

**TIAGO CARMELLO CEOLATO**

**Estudo do comportamento estrutural de elos de amarras de  
ancoragem**

Santos  
2019

**TIAGO CARMELLO CEOLATO**

**Estudo do comportamento estrutural de elos de amarras de  
ancoragem**

Trabalho de Formatura em Engenharia  
de Petróleo do curso de graduação do  
departamento de Engenharia de Minas e  
de Petróleo da Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Carrion.

Santos  
2019

**TIAGO CARMELLO CEOLATO**

**Estudo do comportamento estrutural de elos de amarras de  
ancoragem**

Trabalho de Formatura em Engenharia  
de Petróleo do curso de graduação do  
departamento de Engenharia de Minas e  
de Petróleo da Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo

Área de Concentração: Mecânica e  
simulação

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Carrion

Santos

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

#### Catálogo na publicação

Ceolato, Tiago

Estudo do comportamento estrutural de elos de amarras de ancoragem /  
T. Ceolato -- São Paulo, 2019.  
42 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São  
Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1.Ancoragem 2.Método de Elementos Finitos 3.Fadiga I.Universidade de  
São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de  
Petróleo II.t.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais, Nilton e Débora, à minha irmã Caroline e à minha namorada Isabella pelo apoio e incentivo constante.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Dr. Ronaldo Carrion, pela orientação e estímulo transmitido durante do trabalho.

Aos amigos do curso de Engenharia de Petróleo, em especial aos ingressantes no ano de 2013 por tornarem este período de convivência inesquecível.

E a todos que colaboraram direta ou indiretamente, na execução desse trabalho.

Se você pensa que pode ou se pensa que não pode, de qualquer forma você está certo.

(Henry Ford)

## RESUMO

Com o avanço da exploração de petróleo se dirigindo para águas cada vez mais profundas, principalmente no caso do Brasil, os estudos sobre os processos de ancoragem se tornam bastante relevantes. O desenvolvimento das tecnologias de ancoragem possibilita entre outras coisas o avanço das plataformas de petróleo para áreas antes inexploradas e o aumento da estabilidade das plataformas já em funcionamento. Este trabalho visou aumentar o entendimento dos processos de ancoragem, analisando principalmente os efeitos causados nos materiais das âncoras pelos esforços estático e dinâmicos os quais são submetidas. O estudo utilizou o *software* ANSYS para a simulação com base em método de elementos finitos (MEF) para determinar as regiões sujeitas aos maiores esforços bem como mensurar os mesmos. Foi escolhida uma parte do sistema de ancoragem entre diversas existentes e analisado um ponto crítico dos esforços com o auxílio do *software*. Os resultados foram obtidos da simulação de um caso real, e indicou um elo projetado para ter vida infinita.

Palavras-Chave: Ancoragem. Âncoras. Fadiga, ANSYS. Método de Elementos Finitos.



## **ABSTRACT**

With the advancement of oil exploration going to deeper and deeper waters, especially in the case of Brazil, studies on the mooring processes become very relevant. The development of mooring technologies makes it possible, among other things, to advance oil rigs to previously unexplored areas and to increase the stability of platforms already in operation. This work aimed to increase the understanding of the anchoring processes by analyzing mainly the effects caused on the anchor materials by the static and dynamic efforts to which they are submitted. The study used the ANSYS software for finite element method (FEM) simulation to determine the regions subjected to the greatest efforts and to measure them. A part of mooring system was chosen from several existing ones and a critical point of the efforts was analyzed with the aid of the software. The results were obtained from the simulation of a real case, and indicated a link designed to have infinite life.

Keywords: Anchoring. Anchors. Fatigue. ANSYS. FiniteElementMethod.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	- Catálogo de âncoras da fabricante DAMEN adaptado.....	13
Figura 2	- Âncora Convencional.....	17
Figura 3	- Âncora de Carga Vertical.....	18
Figura 4	- Operação de Ancoragem de Âncora Convencional e de Carga Vertical.....	19
Figura 5	- Âncora de Sucção.....	20
Figura 6	- Âncoras Torpedo.....	21
Figura 7	- Âncora Torpedo Posicionada.....	21
Figura 8	- Linhas de ancoragem.....	22
Figura 9	- Amarras.....	23
Figura 10	- Cabo de aço.....	23
Figura 11	- Cabo de Poliéster.....	24
Figura 12	- Curva S-N.....	25
Figura 13	- Catálogo Intermoor.....	28
Figura 14	- StaticStructural.....	29
Figura 15	- Dados do aço estrutural.....	29
Figura 16	- Modelagem do elo da amarra.....	30
Figura 17	- Elo em 3D.....	30
Figura 18	- Malha de elementos finitos.....	31
Figura 19	- Árvore Mechanical.....	31
Figura 20	- Área engastada.....	32
Figura 21	- Novo engaste.....	33
Figura 22	- Força de tração.....	34
Figura 23	- Intensidade e período da tração.....	34
Figura 24	- Deformação total.....	35
Figura 25	- Deformação máxima.....	35
Figura 26	- <i>Maximum Principal Stress</i> .....	36
Figura 27	- <i>Stress</i> máximo.....	36
Figura 28	- Resultados teste de fadiga.....	36
Figura 29	- Resumo de Resultados.....	37
Figura 30	- Nova deformação total.....	37

Figura 31	- Nova deformação máxima.....	38
Figura 32	- Novo <i>Maximum Principal Stress</i> .....	38
Figura 33	- Novo <i>Stress</i> máximo.....	38
Figura 34	- Novo resultados teste de fadiga.....	39
Figura 35	- Novo resumo de resultados.....	39

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 OBJETIVOS.....	14
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	15
3.1 Elementos de Ancoragem.....	16
3.1.1 Âncoras.....	16
3.1.1.1 Âncora Convencional.....	16
3.1.1.2 Âncora de Carga Vertical.....	18
3.1.1.3 Âncora de Sucção.....	19
3.1.1.4 Âncora Torpedo.....	20
3.1.2 Linha de Ancoragem.....	22
3.1.2.1 Amarras.....	22
3.1.2.2 Cabo de aço.....	23
3.1.2.3 Cabo de Poliéster.....	23
3.2 Teoria de Fadigas.....	24
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
6 CONCLUSÃO.....	37
7 REFERÊNCIAS.....	38

## 1 INTRODUÇÃO

A expansão da exploração de petróleo e gás se deve principalmente à descoberta de grandes campos de petróleo *offshore*, e essa exploração só foi possível graças ao desenvolvimento de tecnologias que podem movimentar cada vez mais a indústria de petróleo rumo ao mar. Nesse contexto, a exploração em alto-mar. Torna-se cada vez mais desafiadora à medida que as lâminas d'água tornam-se mais espessas, entretanto fomenta o desenvolvimento de novas tecnologias e o aprimoramento das já existentes para que essas produções de petróleo possam se dar da forma mais eficiente e segura possível (Shimada, 2018).

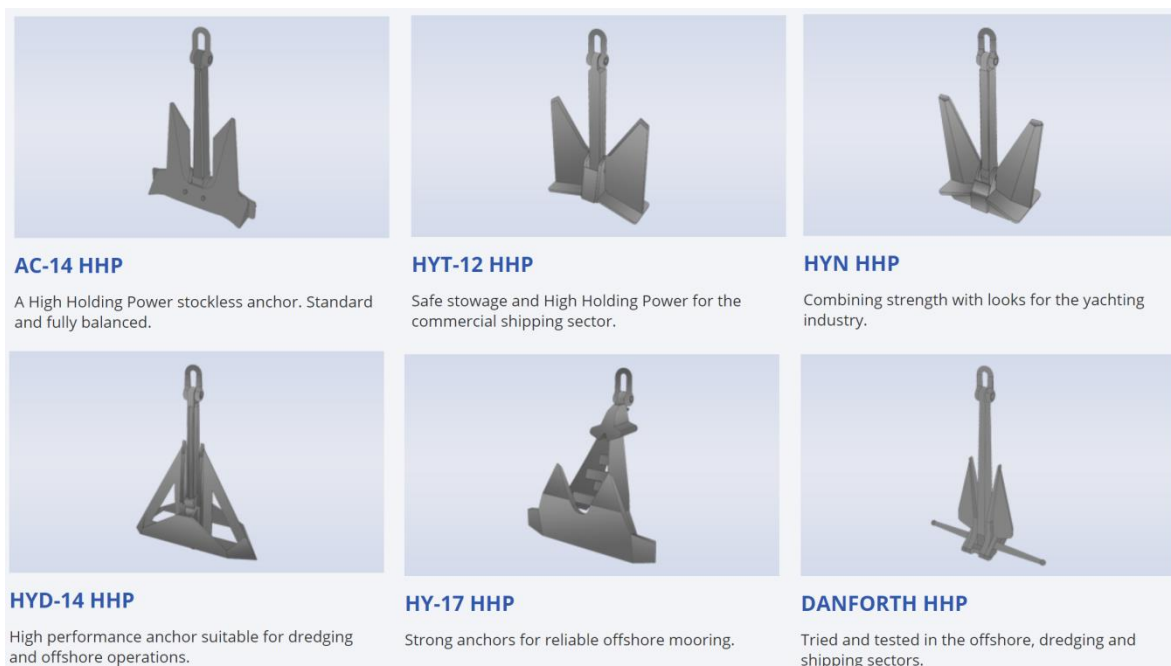
Um dos fatores mais importantes e que muitas vezes limitam a implantação de uma plataforma de petróleo em uma determinada área no oceano é a estabilidade da plataforma. Elas não podem se mover excessivamente de modo a garantir a segurança de todos que ali estão e não danificar os instrumentos utilizados nas operações, o que muitas vezes é um problema devido à severidade do ambiente marinho.

Este desafio gerou uma grande quantidade de estudos e desenvolvimento de diversas tecnologias de ancoragem. E como quase tudo na engenharia de petróleo, cada projeto pode diferir bastante dos outros devido ao elevado número de variáveis, como condições climáticas, correntes marinhas, espessura da lâmina d'água, tipo de plataforma, tamanho da plataforma, tempo de produção, estabilidade do solo marinho, resistência das âncoras aos esforços, entre outros, e justamente esta última será o foco desse estudo. Serão analisados os esforços gerados nas linhas de ancoragem pela plataforma e interação com o solo.

