

DIOGO ANZOLINI CANO

**Análise de tensões no suporte de descida dos tubos de
revestimento utilizados em poços de petróleo**

Área de concentração:
Engenharia de Petróleo – Simulação
Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Ronaldo Carrion

São Paulo
2018

DIOGO ANZOLINI CANO

**Análise de tensões no suporte de descida dos tubos de
revestimento utilizados em poços de petróleo**

Tese apresentada à comissão de
graduação da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Engenheiro de
Petróleo.

Área de concentração:
Engenharia de Petróleo – Simulação
Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Ronaldo Carrion

São Paulo
2018

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus pais, Claudio e Lisangela, por terem feito mais sacrifícios do que eu achei que fosse possível para esse momento chegar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Escola Politécnica, aos meus amigos e professores por todo esse tempo junto, fazendo com que eu saia da faculdade uma pessoa muito melhor do que entrei.

EPÍGRAFE

“Não importa o quão poderoso você se torne nunca tente fazer tudo sozinho, caso contrario ira falhar.”

Uchiha Itachi

Resumo

Com o avanço da exploração de petróleo em águas cada vez mais profundas, novos desafios vão surgindo e maior o custo de um projeto de perfuração. O trabalho em questão analisará uma das etapas com custo mais representativo no projeto, o processo de revestimento do poço. Nesses ambientes, são utilizadas plataformas flutuantes que estão sujeitas ao movimento oscilatório vertical causado pelas ondas do mar (heave). Esse movimento modifica o tipo de carregamento incidente sobre os instrumentos da plataforma, podendo alterar então a resistência necessária dos instrumentos para evitar falhas ou até rupturas dos mesmos. O objetivo desse trabalho será comparar os diferentes carregamentos e mensurar influência do movimento de heave ao calcular a resistência necessária desses instrumentos, através do software ANSYS, que tem como base o método dos elementos finitos (MEF). Os resultados mostraram que realmente há diferença quando comparados cenários estático e dinâmico, mas que no ambiente marítimo brasileiro podem não ser diferenças tão significativas.

Abstract

With the advancement of oil exploration into deeper water, new challenges appear and the costs of drilling projects increase. This paper will analyze one of the most expensive steps of the project, the well casing process. Floating platforms are quite popular in deeper water environments and are subject to vertical oscillatory movements caused by sea waves (heave). This movement modifies the type of stress load applied on the instruments of the platform, which can change the necessary resistance of the instruments to avoid failures or even ruptures. The objective of this paper is to compare the different loads and to measure the influence of the heave movement when calculating the required resistance of these instruments using the ANSYS software, which is based on the finite element method (FEM). The results showed that there is, indeed, a difference between the static and dynamic scenarios. However, in Brazilian maritime environment this difference may not cause significant variations.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Objetivo	3
3. Revisão bibliográfica	4
3.1. Perfuração de plataformas offshore	4
3.2. Etapas de um projeto de poço	5
3.3. Método dos elementos finitos, ANSYS e fenômeno da fadiga.	8
4. Simulações e resultados.....	11
4.1. Simplificações geométricas realizadas.	13
4.2. Parâmetros utilizados na simulação.....	14
4.2.1 Tubos de revestimento	14
4.2.2 Suporte para a coluna de revestimento.....	17
4.3 Modelagem das peças, definição dos elementos e materiais.	19
4.3.1. Definindo tipo de elemento.	20
4.3.2 Definindo tipo de material.	20
4.3.3. Criando as peças.....	20
4.3.4. Diferenciar as peças	20
4.4. Criando a malha.	21
4.5. Condições de contorno e carregamento.....	21
4.5.1 Condições de contorno e carregamento estático.	23
4.5.2 Condições de contorno e carregamento dinâmico.	23
4.6. Resultado das simulações.	25
4.6.1 Resolução estática.....	25
4.6.2 Resolução parte harmônica	26
4.7 Critérios de falha de von Mises.	31
5. Conclusão	36
6. Referências.....	38
7. Apêndice 1 – Simulações ANSYS	39
7.1 Tipo de elemento.	39
7.2 Definindo tipo de material.	39
7.3 Criando as peças.....	39
7.4 Relacionando o tipo de material com a peça.....	40
7.5 Criação da Malha.....	40

7.6 Juntando suporte e coluna de revestimento.	41
7.7 Limitando movimento da região superior do suporte.	41
7.8 Aplicando pressão à superfície do equipamento.	41
7.9 Iniciando Simulação harmônica.	41
7.10 Aplicando carregamento harmônico.	41
8. Apêndice 2 – Artigo Síntese	393

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Demanda global de óleo 1965-2015 , fonte: API Monthly Statistical Report, Vol. 41 No. 4 Published May 18, 2017	1
Figura 2: tipos de revestimento, fonte : Thomas. 2001	6
Figura 3: Exemplo de mesa rotativa, Fonte: http://dc150.4shared.com	8
Figura 4: exemplo de top drive, fonte: www.globaldrillingsupport.com	8
Figura 5: divisão de estrutura complexa em elementos menores, fonte: www.esss.com/metodo-dos-elementos-finitos	10
Figura 6: Outro exemplo de divisão de estrutura complexa em elementos menores, agora tetraédricos, fonte: www.esss.com/metodo-dos-elementos-finitos	10
Figura 7: exemplo de plataforma offshore, fonte: br.depositphotos.com	11
Figura 8: exemplo de plataforma offshore, fonte: www.vagasoffshorebrasil.com.br	12
Figura 9: exemplo de seção de coluna de revestimento sendo deixada pelo elevador e sustentada pela mesa rotativa, fonte: www.odfjellwellservices.com	13
Figura 10: exemplo de tubo de revestimento gerado no ANSYS, fonte: ANSYS versão 17.1	14
Figura 11: exemplo real de tubo de revestimento, fonte: http://www.rhsteelpipe.com/info.php?title=TUBING-AND-CASING&id=44&u=349	15
Figura 12: Tabela do catalogo da Tenaris com propriedades dos tubos de revestimento	16
Figura 13: slip simplificado projetado no ANSYS, fonte: ANSYS versão 17.1	18
Figura 14: Exemplo de slip retirado do site da National Oilwell Varco	18
Figura 15: Conjunto coluna de revestimento (roxo) e suporte (azul) com zoom no contato, imagem retirada do ANSYS 17.1.	20
Figura 16: parâmetros da malha gerada na resolução do problema, retirada do ANSYS 17.1	21
Figura 17: ilustração referente à equação 6 [imagem gerada no paint]	22
Figura 18: resumo das hipóteses consideradas no conjunto simulado com a malha já feita, fonte: ANSYS 17.1	22
Figura 19: Tabela com as especificações API incluindo limite de escoamento do revestimento J-55	32
Figura 20: Tabela comparativa entre o tipo de carregamento e valores de Tensão de Von Mises	32
Figura 21: Dados retirados do ANSYS na criação o suporte	40
Figura 22: Dados retirados do ANSYS na criação da coluna de revestimento	40
Figura 23: Exemplo FPSO, fonte: www.bluewater.com/fleet-operations/what-is-an-fps/	44
Figura 24: divisão de estrutura complexa em elementos menores, fonte: www.esss.com/ metodo-dos-elementos-finitos	45
Figura 25: exemplo de tubo de revestimento(esquerda) e suporte (direita) gerado no ANSYS, fonte: ANSYS versão 17.1	45
Figura 26: resumo das hipóteses consideradas no conjunto simulado com a malha já feita, fonte: ANSYS 17.1	46

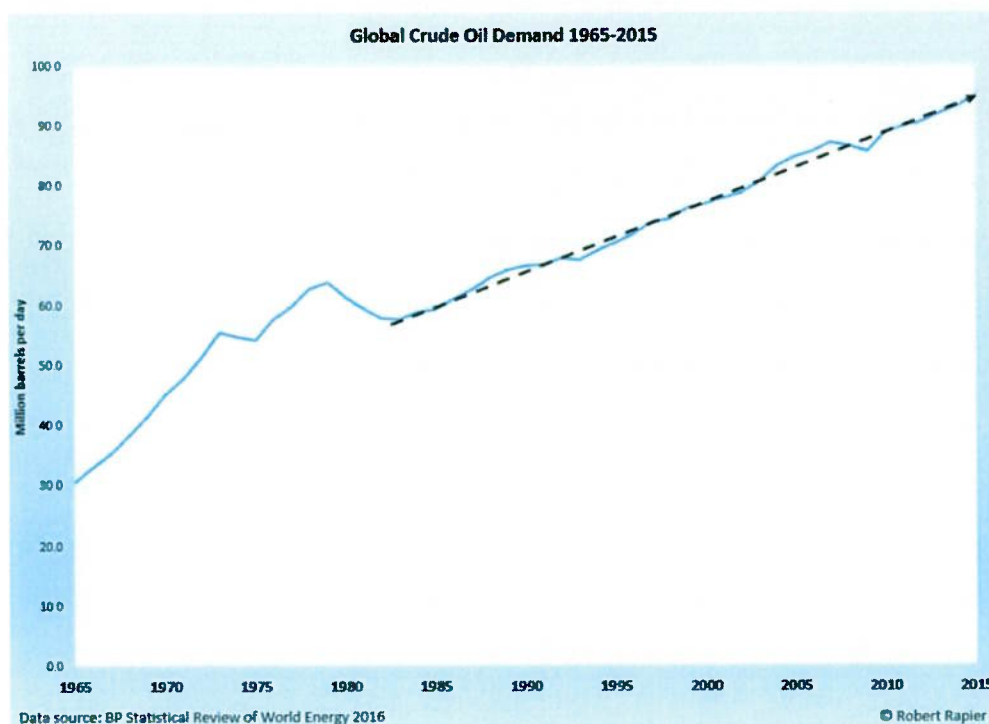
LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Deslocamento no eixo Z em metros	27
Gráfico 2: Ilustração do ANSYS da coluna sem e com carregamento	28
Gráfico 3: Deslocamento (metro) em função da frequência (Hertz).	29
Gráfico 4: deslocamento no conjunto a 60Hz.....	30
Gráfico 5: Deslocamento no conjunto a 0.5Hz.	31
Gráfico 6: tensão efetiva de von Mises no caso estático.....	33
Gráfico 7: Tensão efetiva de von Misses a 60hz	34
Gráfico 8: Tensão efetiva de von Misses a 0,5hz	35

Introdução

No atual contexto energético mundial, no qual se aumenta a demanda por energia (API Monthly Statistical Report, Vol. 41 No. 4 Published May 18, 2017), como observado na figura 1 e diminui a quantidade de novos poços de petróleo descobertos, cada vez mais é necessário o desenvolvimento de novas tecnologias para ultrapassar antigas barreiras tecnológicas, um exemplo disso é a exploração de petróleo no pré-sal. Tomando por base as informações disponíveis no site da Petrobras (Dezembro 2017), na região do pré-sal há hoje em operação 9 plataformas de produção e 25 sondas de perfuração, sendo que em 2018 aproximadamente 18 novas unidades de produção entrarão em operação. Esse ambiente de águas profundas é novo para a indústria do petróleo podendo resultar em processos ainda não otimizados para sua exploração.

Figura 1: Demanda global de óleo 1965-2015, fonte: API Monthly Statistical Report, Vol. 41 No. 4 Published May 18, 2017



Uma das etapas de um projeto de um poço de petróleo é o seu revestimento. O revestimento constitui uma das parcelas mais expressivas do custo da perfuração de um poço de petróleo, variando de 15% a 20% no mar, podendo chegar a 50% em terra. Esse processo é realizado em fases, cujo número depende das características das zonas a serem perfuradas e da profundidade final prevista. Cada fase é concluída

com a descida de uma coluna de revestimento e sua posterior cimentação do espaço anular exterior (Thomas, 2001).

A união dessas fases, ou seja, a junção dessas colunas é feita por uma peça chamada "casing coupling" e a sustentação de toda essa coluna é feita pela mesa rotativa(**figura 3**) ou pelo elevador do "top drive" (**figura 4**), que além de estarem submetidas ao peso da própria coluna de revestimento sofrem também com a ação do *heave* da plataforma, que nada mais é do que a oscilação da mesma causada pela ação do mar (Kuehn,2014).

Objetivo

Tendo em vista esse cenário o objetivo desse trabalho é comprovar a influência e mensurar a interferência do movimento de *heave* da plataforma nos suportes da coluna de revestimento em poços de petróleo em águas profundas (que é o caso do pré-sal). Para fazer essa análise será utilizado o software ANSYS, que tem como base o método dos elementos finitos (MEF), para fazer a simulação dos esforços atuantes tanto no caso estático (despreza o movimento de *heave*) quanto no caso dinâmico, com uma posterior comparação entre eles para avaliar a influência desse movimento.

Revisão bibliográfica

Os tópicos a seguir serão necessários para o entendimento desse trabalho e estão divididos em três partes, a primeira sobre as características de plataformas offshore, a segunda sobre as etapas de um projeto de poço, a terceira falará do método dos elementos finitos, do software utilizado e a do fenômeno da fadiga.

3.1. Perfuração de plataformas offshore

A exploração de petróleo no Brasil se deu fundamentalmente em plataformas offshore, como na Bacia de Campos. Porém a partir de 2007, com a descoberta das enormes reservas de óleo do pré-sal, as oportunidades energéticas do Brasil, que até antes disso não era autossuficiente em petróleo, mudaram e todas as atenções da indústria do petróleo voltaram-se para essa nova barreira tecnológica de águas ultra profundas contendo óleo em uma profundidade jamais explorada antes, mas que podia oferecer como recompensa bilhões de barris de óleo (Martinez, 2016).

Os diferentes tipos de plataformas offshore são escolhidos em relação às características dos ambientes na qual serão instaladas. A forma mais simples de separar essas plataformas é na categoria Fixa ou Flutuante, sendo a primeira, aquelas que são apoiadas no fundo do mar e entende-se por plataforma flutuante uma estrutura complacente posicionada por sistema de ancoragem (Amorim, 2010).

As plataformas fixas são utilizadas em ambientes com lâmina de água pequena (até 300m), que não é o caso das plataformas brasileiras. Com descoberta de poços cada vez mais profundos foi necessário o desenvolvimento das plataformas flutuantes (Amorim, 2010).

Existem vários tipos de unidades flutuantes que diferem pelo fato de: produzir e armazenar petróleo, apenas produzir ou apenas armazenar. Exemplos de plataformas flutuantes são: semissubmersíveis, FPSO (Floating Production Storage Offloading), TLP (Tension Leg Platform) e SPAR (Amorim, 2010).

Serão destacadas aqui as plataformas flutuantes do tipo FPSO, que são as mais utilizadas no Brasil. Os FPSOs são unidades estacionárias flutuantes que produzem e armazenam petróleo e efetuam o escoamento deste e surgiram por causa da necessidade de exploração em águas profundas e o término de vida útil de navios petroleiros (Amorim, 2010). A ideia central dos FPSOs é garantir uma grande capacidade de armazenamento que permita a instalação dessas unidades em campos

muito afastados da costa, onde a instalação de linhas de duto torna-se proibitiva (Grove, 2005).

Unidades flutuantes sofrem movimentações devido à ação das ondas, correntezas e vento, com possibilidade de danificar os equipamentos a serem descidos no poço. Assim, é necessário que ela fique posicionada na superfície do mar, dentro de um círculo com raio de tolerância ditado pelos equipamentos de subsuperfície, como o sistema de ancoragem e o de posicionamento dinâmico (Thomas, 2001). Um dos efeitos dessas movimentações é chamado de *heave*, que consiste no movimento oscilatório vertical (subida e descida apenas) da plataforma, que por consequência arrasta os tubos presos a ela (Woodal, 1976).

3.2. Etapas de um projeto de poço

Um projeto de perfuração de poços de petróleo deve seguir etapas para que seja atingida a zona de interesse de maneira segura e que permita o seu desenvolvimento após a sua realização. Segundo Rocha e Azevedo (2009) o desenvolvimento de um projeto de poço deve seguir as etapas descritas a seguir.

