

# MODELAGEM COMPUTACIONAL DE DEFORMAÇÃO EM POLÍMEROS DE ALTA DENSIDADE E COMPÓSITOS

Murilo Souza Garcia, Thiago Teixeira, Victor Estevo Alves, Diego Felipe Sarsoza Burgos<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, São Paulo, SP, Brasil

## Abstract

Este trabalho estuda a aplicação de modelos mecânicos avançados de polímeros em aplicações de sistemas *offshore* de conversão de energia por gradiente de temperatura. A motivação para este estudo está na busca por soluções eficientes e duráveis para pipelines em ambientes submarinos, onde o HDPE pode desempenhar um papel crucial devido à sua alta flexibilidade e resistência à corrosão.

Para avaliar o desempenho do polímero, serão realizadas simulações computacionais com materiais alternativos usando o software Abaqus e a ferramenta User Material (UMAT), que permite definir com mais liberdades as características do material; essas simulações visam reproduzir as condições de contorno e carregamentos típicos do ambiente submarino.

## 1. Introdução

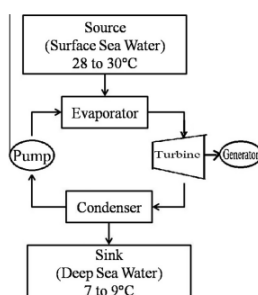
Atualmente a busca por energias limpas e renováveis se intensificou pelo mundo, logo foi questão de tempo para que o ambiente marítimo fosse explorado.

As energias renováveis já difundidas tem como principais obstáculos a eficiência energética e a área necessária para a aplicação dos equipamentos, assim o uso do ambiente marítimo surgiu como grande possibilidade para abrigar parques eólicos e até mesmo painéis solares, em um ambiente onde existe amplo espaço livre e boas condições de vento e solares, sem grande impacto na vida humana ao redor.

Na busca por novas fontes de energia surgiu a OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) que gera energia com base no gradiente de temperatura da água em altas profundidades e a água na superfície.

O sistema da OTEC funciona basicamente como um ciclo de Rankine, um líquido com baixa temperatura de ebulição é evaporado pela água quente da superfície, o vapor leva uma turbina a produzir energia e por fim a água fria condensa o líquido para que seja utilizado novamente, com isso conclui-se um ciclo termodinâmico. O esquema é representado abaixo.

Figure 1: Esquema OTEC

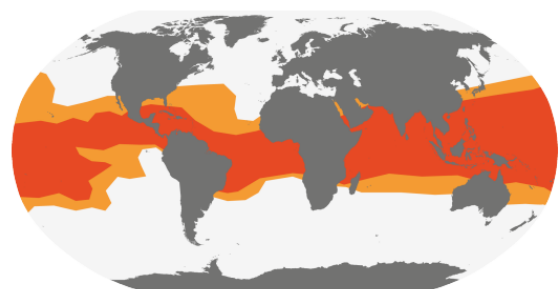


Fonte: Nithesh and Chatterjee (2016)

Assim chega-se a motivação desta pesquisa, uma vez que o sistema depende da capacidade de elevar a água de altas profundidades que conta com uma temperatura mais baixa, essa elevação se dá pela utilização de pipelines, atualmente feitos de um material chamado HDPE (High Density Polyethylene). O estudo de materiais substitutos para desempenhar essa função vai de encontro com os objetivos deste trabalho que serão descritos posteriormente.

O estudo e desenvolvimento desta tecnologia se mostra ainda mais relevante ao Brasil devido as restrições geográficas de aplicação do método. Para que o sistema funcione perfeitamente precisa-se de uma diferença de temperatura entre águas profundas e superficiais maior que 20°C, e este fenômeno só ocorre próximo a linha do Equador, incluindo boa parte da costa brasileira.