O estudo será feito com o auxílio de um *software* para simulação numérica dos esforços. É esperado que estas simulações aumentem o conhecimento sobre os métodos de ancoragem, favorecendo assim a escolha do material e das linhas de ancoragem utilizadas em um projeto.

Existe uma diversidade muito grande de modelos de âncoras de plataformas, como mostrado na Figura 1, com diferentes operações de instalação e para diferentes cenários.

**Figura 1** - Catálogo de âncoras da fabricante DAMEN adaptado.



**Fonte:** DAMEN

Devido à enorme variedade não seria possível abordar todos os modelos de âncoras, portanto o ponto a ser estudado será um elemento em comum à todas as âncoras, as amarras, que conectam as âncoras aos cabos de ancoragem. Como podemos ver na Figura 1, os conectores para as amarras são os mesmos na maioria dos casos.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é verificar a resistência das linhas de ancoragem aos esforços e à fadiga as quais estão submetidas. A fadiga ocorre devido ao movimento oscilatório de uma plataforma no oceano sob ação de ondas, correntes marítimas e ventos. Para isso foi utilizado o *software* ANSYS, para a criação de um modelo através do Método de Elementos Finitos (MEF) das linhas de ancoragem em seus pontos mais críticos a partir dos dados obtidos por Shanying et al. (2013). E seus materiais serão considerados os mais comumente utilizados na indústria de petróleo.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo procura-se apresentar uma revisão literária para o trabalho proposto e foram selecionados alguns trabalhos científicos que serviram de guia para a elaboração do mesmo. E, portanto, constrói-se um panorama do estado atual da literatura científica que serve de base para a formulação matemática do problema e sua resolução.

O primeiro artigo Olson et al. (2001) se mostrou bastante interessante por analisar a estrutura de uma das âncoras mais promissoras no momento de realização da pesquisa? a âncora de sucção, discutindo vantagens e desvantagens, assim como discute e analisa os efeitos do solo marinho para saber se resistirá aos esforços envolvidos na ancoragem. O artigo também realiza testes por modelos computacionais semelhantes aos pretendidos neste trabalho.

Yang (2013) foi selecionado por ser baseado em modelos matemáticos para simular as interações de um corpo com o solo. A abordagem se dá principalmente para análise dos efeitos de rotação no solo e com isso melhorar modelos já existentes. Embora os efeitos da rotação não sejam o foco do trabalho proposto, o artigo se mostra bastante interessante pelas simulações computacionais.

De Assis (2013) analisou sistemas de ancoragem de plataformas em águas profundas, desde a evolução das técnicas de ancoragem até as mais utilizadas no momento da publicação da monografia. Por se tratar de uma apresentação ampla das informações sobre ancoragem e passar um histórico das operações na indústria do petróleo, principalmente a nacional, o artigo apresenta grande relevância principalmente por fornecer os tipos mais comuns de âncoras, suas características, empregabilidade e suas operações necessárias para instalação. As âncoras mais usadas na indústria são âncoras VLA (Vertical Load Anchor), âncoras de sucção, âncoras torpedo, entre outras. Âncoras de sucção são mais utilizadas em ancoragem taut-leg por resistirem melhor aos esforços verticais, as âncoras convencionais e as VLA são bastante empregadas em ancoragem com sistema de catenária, suas instalações consistem na colocação da âncora no solo marinho e para serem tracionadas pela plataforma prendendo-as assim no solo. A VLA, no entanto, penetra muito mais no solo e resiste mais à esforços verticais, podendo assim ser posicionada mais próxima da plataforma.



Augusto et al. (2002) buscaram a otimização de recursos em operações de instalação de âncoras e equipamentos *offshore*. O estudo mostra que as operações de ancoragem até aquele dado momento eram feitas de forma bastante iterativa e dependiam muito da habilidade de quem controlava a operação em diminuir os gastos e os prazos baseados nas experiências passadas. Os autores buscaram otimizar esses processos tendo em vista a demanda de operações cada vez mais caras devido à movimentação da exploração do petróleo se dar em águas cada vez mais profundas, porque embora as operações não fossem tão caras anteriormente em relação aos valores envolvidos na indústria do petróleo, o aumento da lâmina d'água aumentaria significativamente os custos. A principal forma de economizar os recursos buscada foi a diminuição do comprimento dos cabos utilizados na operação (*workwire*), menor comprimento de linha a ser lançado pela embarcação a ser ancorada e menor força horizontal a ser exercida pela embarcação a ser ancorada. Com a equação proposta pelos pesquisadores, onde a solução é encontrada numericamente por um algoritmo de diferenças finitas, são estimadas significativas economias em cada operação de ancoragem.

### **3.1 Elementos de Ancoragem**

Os próximos estudos científicos apresentam um foco maior nas operações de ancoragem, nos estudos de fadigas e nos métodos de simulação no ANSYS com elementos finitos.

#### **3.1.1 Âncoras**

Pela definição de Mendes (2017), a âncora é o elemento responsável pela fixação da linha de ancoragem no fundo do mar. O autor divide as âncoras em quatro tipos, separadas com base no esforço a qual deve resistir, vertical ou horizontal, e no procedimento de ancoragem. Os tipos são:

- Âncora Convencional (DEA – *Drag Embedment Anchor*)
- Âncora de Carga Vertical (VLA – *Vertical Load Anchor*)
- Âncora de Sucção
- Âncora Torpedo

##### **3.1.1.1 Âncora Convencional**

Âncora Convencional (DEA – *Drag Embedment Anchor*) é o modelo tradicional de âncora. São instaladas ao serem arrastadas pelo solo marinho, não

possuem um ângulo de penetração no solo muito acentuado, seu posicionamento não é tão profundo no solo marinho, cerce de 5 a 15 m. São utilizadas para resistirem a esforços horizontais. Um exemplo de âncora convencional pode ser observado na Figura 2.

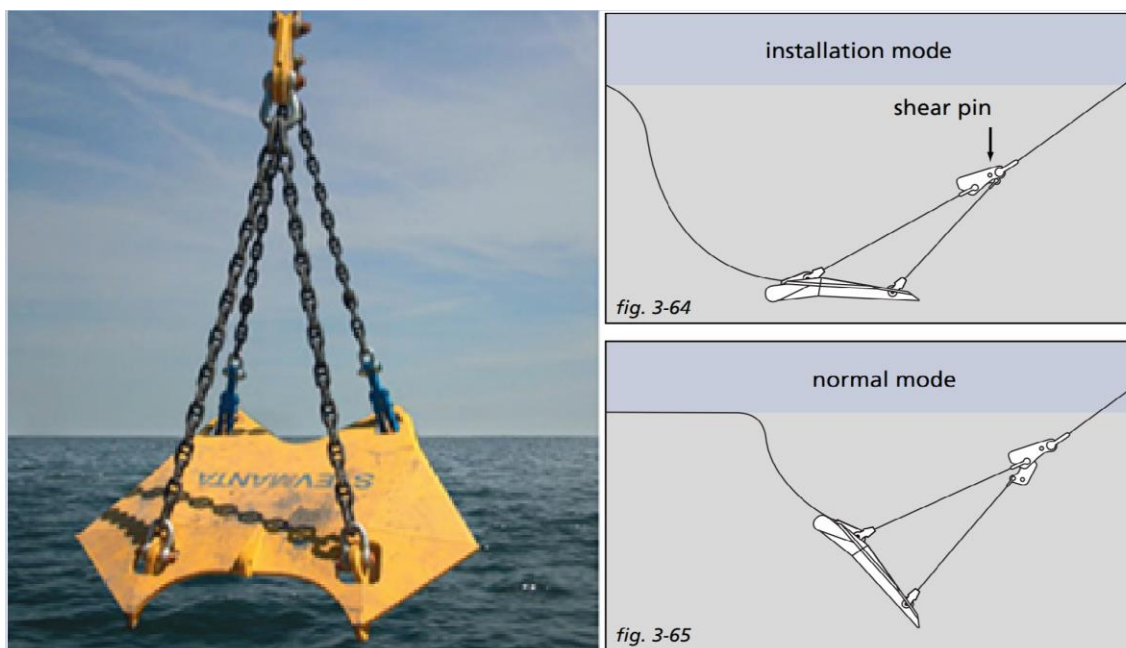
**Figura 2 - Âncora Convencional**



Fonte: VRYHOF

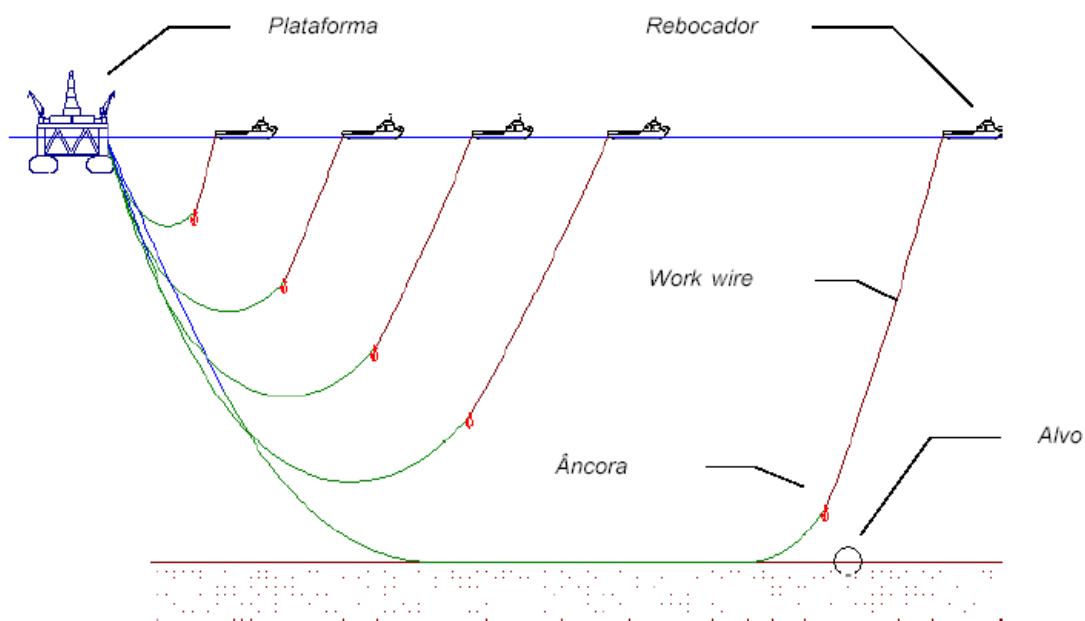
### **3.1.1.2 Âncora de Carga Vertical**

Âncora de Carga Vertical (VLA – *Vertical Load Anchor*) são âncoras com instalação semelhante às convencionais com diferença de estarem conectadas por cabos às amarras, seu ângulo de entrada no solo é maior, geralmente estas âncoras são instaladas mais profundamente no solo marinho. São utilizadas, como o próprio nome indica, para resistirem a esforços verticais. A Âncora de carga vertical pode ser observada na Figura 3, bem como seu posicionamento no solo marinho após instalada.