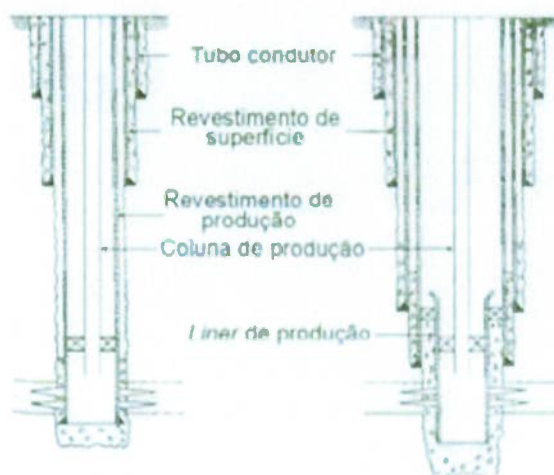
O primeiro passo a ser tomado é a determinação da trajetória e profundidade do poço a ser perfurado com base nas informações geológicas do campo. Após o cálculo da trajetória, inicia-se a fase de determinação das pressões existentes no subsolo e impostas às formações. Uma vez determinadas as geopressões, obtêm-se a janela de operação que é o intervalo entre a pressão de poros e a pressão de fratura, ou seja, o intervalo permitido para a variação da pressão exercida pelo fluido de perfuração de forma a manter a integridade do poço. A partir da janela operacional e outros fatores, são definidas as profundidades das sapatas dos revestimentos e o tipo de fluido a ser usado em cada fase. Em seguida, é feito o programa de brocas com base em propriedades das formações, tais como dureza, resistência e abrasão. O objetivo do programa de brocas é perfurar a formação com a maior taxa de penetração da broca possível, ou *rate of penetration* (ROP), que é a relação entre a extensão da seção perfurada e o tempo. Essa é uma das fases mais críticas do projeto e possui grande influência no custo e sucesso da operação. Por fim, é feita a seleção dos equipamentos que irão compor a parte inferior da coluna de perfuração, conhecido como BHA (*bottom hole assembly*), a ser conectado e descido pela coluna de drillpipes.

Após a determinação de todos esses fatores começa a perfuração de um poço de petróleo, que é realizada através de uma sonda de perfuração. Na perfuração

rotativa, as rochas são perfuradas pela ação da rotação e peso aplicados a uma broca existente na extremidade de uma coluna de perfuração. Os fragmentos da rocha são removidos continuamente através de um fluido de perfuração, ou também conhecidos como lama (Thomas,2001).

Todavia, o poço é perfurado em fases, cujo número depende das características das zonas a serem perfuradas e da profundidade final prevista. Cada uma das fases de perfuração é concluída com a descida de uma coluna de revestimento e sua cimentação, como ilustra a **figura 2** (Thomas,2001).

Figura 2: tipos de revestimento, fonte : Thomas. 2001



Segundo Thomas, 2001, dentre as funções das colunas de revestimento destacam-se as de:

- Desmoronamento das paredes do poço
- Evitar a contaminação da água potável dos lençóis freáticos
- Permitir o retorno do fluido de perfuração à superfície
- Confinar a produção no interior do poço.

Suas principais características envolvem apresentar estanqueidade, ter resistência compatível às solicitações, ser resistente à corrosão e à abrasão, etc.

Ainda segundo Thomas, o dimensionamento das colunas de revestimento considera a resistência mínima que os tubos devem apresentar para suportar as solicitações de tração, pressão interna e colapso. Estas são estimadas levando-se em conta as condições mais adversas que possam ocorrer durante a instalação e a vida útil das colunas.

Aqui está um dos pontos no qual o artigo quer se mostrar importante, para um investimento que representa algo em torno de 20% de um projeto de poço offshore, desconsiderar os efeitos da fadiga dos tubos de revestimento quando sobre o efeito do movimento de *heave* pode ser algo que coloque a segurança do poço em perigo.

A coluna de revestimento é colocada em seções, de aproximadamente 40 pés cada, dentro do poço perfurado, que são unidas por uma peça chamada "casing coullar", segundo o Collins English Dictionary, o processo de "parafusar" uma seção na outra e depois descê-los na coluna de perfuração é chamado de "running casing".

Esse processo é muito mais complexo do que apenas parafusar uma seção na outra, segundo Hero Santoso, as etapas para esse processo são:

1. Checar se não há defeitos no poço perfurado que impossibilitem o revestimento de descer até o fundo.
2. Verificar se as juntas das sessões de revestimento estão aptas para o processo.
3. Os tubos de revestimento são retirados do lugar que estavam armazenados por meio de um elevador.
4. Equipes de normalmente 3 a 4 pessoas içam a coluna de revestimento que já estava dentro do poço, apoiam ela nas cunhas (utilizadas no caso de sonda com mesa rotativa), ou *slips* (em inglês), "parafusam" as seções e liberam a coluna novamente.
5. A coluna é descida até atingir o limite superior da nova seção adicionada e o processo se reinicia.

Nas sondas convencionais, a coluna de perfuração é girada pela mesa rotativa (**figura 3**) (localizada na plataforma da sonda). Nas sondas equipadas com top drive (**figura 4**) a rotação é transmitida diretamente ao topo da coluna de perfuração por um motor acoplado à catarina. No primeiro, a mesa rotativa é quem dá suporte à coluna de revestimento, no segundo pode ser a mesa rotativa ou o elevador acoplado ao top drive (Thomas,2001). As simulações analisarão essas duas peças e verão o efeito do movimento de *heave* sobre elas.

Figura 3: Exemplo de mesa rotativa, Fonte: <http://dc150.4shared.com>



Figura 4: exemplo de top drive, fonte: www.globaldrillingsupport.com



3.3. Método dos elementos finitos, ANSYS e fenômeno da fadiga.

A literatura especializada tem mostrado que, dentre as distintas causas de falha de componentes mecânicos, a mais comum é devida à fadiga do material. Do número total de falhas, as provocadas por fadiga perfazem de 50% a 90%, sendo na maioria das vezes falhas que ocorrem de forma inesperada, repentinamente, portanto bastante perigosas. A fadiga é uma redução gradual da capacidade de carga do componente, pela ruptura lenta do material, consequência do avanço quase infinitesimal das fissuras que se formam no seu interior. Este crescimento ocorre para

cada flutuação do estado de tensões. As cargas variáveis, sejam cíclicas ou não, fazem com que, ao menos em alguns pontos, tenham deformações plásticas também variáveis com o tempo. Estas deformações levam o material a uma deterioração progressiva, dando origem à trinca, a qual cresce até atingir um tamanho crítico, suficiente para a ruptura final, em geral brusca, apresentando características macroscópicas de uma fratura frágil (Rosa, 2002).

No caso proposto pelo artigo, o carregamento cíclico, que poderá ou não romper o material por fadiga, seria decorrente do movimento de *heave* da plataforma junto com a própria força peso do material.

Quando, em casos de estruturas complexas, não é possível tolerar imprecisões na análise, o uso de Métodos Numéricos torna-se uma exigência (Rosa, 2002). Os Métodos Numéricos de Análise Estrutural são baseados na Mecânica do Contínuo, como a Teoria da Elasticidade e a Teoria da Plasticidade (Rosa, 2002). Estes métodos possibilitam a análise para geometrias quaisquer, dando assim grande flexibilidade na solução de problemas. Os principais Métodos Numéricos em uso são o de diferenças finitas, o de elementos finitos e o de elementos de contorno. Pela relativa facilidade de uso, o Método de Elementos Finitos tem uma aplicação cada vez mais abrangente e generalizada, seguido de perto, ultimamente, pelo Método de Elementos de Contorno (Rosa, 2002).

O Método de Elementos Finitos é um processo numérico que usa a solução de um "elemento" de forma geométrica relativamente simples, solução esta normalmente obtida com auxílio da Mecânica do Contínuo, para então obter o comportamento de toda uma estrutura, com forma qualquer. A estrutura sob análise é dividida em um conjunto de elementos com dimensões finitas e geometria conhecida. Assim, a partir do comportamento de um elemento, é obtida a solução da estrutura. Mesmo em casos mais simples estes processos podem se tornar atrativos, desde que disponível o programa de cálculo, pois alguns minutos de computador fornecem todos os resultados, com maior exatidão do que se fosse feita uma análise usual, consumindo dezenas ou mesmo centenas de horas (Rosa, 2002). A **figura 5** ilustra a divisão de uma estrutura mais complexa (esquerda) em inúmeros elementos simples (direita), no caso, inúmeros quadriláteros.

Figura 5: divisão de estrutura complexa em elementos menores, fonte: www.esss.com/metodo-dos-elementos-finitos.

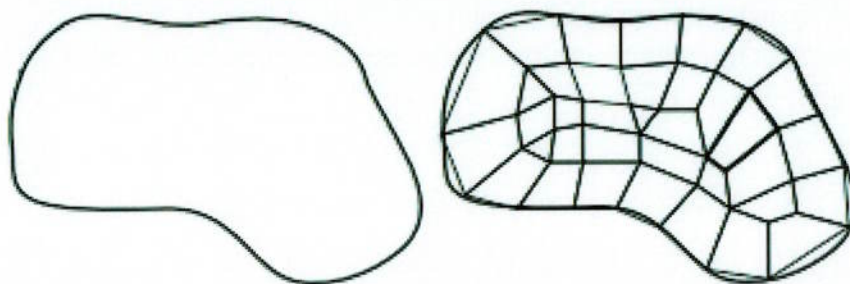
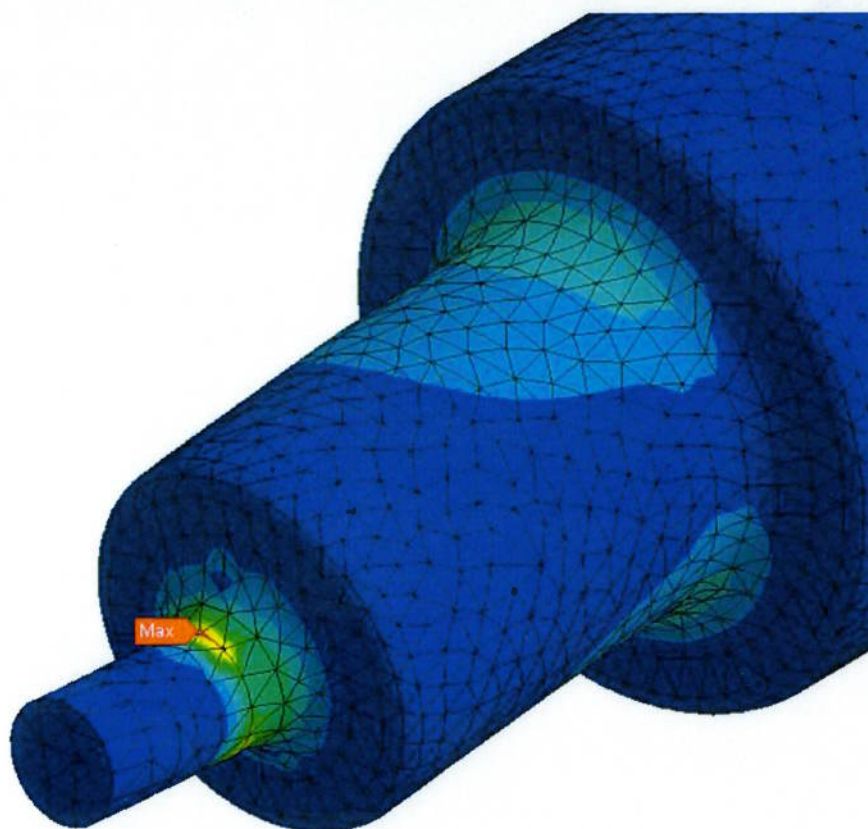


Figura 6: Outro exemplo de divisão de estrutura complexa em elementos menores, agora tetraédricos, fonte: www.esss.com/metodo-dos-elementos-finitos.



O ANSYS é um software comercial de elementos finitos que vem sendo utilizado nas mais diversas classes de problemas de engenharia (WARHADPANDE et al., 2010) e será o software utilizado para fazer as simulações desse trabalho.

Simulações e resultados

Como dito anteriormente foram simuladas duas peças atuando em conjunto, sendo a primeira a coluna de tubos de revestimento em um poço de petróleo e a segunda a representação de um suporte para essa coluna, com objetivo de ver a existência e a influência do movimento harmônico de *heave* da plataforma nesse conjunto de peças. Todas as simulações foram realizadas no software baseado no método dos elementos finitos ANSYS versão 17.1 e 19.0.

As figuras a seguir tem o intuito de facilitar o entendimento do problema para quem não está totalmente familiarizado com plataformas offshore. Pode-se observar nas **figuras 7 e 8** que na região central de ambas as plataformas há uma espécie de torre, nessa torre acontece o processo de casing running, no qual os inúmeros pedaços da coluna de revestimento são içados até o topo e então vão descendo até o contato com a mesa rotativa (**figura 9**).

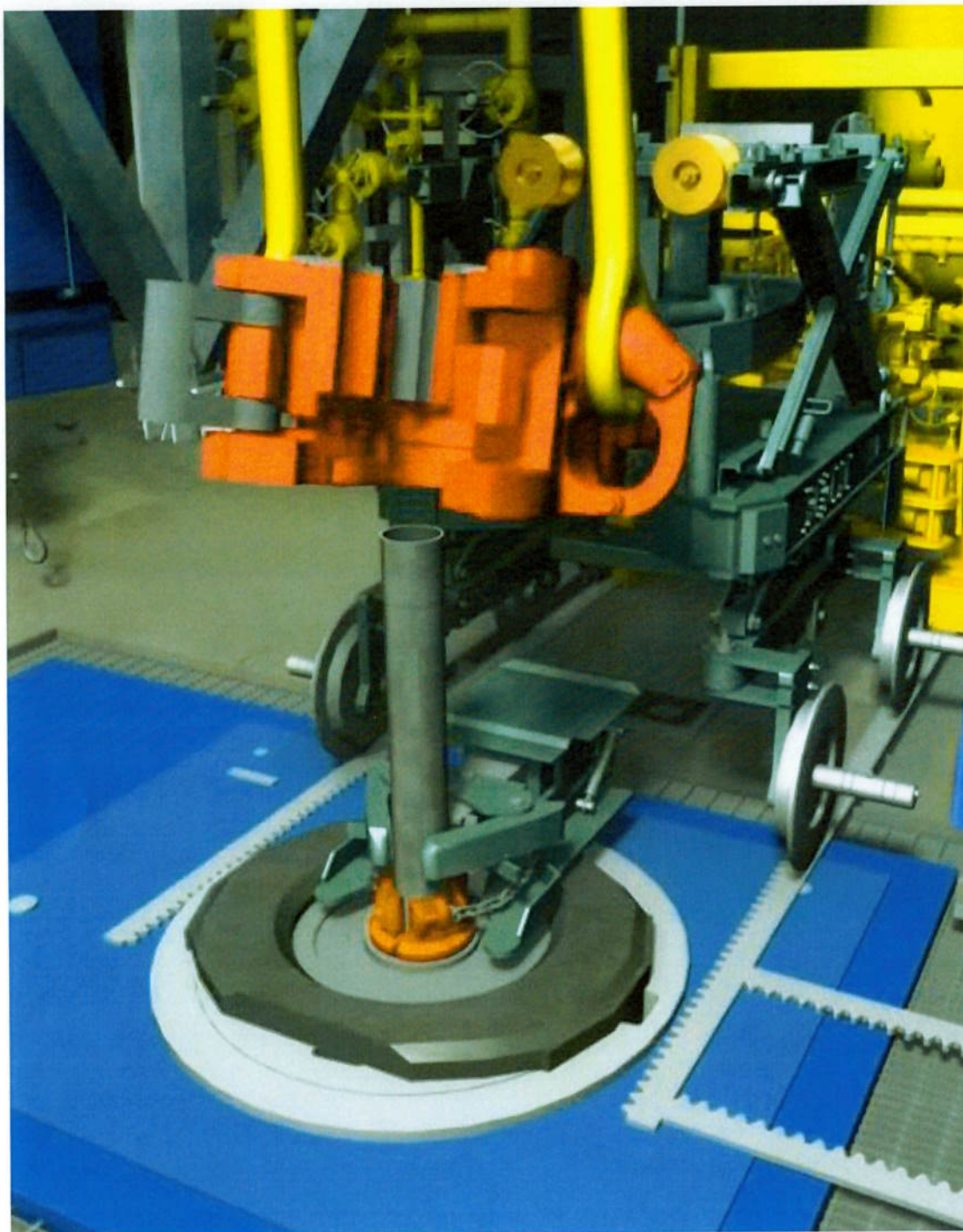
Figura 7: exemplo de plataforma offshore, fonte: br.depositphotos.com



Figura 8: exemplo de plataforma offshore, fonte: www.vagasoffshorebrasil.com.br.



Figura 9: exemplo de seção de coluna de revestimento sendo deixada pelo elevador e sustentada pela mesa rotativa, fonte: www.odfjellwellservices.com



4.1. Simplificações geométricas realizadas.

Como mostrado nas **figuras 3 e 4** fica visível que independente do suporte utilizado ele terá uma geometria complexa para ser desenhada em um software não

especializado em criação de peças, por isso foi feita a aproximação desse suporte para um cilindro oco reto (**figura 13**). Outra aproximação feita foi a de simular a coluna de revestimento como uma peça única (**figura 10**), também com formato cilíndrico oco reto, e não como a junção de várias seções de tubos de revestimento.