Figure 2: Área de Aplicação OTEC



Fonte: Van Kooten (2020)

Além das restrições geográficas o sistema ainda apresenta mais um obstáculo, que também é observado na maioria das fontes de energia renováveis, sua eficiência sendo limitada, atualmente, a 8%, porém já se busca possíveis melhorias para que isso se altere, uma delas é o aumento do diâmetro dos tubos de entrada de água, por exemplo uma estação de OTEC que tem como objetivo a produção de 10 Mw necessita de pipelines

com diâmetro de 4 metros.

Assim o escopo desta pesquisa se mostra de suma importância para o avanço dessa tecnologia, simular o comportamento deste material para diversas condições impactará diretamente no sucesso deste sistema e na atual busca por energias limpas.

## 2. Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivos principais:

- Modelar com sucesso os dois materiais descritos na pesquisa;
- Simular um modelo de tubo similar aos utilizados no sistema OTEC para ambos os materiais;
- Validar os resultados obtidos com os disponibilizados nas referências;
- Ser capaz de comparar os resultados da reposta mecânica dos polímeros e compósitos estudados;
- Validar a utilização desses materiais em ambiente submarino e na aplicação do OTEC.

Além dos objetivos principais planeja-se realizar um pequeno estudo complementar relacionado a orientação das fibras no compósito, este estudo será realizado com um modelo complementar e após os testes será estudada a possível aplicação dos resultados no modelo final.

## 3. Metodologia

Esta seção tem como principal objetivo definir os materiais e apresentar alguns conceitos que serão importantes ao decorrer das simulações. O foco do estudo será demonstrar a aplicação do Polietileno de Alta Densidade Reticulado (XLPE), material de resposta mecânica próxima ao HDPE, e compará-lo com o desempenho de um compósito na mesma situação.

Neste caso será realizado uma série de simulações computacionais que deverão simular as condições de contorno do ambiente submarino, para isso será utilizado o software de modelagem de elementos finitos Abaqus.

Na modelagem do XLPE utilizaremos a ferramenta *User Material* (UMAT) assim podemos definir os parâmetros da resposta visco-elástica característica dessa classe de material, a ferramenta é baseada na definição dos critérios de tensão e isotropia com relação a influência das condições de contorno com a pressão aplicada pelo ambiente.

Utilizando a subrotina criada por Johnsen Johnsen et al. (2019) adaptou-se o código em FORTRAN sendo assim inseridos no Abaqus, as principais adaptações necessárias foram relacionadas ao tipo de objeto, uma vez que a simulação será aplicada a um tubo com dimensões próximas aos utilizados no sistema OTEC (*Ocean Thermal Energy Conversion*).

### 3.1. XLPE

A modelagem computacional realizada neste estudo apresentará as propriedades de um material polimérico bem próximo ao HDPE, o XLPE (*High Density Cross Linked Polyethylene*), ambos são constituídos da mesma resina porém diferem quanto ao meio de fabricação.

A escolha por este material foi necessária uma vez que a rotina utilizada e disponibilizada nas referências foi calibrada para as características do XLPE, assim observando sua semelhança ao HDPE seguiu-se com o estudo da modelagem.

Na manufatura do HDPE temos *pellets* de resina termoplástica que são moídos e derretidos para criar o material líquido, este material é resfriado e endurecido até criar uma superfície linear de polietileno, neste caso as moléculas que fazem parte do material se conectam em linha, como uma corda.

Já na fabricação do XLPE é adicionado um catalisador a resina termoplástica, transformando a mesma em um termofixo e gerando ligações covalentes entre as moléculas do material final, assim temos um material que apresenta características de resistência melhores que o HDPE.

O XLPE apresenta melhor resistência ao impacto, a tração e a fratura, além de maior resistência química, resistência ao calor e estabilidade dimensional que o Polietileno de Alta Densidade Linear.

### 3.2. Materiais Compósitos

Materiais compósitos são caracterizados como materiais heterogêneos e multifásicos, sendo constituídos por dois materiais diferentes, que em geral trazem características complementares, a fim de contribuir para a resposta mecânica pelo princípio da ação combinada.