**Figura 3 - Âncora de Carga Vertical**

Fonte: VRYHOF

A operação de instalação dos dois tipos de âncoras citados até agora é bastante parecida, as âncoras são transportadas por uma embarcação de apoio até o local de instalação onde são descidas até o solo marinho, uma vez em posição no leito marinho a plataforma de petróleo inicia o tracionamento da linha de ancoragem, fazendo com que a âncora se enterre e se prenda ao solo. Como mostra a Figura 4.

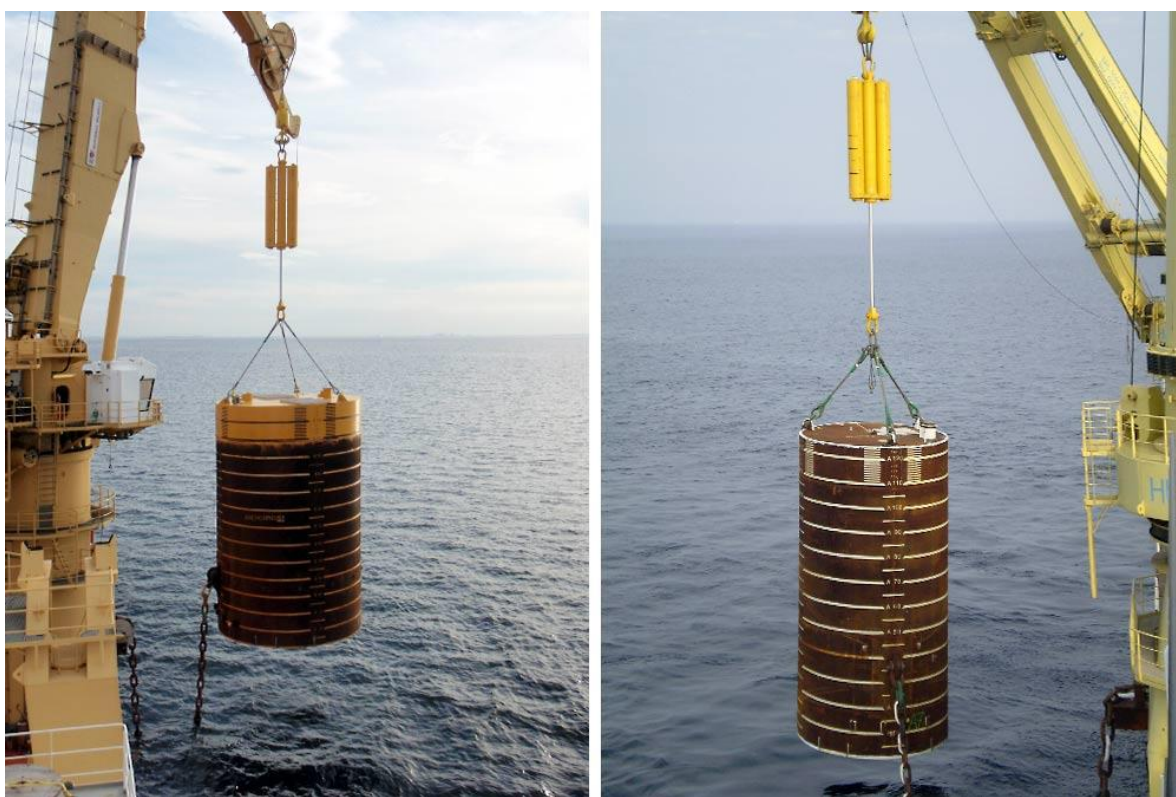
**Figura 4 - Operação de Ancoragem de Âncora Convencional e de Carga Vertical**

Fonte: Introdução à ancoragem (PNV2587)

### 3.1.1.3 Âncora de Sucção

Âncoras de Sucção ou Estacas de Sucção consistem em cilindros ocos de cerca de 15 m com uma extremidade aberta e outra fechada. São posicionadas no solo com a extremidade aberta para baixo em contato com o solo e tem a água do interior do cilindro bombeada para fora fazendo com que a força de secção a mantenha presa. São principalmente utilizadas em sistemas que as linhas são mantidas tensionadas. Na Figura 5 está uma âncora de sucção sendo posicionada para início do processo de instalação.

**Figura 5** - Âncora de Sucção



Fonte: Cranemaster

### 3.1.1.4 Âncora Torpedo

Âncoras Torpedo foram desenvolvidas pela Petrobras e são cilindros sólidos com pontas cônicas e aletas para maior estabilidade e fixação ao solo, lançados de uma altura determinada em relação ao solo marinho onde após o lançamento elas penetram no solo e se mantêm fixas. Resistem bem tanto a esforços verticais quanto a horizontais e apresentam baixa sensibilidade em relação a variação de lâmina d'água. Na Figura 6 as âncoras torpedo estão no convés da embarcação de apoio que fará o lançamento das mesmas, também é possível observar na parte



final da embarcação a estrutura que segura a amarra até o momento da soltura da âncora.

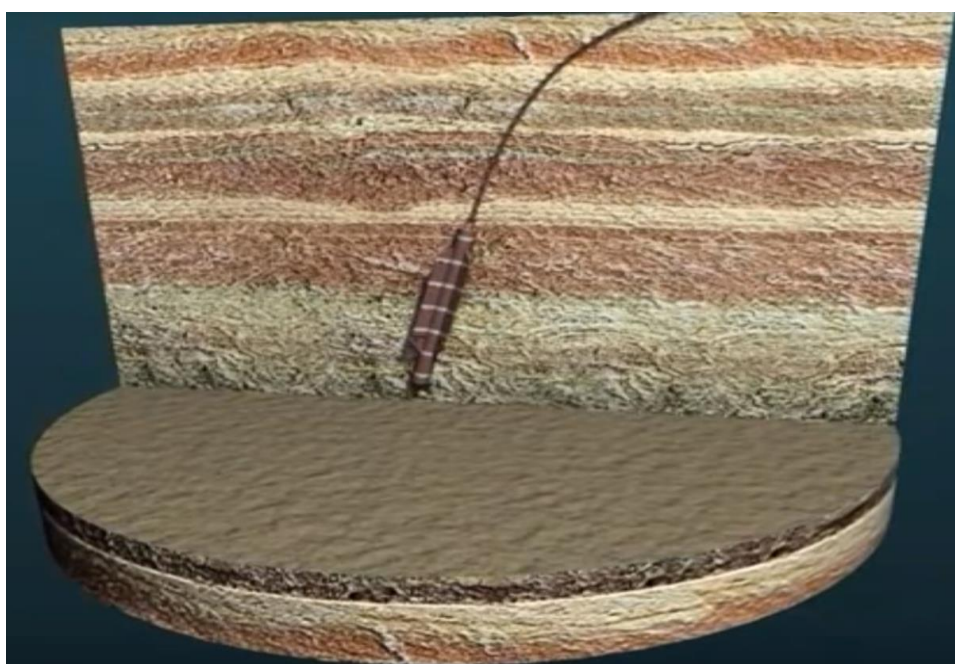
**Figura 6-** Âncoras Torpedo



**Fonte:** Projeto de Sistemas Oceânicos I (UFRJ)

A Figura 7 é uma representação em 3D do posicionamento da âncora torpedo no solo marinho. É interessante observar a grande penetração da âncora no solo que ocorre de maneira bastante rápida.

**Figura 7 -** Âncora Torpedo Posicionada

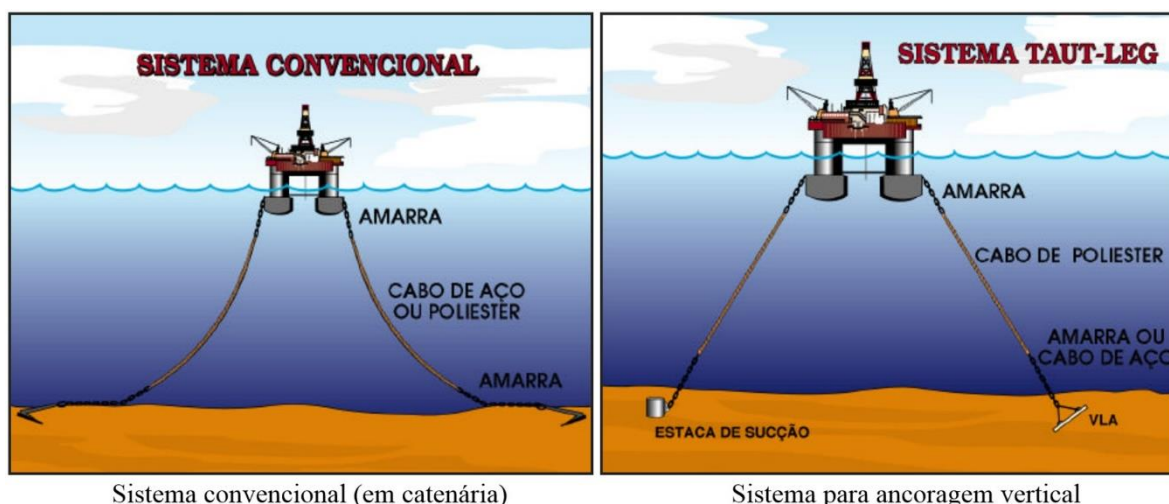


**Fonte:** Lançamento de Âncora Torpedo < <https://www.youtube.com/watch?v=sL-wmbN8h6o>>

### 3.1.2 Linha de Ancoragem

A ligação da plataforma com a âncora fixada no solo é feita pelas linhas de ancoragem, que são constituídas por três trechos diferentes, dois trechos de amarra e o trecho de cabo. Ilustrados na Figura 8.