4.2. Parâmetros utilizados na simulação.

4.2.1 Tubos de revestimento

Figura 10: exemplo de tubo de revestimento gerado no ANSYS, fonte: ANSYS versão 17.1

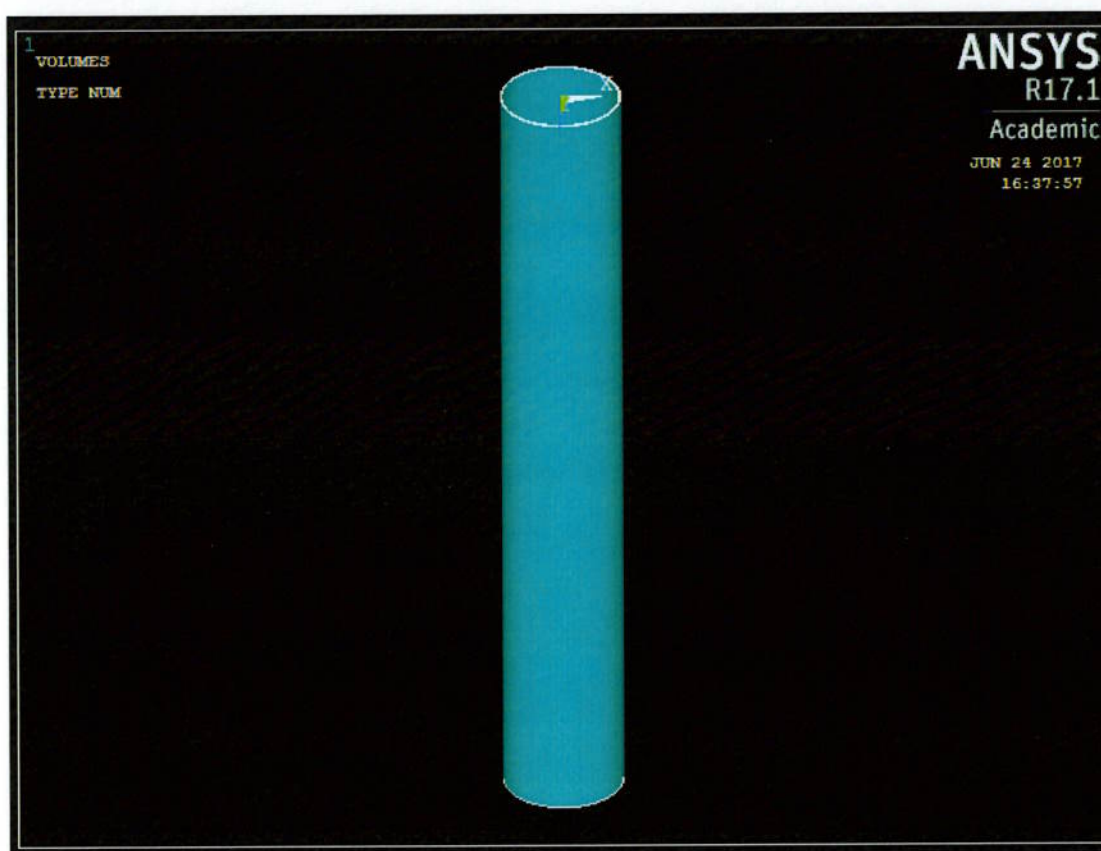


Figura 11: exemplo real de tubo de revestimento, fonte:
<http://www.rhsteelpipe.com/info.php?title=TUBING-AND-CASING&id=44&u=349>



Tubos de revestimento não são todos iguais, eles diferem entre si pela sua dureza, limite de escoamento, resistência à corrosão, etc. Tudo isso é controlado pela composição do tubo e pelo tratamento de calor aplicado na sua formação. Os tipos mais comuns são os K-55 e o J-55 devido ao preço mais baixo (**figura 11**). Para as simulações realizadas serão utilizados os dados relativos ao revestimento do tipo J-55 segundo as especificações API.

Segundo a Tenaris, que é a empresa que produz os tubos utilizados na indústria do petróleo pela Petrobras, os tubos de revestimento podem variar desde 4,5 a 24,5 polegadas de diâmetro, por isso nessa simulação será utilizado um valor intermediário de 16 polegadas (0,4064 metros) com a espessura do tubo de 0,495 polegada. Apesar do processo de revestimento ser realizado em etapas e nessas etapas a coluna ter desde alguns metros até mais de 4000 metros, será utilizado o valor de 20 metros para essa simulação, pois valores muito grandes exigiram horas de simulação e computadores extremamente potentes, além de ultrapassarem o limite de elementos do software.

Figura 12: Tabela do catalogo da Tenaris com propriedades dos tubos de revestimento

API Steel Grades | Casing | 13 3/8" TO 18"

(90 ksi, 95 ksi, 110 ksi and 125 ksi on reverse side)

SPECIFIED MINIMUM YIELD STRENGTH							
40 ksi 55 ksi 65 ksi 80 ksi							
Steel grades							
H40 H55 H65 H80, H80Q, H80, H80Q, H80, H80Q							
OUTSIDE DIAMETER	NOMINAL LINEAR MASS TBC	WALL THICKNESS	PLATE END MASS	INSIDE DIAMETER	STANDARD DRIFT DIAMETER	ALTERNATIVE DRIFT DIAMETER	CROSS-SECTIONAL AREA
in	lb/ft	in	lb/ft	in	in	in	in ²
13 3/8	85.00	0.608	82.98	12.159	12.003	—	24.386
	86.00	0.625	85.19	12.125	11.969	12.000	25.035
	92.50	0.672	91.25	12.031	11.875	—	26.818
	98.00	0.719	97.28	11.937	11.781	—	28.587
	100.00	0.734	99.19	11.907	11.751	—	29.149
	108.10	0.797	107.16	11.781	11.625	—	31.493
	115.70	0.859	114.93	11.657	11.501	—	33.776
	123.40	0.922	122.74	11.531	11.375	—	36.071
	130.80	0.984	130.34	11.407	11.251	—	38.305
	138.30	1.047	137.98	11.281	11.125	—	40.550
13 1/2	145.60	1.109	145.42	11.157	11.001	—	42.735
	80.40	0.575	79.58	12.348	12.161	12.250	23.387
13 5/8	81.40	0.580	80.11	12.340	12.153	12.250	23.547
	88.20	0.625	86.86	12.375	12.188	12.250	25.525
14	105.00	0.760	104.52	12.105	11.918	—	30.717
	65.00	0.375	62.64	15.250	15.063	—	18.408
16	75.00	0.438	72.86	15.124	14.937	—	21.414
	84.00	0.495	82.05	15.010	14.823	—	24.112
	94.50	0.562	92.75	14.876	14.689	14.750	27.257
	95.00	0.566	93.38	14.868	14.681	14.750	27.444
	96.00	0.575	94.81	14.850	14.663	14.750	27.864
	102.90	0.625	102.72	14.750	14.563	—	30.189
	109.00	0.656	107.60	14.688	14.501	14.600	31.622
	119.00	0.715	116.83	14.570	14.383	—	34.334
	128.00	0.781	127.06	14.438	14.251	—	37.341
	137.90	0.843	136.59	14.314	14.127	—	40.841
	147.30	0.906	146.19	14.188	14.001	—	42.962

Com os dados obtidos da **figura 12**:

- Diâmetro interno / externo (polegadas): 16/15,01
- Densidade linear (lb/ft): 84

Com o valor dado de densidade linear 84lb/ft, que equivale à aproximadamente 125,006 kg/m e os outros valores dados é possível calcular a densidade do tubo de revestimento.

Sendo o volume de um cilindro oco igual à V e V sendo explicitado pela **equação 1**, na qual, R é o raio maior, r o raio menor e h o comprimento da coluna de revestimento, têm-se que:

$$V = \pi h (R^2 - r^2) \quad [\text{Equação 1}]$$

$$V = 20\pi (0,2032^2 - 0,190627^2)$$

$$V = 0,31111172 \text{ m}^3$$

Com a densidade linear de 125,006 kg/m e uma coluna de 20 metros de comprimento, tem-se que a massa total do conjunto é de 2500 kg.

Como densidade é a razão entre massa e volume (**equação 2**), obtêm-se uma densidade de:

$$d = \frac{m}{V} \quad [\text{Equação 2}]$$

$$d = \frac{2500,12}{0,3111172}$$

$$d = 8035,9427 \text{ Kg/m}^3$$

Foi obtida uma densidade de 8035,9427 Kg/m³, que é próxima da densidade conhecida do aço de 7830 Kg/m³, mostrando que mesmo com os componentes específicos para o tubo de revestimento sua densidade não é muito diferente do aço comum. Por isso mesmo foi utilizado o valor padrão para módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson do aço, respectivamente 210 MPa e 0,33.

4.2.2 Suporte para a coluna de revestimento.

No momento de adicionar mais uma seção de tubo de revestimento à coluna deve-se apoiá-la em um suporte para então realizar o processo já apresentado chamado de casing running. Essa peça é o chamado *slip*, que segundo uma das empresas que o fabrica, a National Oilwell Varco, para o caso da simulação na qual o revestimento é de 16 polegadas, deve-se usar o *UC-3 Casing slip*, feito de aço e pesando 102 Kg.

Figura 13: slip simplificado projetado no ANSYS, fonte: ANSYS versão 17.1

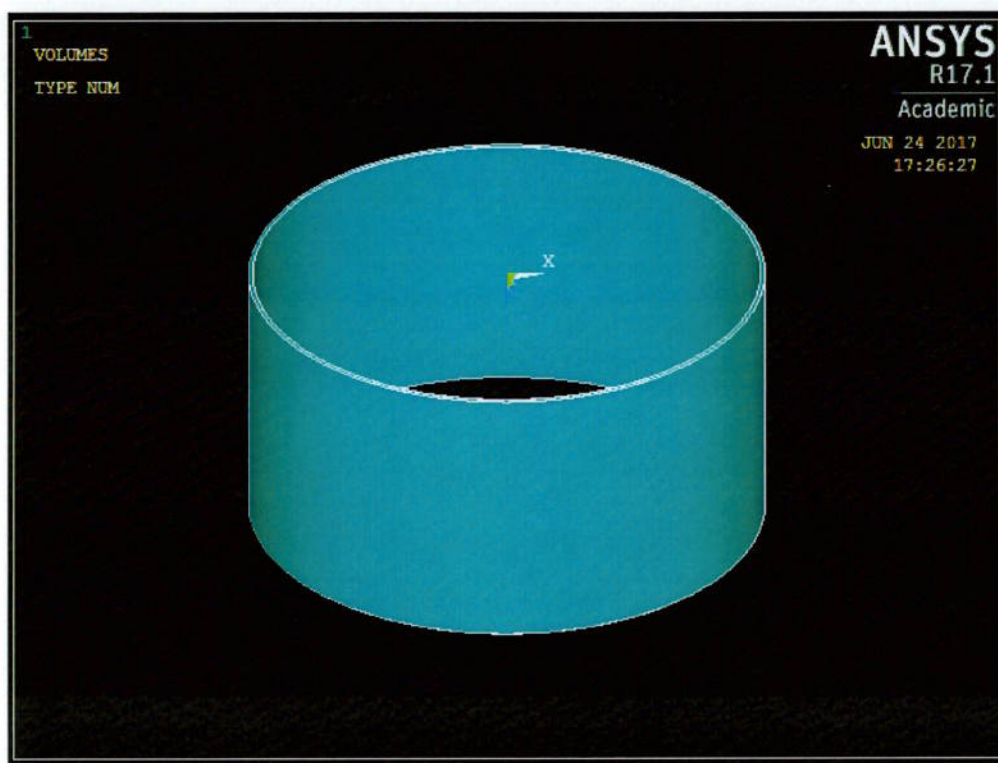


Figura 14: Exemplo de slip retirado do site da National Oilwell Varco



Aproxima-se essa peça para um cilindro oco (**figura 13**) e calcula-se sua altura da maneira análoga à coluna de revestimento:

$$d = \frac{m}{V}$$

$$7830 = \frac{102}{V}$$

$$V = 0,0130268 \text{ m}^3$$

Com esse volume é possível obter a altura do cilindro, pela fórmula de volume de cilindro oco (**equação 3**), utilizando o raio interno como o raio externo do tubo de revestimento:

$$V = \pi h (R^2 - r^2) \text{ [Equação 3]}$$

$$0,0130268 = \pi h (R^2 - 8^2)$$

Chegou-se em uma relação entre a altura do cilindro e seu diâmetro externo. Escolhendo no catálogo de slips da National Oilwell Varco um comprimento médio de 0,4 metro foi obtido então um diâmetro externo de 0,4546 metro, com isso, as propriedades do suporte simulado foram:

- Material: aço padrão densidade 7830 Kg/m³, módulo de elasticidade 210MPa, coeficiente de Poisson 0,33.
- Diâmetro interno: 0,4064 metro.
- Diâmetro externo: 0,4546 metro.
- Comprimento: 0,4 metro.

4.3 Modelagem das peças, definição dos elementos e materiais.

Agora que foram apresentados os materiais que serão simulados se dá início a parte computacional, que pode ser separada em cinco partes:

- Modelagem das peças, ou seja, transformar objetos reais, como o suporte e a coluna de revestimento, em peças virtuais através do ANSYS.
- Criação da malha.
- Condições de contorno e carregamento
- Resultado das simulações.
- Análise dos critérios de falha.

É válido lembrar que as duas primeiras etapas independem do tipo de simulação realizada, estática ou dinâmica.

4.3.1. Definindo tipo de elemento.

Foi escolhida a geometria do elemento infinitesimal que será simulado pelo método dos elementos finitos, resultando em elementos tetraédricos sólidos com 4 nós, que é um dos materiais catalogados no manual do ANSYS (7.1 Apêndice).

4.3.2 Definindo tipo de material.

Foram relacionados tanto suporte quanto coluna de revestimento com o material correspondente que o compõe. Para mais informações ver descrição (7.2 Apêndice).

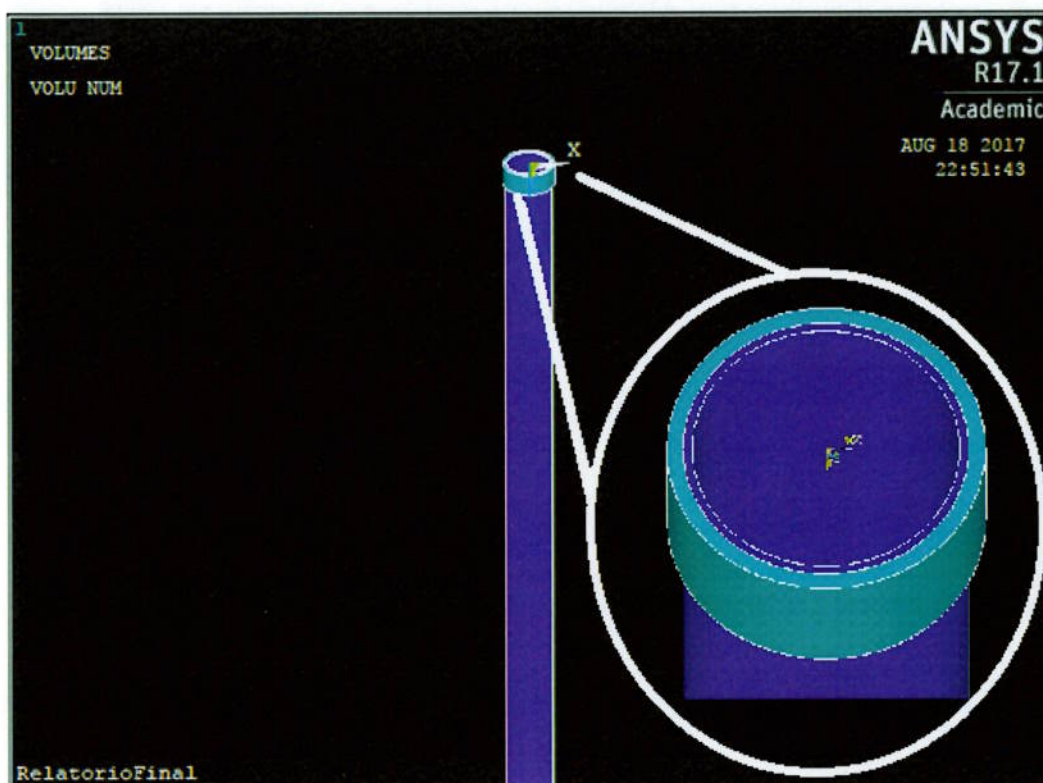
4.3.3. Criando as peças.