Todo material compósito é composto por duas principais fases, a fase matriz e a fase de reforço, ou como é chamada também a fase dispersa. A fase matriz é responsável por dar liga ao material sendo a fase contínua, já a fase de reforço tem como principal finalidade a definição das características mecânicas do material, a depender de seu tamanho, distribuição e orientação.

### 3.3. Tensão

Quando um corpo é submetido a esforços externos, ativos (forças aplicadas) ou reativos (apoios), a tensão é um esforço interno que surge reacionalmente de modo a equilibrar e distribuir ao longo do corpo os efeitos do carregamento sentido.

A definição de tensão é a variação de uma força  $\Delta \vec{F}$  em uma área  $\Delta A$  de um corpo quando  $A \rightarrow 0$  em um escolhido ponto P, como segue na equação abaixo:

$$\vec{p}(P, \vec{n}) = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{F}}{\Delta A} \quad (1)$$

Porém, uma análise desse modo seria mais complexa, então normalmente se decompõe  $\vec{p}$  em 2 componentes perpendiculares, que permitem melhor entender os efeitos que as tensões causam no corpo, sendo elas:

$$\vec{p} = \vec{\sigma} + \vec{\tau} \quad (2)$$

### 3.3.1. Tensão Normal

A decomposição de da tensão que atua na direção da normal do corpo  $\vec{n}$ , ou seja, perpendicular ( $\perp$ ) à uma superfície de corte S em análise, sendo essa a responsável por causar variações, também chamadas deformações, volumétricas no corpo como resposta à solicitações.

$$\vec{\sigma} = \sigma \vec{n}, \vec{n} \perp S \quad (3)$$

### 3.3.2. Tensão Cisalhante

O restante da decomposição da tensão em um corpo, sendo essa parcela a paralela à superfície de corte S em análise. De modo geral, a tensão de cisalhamento, ou cisalhante, é responsável pelas respostas do corpo que não variam o volume porém causa distorções em sua forma.

$$\vec{\tau} = \tau \vec{t}, \vec{t} \parallel S \quad (4)$$

### 3.4. Coeficiente de Poisson

A Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), adimensional, é uma das mais importantes propriedades que definem as reações de um material, pois define parte do comportamento básico do material quando submetidos à esforços, sua relação tensão-deformação.

A definição do mesmo se dá pela análise das deformações nas dimensões do material, nos eixos laterais (plano ortogonal ao eixo de aplicação da carga), quando comparados com a deformação ocorrida no eixo principal, eixo de aplicação de força. Segue na equação :

$$\nu_{ij} = -\frac{\epsilon_j}{\epsilon_i} \quad (5)$$

Apesar da extensão nas direções serem adimensionais, pois tratam-se da divisão do comprimento inicial, na direção, dividido pela variação do comprimento na mesma direção ( $L_0/\Delta L$ ), é de costume representar a unidade mm/mm.

Exemplificando, a divisão das deformações em Y e Z, ou quaisquer eixos laterais, divididas pela deformação ocorrida em X é uma constante adimensional do material, trata-se de uma razão. Ademais, a mesma contém a convenção de sinais de que trações são positivas e compressões negativas, sendo o sinal de menos devido ao fato das deformações transversais e longitudinais possuem sinais opostos.

De um ponto de vista computacional, matricial, o Coeficiente de Poisson é um dos parâmetros de entrada no software de simulação utilizado, devido à sua presença na Lei de Hooke Generalizada.

### 3.5. Módulo de Elasticidade/Young

O Módulo de Elasticidade, também conhecido como Módulo de Young (*Young's Modulus*), representado pela letra grega E (epsilon maiúsculo) é uma das propriedade fundamentais dos materiais, sendo responsável por caracterizar seu comportamento elástico. Sua interpretação pode ser dada como a rigidez de um material, quanto maior o seu valor, mais rígido é o material.

Rigidez é a capacidade de um material de resistir à deformações, quando sujeito à uma força externa, sendo assim é uma medida da resistência do material à deformação. Vale ressaltar, que o módulo de elasticidade é uma característica intensiva do material, enquanto a rigidez depende da geometria, logo extensiva.

