Este modelo também considerou todos os movimentos do navio, enquanto os demais apenas o

movimento de *heave* (vertical). O fato de utilizar o R.A.O. do navio faz os resultados incluírem movimentações adicionais. Deste modo, conclui-se que a diferença entre o FAD calculado da análise hidrodinâmica e da análise estrutural se devem a este fator. As classes de operação mostraram não gerar uma variação significativa no valor de FAD no Link 5. O que contribui para essa baixa diferença são os períodos de onda considerados para as alturas significativas correspondentes a cada classe na Bacia de Campos, em que a excitação fica mais suave por utilizar períodos mais longos.

Através deste modelo também foi possível obter a resposta do *Skid* em relação a excitação das ondas e comportamento do navio, que foi utilizado na simulação estrutural dinâmica realizada no programa Ansys Mechanical.

O estudo do *Skid* em regime transiente, modelado com elementos de casca, permitiu a comparação entre a reação no cabo, em momento de pico, com a força estática do modelo associada ao peso próprio. Os deslocamentos utilizados para esta análise, extraídos do programa OrcaFlex, representam a excitação de base que é transferida ao *Skid*. Calculou-se então o FAD Simulado, utilizando-se a diferença percentual da força associada ao peso próprio em caso estático e a reação máxima do cabo em análise transiente. As análises visam comparar os resultados estruturais em termos das tensões entre os dois modelos. Esta análise permite verificar se a hipótese de carregamento *quasi-estático* pode ser considerada válida, como comentado por ADAMS (2008). Os resultados obtidos, referente às tensões máximas e da distribuição geral de tensões entre o modelo transiente e estático com majorações se mostraram próximos, indicando que a frequência do carregamento se mostra baixa o suficiente para poder ser representada, de maneira satisfatória, através de uma análise estática com um multiplicador no valor do campo gravitacional. As tensões máximas entre o modelo transiente e estático com FAD Simulado aplicado, possuem uma diferença de 0,027%, indicando que, a simplificação do regime de tempo do modelo pode ser aplicada para estruturas sujeitas a carregamento semelhantes, com variações graduais de carregamento. Na Figura 87, estão expostos os resultados das análises citadas anteriormente, com variações pequenas, tanto para os valores máximos das tensões quanto para a sua distribuição. Importante ressaltar a grande diferença na capacidade computacional necessária para a obtenção do resultado transiente, com o modelo estático sendo simulado em um tempo 98% menor.

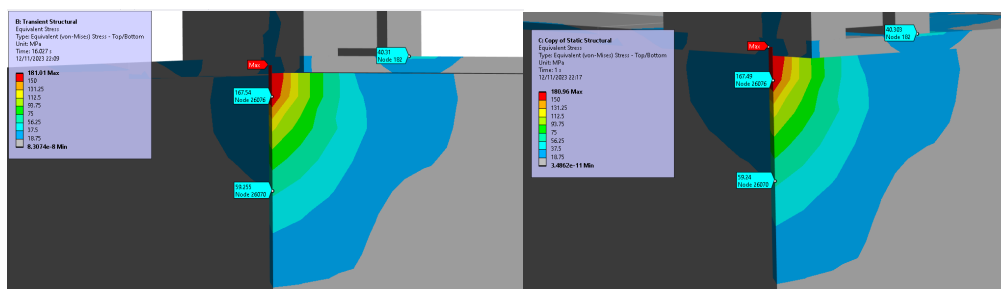


Figura 87 - Comparação entre análise transiente e estática majorada pelo FAD Simulado

A Tabela 6 mostra os valores dos fatores de majoração encontrados em cada norma e modelo.

Pode-se observar que os valores obtidos por norma são mais conservadores e que considerando-se apenas a movimentação do *Skid*, o componente possui um fator de segurança elevado. Os diferentes fatores que compõem o FAD obtido através das normas são abrangentes e complexos, enquanto o presente trabalho foca em uma operação determinada de uma estrutura específica, submetida a excitação por ondas regulares. Por outro lado, é possível inferir que com um estudo localizado, os fatores de amplificação dinâmica serão menores, por considerar menos casos e menos variações na construção, permitindo o desenvolvimento de estruturas mais otimizadas.

Tabela 6 – Comparação de Fatores de Majoração.