Através dos comandos (7.3 Apêndice) foram geradas as geometrias da coluna e do suporte.

4.3.4. Diferenciar as peças.

Agora se deve informar qual peça é feita de qual material criado anteriormente (7.4 Apêndice).

Figura 15: Conjunto coluna de revestimento (roxo) e suporte (azul) com zoom no contato, imagem retirada do ANSYS 17.1.



4.4. Criando a malha.

Após criar as peças deve-se criar a malha para então simular o conjunto, isso foi feito através dos comandos da seção **7.5 do apêndice**:

Após essa etapa a malha terá sido criada pelo modo “smart”, com isso o programa define a melhor configuração de malha para esse problema, resultando na configuração dada pela **figura 18**.

Figura 16: parâmetros da malha gerada na resolução do problema, retirada do ANSYS 17.1

```
STATUS OF SMART SIZING PARAMETERS
SIZE LEVEL                                = 10
SMART SIZING SCALE FACTOR                 = 5.0000
AREA INTERNAL EXPANSION FACTOR            = 2.0000
AREA INTERNAL TRANSITION CONTROL FACTOR   = 2.0000
SPANNED ANGLE PER ELEMENT (LOW ORDER ELEMENTS) = 45
SPANNED ANGLE PER ELEMENT (HIGH ORDER ELEMENTS) = 45
GROWTH RATIO FOR PROXIMITY CHECK          = 2.0000
SMALL HOLE COARSENING IS                  ON
SMALL ANGLE COARSENING IS                 ON
MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS              = 4
SURFACE PROXIMITY REFINEMENT IS           OFF
ELEMENT SIZE (ESIZE)                      = 1.0000
```

Agora o objetivo é fazer com que a parede externa da coluna de revestimento e a parede interna do suporte, quando em contato, tenham seus movimentos relativos inexistentes, para o deslizamento de uma peça em relação à outra não atrapalhar na simulação futuramente. Para isso foram realizados os comandos descritos pela parte **7.6 do Apêndice**:

4.5. Condições de contorno e carregamento

Como o suporte é uma peça fixa apoiada na plataforma, ele deverá ter seus graus de liberdade limitados, mostrando assim que não se movimenta. Como as equações teóricas, utilizadas na comparação entre os resultados da simulação e a literatura, são de uma viga engastada pela ponta (**figura 19**) então a área com os graus de liberdade limitados será a área superior do suporte.

Para isso deve-se realizar os procedimentos descritos em **7.7 do Apêndice**.

A **figura 20** representa a situação atual do conjunto slip-coluna.

Figura 17: ilustração referente à equação 6 [imagem gerada no paint]

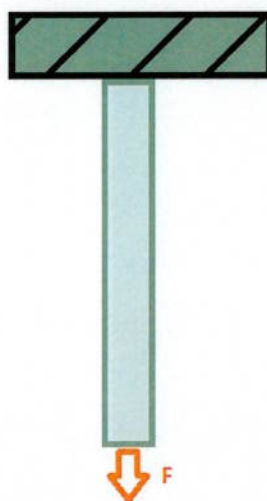
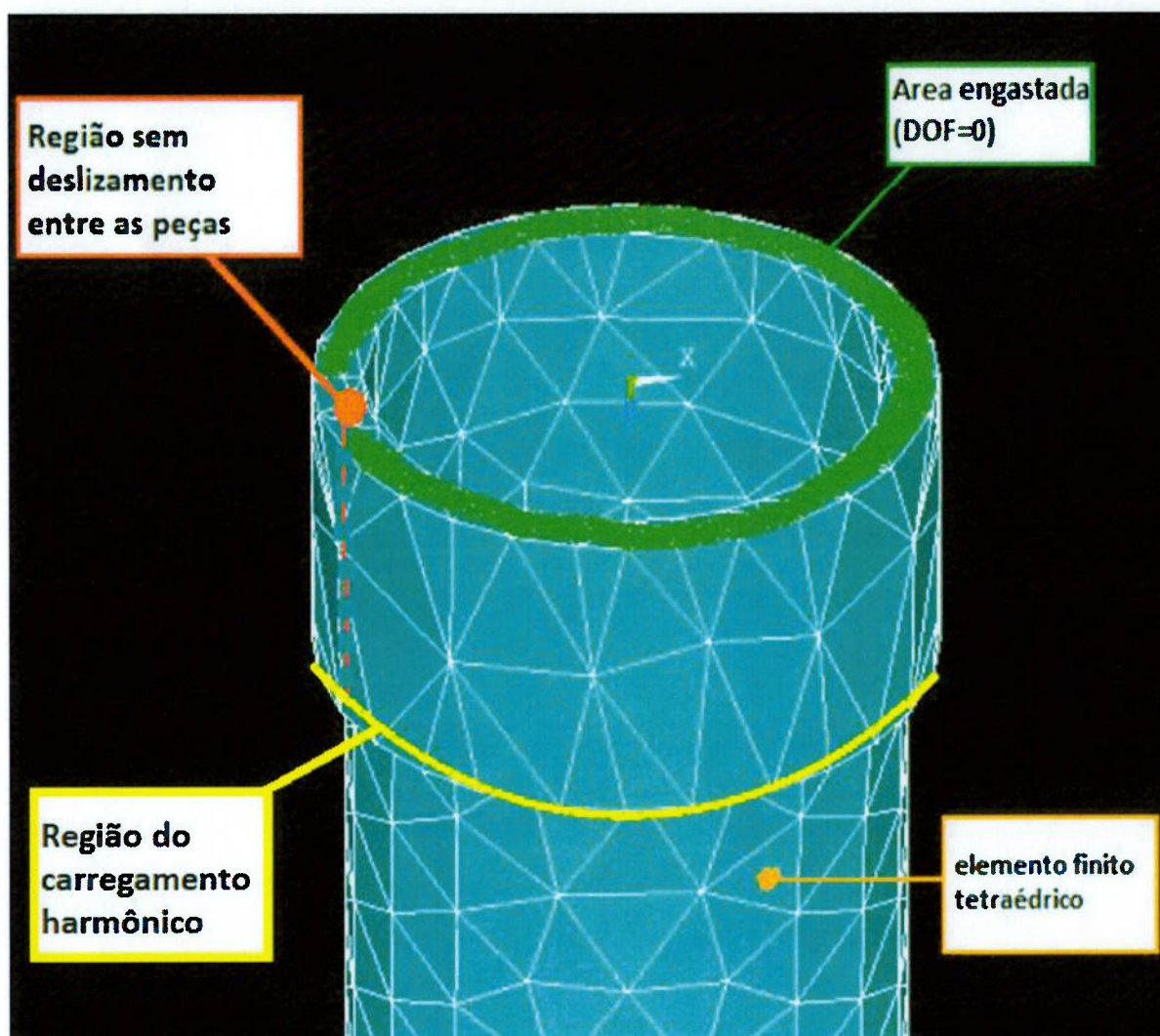


Figura 18: resumo das hipóteses consideradas no conjunto simulado com a malha já feita, fonte: ANSYS 17.1



A partir dessa etapa serão tratadas separadamente as simulações dos carregamentos estático e dinâmico.

4.5.1 Condições de contorno e carregamento estático.

Ao desprezar o atrito entre a água do mar e a coluna de revestimento, pode-se assumir que o peso da coluna anexada à nova seção e a força peso dos materiais são as forças atuantes nesse sistema e a força exercida pela coluna será representada por uma pressão na face inferior da seção. Para transformar essa força em uma pressão será feito o seguinte procedimento. Será considerado que a coluna anexa à seção é composta apenas por uma outra seção de tubo.

Sendo **F** força, **m** massa, **a** aceleração, **P** pressão e **A** área da face inferior da coluna de revestimento, podemos relacioná-las através da **equação 4**:

$$F = m * a \quad [\text{Equação 4}]$$

$$P = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi * (R^2 - r^2)}$$

Com o valor obtido anteriormente do peso da coluna de 2500,12 Kg e sabendo que aceleração da gravidade vale aproximadamente 9,80665 m/s², têm-se que a força resultante do peso da coluna de revestimento é de 24.517,8 Newton.

Com os valores do raio interno e externo do tubo de revestimento e da força obtida anteriormente e utilizando a **equação 5** obtém-se a pressão que equivale à coluna anexa:

$$P = \frac{F}{\pi * (R^2 - r^2)} = \frac{24517,8}{0,015551} \quad [\text{Equação 5}]$$

$$P = 1,57660601 \text{ MPa}$$

Agora basta inserir esse dado (com sentido negativo de tração) através do comando **7.8 do Apêndice**.

Aqui termina a modelagem da parte estática, basta selecionar o item Solve → Solve current LS → ok.

4.5.2 Condições de contorno e carregamento dinâmico.

Como dito anteriormente, carregamento dinâmico é todo carregamento no qual o tempo é uma das variáveis na aplicação da carga, podendo ter intensidade

constante ou apresentar variações ao longo do tempo, ou seja, é quando o estado de tensão varia com o tempo.

Com o *heave* da plataforma, o conjunto suporte-coluna de revestimento oscila junto, e é intuitivo pensar que, em comparação com o cenário estático, quando a plataforma “sobe” os esforços atuantes na interface entre o slip e a coluna são maiores do que quando a plataforma “desce”. Supondo que o movimento da plataforma seja exclusivamente vertical, *heave*, então os esforços atuantes no contato variam com o tempo e podem ser considerados como um o carregamento harmônico com frequência igual à frequência oscilatória da plataforma.

Para fazer uma simulação com carregamento harmônico foi iniciada uma nova simulação, mas sem mudar a malha e as peças utilizadas (**7.9 Apêndice**).

Nesse ponto uma nova simulação se inicia, porem com carregamento harmônico e não mais estático. É necessário agora aplicar as condições de contorno.

Para aplicar o deslocamento zero (engastar) à área superior do suporte foram seguidos os mesmos passos do carregamento estático.

Em relação às forças no sistema, pode-se afirmar que a força peso da coluna é constante, já que depende da aceleração da Terra e não da coluna, mas com o *heave* as tensões no contato, decorrente da nova seção de tubo suportar a coluna anexa a ela, variam.

Resumindo, o sistema em questão possui sua região superior engastada, uma força constante, força peso da coluna de revestimento, e tensões que variam com o tempo no contato slip – coluna (**figura 19**).

Apesar de ser um carregamento harmônico, foram seguidos os mesmos passos, acrescentando apenas uma passagem ao final, descrita pela passagem **7.10 do Apêndice**:

Foi utilizado esse range de frequência porque, após algumas simulações, foi observado que não eram necessários intervalos maiores já que os parâmetros obtidos se comportam de maneira cíclica, sendo evidente sua repetição em intervalos menores que 500Hz.

4.6. Resultado das simulações.

4.6.1 Resolução estática.

Antes de analisar o resultado das simulações é importante relembrar o conceito de deslocamento e deformação.

Considerando uma estrutura sob efeito de uma carga genérica que acabará levando a uma mudança da configuração inicial do seu estado de tensão, a estrutura altera a sua forma que, de maneira ilustrativa, é mostrada na **figura 21**. A mudança inicial de um ponto B que possa representar a configuração geométrica de uma peça estrutural plana em relação a um sistema de referência fixo para uma nova posição B', como mostra a **figura 21**, é chamado de estado de deslocamento.

O deslocamento do ponto B para B' pode não apenas gerar uma translação de corpo rígido de toda a peça, mas também alterar a configuração geométrica natural da estrutura, fazendo com que a peça se deforme. Com isso, ocorre um novo estado denominado Estado de Deformação. A distância percorrida do ponto B até B' é chamada de deslocamento e pode ser dividido nas 3 direções, deslocamento linear em x, y e z.

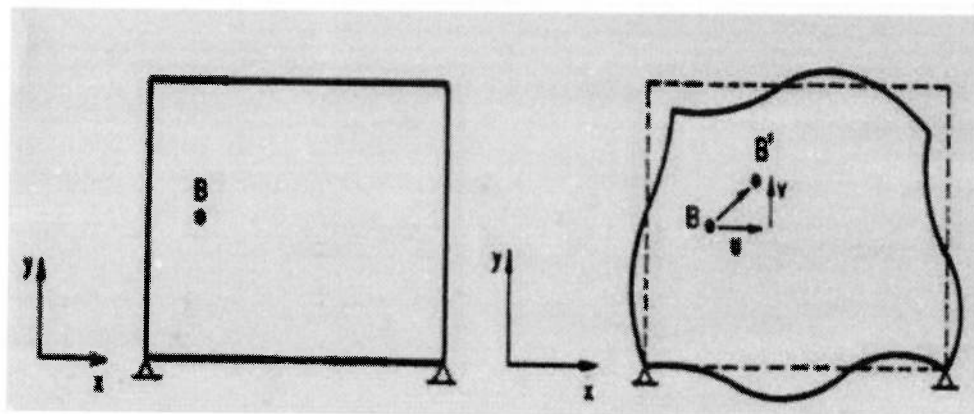


Figura 21: ilustração de um corpo deformado e não deformado, fonte: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/17050/17050_3.PDF

A partir do **gráfico1** obtêm-se dados que relacionam o deslocamento, no eixo vertical Z, dos diversos pontos que compõe o conjunto coluna de revestimento e suporte. Com esse gráfico é possível obter o valor máximo e mínimo de deslocamento, o primeiro ocorre no limite inferior da coluna de revestimento e tem intensidade de aproximadamente 0,000145 metro, já o valor mínimo pertence à região superior do

conjunto, que como estipulado era nulo. Esse deslocamento acaba deformando a coluna, que resulta no **gráfico 2**, que mostra a coluna sem deformação, conseqüentemente sem carregamento, e com deformação (deformação essa que causa alongamento e afinamento da coluna).

Para ver se o resultado obtido assemelha-se com a realidade foi criada a hipótese de aproximar esse carregamento em questão para um caso conhecido de carregamento axial em vigas. Segundo a literatura, no caso de uma viga engastada por uma face da extremidade e com carregamento axial na outra extremidade, pode-se estimar o deslocamento através da **equação 6**, na qual **F** é a força do carregamento, **A** a área transversal, **L** o comprimento da viga (que no caso é o conjunto analisado) e **E** o módulo de elasticidade do material:

$$[\text{Equação 6}] \quad d = \frac{l \cdot F}{E \cdot A} = \frac{P \cdot L}{E} = \frac{1,57660601 \text{ MPa} \cdot 20 \text{ metros}}{2,1 \cdot 10^{11}} = 0,00015015295 \text{ metro}$$

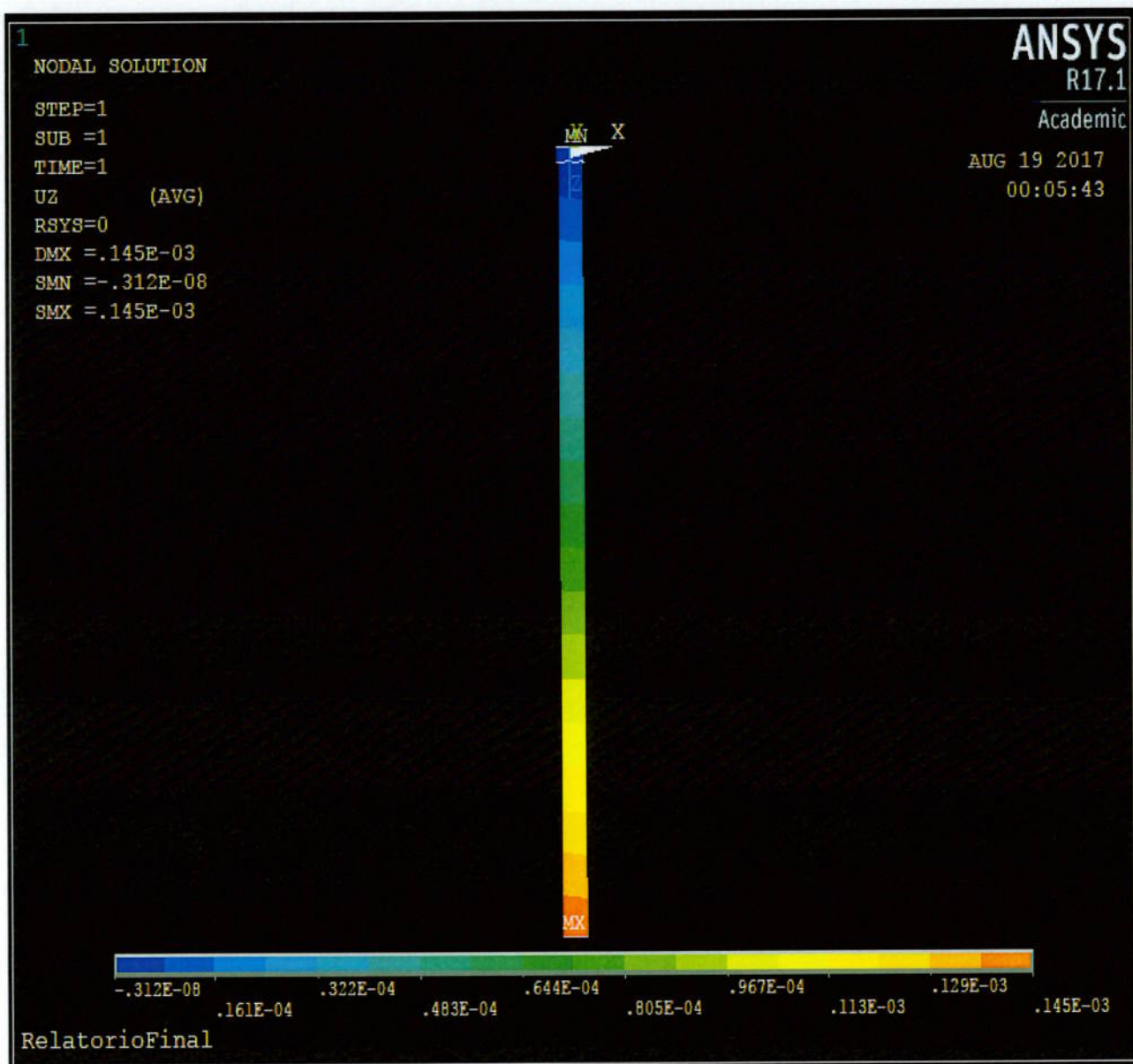
A partir do **gráfico 1** obtém-se o valor do maior deslocamento no caso estático, que é de aproximadamente 0,000145 metro que quando comparado ao valor obtido da literatura de 0,0001501 metro praticamente confirma a exatidão dos dados simulados no ANSYS e também mostra que aproximar o conjunto analisado por um carregamento axial normal de viga, como o da hipótese, não é um absurdo.