Fisicamente o módulo de elasticidade pode ser associando diretamente com a resposta nas dimensões de um material perfeitamente elástico, mostrando a resposta que se obteria do mesmo ao ser sujeito à força. Em outras palavras, com o aço por exemplo, que possui  $E \cong 210\text{GPa}$ , logo se não houvesse nenhum comportamento plástico ou ruptura, uma vez aplicada tensão haveria uma deformação de 100% no seu comprimento.

Ademais, uma visão matemática pode ser dada como o sendo a tangente do ângulo construído pela curva tensão deformação na região elástica, vide Figura 3.

Também, assim como o Coeficiente de Poisson, é parâmetro de entrada nos softwares de simulação MEF (Método de Elementos Finitos), está presente na crucial matriz de rigidez [K] do material e na Lei de Hooke Generalizada.

### 3.6. Lei de Hooke generalizada

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \end{aligned}$$

Lei de Hooke Generalizada para tensões normais

Para a monografia em questão os ensaios realizados são Ensaio de Tração, ou seja, existem apenas esforços no eixo longitudinal do corpo, assim possibilitando simplificações devido à  $\sigma_y = \sigma_z = 0$

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} \\ \epsilon_y &= -\nu\sigma_x \\ \epsilon_z &= -\nu\sigma_x \end{aligned}$$

### 3.7. Curva tensão deformação

O ensaio de um corpo é usualmente registrado por meio de uma curva tensão deformação, no qual são possíveis 2 curvas:

- Engenharia: Trata-se de uma análise que considera a área inicial transversal do corpo, na região do pescoço, inicial como constante para avaliar os valores de tensão e plotar os mesmos contra a deformação, é a curvatura típica vista no gráfico abaixo.
- Verdadeira: Trata-se do mesmo ensaio e medições da curva de engenharia, porém a região de interesse, seção de área transversal, é atualizada conforme a mesma varia com o corpo

Apesar de a análise da curva de engenharia ser a mais típica e geralmente permitir entender melhor regiões e questões do comportamento do material, é da curva verdadeira que são retirados os dados para os softwares como o ABAQUS normalmente.

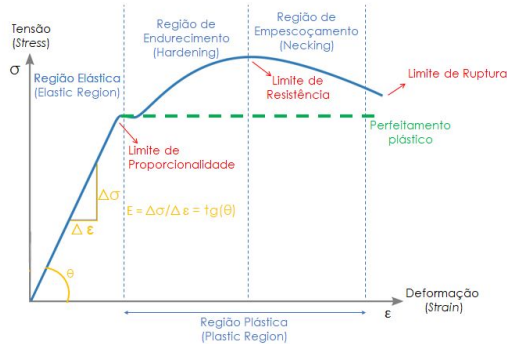


Figure 3: Curva tensão-deformação típica para material dúctil  
Fonte: Autoria própria

#### 4. Introdução a Modelagem e Software

A modelagem computacional foi realizada para os materiais XLPE e CFRP, abrangendo assim um polímero e um compósito, a escolha desses materiais se deu pela literatura disponível, uma vez que para o XLPE foi utilizada a ferramenta do Abaqus UMAT (User Material), com uma subrotina disponibilizada por Johnsen et al. (2019), e para o CFRP foram utilizadas as ferramentas de definição de propriedade básica do Abaqus, com base nos dados de propriedades mecânicas disponibilizados por Daud et al. (2015).

Utilizaram-se 2 versão do *software* de elementos finitos Abaqus, distribuído pela empresa SIMULIA, sendo ambas acadêmicas disponibilizadas pela universidade: ABAQUS 2019 (Simulações CFRP) e ABAQUS 2022 (XLPE). A modelagem se baseou em dois corpos de prova, o primeiro para validação do UMAT, foi baseado no desenvolvido por Johnsen et al. (2019), já o segundo se deu por dimensões inspiradas nas utilizadas na aplicação da OTEC.