FD (DNVGL-ST-E273)	FAD (DNV-ST-N001)	Modelo com 1 GDL	OrcaFlex	Ansys Mechanical
2,41	1,75	1,04	1,13	1,09

Tomando o Fator de majoração do modelo de um grau de liberdade como referência, os valores obtidos no Ansys Mechanical e OrcaFlex divergiram, respectivamente, em 4% e 8%.

Isso mostra que o modelo de um grau de liberdade, com custo computacional muito inferior aos outros, pode ser utilizado com resultados satisfatórios de estimativas em análises preliminares.

6.2 ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DO SKID

Com o intuito de determinar o modelamento por MEF mais eficiente, dentro dos parâmetros definidos no presente trabalho para a geometria do *Skid*, diversos modelos foram construídos, comparando-se, o número de elementos e a sua capacidade de representar corretamente a distribuição das tensões do modelo.

Pelo tipo de estrutura que compõe o *Skid*, elementos de casca se mostraram altamente eficientes, devido a sua capacidade de capturar adequadamente a distribuição das tensões, ao mesmo tempo que possuem 86% menos nós quando comparados com um modelo de elementos sólidos com tamanho equivalente. Na Figura 88, estão mostrados os resultados comparativos entre os modelos de casca e sólidos, respectivamente.

Esta grande diferença se deve pela construção numérica dos elementos de casca considerar apenas um terço dos nós em sua espessura, frente a elementos sólidos quadráticos. Para elementos de casca, a tensão possuirá uma variação exclusivamente linear na espessura, porém, como para a maior parte das geometrias consideradas tem-se uma dimensão muito menor que as outras, a representação física se mantém razoável, com uma variação das tensões médias inferior a 3%, que são justificáveis pela redução do custo computacional. Representações melhores podem ser atingidas, mas como explicitado, o custo computacional sofre um aumento considerável, sem ganhos significativos de precisão.

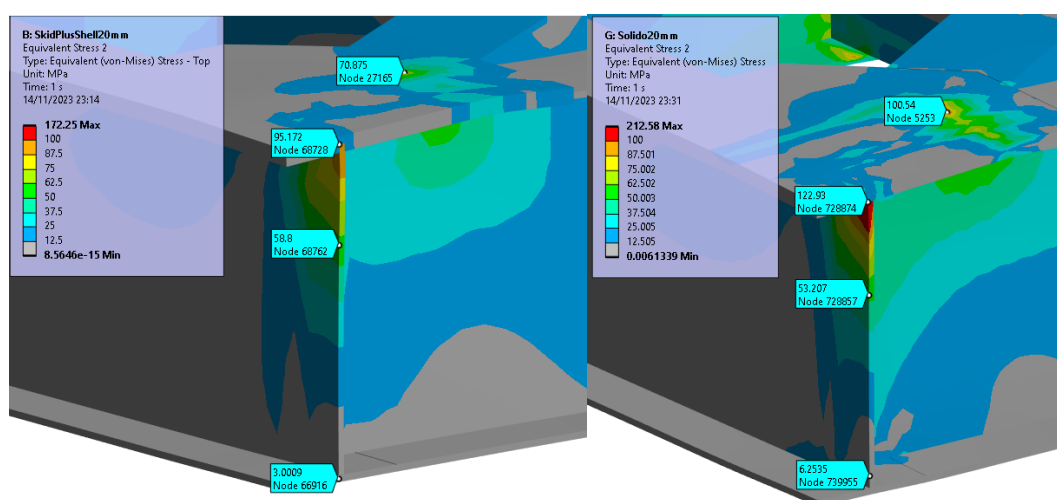


Figura 88 – Comparação dos resultados entre um modelo de casca e sólidos com mesmo tamanho de elemento.

Elementos de viga também foram estudados, para avaliar a sua capacidade de representação da estrutura. Contudo, devido às dimensões pequenas do *Skid* e grande influência de regiões de concentração de tensões, este tipo de elementos não se mostrou benéfico para análise, por não possuir a capacidade de capturar corretamente as tensões em regiões de descontinuidades geométricas.