4.6.2 Resolução parte harmônica

Assim como no caso estático é possível plotar gráficos de deslocamento em todo o conjunto suporte-coluna de revestimento, porém o caso harmônico difere do anterior pelo fato desses deslocamentos não somente variarem com a posição na coluna, mas também com a frequência do carregamento. Segundo Fabiano Vieira em seu livro *Métodos e Técnicas de Análise de Vibração*, “frequência de ressonância ou frequência natural é o conjunto de frequências particulares de um corpo em vibração livre, determinada pelo tamanho, forma e composição desse, que quando atingida pelo corpo produz o fenômeno da ressonância”. De maneira prática pode-se dizer que é a frequência que maximiza o deslocamento de um corpo. Essa frequência natural não tem valor único e sim ocorre em intervalos uniformes.

Novamente, assim como feito no caso estático, aproximar esse conjunto suporte-coluna de revestimento para o caso padrão de uma viga engastada em uma extremidade e com carregamento na outra, pode-se encontrar as frequências naturais através da **equação 7**:

Gráfico 1: Deslocamento no eixo Z em metros

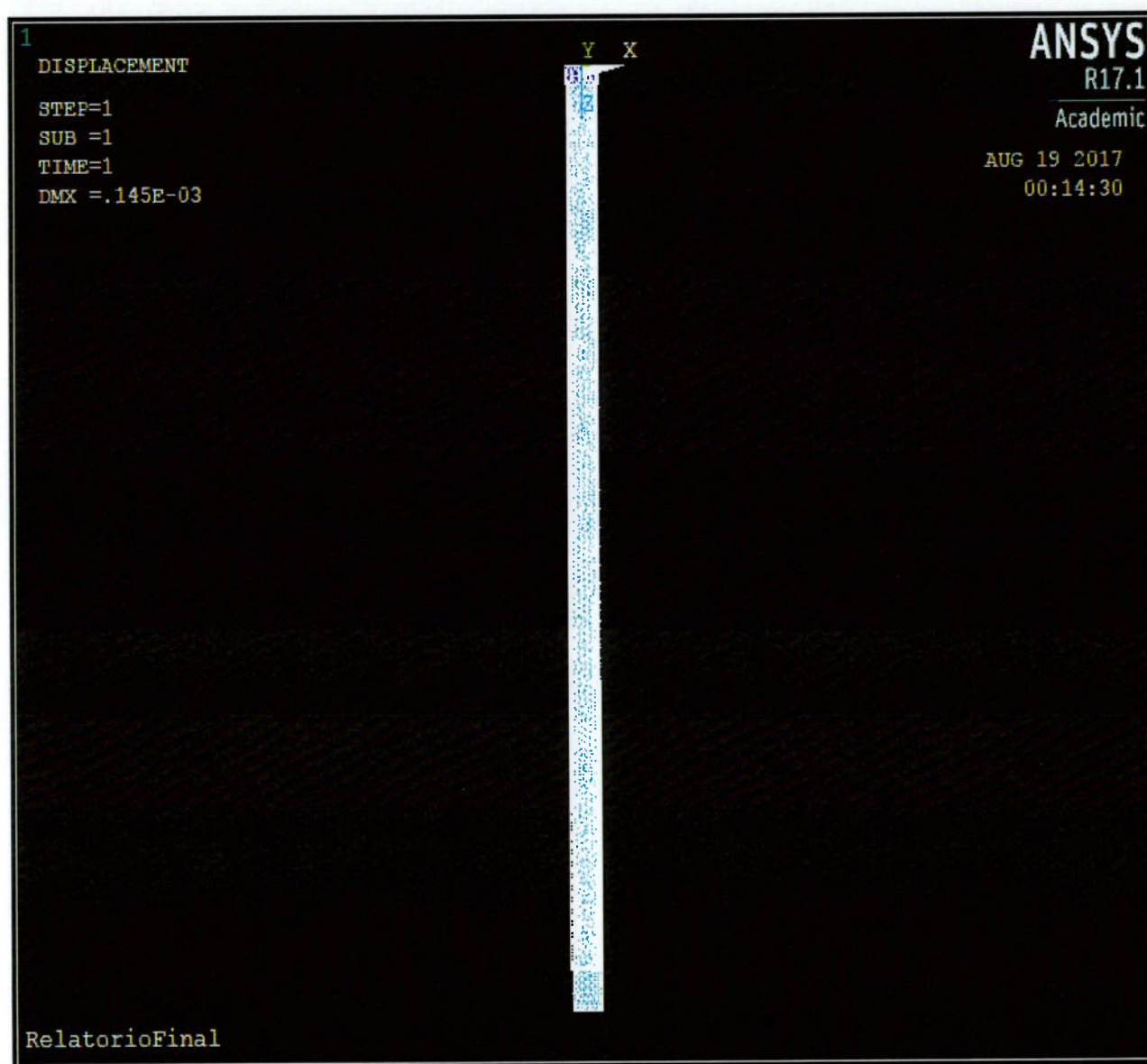


$$\text{[Equação 7]} \quad \omega = n \frac{\sqrt{E}}{2l}$$

Na qual n é o fator utilizado para achar os valores múltiplos, e assume qualquer valor inteiro maior que 1, \sqrt{E} é a raiz quadrada do modulo de elasticidade dividido pela densidade do material, l é o comprimento da viga e ω são os valores das frequências naturais. Aplicando esses valores à formula , obtém-se:

$$\omega = \frac{\sqrt{(2,1E11/8035)n\pi}}{2*20} = n 401,52 \text{ rad/s} = n 63,9 \text{ Hz.}$$

Gráfico 2: Ilustração do ANSYS da coluna sem e com carregamento



Segundo a **equação 7**, a frequência harmônica desse conjunto assume aproximadamente valores múltiplos de 64 Hertz. Para conferir isso foi feito um gráfico de deslocamento da área inferior da coluna em relação ao log da frequência, o resultado obtido é apresentado pelo **gráfico 3**.

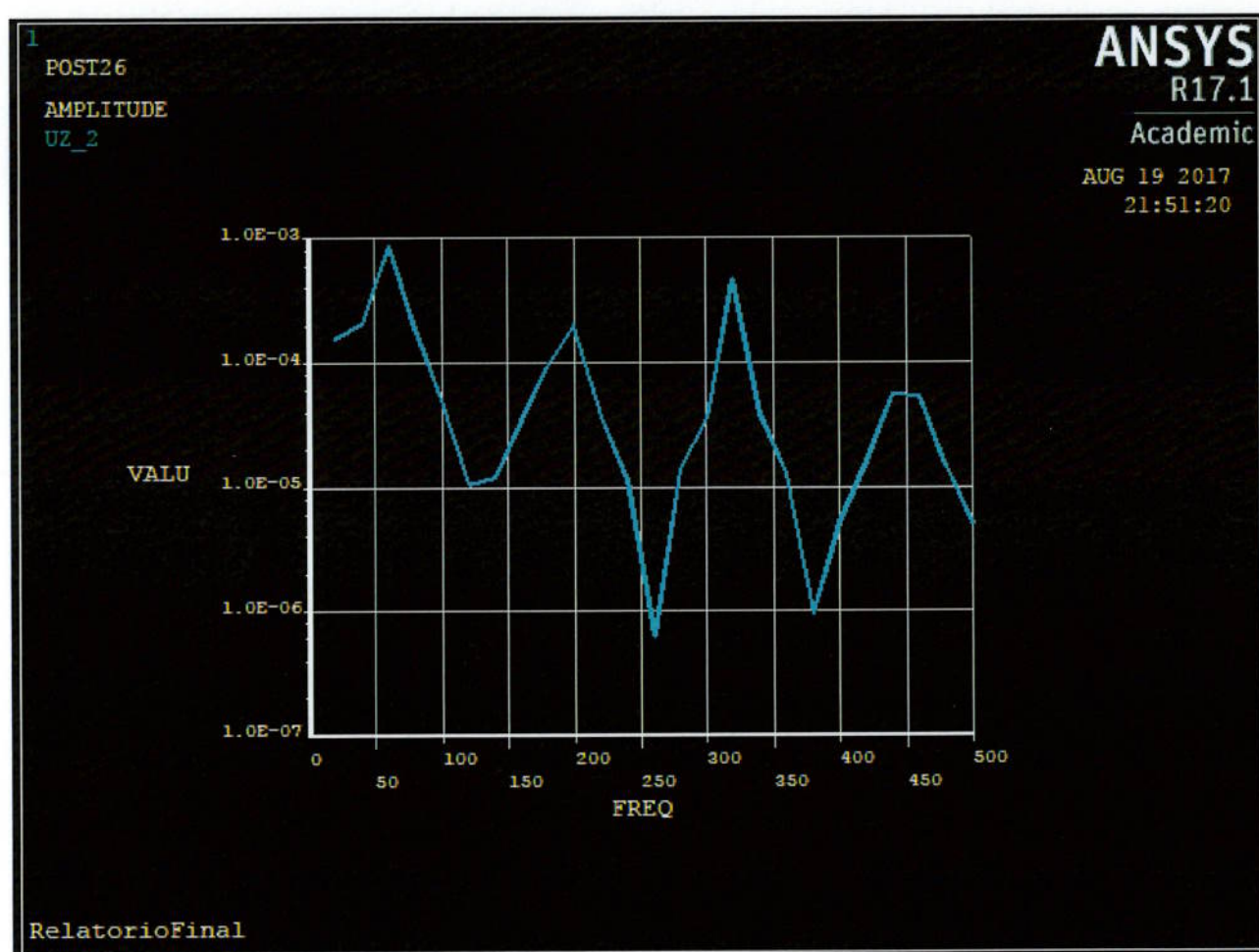
Pode-se ver que para o primeiro valor de frequência natural a hipótese tomada é suficientemente correta, já que o deslocamento parece ter um comportamento cíclico em função da frequência em valores, inicialmente e aproximadamente, múltiplos de 64 Hertz.

Para comparar agora os valores de deslocamento harmônico e estático serão utilizados os **gráficos 4 e 5**, que mostram o deslocamento em frequências de 64Hz e 0.5Hz.

Para o **gráfico 4** (60Hz) o deslocamento máximo assumiu valores próximos à 0,000877 metro na área inferior da coluna de revestimento, já o **gráfico 5** (0.5Hz) assumiu como valor máximo de deslocamento 0,000158 metro.

Agora com esses valores fica possível a comparação entre os dois cenários. Quando comparados o valor máximo do caso dinâmico (0,00087) com o valor estático (0,000145) o cenário dinâmico mostra deslocamentos quase **seis vezes** maiores que o caso estático, isso pegando a maior diferença possível.

Gráfico 3: Deslocamento (metro) em função da frequência (Hertz).



Para trazer essa comparação mais próxima da realidade brasileira, na qual o ambiente marinho é ameno e as oscilações são bem menores que 60Hz, será utilizado o **gráfico 5**, que mostra o deslocamento com frequência de 0,5Hz, que nada mais é do que 1 oscilação a cada 2 segundos. Nesse caso o deslocamento máximo obtido teve intensidade bem inferior à anterior sendo igual a 0,000158, ou seja, na prática há um aumento, porém bem menor em relação à frequência natural, que é o esperado, já que essa frequência maximiza o deslocamento.