Ambos os modelos foram construídos com base em elementos axisimétricos devido a limitação da subrotina utilizada para definição do XLPE, assim seguiu-se com os mesmos modelos para a simulação do compósito para que fosse possível a comparação entre os resultados.

A realização de uma simulação utilizando o *software* proposto pode ser dividida nas seguintes etapas principais:

- **Modelagem geométrica:** Criação da geometria do corpo de prova, definindo suas dimensões principais, segmentações e sua posição em relação à base de coordenadas.
- **Caracterização do material:** Definição dos parâmetros que descreverão o comportamento do material, e consequentemente do corpo de prova, ao decorrer da simulação.

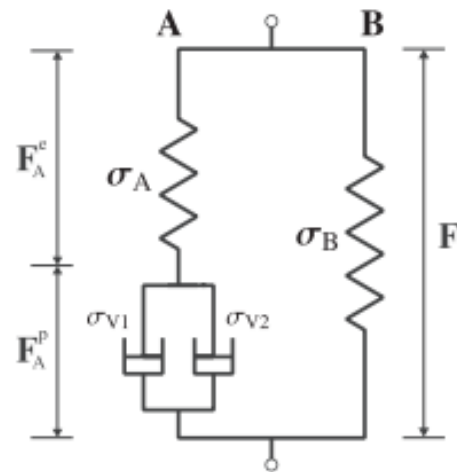
- **Aplicação das condições de contorno e cargas:** Estabelecimento dos graus de liberdade, das cargas e deslocamentos aplicados no corpo de prova.
- **Geração da malha:** Definição do refinamento da malha que será analisada.
- **Execução da simulação e plotagem dos resultados:** Escolha dos *outputs* desejados, execução da tarefa e configuração dos gráficos ou representações visuais dos resultados alcançados.

#### 5. Modelagem XLPE

A modelagem do XLPE, foi baseada na abordagem tomada por Johnsen et al. (2019), nela o modelo constitutivo utilizado para definição da resposta mecânica e propriedades do material é dividido em duas partes principais.

A primeira parte, chamada no artigo de parte A, trata-se da resposta hiperelástica e viscoplástica do material, já a segunda parte, chamada de parte B, trata do endurecimento orientacional devido ao alinhamento da cadeia polimérica apresentada pelo material.

Figure 4: Rheological Model - Modelo Constitutivo XLPE



Fonte: Johnsen et al. (2019)

Logo é utilizado uma divisão do gradiente de tensão de deformação separando a resposta do material entre as deformações elástica e plástica, sendo essa divisão definida principalmente na parte A, pela figura acima pode-se ver que o gradiente de deformação é igual nas duas partes.

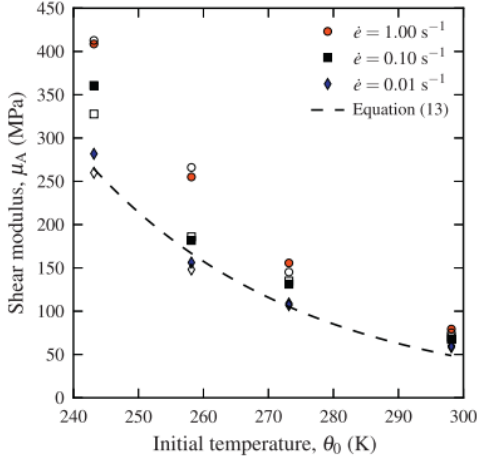
$$F = F_A = F_A^e F_A^p = F_B \quad (6)$$

A calibração do material foi feita com base em resultados experimentais disponíveis em literatura, neste caso foram utilizados valores de módulo de cisalhamento, *Flow Stress*, e *Strain Hardening*.

O módulo de cisalhamento foi definido com base nos resultados experimentais demonstrados em Johnsen et al. (2017),

neles podemos ver a influência clara da temperatura e da taxa de deformação no módulo de cisalhamento.