7 CONCLUSÕES

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a eficiência das modelagens mais eficientes para o estudo do comportamento estrutural de um *Skid*. Foram utilizadas várias abordagens para analisar os esforços transmitidos. As conclusões obtidas para o *Skid* são as seguintes:

1. Para o *Skid* estudado, a representação por corpos de casca se mostra ideal, do ponto de vista do custo computacional do modelo e do tempo de pré-processamento necessário. Modelos sólidos apresentam um custo computacional excessivamente alto sem ganho considerável da precisão de resultados, sendo necessário um aumento de 86% no número de nós para obter um modelo aceitável. Elementos de viga não são capazes de capturar com precisão os resultados em regiões de concentração de tensão, necessitando de um pré-processamento adicional considerável.
2. A distribuição de tensões obtida para modelos com carregamentos estáticos corrigidos através de um coeficiente de majoração, apresentam uma boa concordância com análises de modelos transientes. Obteve-se uma variação de 0,027% quando comparados os resultados de tensão máxima entre os modelos transiente e estático com coeficientes de majoração aplicados.
3. Para casos simplificados, com a utilização de ondas regulares, sem a representação da rigidez do guindaste, o FAD proveniente da simulação se mostrou menor que os previstos em normas, tendo em vista que o valor obtido não se propõe a aumentar o coeficiente de segurança do equipamento, atuando apenas como uma maneira de tornar equivalentes as tensões em simulações estáticas, frente à transientes. Além disso a norma se propõe a abranger diversos casos similares enquanto os obtidos computacionalmente tratam de um caso específico

4. Foi possível observar, através do estudo de ganho da estrutura, que a influência do amortecimento é desprezível para o intervalo de ondas na região de operação do sistema.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Representação detalhada do guindaste, a fim de modelar com mais precisão a rigidez equivalente deste sistema, conseqüentemente, avaliando a influência deste no deslocamento que é transferido até o *Skid*;
- Avaliar a variação da posição do guindaste no convés do Navio e sua influência na movimentação do *Skid*;
- Modelo de ondas irregular, com deslocamentos e frequências obtidas em cartas marítimas;
- Representação mais detalhada da resposta do navio aos carregamentos;
- Representação dos cabos com mais precisão;
- Estudo da influência dos carregamentos transferidos ao MCV transportado no *Skid*;
- Aplicação do modelo de *Response Amplitude Operator* (R.A.O.) nos cálculos analíticos;
- Avaliar a influência de movimentações laterais.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, V. **A Designer's Guide to Simulation with Finite Element Analysis**, 1. Ed. NAFEMS, 2008.
- BATALHA, A. F. **Análise de Fadiga de Estruturas Offshore Tipo Topside**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. 2009.
- BERENDS, Erik E.; VAKIS, A.; PRINS, W. **Scaling Effects and Validation of the Ocean Grazer Experimental Wave Tank using CFD**. 2021. Tese de Doutorado.
- BRIDON. **Oil & Gas Catalogue**, 5 Ed, 2011.
- CHAKRABARTI, Subrata. **Handbook of Offshore Engineering (2-volume set)**. Elsevier, 2005.
- CHILLERY. M. **Simulation Handbook Structural Linear Statics**, 1. Ed. NAFEMS, 2013.
- CLAUSS, G. F; RIEKERT, T. Operational limitations of offshore crane vessels. In: **Offshore Technology Conference**. OTC, 1990. p. OTC-6217-MS.
- CONWAY, Ted A.; COSTELLO, George A. Bird-caging in wire rope. **Journal of engineering mechanics**, v. 116, n. 4, p. 822-831, 1990.
- Det Norske Veritas. **DNVGL-OS-C101: Design of Offshore Steel Structures, General - Lrfd Method**, Julho, 2017.
- Det Norske Veritas. **DNVGL-ST-E273: Portable Offshore Units**. 2016.
- Det Norske Veritas. **DNV-RP-C205: Environmental Conditions and Environmental Loads**, Setembro, 2019.
- Det Norske Veritas. **DNV-ST-N001: Marine operations and marine warranty**, Setembro, 2021.
- FERREIRA, D. P. **As Principais Operações Das Embarcações PLSV**. Monografia. Curso de Aperfeiçoamento para Oficiais de Náutica (APNT). Centro de Instrução Almirante Graça Aranha. Marinha do Brasil, Rio de Janeiro, 2013.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7. Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- JOURNÉE, J. M. J; MASSIE, W. W. Offshore hydromechanics. 1 Ed. **Delft University of Technology**, 2001.
- JPE Innovations. **STRUCTURAL DAMPING PROPERTIES OF MECHANICAL SYSTEMS**, <https://www.jpe-innovations.com/precision-point/structural-damping-properties-mechanical-systems/>. acessado em 19 nov, 2023.