Gráfico 4: deslocamento no conjunto a 60Hz

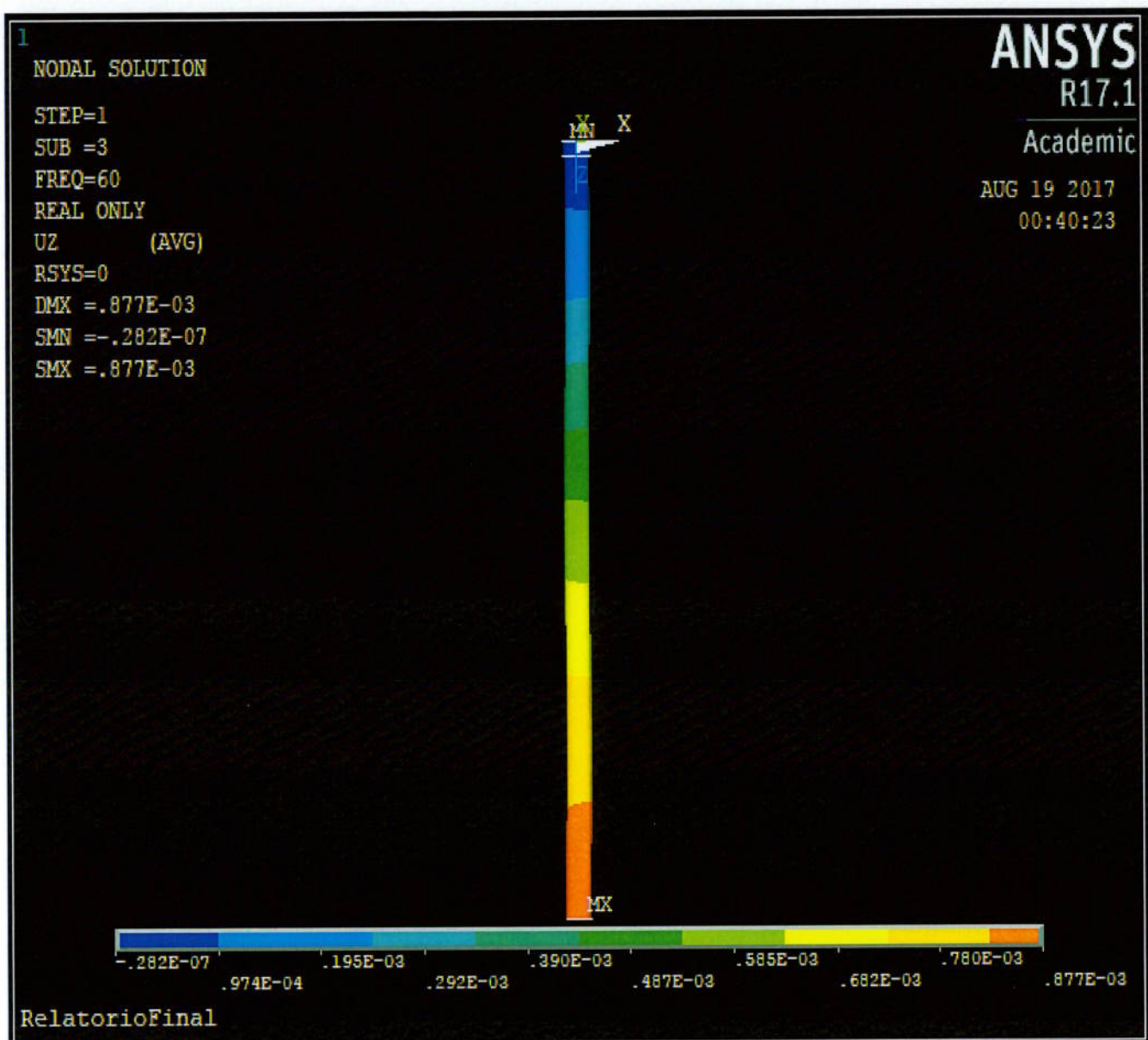
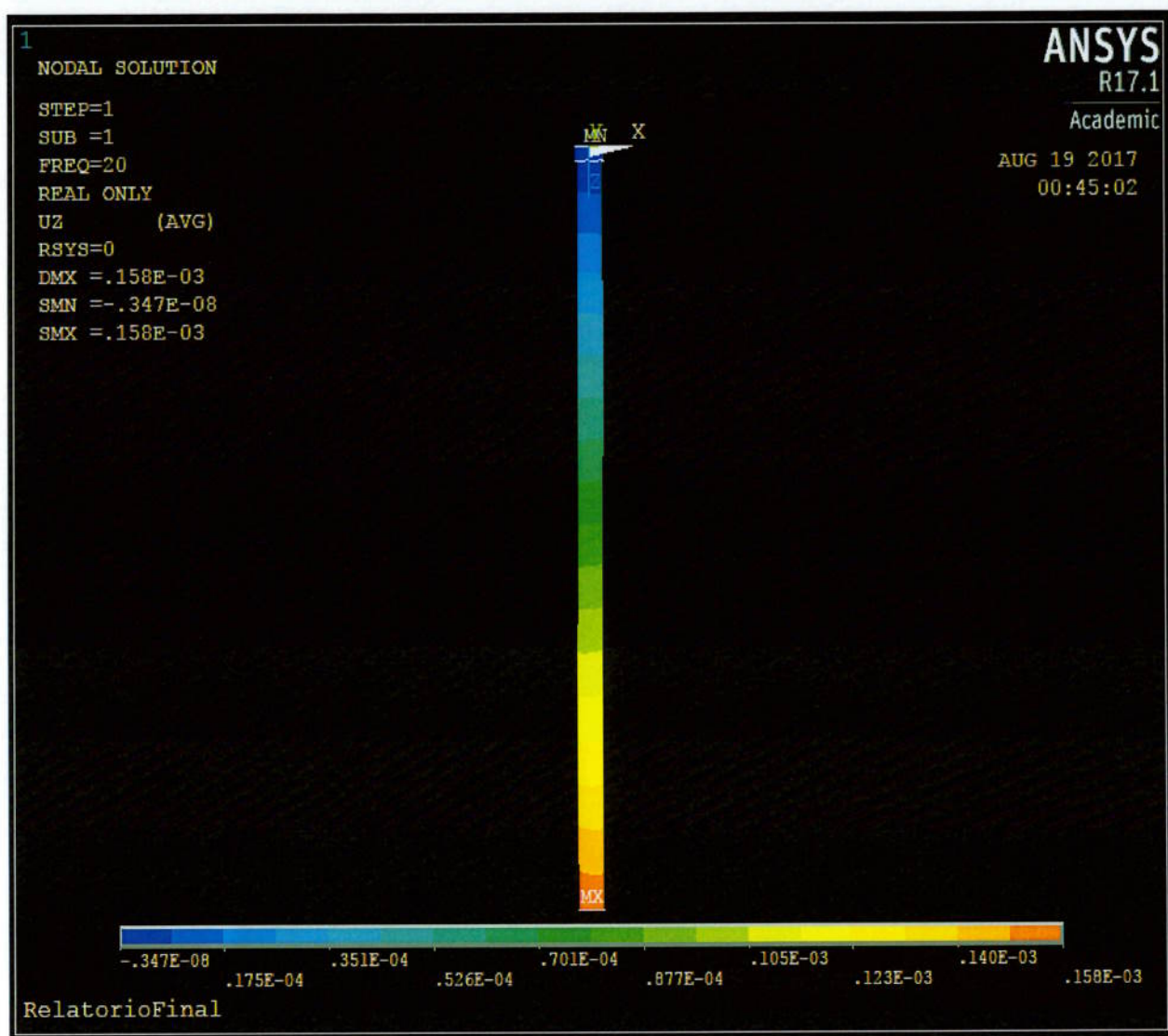


Gráfico 5: Deslocamento no conjunto a 0.5Hz.



4.7 Critérios de falha de von Mises.

O critério de falha de von Mises diz que “um material é dito estar em estado de início de escoamento quando sua tensão equivalente de von Mises atinge um valor crítico denominado tensão de escoamento”, ou seja, o material pode falhar caso a tensão de von Mises seja igual ao seu limite de escoamento.

Foram achados dados do site da EOI (Equip outlet inc), que é uma produtora e distribuidora de tubos de revestimento de aço para poços de petróleo, que permitirá a análise desse critério de falha nas simulações realizadas:

Figura 19: Tabela com as especificações API incluindo limite de escoamento do revestimento J-55

Series	Application	Grade	Type	Yield Strength		Tensile Strength
				Minimum psi (MPa)	Maximum psi (MPa)	Minimum psi (MPa)
API	Group 1	H40		40,000 (276)	80,000 (552)	60,000 (414)
		J55		55,000 (379)	80,000 (552)	75,000 (517)
		K55		55,000 (379)	80,000 (552)	95,000 (655)
		N80	1	80,000 (552)	110,000 (758)	100,000 (689)
			Q	80,000 (552)	110,000 (758)	100,000 (689)
	Group 2	R95		95,000 (655)	110,000 (758)	105,000 (724)
		M65		65,000 (448)	85,000 (586)	85,000 (586)
		L80	1	80,000 (552)	95,000 (655)	95,000 (655)
			13Cr	80,000 (552)	95,000 (655)	95,000 (655)
		C90	1	90,000 (621)	105,000 (724)	100,000 (689)
		T95	1	95,000 (655)	110,000 (758)	105,000 (724)
		C110		110,000 (758)	120,000 (828)	115,000 (793)
	Group 3	P110		110,000 (758)	140,000 (965)	125,000 (862)
	Group 4	Q125	1	125,000 (862)	150,000 (1,034)	135,000 (931)

Segundo essa tabela o limite de escoamento (Yield Strenght) do tubo de revestimento em questão (J-55) tem como limite inferior de 379 MPa e superior de 552 MPa. Ou seja, caso a tensão de von Mises atinja valores próximos de 379 MPa (próximos, pois foram feitas algumas hipóteses na simulação das peças no ANSYS que podem acabar aumentando o erro dos resultados comparados à realidade) o material já está sujeito a falhar.

Foram obtidos dessa simulação gráficos relacionando a tensão efetiva de von Mises no conjunto tanto no caso estático quanto no dinâmico (no qual também variou-se a frequência para ver como variava a tensão). Os resultados estão expostos nos **gráficos 6, 7 e 8**.

Para resumir os dados criou-se a tabela a seguir:

Figura 20: Tabela comparativa entre o tipo de carregamento e valores de Tensão de Von Mises

Tipo de carregamento	Tensão de von Mises mínima	Tensão de von Mises máxima	Limite de escoamento (min/max)
Estático	28.988,1 Pa	1.990.000 Pa	379.000.000/552.000.000
Harmônico 60Hz	266.722 Pa	17.600.000 Pa	379.000.000/552.000.000
Harmônico 0,5Hz	29330,8 Pa	2.240.000 Pa	379.000.000/552.000.000

Com a tabela da **figura 22** fica mais fácil comparar a tensão efetiva de von Mises em cada caso com o Limite de escoamento do material. Em todos os casos a tensão não chega a atingir o limite mínimo de escoamento, no caso em que a tensão é maior (carregamento harmônico na frequência natural) o valor máximo de tensão efetiva de von Mises atinge apenas 4,7% do valor mínimo de limite de escoamento.

Para medir quanto que a diferença no tipo de carregamento pode influenciar na tensão efetiva basta comparar o caso estático máximo com o harmônico máximo (que ocorrem no mesmo ponto, o inferior da coluna de revestimento). Quando comparados, de 1.9900.000 Pa para 17.600.000 há um aumento de quase 9 vezes de tensão efetiva de von Mises.

Gráfico 6: tensão efetiva de von Mises no caso estático

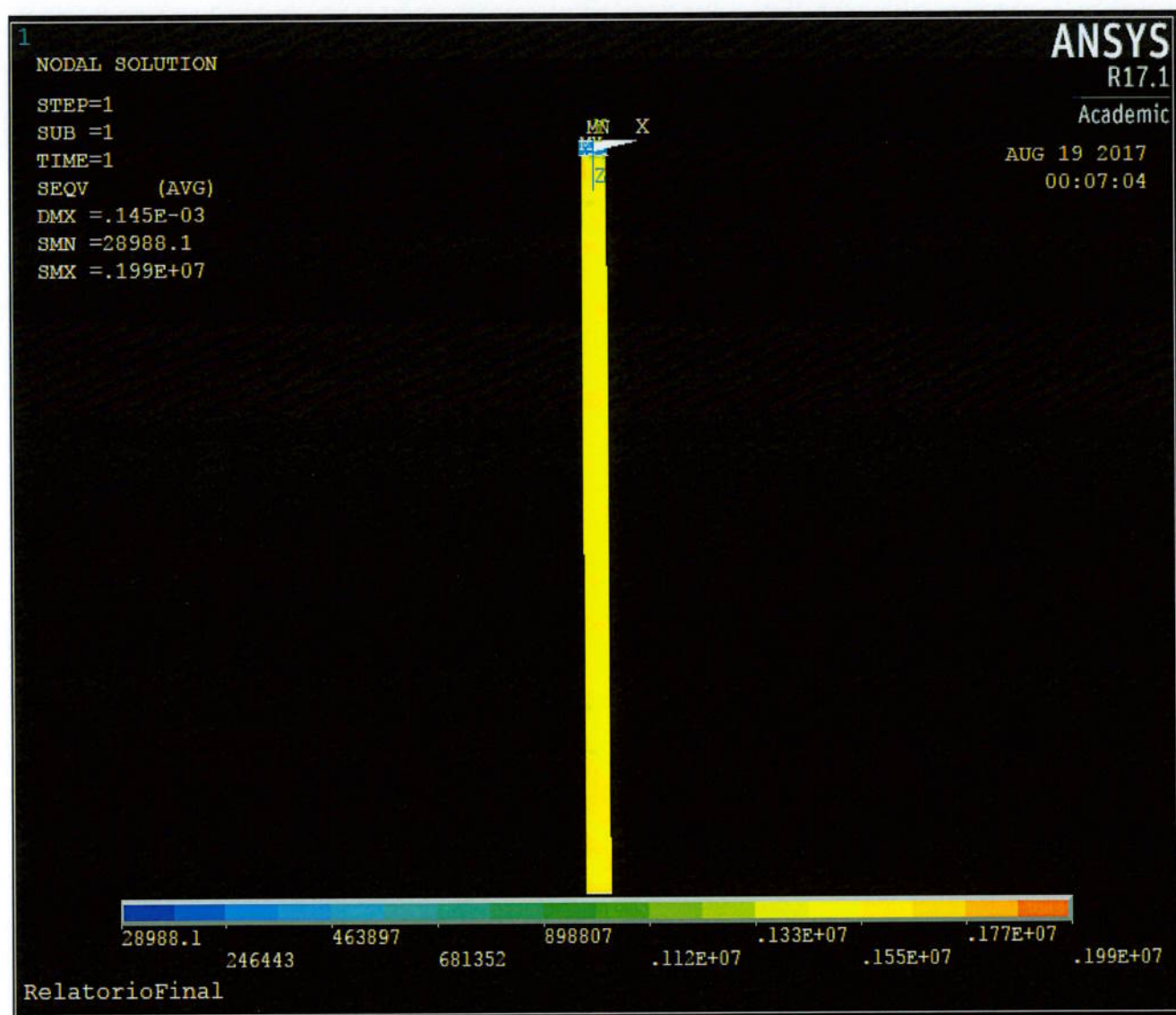


Gráfico 7: Tensão efetiva de von Mises a 60hz

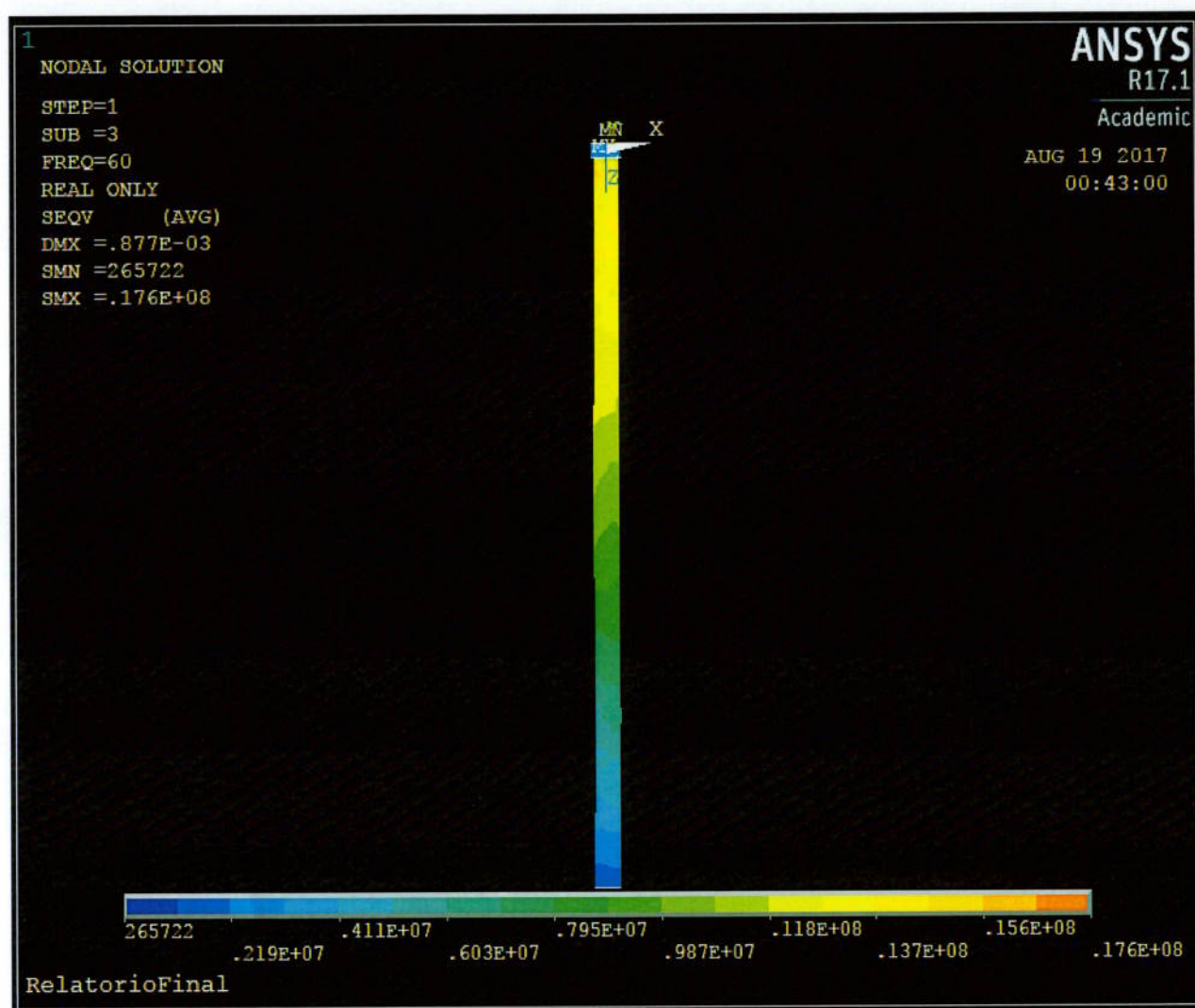
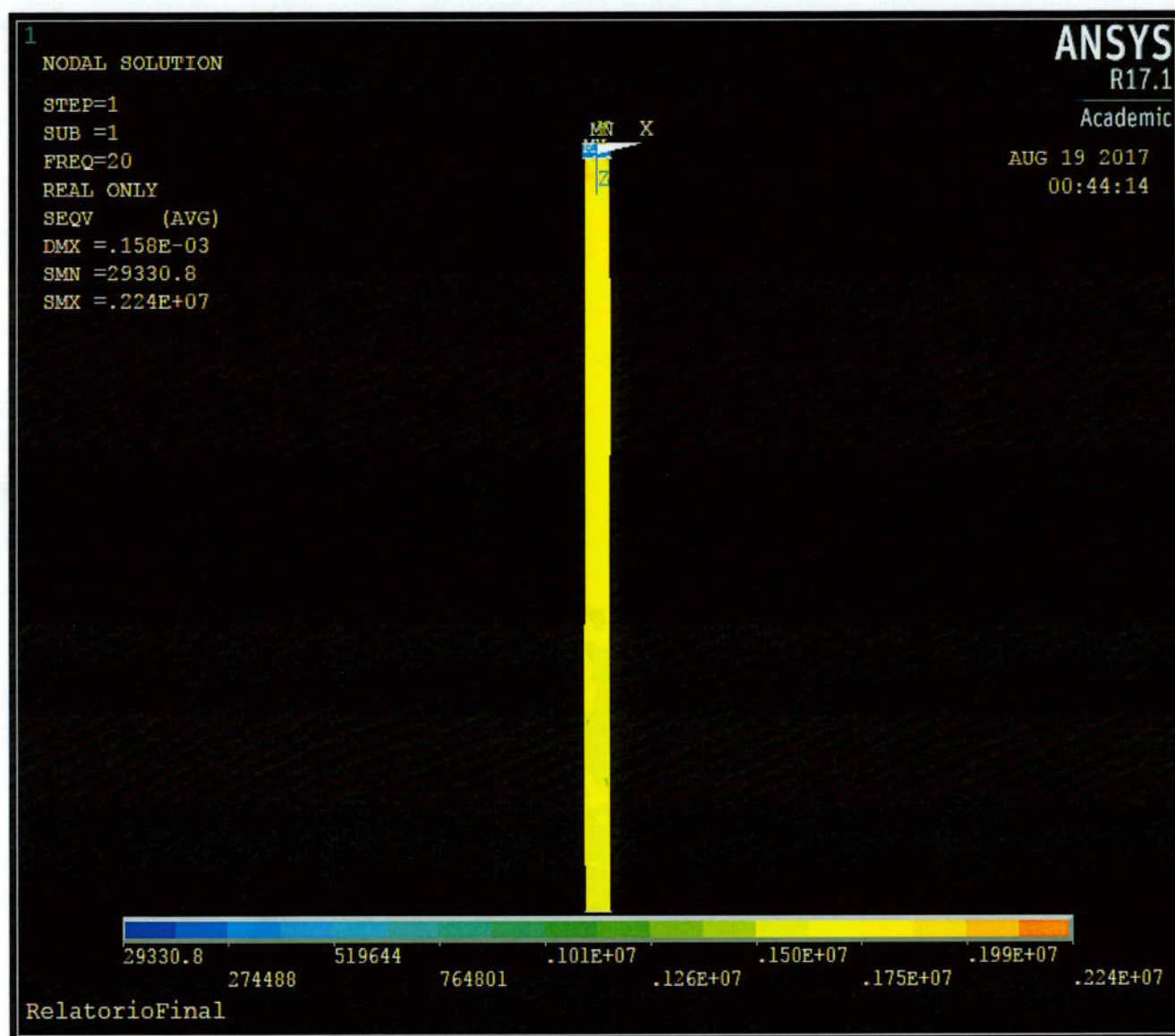