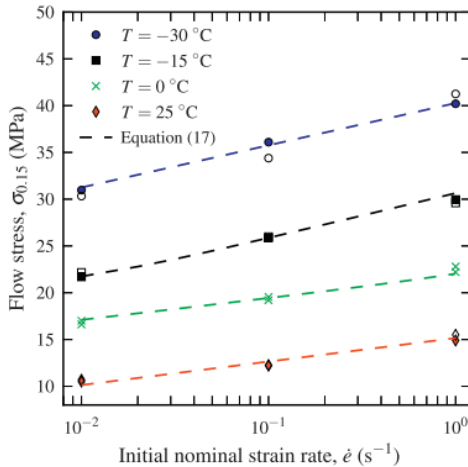
Figure 5: Temperatura Inicial x Módulo de Cisalhamento



Fonte: Johnsen et al. (2017)

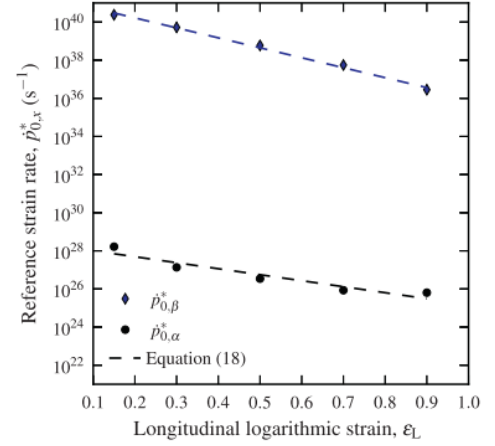
Os coeficiente necessários para o modelo foram definidos pelas curvas de tensão-deformação retiradas de Johnsen et al. (2017) utilizando o *Flow Stress* com uma deformação fixa de  $\epsilon_L = 0.15$ , assim com base nos gráficos abaixo foram definidos os parâmetros finais que caracterizam o material.

Figure 6: Taxa de Deformação Inicial x Flow Stress



Fonte: Johnsen et al. (2019)

Figure 7: Deformação Longitudinal Logarítmica x Taxa de Deformação de Referência



Fonte: Johnsen et al. (2019)

Com a calibração do modelo realizada os seguintes parâmetros do material foram definidos por Johnsen et al. (2019):

Par.	$\mu_{A,ref}$ (MPa)	$a_A$ ( $K^{-1}$ )	$\theta_{ref}$ (K)	$\Delta H_\alpha$ (kJ/mol)	$V_\alpha$ ( $nm^3$ )
Part A	46	0.028	298.15	179.5	4.72

Table 1: Parâmetros Part A - Tabela 1  
Fonte: Johnsen et al. (2019)

Par.	$\dot{\rho}_{0,\alpha}$ ( $s^{-1}$ )	$b_\alpha$ (-)	$\Delta H_\beta$ (kJ/mol)	$V_\beta$ ( $nm^3$ )	$\dot{\rho}_{0,\beta}$ ( $s^{-1}$ )	$b_\beta$ (-)
Part A	2.36E25	3.0	196.1	3.19	6.13E36	10.0

Table 2: Parâmetros Part A - Tabela 2  
Fonte: Johnsen et al. (2019)

Sendo esses parâmetros da parte A, resposta hiperelástica e viscoplástica do material, apresentam parâmetros de 3 tipos: Valores base iniciais de propriedades do material (Módulo de cisalhamento), sensibilidade do material à taxa de deformação e variação da temperatura e pontos de início para ativação dos estados de relaxamento (volume e energia devido à deformação).

Parameters Part B	$\mu_{B,ref}$ (MPa)	$K_B$ (MPa)	$\lambda_{lock}$ (-)
Value	2.0	1500	5.2

Table 3: Parâmetros Part B  
Fonte: Johnsen et al. (2019)

Sendo esse parâmetro da parte B, endurecimento orientacional devido ao alinhamento da cadeia polimérica, trata-se de uma teoria mais consolidada e seus 3 parâmetros são:  $\mu_{B,ref} \equiv$  Módulo de cisalhamento na temperatura de referência;  $K_B \equiv$  Constante de Boltzmann;  $\lambda_{lock} \equiv$  Deformação onde ocorre uma mudança abrupta do endurecimento do material.