Kim, S.D; Kim, M.H; Oh, M.H; Ju, Y.K. **Damping Coefficients for Weak and Moderate Earthquake Ground Motions**. CTBUH Research Paper, Seoul, out. 2004. Seul.

Li, Z; Xu, C; Wu, S **Calculating the Rayleigh damping coefficient under seismic dynamic simulation of a quayside container crane**, Hindawi, Estados Unidos da América, Sep, 2019.

LIEBERT, C. RASHID, M. **Finite Element Analysis of a Lifting Portable Offshore Unit**, Suécia, 2015.

NAM, B. W.; KIM, N. W.; HONG, S. Y. Experimental and numerical study on coupled motion responses of a floating crane vessel and a lifted subsea manifold in deep water. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, v. 9, n. 5, p. 552-567, 2017.

Orban, F; Phys, J.: Conf. Ser. 268 012022, **Damping of materials and members in structures**, 2011.

PAZ, M; Leigh, W. **Structural Dynamics_ Theory and Computation-Springer** 5 ed, Unidos da América, 2004.

PEREZ BODALO, Eduardo et al. **Comparative analysis of design codes for portable offshore units**. 2013.

PERÔNICA, D. S., NETO, J. A. C. M., JUSTINO, M. E. C., **APLICAÇÃO DO MÉTODO DE DORMAND-PRINCE PARA OBTENÇÃO DA RESPOSTA DE UM SISTEMA DE AMORTECIMENTO MASSA-MOLA NO MATLAB**. In: 7º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Ensino em Ciências. 2022.

PIMENTEL, J., **MOBO – NA ALTERNATIVE TYPE OF SUBSEA**, OFFSHORE ASIA, MARCH, 2013.

RADOIČIĆ, G; Jovanović, M. **Experimental Identification of Overall Structural Damping of System**, 2013.

RAO. S. S. **Mechanical Vibrations**, 1. Ed. Addison-Wesley, 1990.

REBELLO, G. A. P. **Análise de módulo de conexão vertical para compressor para operação em águas ultra profundas**. Projeto de graduação, UFRJ, Rio de Janeiro, 2015.

RIBEIRO, Eric Oliveira et al. **Distribuição conjunta de alturas significativas e períodos de pico de ondas na bacia de Campos**. In: III Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. 2004.

RIZZO, N. A. S., VAZ, M. A., CAIRE, M. **ESTUDO DA INSTABILIDADE DAS ARMADURAS DE TRAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**, Rio de Janeiro, 2012.

RR GUINDASTE. **Guindaste Articulado IM 50.**
<https://rrguindastes.com.br/guindaste-articulado-im-50/>. Acessado em 17 nov 2023.

SANTOS, I. M. **Análise comparativa de modelos de compensação de heave no processo de instalação de equipamentos submarinos.** 2020.

SILVA, I. V. **Aplicação de Técnicas de Otimização em Operações de Conexão Vertical Direta de 1ª Extremidade.** 2021.

SEGERLIND, L. J. **Applied Finite Element Analysis.**, 2. Ed. JOHN WILEY AND SONS, 1984.

SIMSCALE (2022). **“How to Compute the Coefficients for Rayleigh Damping?”**
<https://www.simscale.com/knowledge-base/rayleigh-damping-coefficients/>. Acessado em 18 nov 2023

STEVENSON, J. D. Structural damping values as a function of dynamic response stress and deformation levels. **Nuclear engineering and design**, v. 60, n. 2, p. 211-237, 1980.

WITZ, J. A. Parametric excitation of crane loads in moderate sea states. **Ocean Engineering**, v. 22, n. 4, p. 411-420, 1995.

ZERWER, A; CASCANTE, G; HUTCHINSON, J. Parameter Estimation in Finite Element Simulations of Rayleigh Waves, **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Vol. 128, No. 3, March 1, p. 250-261, Março, 2002.