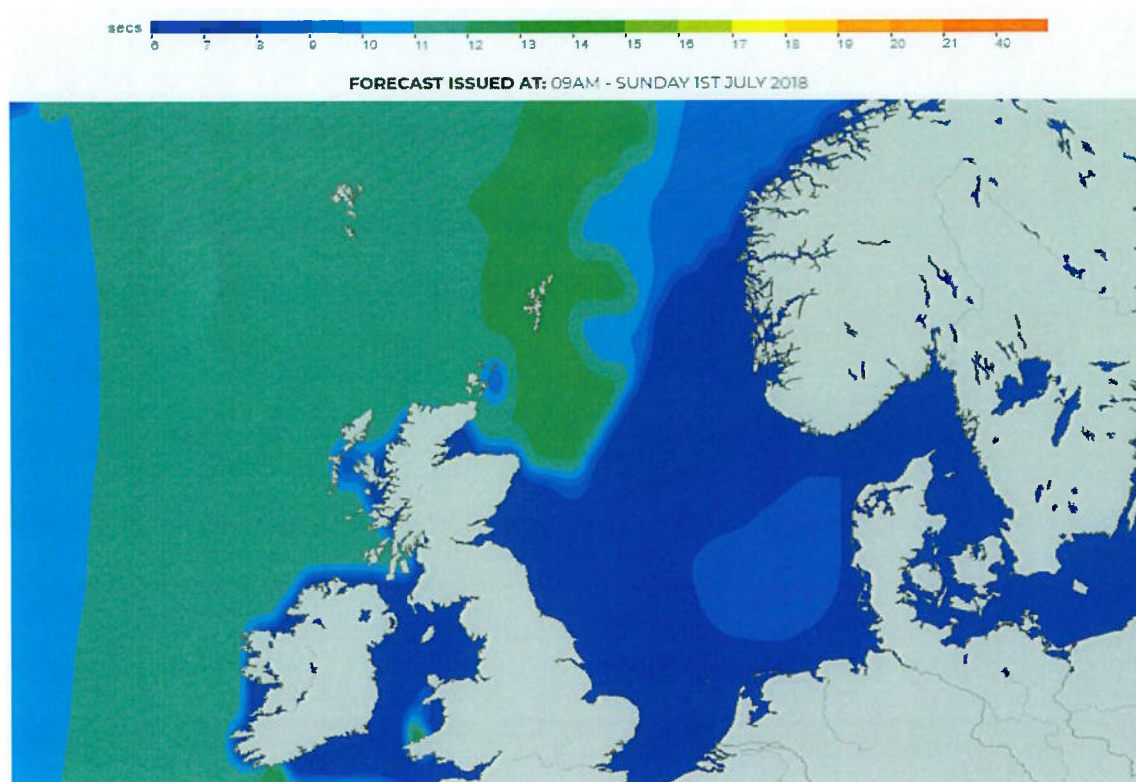
Gráfico 8: Tensão efetiva de von Mises a 0,5hz



Conclusão

Os resultados obtidos comprovam o objetivo inicial que era de mostrar que o movimento de *heave* da plataforma, interpretado como um carregamento harmônico no conjunto suporte e coluna de revestimento tem consequências diferentes para o conjunto quando comparado ao caso estático. Com as simulações comprovou-se, no limite das aproximações feitas, um aumento de até 6 vezes (dependendo do ponto em análise) no deslocamento e de quase 9 vezes para tensão efetiva de von Mises. Esse aumento nos parâmetros pode ser algo útil para a área industrial por introduzir outros parâmetros de dimensionamento dessas peças, já que, o aumento no deslocamento indica também uma maior deformação dessas peças que deve ser levada em conta no projeto dos tubos de revestimento e dos slips.

Figura 21: Mapa do período de Ondas do mar do norte, fonte: magicseaweed.com/Mar-do-Norte-Surf-Chart/7/?type=period



Esse aumento, porém depende muito da frequência do carregamento, como mostrado no gráfico deslocamento versus frequência (**gráfico 3**) e como o objetivo é aplicar esses conhecimentos ao caso real, no qual o carregamento tem uma frequência bem mais baixa que 60Hz vê-se que a mudança no deslocamento e na tensão pode não ser tão grande.

Usando como exemplo o **gráfico 4** (carregamento harmônico com frequência de 0,5 Hz) em conjunto com a **figura 21** (que apresenta valores reais de frequência de onda entre 0.16 Hz e aproximadamente 0.08Hz) pode-se dizer que os valores esperados de deslocamento e tensão efetiva seriam mais próximos dos valores simulados em 0.5 Hz e, nesse caso observa-se que não há tanta diferença em relação ao caso estático (varia algo em torno de 10% quando se compara 0,000145 com 0,000158), mostrando que, para esse cenário, o carregamento harmônico no conjunto não é tão relevante.

As simulações mostraram que mesmo com o aumento da tensão efetiva ela não chega a valores próximos do limite de escoamento, mostrando então que não há necessidade de se preocupar, no momento do dimensionamento dos tubos de revestimento e dos suportes, com falha devido ao carregamento harmônico.

Outra atribuição válida a esse trabalho é ao fato de ter sido o primeiro trabalho a utilizar o software ANSYS na Escola Politécnica em Santos, o que trará mais facilidade futuramente aos alunos que também quiserem desenvolver projetos de iniciação científica ou trabalhos de conclusão de curso com esse software já que não é mais um software totalmente desconhecido pelos alunos. Por esse motivo foram deixados os passos realizados para configuração do software ao longo do trabalho. Uma maior familiaridade dos alunos com o software pode favorecer a análise feita ao desconsiderar algumas hipóteses realizadas, como considerar que a plataforma se move apenas na vertical e o fato do atrito entre a água e a coluna de revestimento ter sido desprezado.

Referências

- [1] T. J. R. Hughes, 2000, **The finite element method – linear static and dynamic finite element analysis**. New Jersey: Dover Publications.
- [2] J. E. Thomas (Org.), 2001, **Fundamentos de Engenharia de Petróleo, 2ª edição**, Rio de Janeiro, Editora Interciência.
- [3] N. H. Kim, B. V. Sankar, 2009, **Introdução à Análise e ao Projeto em Elementos Finitos**, LTC Editora.
- [4] <http://www.petrobras.com.br> acessado em 07/05/2017.
- [5] Kuehn, A. L. T. O., **Técnicas de perfuração com gerenciamento de pressão aplicáveis aos reservatórios carbonáticos do pré-sal brasileiro**, Rio de Janeiro, 2014.
- [6] Amorim, T.O., **Plataformas offshore uma breve análise desde a construção ao descomissionamento**, Rio de Janeiro; UEZO, 2010.
- [7] GROVE, M.A., **Sistema de Posicionamento Híbrido para FPSOs**. Tese de Mestrado em Engenharia Oceânica. Rio de Janeiro: Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2005.
- [8] Woodall-Mason, N. and Tilbe, J.R. **Value of Heave Compensation to Floating Drilling JPT** (August .1976), 938-9464
- [9] Martinez, P. and Colacios, R. **Pré-Sal: Petróleo e políticas públicas no Brasil (2007-2016)**. Journal of Social, Technological and Environmental Science, v. 5, p 145-167, 2016.
- [10] Rosa, Edison da. **Análise de resistência mecânica :Mecânica da fratura e fadiga**. Santa Catarina, 2002.
- [11] WARHADPANDE, A. et al. **A new finite element fatigue modeling approach for life scatter tensile steel specimens**. International Journal of Fatigue, v. 32, p.685-697, 2010.
- [12] ANSYS® Licença acadêmica, Versão 17.1
- [13] SILVA, F. A.; CHAVES, C. A.; GUIDI, E. S. **Análise de falha por fadiga em eixo de transmissão utilizando o método dos elementos finitos**. Exacta – EP, São Paulo, v. 14, n. 2, p. 207-219, 2016.
- [14] https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/ans_thry/thy_el285.html dados sobre o elemento 285 utilizado no ANSYS

Apêndice – Simulações ANSYS

Seguem as etapas efetuadas para cada procedimento citado anteriormente:

7.1 Tipo de elemento.

Foram inseridos os seguintes comandos para definir o tipo de elemento finito que será utilizado para representar as estruturas mais complexas (suporte e coluna):

- Preprocessor → Element Type → Add/Edit/Delete → Add → Solid → Tetrahedral 4 node 285.

7.2 Definindo tipo de material.

Foram inseridos os seguintes comandos para definir o material que compõe cada equipamento da simulação (aço, ferro, etc.):

- **Material 1 (compõe a coluna de revestimento):** [Preprocessor → Material Props → Material Model → Structural → Linear → Elastic → Isotropic → 210MPa e 0,33 (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson) → Density → 8035 Kg/m³]

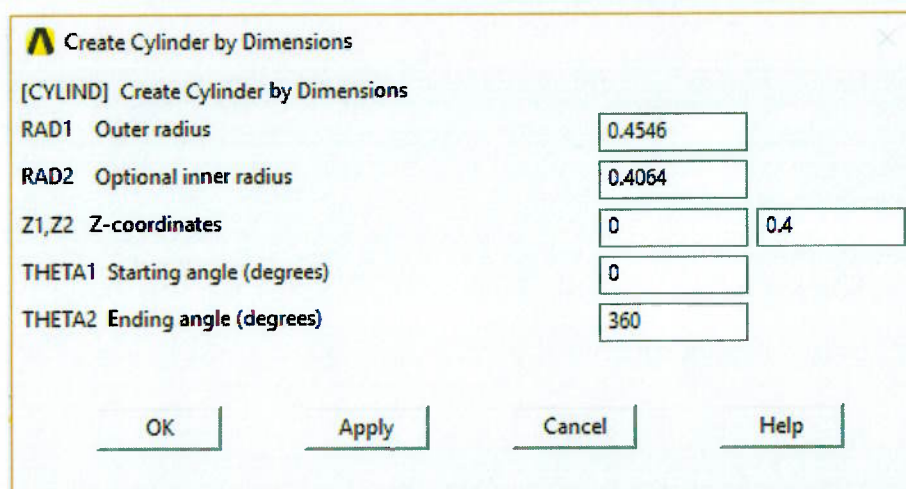
Faz-se agora o mesmo caminho, porém para o material 2, do suporte, inserindo as propriedades previamente discutidas para os slips.

7.3 Criando as peças.

Foram inseridos os seguintes comandos para gerar o suporte e a coluna de revestimento (ambos são cilindros retos e ocos):

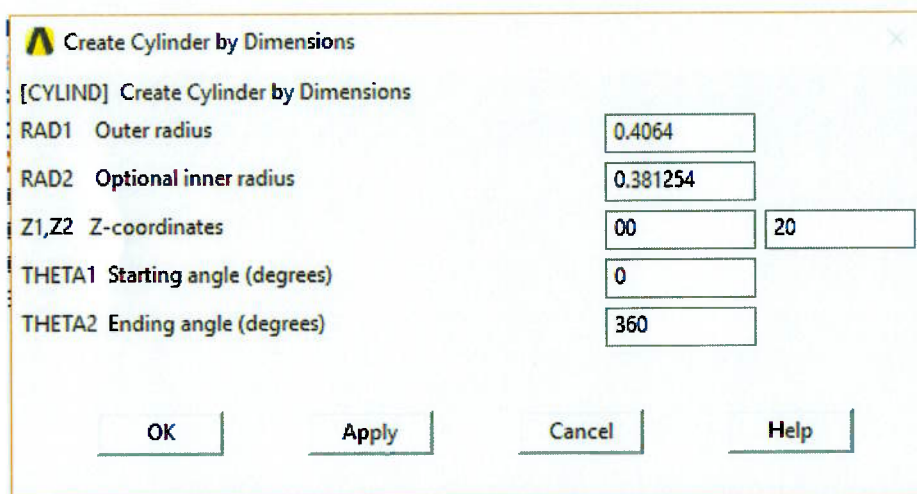
- Preprocessor → Modeling → Create → Volumes → Cylinder → By Dimensions.
- Para criar o suporte (**figura 21**) foram dadas as seguintes medidas, em metro (justificadas anteriormente):

Figura 22: Dados retirados do ANSYS na criação o suporte



- As medidas do cilindro que representa a coluna de revestimento (figura 22), em metros, foram inseridas as seguintes medidas:

Figura 23: Dados retirados do ANSYS na criação da coluna de revestimento



7.4 Relacionando o tipo de material com a peça.

- Preprocessor → Meshing → Mesh Attributes → Picked Volumes → Selecionar a coluna de revestimento → selecionar material 1 para ela → selectionar o suporte → selecionar material 2.

7.5 Criação da Malha.

- Preprocessor → Meshing → Mesh Tool → Set (ao lado de Global) → tamanho mínimo de 1 → ok → Smart Size → arrastar tudo para a direita (Coarse) → Mesh → deixar em volumes → Mesh → Pick All .

7.6 Juntando suporte e coluna de revestimento.

- Preprocessor → Coupling / Ceqn → Coincident Nodes → Toler = 0,001 → ok

7.7 Limitando movimento da região superior do suporte.

- Solution → Load → Define Loads → Apply → Structural → Displacement → On Area → selecionar a área superior do suporte (Área 1) → All DOF → 0 → ok.

7.8 Aplicando pressão à superfície do equipamento.

- Solution → Load → Define Loads → Apply → Structural → Pressure → On Areas → selecionar a área inferior da coluna de revestimento (Área 14) → ok → inserir valor 1576606,01 Pascal → ok.