**Figura 8** - Linhas de ancoragem



**Fonte:** Propriedades Mecânicas e Microestruturais de Juntas Soldadas pelo Processo a Arco Submerso com Elevado Aporte Térmico

#### 3.1.2.1 Amarras

As amarras, Figura 9, são correntes de aço carbono ou de baixa liga, que ligam a plataforma ao cabo e o cabo à âncora, por terem elevada vida útil e grande resistência à abrasão. Para os trechos intermediários são usados cabos de aço, Figura 10, ou de poliéster, Figura 11, devido peso muito menor que o da amarra e por serem consideravelmente mais baratos.

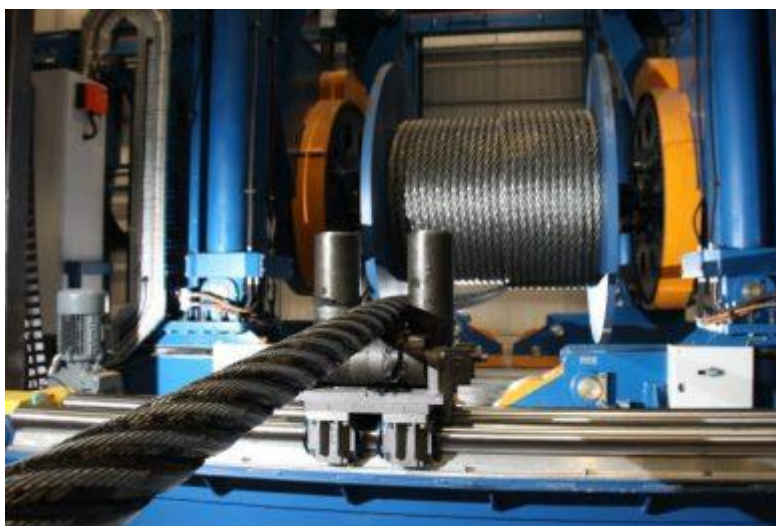
As amarras são o foco deste trabalho, apesar do direcionamento inicial ser dado para as âncoras, a análise das âncoras seria bastante complexa e um assunto extenso demais para a abordagem em um trabalho de conclusão de curso com custos computacionais mais elevados. Devido a este fato a simulação foi feita com base em um modelo de amarra obtido na indústria com dados reais obtidos de Shanying et al. (2013).

**Figura 9 - Amarras**



**Fonte:** <http://www.ferrazinspecoes.com.br/offshore.html>

**Figura 10 - Cabo de aço**



**Fonte:** <https://im-mining.com/2015/12/09/mining-rope-giants-bekaert-and-bridon-in-merger/>



**Figura 11** - Cabo de Poliéster



Fonte: <<http://www.energy-oil-gas.com/2009/05/15/bexco-2/>>

### 3.2 Teoria de Fadiga

Para Norton (2004), a maioria das falhas em máquinas acontecem devido a cargas que variam com o tempo. Estas falhas ocorrem, normalmente, com tensões significativamente menores aos valores de resistência ao escoamento dos materiais.

A definição de fadiga segundo a norma ASTM (*American Society for Testing and Materials*) é a seguinte:

“Processo progressivo e localizado de modificações estruturais permanentes ocorridas em um material submetido a condições que produzam tensões e deformações cíclicas que pode culminar em trincas ou fratura após um certo número de ciclos.”

Portanto a fadiga ocorre após um carregamento aplicado de forma cíclica expandir uma microfratura no material, de forma gradual, até o ponto de uma ruptura total do mesmo de forma abrupta.

Quando o problema envolve tensões normais e de cisalhamento combinadas é utilizado no *software* a tensão equivalente de Von Mises ( $\sigma'$ ), dada pela Equação 1 abaixo.

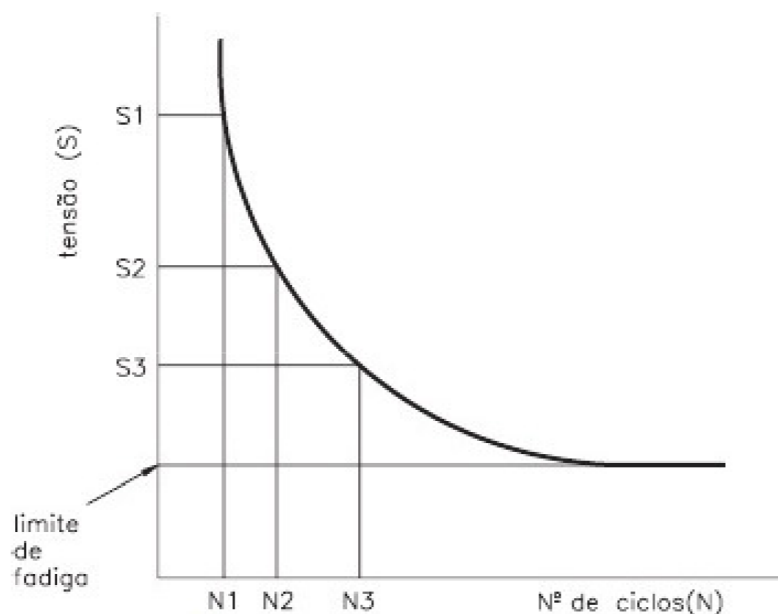
$$\sigma' = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}{2}} \quad (1)$$



Em que  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  são, respectivamente, as tensões principais nos eixos cartesianos e  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$  e  $\tau_{zx}$  são as tensões de cisalhamento (Shimada, 2018).

Para a realização de projetos levando em consideração possíveis falhas por fadiga normalmente são utilizados os métodos SxN, com o gráfico gerado pela curva S de tensão (*Stress* do inglês) pelo número de ciclos N.

**Figura 12** - Curva S-N



**Fonte:** <http://www.engbrasil.eng.br/pp/em/aula11.pdf>

A curva S-N é obtida através de consecutivos ensaios de ruptura para um mesmo material e os resultados resultam na curva da figura 12.

Quando o número de ciclos de um material é superior a  $10^6$  para uma determinada tensão é dito que este material apresenta vida infinita para tensões menores ou iguais a esta, De Azevedo Silva et. al. (2016).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

O *software* utilizado foi o ANSYS, que é um *software* comercial de simulação. A ferramenta foi escolhida por ser bastante conhecida, e de fácil manuseio. A versão utilizada foi ANSYS 19.3.

O ANSYS é um programa de simulação para engenharia que engloba diversas metodologias de simulação para diferentes situações, no caso desse estudo ele foi selecionado por gerar uma malha de elementos finitos para análise de estruturas.

Outro motivo da escolha é por ser um *software* bastante difundido e com licença estudantil gratuita. O que levou outros alunos com estudos semelhantes a este, Cano (2018), optarem pelo mesmo.

Para a simulação foi escolhido um ponto crítico e comum a praticamente todas as linhas de ancoragem que é a amarra próxima à âncora. Foi escolhido um elo de amarra submetidos a esforços documentados na literatura de Shanying et al. (2013). Os autores estudaram um cenário onde um FPSO está localizado no mar ao sul da China, sobre uma lâmina d'água de 910 metros e compararam o sistema de ancoragem em catenária com o *taut-leg*, ambos ligados à embarcação por um sistema de *turret*. Esta simulação terá como base os dados da ancoragem em catenária, Tabela 1, com configuração da linha de ancoragem de amarra-cabo-amarra, onde a âncora está ligada à plataforma por dois trechos de correntes com um cabo de aço ligando as duas e sendo a maior parte da linha.

**Tabela 1** - Dados linhas de ancoragem em catenária

Mooring Type	Catenary ( chain-wire-chain )			
Mooring Line	Max ( KN )	Mean ( KN )	Min ( KN )	RMS (KN )
Line1	3064	1641	1107	176.9
Line2	2961	1624	1099	170.6
Line3	2847	1604	1091	163.7
Line4	1485	1124	1123	98.7
Line5	1488	1096	615.0	99.5
Line6	1468	1069	575.1	99.9
Line7	1396	952.7	407.6	111.65
Line8	1414	964.4	425.5	113.5
Line9	1445	980.0	438.8	113.2
Line10	2052	1441	971.0	136.0
Line11	2172	1472	996.1	140.7
Line12	2306	1501	1008	145.8

**Fonte:** Shanying et al. (2013).

Foram utilizados os dados da linha 10 para a simulação computacional, assim, a força máxima de tração que a amarra suportou foi de 2.052.000 Newtons como é possível observar na tabela.

Para a escolha do tamanho do elo da amarra, foram seguidos os dados da tabela de corrente conectada à âncora na Tabela 2. O que resultou em um diâmetro de 89 milímetros.

**Tabela 2** - Dados das linhas de ancoragem

<b>Composition</b>	<b>Catenary ( chain-wire-chain )</b>	<b>Taut ( chain-polyester-chain )</b>
Depth (m)	910	
Pretension (KN)	1201	1201
Total length (m)	2087.9	1187.9
Chain connecting turret	Chain	Chain
Length (m)	46	91
Diameter (mm)	89	89
MBL (KN)	6514.5	6514.5
EA (KN)	794000	794000
Center section	Wire	Polyester
Length (m)	1128	974.9
Diameter (mm)	89	140
MBL (KN)	6421	6418
EA (KN)	690000	128360
Chain connecting anchor	Chain	Chain
Length( m)	914	122
Diameter(mm)	89	89
MBL (KN)	6514.5	6514.5
EA (KN)	794000	794000

**Fonte:** Shanying et al. (2013).

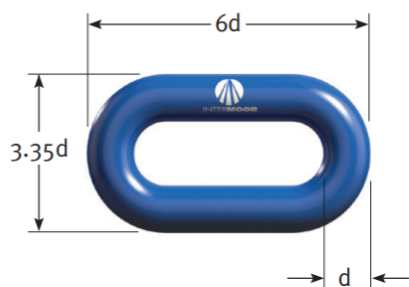
Com o diâmetro do elo, obteve-se os dados de uma amarra com essas características em na tabela de uma fabricante de amarras, Figura 13. É valido ressaltar aqui que algumas amarras possuem uma barra de reforço no meio dos elos, esta barra é conhecida como malhete, eles também servem para impedir a

ascensão dos elos evitando que se atritem ou se entrelacem Bico (2013). Como não foi feita nenhuma menção aos malhetes no estudo, foi escolhido um elo sem malhete no catálogo da fabricante.