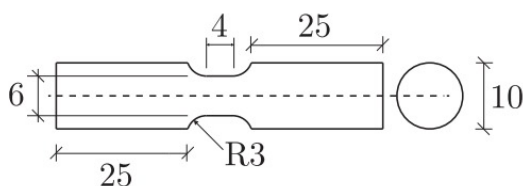
Com o material definido parte-se para validação dos resultados obtidos pelo grupo durante as simulações com os resultados apresentados no artigo base Johnsen et al. (2019). Para a validação será comparado uma série de resultados obtidos da reprodução da simulação de um corpo de prova similar ao apresentado na referência original.

### 5.1. Definições computacionais

Apresentado um pouco mais o material a modelagem pelo ponto de vista do software e do arquivo .CAE (geometria do material para ser inserida no ABAQUS) fornecido pelo artigo.

Em primeiro lugar, o corpo de prova dos ensaios realizados na referência base é cilíndrico, veja Figura 8, a construção no ABAQUS também segue esse formato.

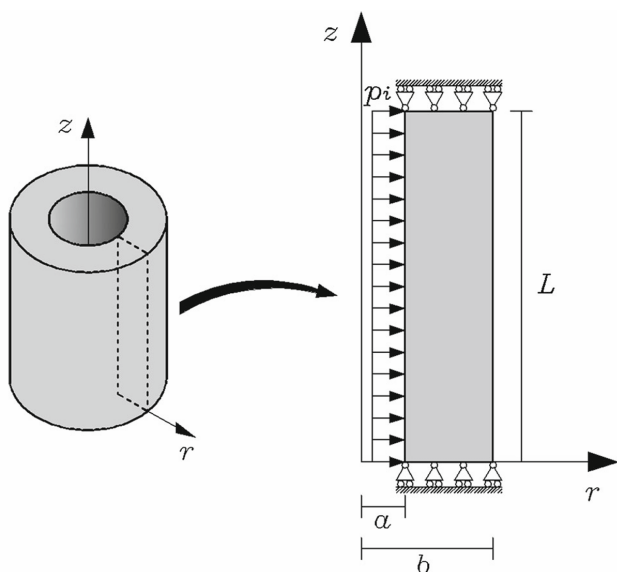
Figure 8: Corpo de prova usado nos ensaios experimentais. Medidas em mm



Fonte: Johnsen et al. (2019)

Então, a primeira constatação que permite uma simplificação é que por se tratar de um corpo cilíndrico uniforme e homogêneo, a resposta do corpo pode ser apresentada apenas por uma seção 2D do corpo, já que, pensando por coordenadas polares, é possível perceber que a resposta não depende do ângulo  $\theta$ , como representado abaixo, Figura 9:

Figure 9: Exemplo de como funciona um modelo axissimétrico



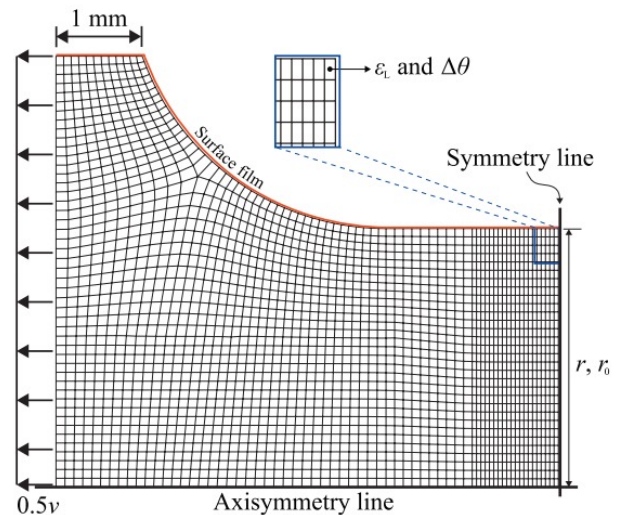
Fonte: C. Bagni, H. Askes, E. C. Aifantis (2016)

Em segundo lugar, agora pensando seção 2D do tubo, é possível constatar mais 2 simetrias diretamente: A seção em

torno de um eixo horizontal que passa na região do entalhe com largura reduzida (em inglês *gauge section*; Por se tratar de um ensaio de tração à também uma simetria em relação à carga nas superfície superior e inferior.