7.9 Iniciando Simulação harmônica.

- Solution → Analysis type → New Analysis → Harmonic → OK.
- Solution → Analysis Type → Analysis Options → Full mode → Ok → Sparse Solver → Tolerance = 1e-008 → Ok.

7.10 Aplicando carregamento harmônico.

- Solution → Load → Define Loads → Apply → Structural → Pressure → On Areas → selecionar a região logo abaixo do contato suporte-coluna de revestimento (**Figura 20**) → ok → inserir valor 1576606,01 Pascal → ok.
- Solution → Load Steps Opts → Time/Frequency → Frequency and substeps. → Limitar a variação entre 0 e 500Hz com divisões a cada 50Hz.

Universidade de São Paulo

Engenharia de Petróleo – Escola Politécnica

Número: 8610266 USP

Data: 09/06/2018



Análise de tensões no suporte de descida dos tubos de revestimento utilizados em poços de petróleo

Diogo Anzolini Cano

Orientador: Professor Dr. Ronaldo Carrion

Resumo

Com o avanço da exploração de petróleo em águas cada vez mais profundas, novos desafios vão surgindo e maior o custo de um projeto de perfuração. O trabalho em questão analisará uma das etapas com custo mais representativo no projeto, o processo de revestimento do poço. Nesses ambientes, são utilizadas plataformas flutuantes que estão sujeitas ao movimento oscilatório vertical causado pelas ondas do mar (heave). Esse movimento modifica o tipo de carregamento incidente sobre os instrumentos da plataforma, podendo alterar então a resistência necessária dos instrumentos para evitar falhas ou até rupturas dos mesmos. O objetivo desse trabalho será comparar os diferentes carregamentos e mensurar influência do movimento de heave ao calcular a resistência necessária desses instrumentos, através do software ANSYS, que tem como base o método dos elementos finitos (MEF). Os resultados mostraram que realmente há diferença quando comparados cenários estático e dinâmico, mas que no ambiente marítimo brasileiro podem não ser diferenças tão significativas.

Abstract

With the advancement of oil exploration in deeper water, new challenges appear and the cost of a drilling project increases. This paper will analyze one of the most costly steps in the project, the well casing process. Floating platforms are used in deeper water environments and are subject to vertical oscillatory movement caused by sea waves (heave). This movement modifies the type of load incident on the instruments of the platform, and then can change the necessary resistance of the instruments to avoid failures or even ruptures. The objective is to compare the different loads and to measure the influence of the heave movement when calculating the required resistance of these instruments using the ANSYS software, which is based on the finite element method (FEM). The results showed that there is indeed a difference when compared to static and dynamic scenarios, but here in Brazilian maritime environment it may not cause significant differences.

1. Introdução

No atual contexto energético mundial, no qual se aumenta a demanda por energia e diminui a quantidade de novos poços de petróleo descobertos, cada vez mais é necessário o desenvolvimento de novas tecnologias para ultrapassar antigas

barreiras tecnológicas, um exemplo disso é a exploração de petróleo no pré-sal. Esse ambiente de águas profundas é novo para a indústria do petróleo podendo resultar em processos ainda não otimizados para sua exploração.

Uma das etapas de um projeto de um poço de petróleo é o de revestimento. O revestimento constitui uma das parcelas mais expressivas do custo da perfuração de um poço de petróleo, variando de 15% a 20% no mar. Esse processo é realizado em fases, cujo número depende das características das zonas a serem perfuradas e da profundidade final prevista. Cada fase é concluída com a descida de uma coluna de revestimento e sua posterior cimentação do espaço anular exterior [2].

A união dessas fases, ou seja, a junção dessas colunas é feita por uma peça chamada “casing coupling” e a sustentação de toda essa coluna é feita pela mesa rotativa ou pelo elevador do “top drive”, que além de estarem submetidas ao peso da própria coluna de revestimento sofrem também com a ação do heave da plataforma, que nada mais é do que a oscilação da mesma causada pela ação do mar [5].

2. Revisão bibliográfica

2.1. Plataformas offshore

A exploração de petróleo no Brasil se deu fundamentalmente em plataformas offshore, como na Bacia de Campos. Os diferentes tipos de plataformas offshore são escolhidos em relação às características dos ambientes no qual serão instaladas, podendo ser separadas em 2 grupos, fixas e flutuantes [6]. Serão destacadas aqui as plataformas flutuantes do tipo FPSO (figura 1), que são as mais utilizadas no Brasil. Os FPSOs são unidades estacionárias flutuantes que produzem e armazenam petróleo e efetuam o escoamento deste e surgiram por causa da necessidade de exploração em águas profundas e o término de vida útil de navios petroleiros.[6]

Unidades flutuantes sofrem movimentações devido à ação das ondas, correntezas e vento, com possibilidade de danificar os equipamentos a serem descidos no poço. Um dos efeitos dessas movimentações é chamado de *heave*, que consiste no movimento oscilatório vertical (subida e descida apenas) da plataforma, que por consequência arrasta os tubos presos a ela [8].

2.2. Etapas de um projeto de poço

Um poço de petróleo é perfurado em fases, cujo número depende das características das zonas a serem perfuradas e da profundidade final prevista. Cada uma das fases de perfuração é concluída com a descida de uma coluna de revestimento e sua cimentação [2]. As principais características da coluna de revestimento envolvem: apresentar estanqueidade, ter resistência compatível às solicitações, ser resistente à corrosão e à abrasão, etc.

Segundo Thomas [2], o dimensionamento das colunas de revestimento considera a resistência mínima que os tubos devem apresentar para suportar as solicitações de tração, pressão interna e colapso. Estas são estimadas levando-se em conta as condições mais adversas que possam ocorrer durante a instalação e a vida útil das colunas.

Figura 24: Exemplo FPSO, fonte: www.bluewater.com/fleet-operations/what-is-an-fps/



Aqui está um dos pontos no qual o artigo quer se mostrar importante, para um investimento que representa algo em torno de 20% de um projeto de poço offshore, desconsiderar os efeitos da fadiga dos tubos de revestimento quando sobre o efeito do movimento de heave pode ser algo que coloque a segurança do poço em perigo.

Nas sondas convencionais, a coluna de perfuração é girada pela mesa rotativa e nas sondas equipadas com top drive a rotação é transmitida diretamente ao topo da coluna de perfuração por um motor acoplado à catarina. No primeiro, a mesa rotativa é quem dá suporte à coluna de revestimento, no segundo pode ser a mesa rotativa ou o elevador acoplado ao top drive [2]. As simulações analisarão essas duas peças e verão o efeito do movimento de heave sobre elas e sobre os tubos de revestimento.

2.3. Método dos elementos finitos, ANSYS e fenômeno da fadiga

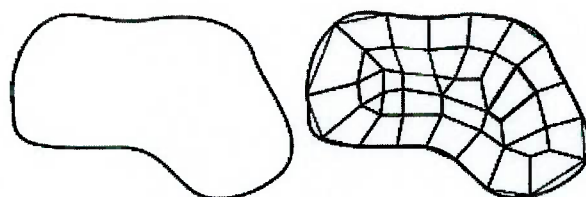
A literatura especializada tem mostrado que, dentre as distintas causas de falha de componentes mecânicos, a mais comum é devida à fadiga do material, sendo na maioria das vezes falhas que ocorrem de forma inesperada, repentinamente, e portanto bastante perigosas. A fadiga é uma redução gradual da capacidade de carga do componente, pela ruptura lenta do material, consequência do avanço quase infinitesimal das fissuras que se formam no seu interior que ocorrem quando há inúmeras variações do estado de tensão do material [10]. No caso proposto pelo artigo, o carregamento cíclico, que poderá ou não romper o material por fadiga, seria decorrente do movimento de heave da plataforma.

Em casos de estruturas complexas não é possível tolerar imprecisões na análise e então o uso de Métodos Numéricos torna-se uma exigência. Os principais Métodos Numéricos em uso são o de diferenças finitas, o de elementos finitos e o de elementos de contorno. Pela relativa facilidade de uso, o Método de Elementos Finitos tem uma aplicação cada vez mais abrangente e generalizada [10]. O Método de Elementos Finitos é um processo numérico que usa a solução de um "elemento" de forma geométrica relativamente simples, solução esta normalmente obtida com auxílio da Mecânica do Contínuo, para então obter o comportamento de

toda uma estrutura, com forma qualquer. A **figura 24** ilustra a divisão de uma estrutura mais complexa (esquerda) em inúmeros elementos simples (direita), no caso, inúmeros quadriláteros.

O ANSYS [12] é um software comercial de elementos finitos que vem sendo utilizado nas mais diversas classes de problemas de engenharia (WARHADPANDE et al., 2010) e será o software utilizado para fazer as simulações desse trabalho.

Figura 25: divisão de estrutura complexa em elementos menores, fonte: www.esss.com/metodo-dos-elementos-finitos.

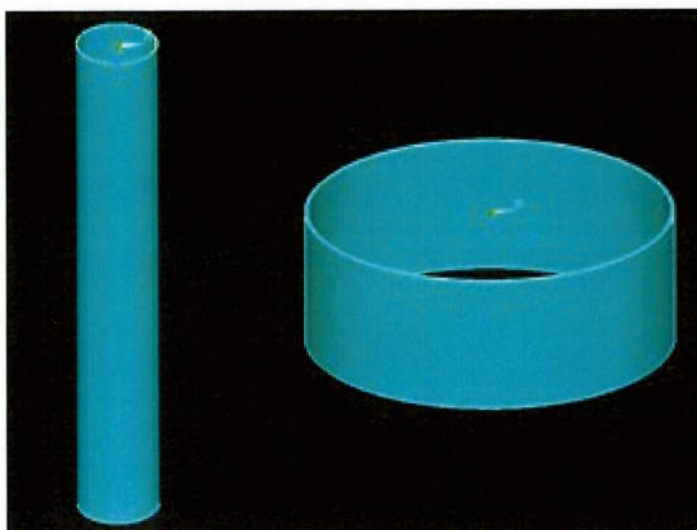


3. Simulações e Resultados

Como dito anteriormente foram simuladas duas peças atuando em conjunto, sendo a primeira a coluna de tubos de revestimento em um poço de petróleo e a segunda a representação de um suporte para essa coluna, com objetivo de ver a existência e a influência do movimento harmônico de heave da plataforma nesse conjunto de peças. Todas as simulações foram realizadas no software baseado no método dos elementos finitos ANSYS versão 17.1 e 19.0.

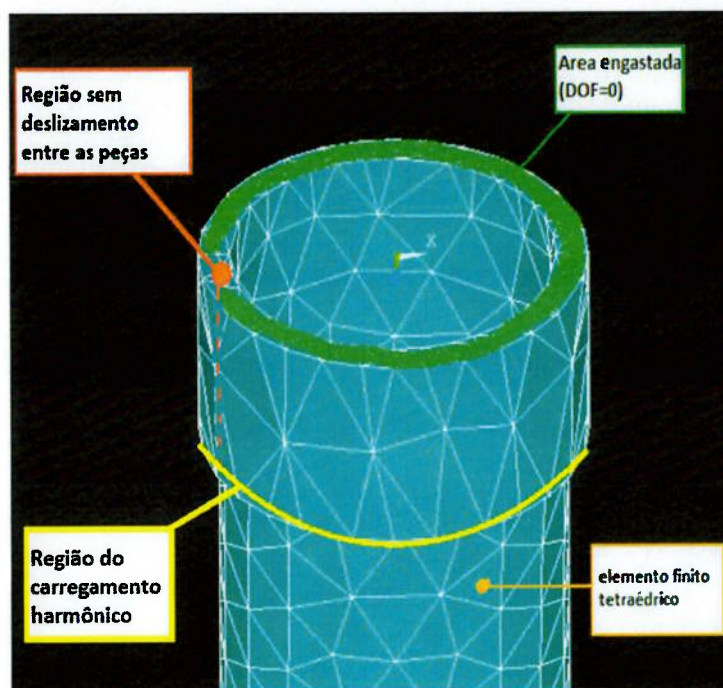
Devido a limitação do ANSYS para desenhar as peças e aos computadores utilizados não serem específicos para simulações pesadas, as peças (suporte e coluna de revestimento) foram simplificadas para cilindros ocos, como mostrados na **figura 25**.

Figura 26: exemplo de tubo de revestimento(esquerda) e suporte (direita) gerado no ANSYS, fonte: ANSYS versão 17.1



Foi utilizada então a hipótese de um sistema composto por um suporte (slip) engastado na plataforma pela face superior e acoplado à coluna de revestimento (com comprimento de 20 metros), e outro pedaço de coluna de 20 metros sob o anterior em um cenário no qual o atrito entre o mar e a coluna era desprezado e o movimento da plataforma era exclusivamente vertical. Foram feitas duas simulações, a primeira no cenário no qual não houvesse movimento da plataforma (caso estático) e o outro com movimento de *heave* (caso dinâmico). Tudo isso pode ser resumido com a **figura 26**.

Figura 27: resumo das hipóteses consideradas no conjunto simulado com a malha já feita, fonte: ANSYS 17.1



3.1. Simulação caso estático

Nesse caso supõe-se que a força atuante no sistema é a força peso e não há variação no estado de tensão dos materiais com o tempo.

As simulações desse cenário resultaram em deslocamento máximo, no fundo da coluna de revestimento, com valor de 0,000145 metro e tensão efetiva de von Mises máxima de 1.990.000 Pascal próximo do contato slip-coluna de perfuração.

3.2. Simulação caso dinâmico

No cenário dinâmico há variação do estado de tensão no suporte e na coluna devido ao movimento de *heave* modificando assim a simulação já que agora deve-se levar em consideração a força peso constante na coluna e esforços variáveis com o tempo no contato slip-coluna.

Vale destacar que os valores de deslocamento e tensão efetiva variam não só com a posição analisada no sistema mas também com a frequência do carregamento.

Na simulação feita vale destacar os resultados da **tabela 1**:

Frequência (Hz)	Deslocamento máximo (m)	Tensão efetiva máxima (Pa)
0,5 Hz	0,000877	2240000
60 Hz	0,000158	17600000

Tabela 1: resumo da simulação do caso dinâmico

4. Conclusão

O Objetivo inicial do trabalho foi atingido ao demonstrar que há diferença de resultados ao analisar o ambiente com e sem o movimento de *heave*, como por exemplo, um aumento de até 6 vezes do deslocamento na coluna de revestimento, mas demonstrou também que essa diferença depende muito da frequência das ondas do ambiente, que na prática pode acabar não sendo significativo no cenário brasileiro.

5. Referências

- [1] T. J. R. Hughes, 2000, The finite element method – linear static and dynamic finite element analysis. New Jersey: Dover Publications.
- [2] J. E. Thomas (Org.), 2001, Fundamentos de Engenharia de Petróleo, 2ª edição, Rio de Janeiro, Editora Interciência.
- [3] N. H. Kim, B. V. Sankar, 2009, Introdução à Análise e ao Projeto em Elementos Finitos, LTC Editora.
- [4] <http://www.petrobras.com.br> acessado em 07/05/2017.
- [5] Kuehn, A. L. T. O., Técnicas de perfuração com gerenciamento de pressão aplicáveis aos reservatórios carbonáticos do pré-sal brasileiro, Rio de Janeiro, 2014.
- [6] Amorim, T.O., Plataformas offshore uma breve análise desde a construção ao descomissionamento, Rio de Janeiro; UEZO, 2010.
- [7] GROVE, M.A., Sistema de Posicionamento Híbrido para FPSOs. Tese de Mestrado em Engenharia Oceânica. Rio de Janeiro: Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2005.
- [8] Woodall-Mason, N. and Tilbe, J.R. Value of Heave Compensation to Floating Drilling JPT (August .1976), 938-9464
- [9] Martinez, P. and Colacios, R. Pré-Sal: Petróleo e políticas públicas no Brasil (2007-2016). Journal of Social, Technological and Environmental Science, v. 5, p 145-167, 2016.

- [10] Rosa, Edison da. Análise de resistência mecânica :Mecânica da fratura e fadiga. Santa Catarina, 2002.
- [11] WARHADPANDE, A. et al. A new finite element fatigue modeling approach for life scatter tensile steel specimens. International Journal of Fatigue, v. 32, p.685-697, 2010.
- [12] ANSYS® Licença acadêmica, Versão 17.1
- [13] SILVA, F. A.; CHAVES, C. A.; GUIDI, E. S. Análise de falha por fadiga em eixo de transmissão utilizando o método dos elementos finitos. Exacta – EP, São Paulo, v. 14, n. 2, p. 207-219, 2016.
- [14] https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/ans_thry/thy_el285.html
dados sobre o elemento 285 utilizado no ANSYS