Figura 13 - Catálogo Intermoor

## Section 2

## Common Studless Link



Common Studless Link - 74 to 102mm

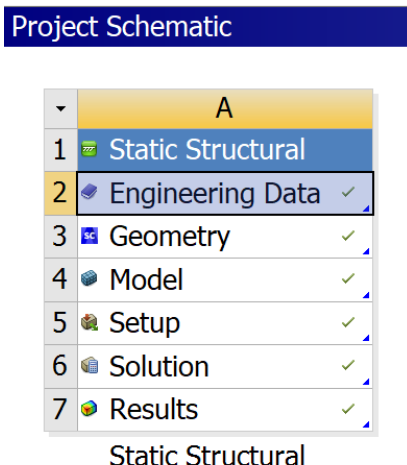
Chain (mm)	Length	Width	kg/m	Weight/ Link
74	444	248	110	36
75	450	251	113	37
76	456	255	116	39
77	462	258	119	40
78	468	261	122	42
79	474	265	125	43
80	480	268	128	45
81	486	271	131	47
82	492	275	135	49
83	498	278	138	50
84	504	281	141	52
85	510	285	145	54
86	516	288	148	56
87	522	291	152	58
88	528	295	155	60
89	534	298	159	62
90	540	302	162	64
91	546	305	166	66
92	552	308	169	69
93	558	312	173	71
94	564	315	177	73
95	570	318	181	76
96	576	322	184	78
97	582	325	188	80
98	588	328	192	83
99	594	332	196	85
100	600	335	200	88
101	606	338	204	91
102	612	342	208	93

January 2015

Fonte: Intermoor <[https://intermoor.com/wp-content/uploads/2018/12/Common\\_Studless\\_Link.pdf](https://intermoor.com/wp-content/uploads/2018/12/Common_Studless_Link.pdf)>

Com as dimensões do elo, pôde-se recriar um modelo computacional no *software* ANSYS. Inicialmente, foi selecionado o método de simulação de *StaticStructural* na página inicial do *software* Figura 14.

Figura 14 – *Static Structural*



Fonte: ANSYS 2019 R2

O material escolhido para o modelo foi aço estrutural, um dos materiais já pertencentes à base de dados *software*, com os parâmetros já estabelecidos como padrão do ANSYS. Todos os dados dos materiais estão presentes na Figura 15.

Figura 15 - Dados do aço estrutural

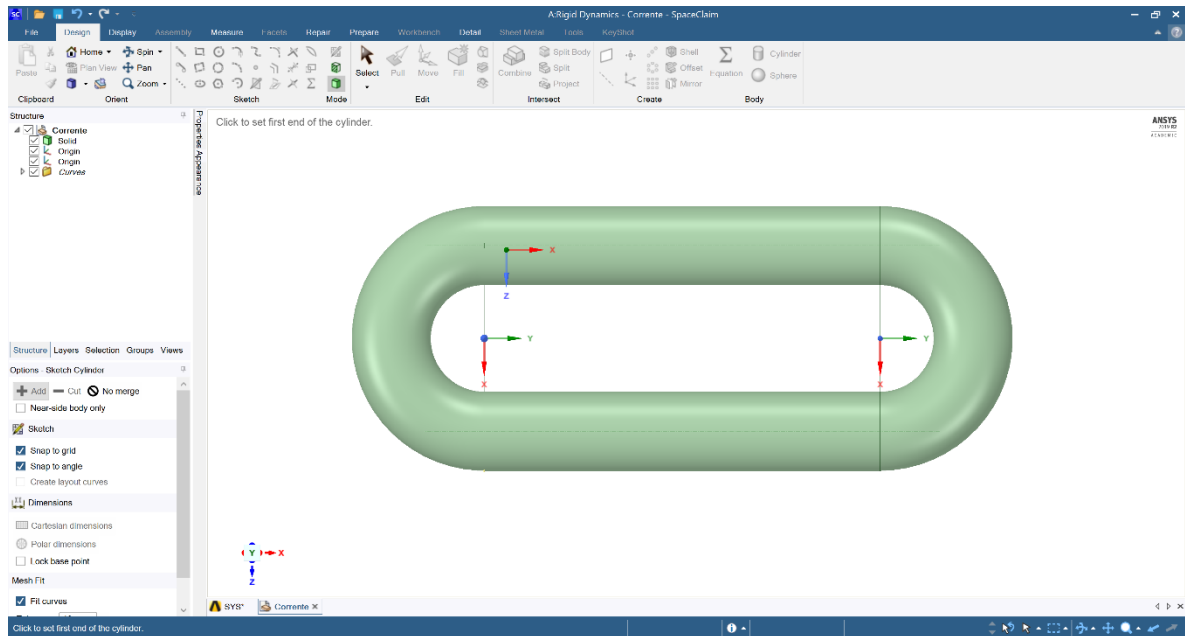
Outline of Schematic A2: Engineering Data			
	A	B	C
1	Contents of Engineering Data	Source	Description
2	Material		
3	Structural Steel	Gen	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material		
Properties of Outline Row 3: Structural Steel			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
6	Isotropic Elasticity		
12	Strain-Life Parameters		
20	S-N Curve	Tabular	
24	Tensile Yield Strength	2.5E+08	Pa
25	Compressive Yield Strength	2.5E+08	Pa
26	Tensile Ultimate Strength	4.6E+08	Pa
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa

Fonte: ANSYS 2019 R2

Seguindo a ordem de preenchimento do menu de *StaticStructural*, tem-se a geometria como próximo passo. Aqui, foi criado o modelo em 3D, Figura 16, do elo

de amarra a ser estudado com as dimensões citadas anteriormente. Esta etapa abre o *SpaceClaim*, programa incorporado ao ANSYS, para a modelagem de objetos. Poderia-se também importar um modelo criado em outro *software* CAD, porém foi utilizado o *SpaceClaim* mesmo.

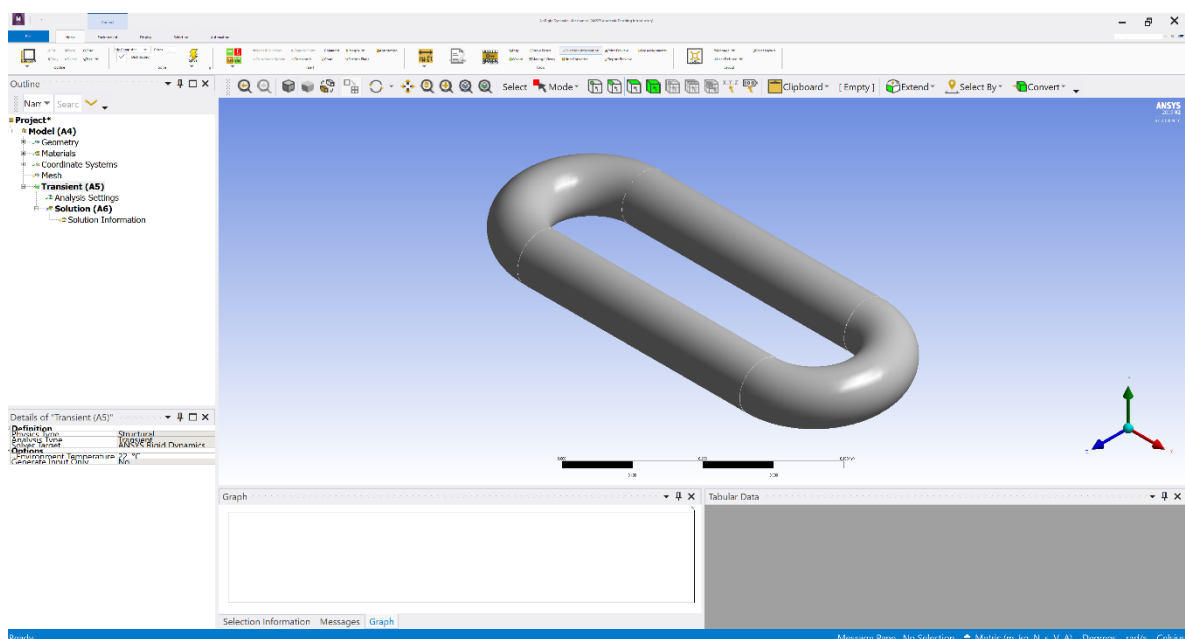
**Figura 16** - Modelagem do elo da amarra



**Fonte:** Desenvolvido pelo autor

Com o modelo criado, abriu-se o *Mechanical* outro programa integrado que é acionado ao passar para os testes no item *Model* do menu, Figura 17.

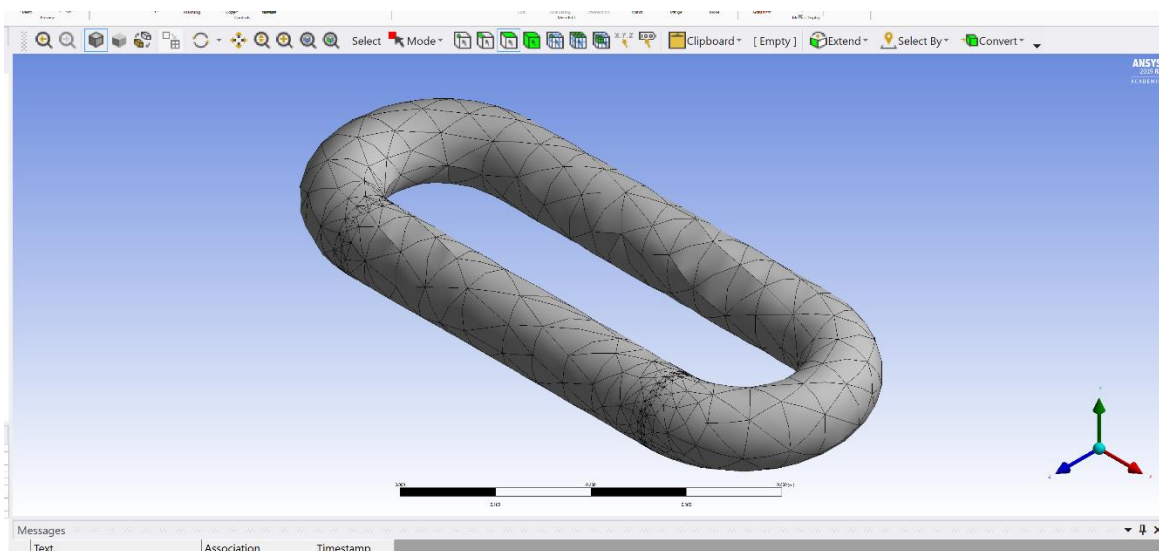
**Figura 17** - Elo em 3D



**Fonte:** Desenvolvido pelo autor

A árvore do projeto, Figura 19, no *Mechanical* é visualizada à esquerda da tela. O primeiro passo agora é criar a malha de elementos finitos, clicando em *GenerateMesh*. A malha de elementos finitos definida pelo *software* está representada na figura 18.

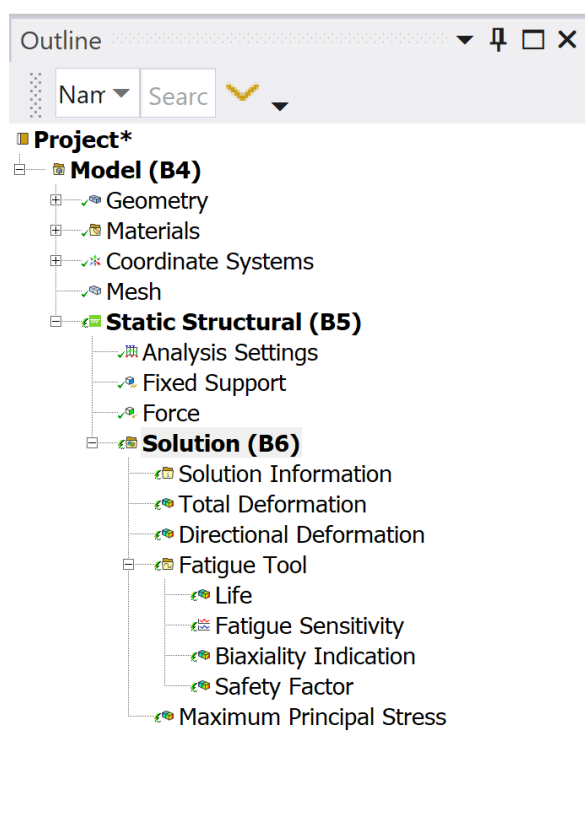
**Figura 18** - Malha de elementos finitos



**Fonte:** Desenvolvido pelo autor



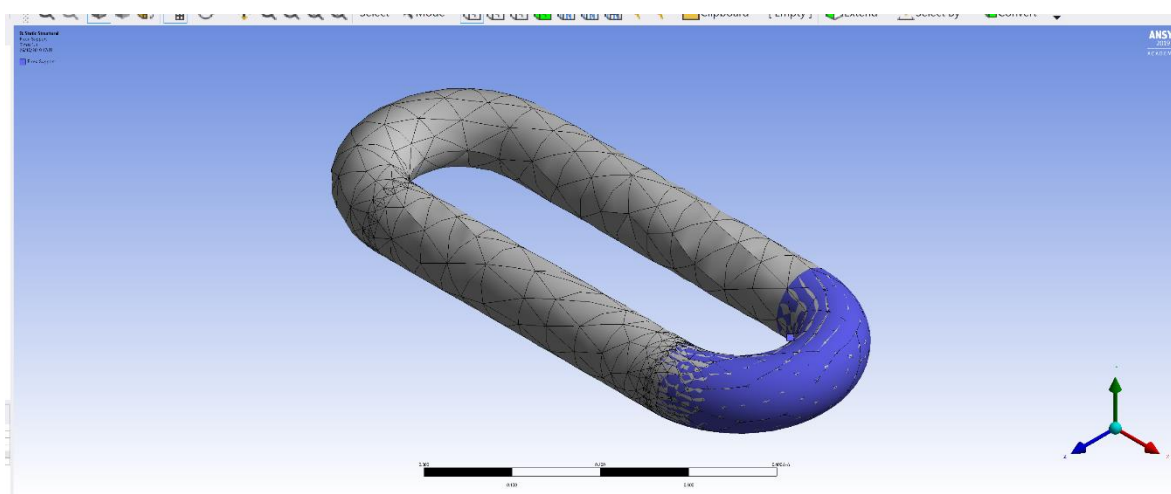
**Figura 19 - Árvore *Mechanical***



**Fonte:** Desenvolvido pelo autor

Para simular os esforços submetidos nas amarras, manteve-se estática a base do elo. Como mostrado na Figura 20, onde a área azul escura foi engastada.

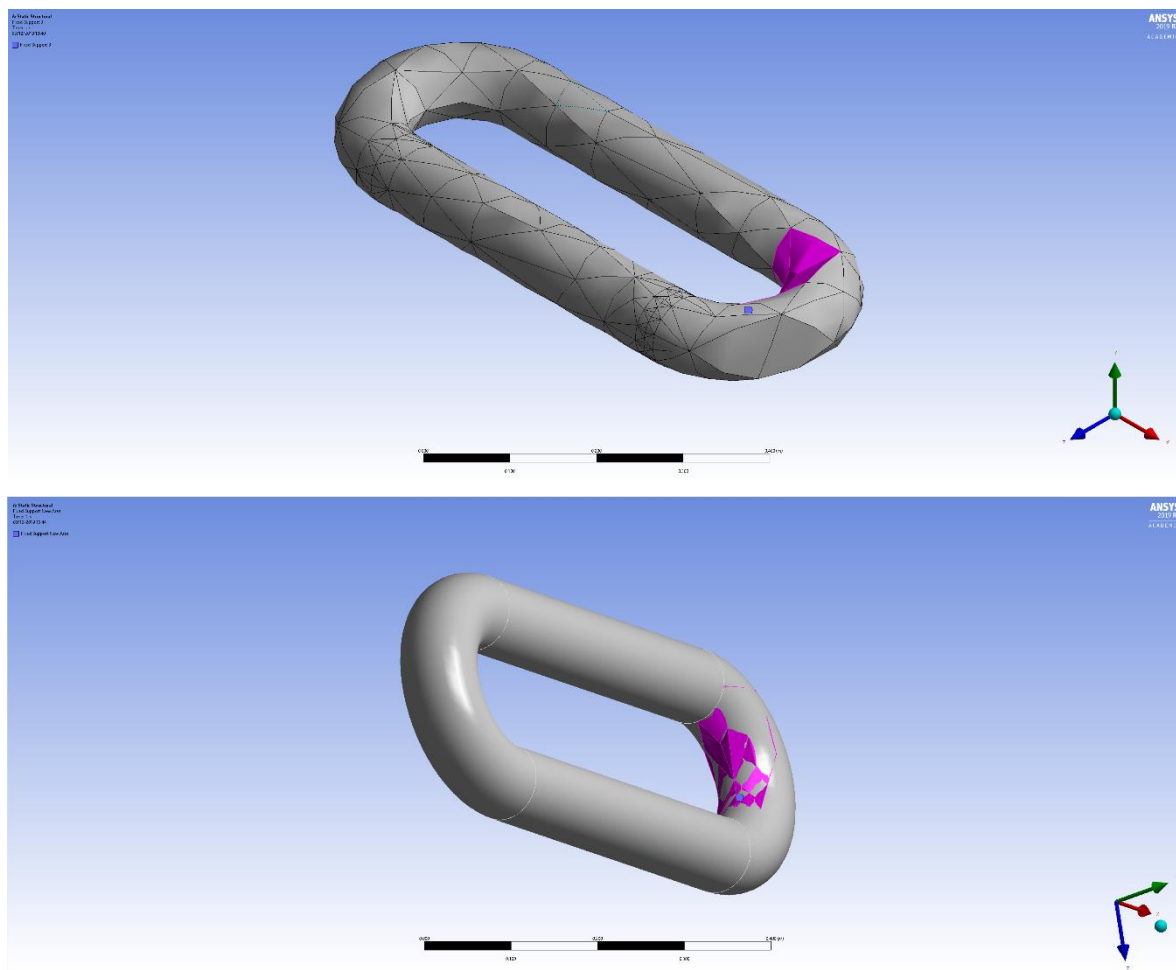
**Figura 20 - Área engastada**



**Fonte:** Desenvolvido pelo autor

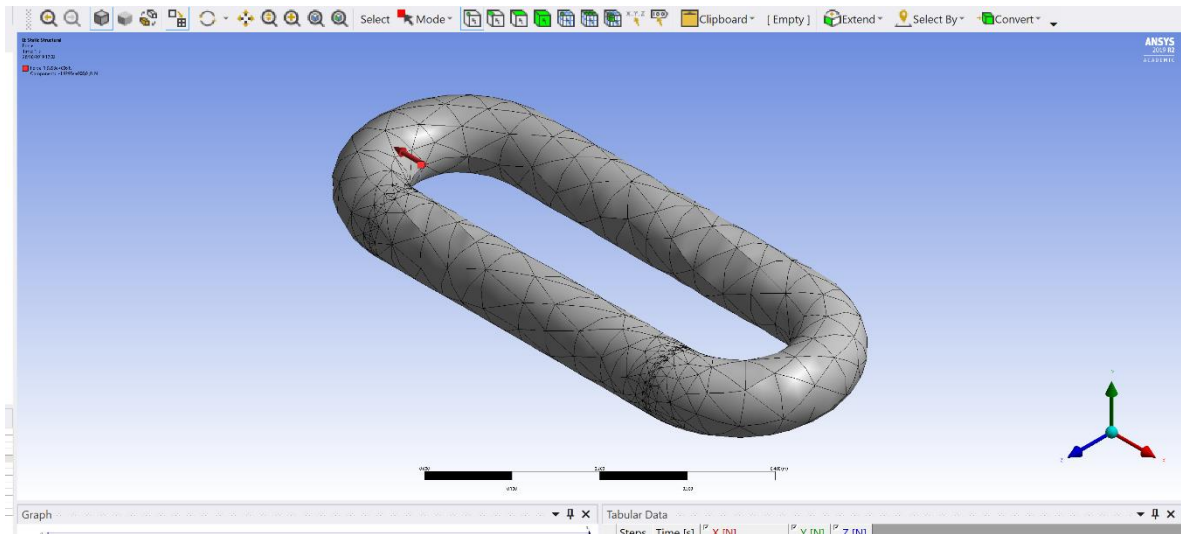
Posteriormente, foi-se necessário comparar os resultados deste engaste com um engaste menor centralizado na parte interna inferior do trecho curvo apresentado na Figura 21 abaixo. Usou-se este novo engaste para comparação com o anterior, onde todas as outras configurações do programa foram mantidas. Esta necessidade surgiu de melhorar a simetria dos resultados ao longo da peça.

**Figura 21 - Novo Engaste**



**Fonte:** Desenvolvido pelo autor

A força oscilatória obtida das tabelas de Shanying et al. (2013) foi inserida no ponto central interno da curva superior do elo. Como mostrado na Figura 21 com direção paralela da amarra e sentido de tracionar o elo.

**Figura 22 - Força de tração**

**Fonte:** Desenvolvido pelo autor

Os valores da força oscilatória com período definido de 10 segundos a cada ciclo foram inseridos conforme a Figura 22. Os dados são da linha 10 citada anteriormente na Figura 13, com valor máximo, mínimo e médio.

**Figura 23 - Intensidade e período da tração**

Tabular Data					
	Steps	Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> X [N]	<input checked="" type="checkbox"/> Y [N]	<input checked="" type="checkbox"/> Z [N]
1	1	0.	-2.052e+006	0.	0.
2	1	1.	= -1.9298e+006	= 0.	= 0.
3	N/A	5.	-1.441e+006	0.	0.
4	N/A	10.	-9.71e+005	0.	0.
*					

**Fonte:** Desenvolvido pelo autor

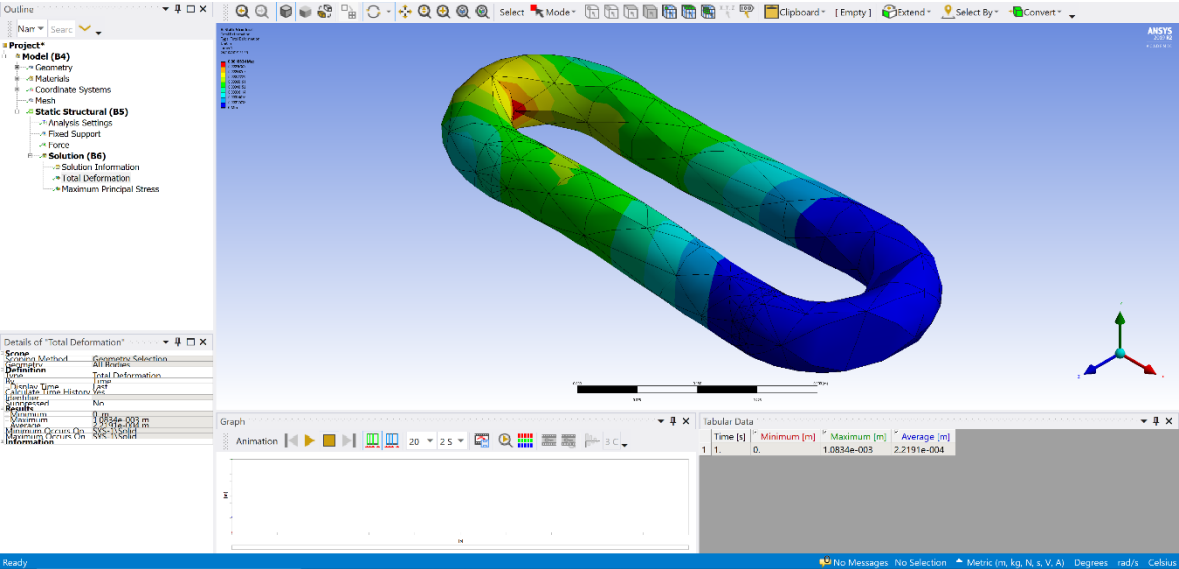
Com todos os parâmetros de entrada inseridos, pode-se solicitar as soluções desejadas do problema, e foram elas Deformação total, Esforço principal máximo e Ferramenta de Fadiga.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O primeiro resultado apresentado foi o de deformação total, presente na Figura 23. É importante salientar que a deformação apresentada está representada

de forma exagerada para melhor visualização das deformações, as deformações reais seriam muito mais discretas.

Figura 24 - Deformação total



Fonte: Desenvolvido pelo autor

A deformação máxima foi de 1,0834 milímetro, Figura 24, muito pequena comparada ao tamanho total da peça, que tem 584 milímetros de comprimento. Uma deformação de 1,0834 milímetros a cada elo da amarra com total de 914 metros resultaria em um aumento de 1,544 metro no comprimento total da amarra.

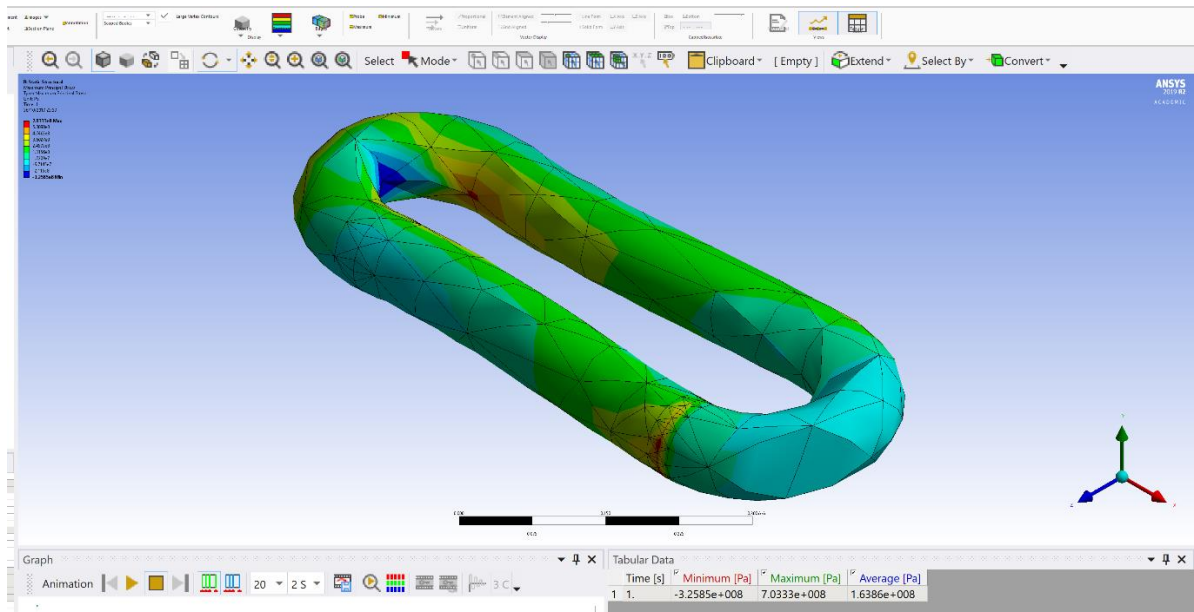
Figura 25 - Deformação máxima

Tabular Data				
	Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> Minimum [m]	<input checked="" type="checkbox"/> Maximum [m]	<input checked="" type="checkbox"/> Average [m]
1	1.	0.	1.0834e-003	2.2191e-004

Fonte: Desenvolvido pelo autor

A seguir o resultado do teste de *Maximum Principal Stress* da Figura 25.

Figura 26 - Maximum Principal Stress



Fonte: Desenvolvido pelo autor

A Figura 26 mostra os resultados do teste de *Stress* Máximo.

Figura 27 - Stress máximo

Tabular Data				
	Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> Minimum [Pa]	<input checked="" type="checkbox"/> Maximum [Pa]	<input checked="" type="checkbox"/> Average [Pa]
1	1.	-3.2585e+008	7.0333e+008	1.6386e+008

Fonte: Desenvolvido pelo autor

E finalmente os resultados do teste de fadiga com o método S-N, apresentados na Figura 27.

Figura 28 - Resultados teste de fadiga

Tabular Data				
	Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> Minimum	<input checked="" type="checkbox"/> Maximum	<input checked="" type="checkbox"/> Average
1	1.	7.0961e+005	1.e+009	4.1128e+008

Fonte: Desenvolvido pelo autor

A média de vida da amarra em segundos é de  $4,1128 \times 10^8$  o que gera uma expectativa de vida de 13,041 anos. Com um ciclo a cada 10 segundos tem-se um

número total de  $4,1128 \times 10^7$  ciclos. Configurando assim uma peça com vida infinita, por possuir uma vida maior que  $10^6$  ciclos. O que era o esperado para um material já utilizado na indústria e bastante estudado.

O Resumo dos resultados é apresentado na Figura 28.

**Figura 29** - Resumo de Resultados

Results	Minimum	Maximum	Units	Time (s)
Total Deformation	0.	1.0834e-003	m	1.
Maximum Principal Stress	-3.2585e+008	7.0333e+008	Pa	1.
Life	7.0961e+005	1.e+009	Units Unavailable	0.
Safety Factor	0.13123	15.	Units Unavailable	0.

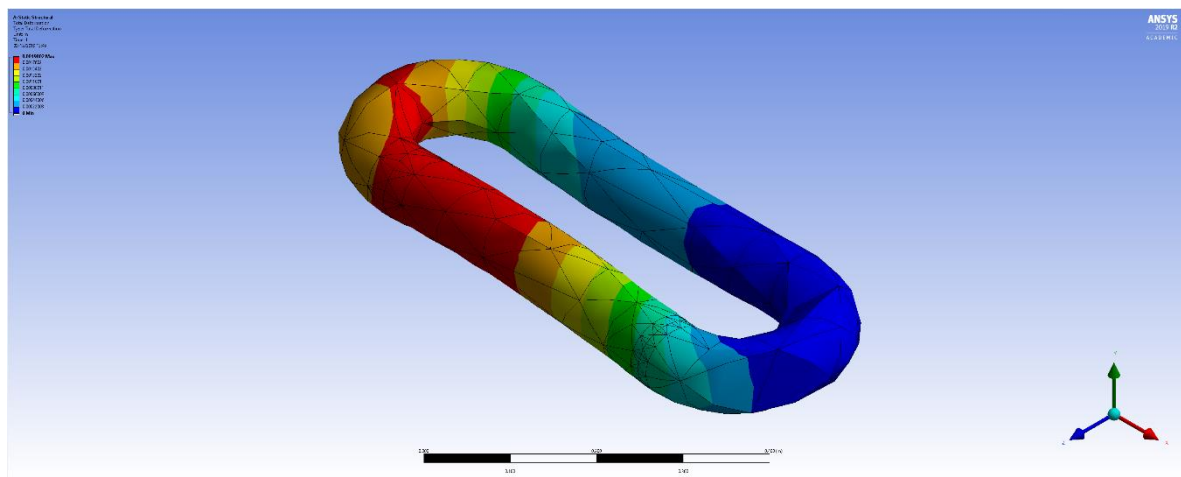
**Fonte:** Desenvolvido pelo autor

Como visto anteriormente, para uma maior simetria dos resultados ao longo da peça, foi sugerido uma nova área de engaste menor, conforme a Figura 21.

Novamente os testes foram realizados e os mesmos parâmetros do primeiro teste foram utilizados, a única mudança foi a área de engaste. Os novos resultados são mostrados a seguir.

A nova deformação total, Figura 30, permite visualizar a diferença e o aumento da simetria.

**Figura 30** - Nova deformação total



**Fonte:** Desenvolvido pelo autor

Como espera-se, houve um aumento da deformação total da peça, Figura 31, que deve ter ocorrido por ter aumentado a área não engastada, dando-se assim mais liberdade de movimentação para o material.

**Figura 31** - Nova Deformação máxima

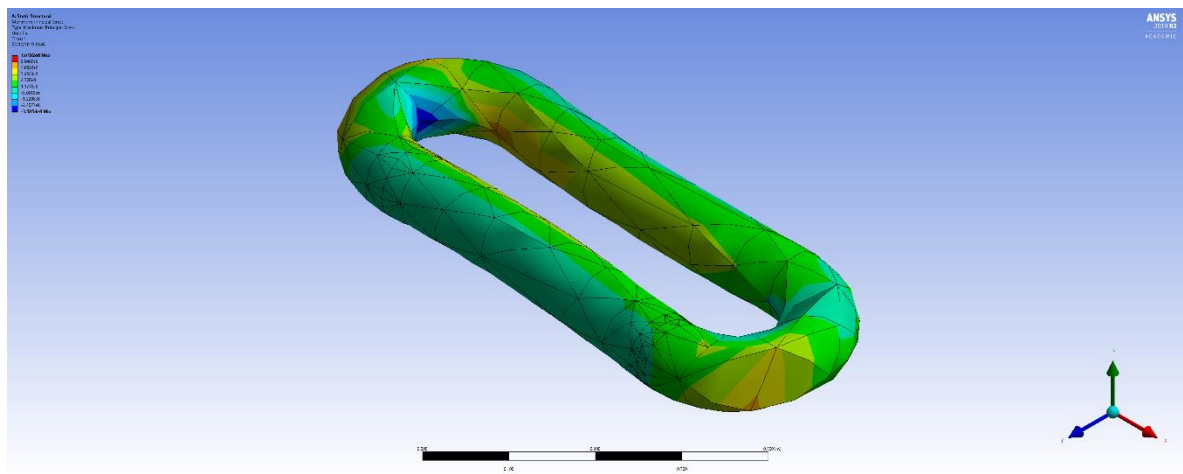
Tabular Data				
	Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> Minimum [m]	<input checked="" type="checkbox"/> Maximum [m]	<input checked="" type="checkbox"/> Average [m]
1	1.	0.	1.9802e-003	9.0142e-004

**Fonte:** Desenvolvido pelo autor

A deformação máxima foi de 1,9802 milímetro. O que resultou em um aumento de 2,822 metros no comprimento total da amarra de 914 metros.

O novo resultado do teste de *Maximum Principal Stress* da Figura 32 foi apresentado, observa-se uma menor concentração das tensões, as áreas avermelhadas são menores, o que indica uma melhor distribuição das tensões.

**Figura 32** – Novo *Maximum Principal Stress*



**Fonte:** Desenvolvido pelo autor

Na Figura 33, indica-se a redução real do *Stress* máximo. Observa-se a redução da máxima e da média tensão.

**Figura 33** - Novo *Stress* Máximo

Tabular Data				
	Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> Minimum [Pa]	<input checked="" type="checkbox"/> Maximum [Pa]	<input checked="" type="checkbox"/> Average [Pa]
1	1.	-3.5854e+008	7.0192e+008	1.6342e+008

**Fonte:** Desenvolvido pelo autor

E finalmente o novo resultado do teste de fadiga, apresentados na Figura 34.

**Figura 34** - Novo Resultados teste de fadiga

Tabular Data				
	Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> Minimum	<input checked="" type="checkbox"/> Maximum	<input checked="" type="checkbox"/> Average
1	1.	6.7979e+005	1.e+009	2.0243e+008

**Fonte:** Desenvolvido pelo autor

Pode-se observar uma diminuição da vida do material, porém a ordem de grandeza do número de ciclos se manteve a mesma, e maior que  $10^6$ , portanto a peça ainda pode ser considerada com vida infinita para estes valores de tensão.

O Resumo dos novos resultados se apresenta na Figura 35.

**Figura 35** - Novo resumo de resultados

Results	Minimum	Maximum	Units	Time (s)
Total Deformation	0.	1.9802e-003	m	1.
Maximum Principal Stress	-3.5854e+008	7.0192e+008	Pa	1.
Life	6.7979e+005	1.e+009	Units Unavailable	0.
Safety Factor	0.12908	15.	Units Unavailable	0.

**Fonte:** Desenvolvido pelo autor



## 6 CONCLUSÃO

Foi possível concluir com este estudo que a deformação dos elos das amarras não é de grande em relação ao comprimento da amarra de fundo, a expansão de 1,544 metro representa 0,1689% do comprimento total de 914 metros.

Os pontos com maior estresse em um elo de amarra estão nas junções entre a parte cilíndrica reta e a curva semi-toroidal. Estes devem ser os pontos onde o elo deve se romper em uma eventual fadiga. São os pontos críticos da estrutura.

A simulação realizada encontrou vida infinita para o elo da amarra, o que era esperado assumindo que os dados foram retirados de um caso real, onde estudos de dimensionamento das amarras devem ter sido realizados para seleção da amarra utilizada no projeto.

Para a segunda simulação, com o engaste menor na parte inferior do elo da amarra, observou-se uma simetria maior dos resultados por toda a porção do elo, com isso os valores obtidos devem se aproximar mais do resultado real do que a primeira simulação.

A expansão total da amarra aumentou significativamente comparado com o primeiro teste, passando de 1,544 metro para 2,822 metros.

Também se observou uma redução das tensões máximas, o que deve-se ao fato da liberdade de movimentação do material ter aumentado.

O ANSYS se mostrou um *software* bastante eficiente, após um tempo relativamente curto de aprendizagem, e vários tutoriais básicos estão disponíveis na *internet*. Porém, surgem dificuldades de orientação devido ao grande número de possibilidades que o programa oferece, isso faz com que nem tudo seja intuitivo. Outra dificuldade que pode ser observada é que o maior desafio em um problema como este é a criação do objeto em 3D, este trabalho utilizou uma geometria bastante simples, porém objetos mais complexos complicariam bastante a modelagem e aumentariam em muito o tempo de processamento.

## 7 REFERÊNCIAS

ASSIS, J. S. **Sistemas de Ancoragem de Plataformas: Manuseio de Âncoras em Águas Profundas**. Apresentação de monografia ao Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, 2013.

AUGUSTO, O. B., ANDRADE, B. L. R., ROSSI, R. R. **Otimização de Recursos Para a Operação de Instalação de Âncoras de Equipamentos Offshore**. Pesquisa Operacional, v.22, n.3, p.305-322, 2002.

BICO, V. M. P. - **Amarração de Plataformas Offshore Flutuantes com Cabos de Poliéster**. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Dissertação de mestrado, 2013.

CANO, D. A. **Análise de tensões no suporte de descida dos tubos de revestimento utilizados em poços de petróleo**. Trabalho de formatura, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2018.

DE AZEVEDO SILVA, F., CHAVES, C. A., SIQUEIRA GUIDI, E., **Análise de falha por fadiga em eixo de transmissão utilizando o método dos elementos finitos**. 14(2), 207-219. ISSN: 1678-5428, 2016.

MENDES, A. B. **Operações de Ancoragem**. Material da disciplina *Sistemas de Apoio à Prospeção e Produção de Petróleo no Mar*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2017.

NORTON, R.L. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem ilustrada**. 2 ed. Bookman, 2004.

OLSON, R. E., Rauch, A. F., GILBERT, R. B., TASSOULAS, J. L., AUBENY, C., & MURFF, J. D. **Toward the Design of New Technologies for Deep-Water Anchorages**. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2001.

SHANYING, Lin, LIPING, S., SHIGUANG, Z., HEMING, J., & YUNLONG, G. **The Comparison and Analysis between Catenary Mooring System and Taut Mooring System of FPSO**, 2013.

SHIMADA, M. K. **Avaliação de falhas por fadiga em colunas de perfuração**. Trabalho de Formatura, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2018.

YANG, Y., & YU, H.-S. **A Soil Model Considering Principal Stress Rotations**. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2013.