Então, com essas 2 em mente é possível simplificar novamente o modelo, usando metade da seção recortada anteriormente, como mostrado abaixo o resultado final que os escritores da Johnsen et al. (2019) usam para realizar as análises computacionais, Figura 10:

Figure 10: Geometria de modelo computacional final



Fonte: Johnsen et al. (2019)

Por último, vale constatar que a rotina UMAT desenvolvida na referência Johnsen et al. (2019) foi para esse modelo apresentado, sendo o fato de se tratar do tipo de *Part* axissimétrica do ABAQUS (CAX4/CAX4R) uma implicação forte para como abordaremos as outras modelagens desenvolvidas e discutidas ao longo do trabalho.

Com o material definido e as limitações constatadas, parte-se para validação dos resultados obtidos pelo grupo durante as simulações com os resultados apresentados no artigo base Johnsen et al. (2019). Para a validação será comparado uma série de resultados obtidos da reprodução da simulação de um corpo de prova similar ao apresentado na referência original.

## 6. Modelagem Compósito Polimérico

A abordagem na simulação do compósito escolhida é mais simplificada do que a adotada na definição do XLPE demonstrada nas seções anteriores. Neste caso, a ideia é conseguir construir um material minimamente satisfatório apenas utilizando dados de referências e as capacidades nativas do ABAQUS, não sendo necessária implementação via UMAT.

Então, foi-se adotado o sistema de definição de propriedades do material do próprio software com base nas propriedades mecânicas definidas por Daud et al. (2015), sendo que os materiais compósitos possuem um maior número de estudos publicados, facilitando assim a definição de seus parâmetros para a simulação.



Neste estudo buscou-se a modelagem de um compósito de polímero reforçado com fibra de carbono, conhecimento também como, CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*), esse material foi escolhido devido a sua ampla utilização no campo da engenharia em papéis que necessitam de um material leve e com boa resposta dinâmica aos esforços.

Atualmente existem aplicações deste material nas indústrias automotiva, aeronáutica, e até mesmo na indústria offshore, segundo artigo publicado na *Offshore Magazine* por Charlesworth and Hatton (2018) com a crescente exploração de petróleo em águas ultra profundas a busca da utilização do CFRP em risers, jumpers e flowlines vem crescendo exponencialmente.

O CFRP se destaca em sua aplicação na indústria offshore principalmente pela sua resistência a corrosão, e sua relação entre resistência e peso, que se comparada ao aço inoxidável se mostra vinte vezes maior.

### 6.1. Definição dos Parâmetros da Modelagem

Para a simulação do material em questão utilizaremos os coeficientes definidos por Daud et al. (2015), assim temos:

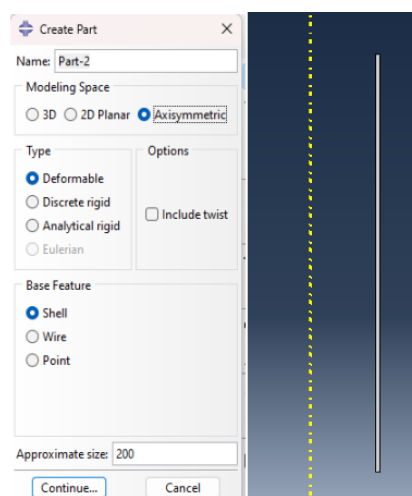
Descrição	Valor
Longitudinal Modulus ( $E_1$ ) - GPa	230
Tranverse in-plane Modulus ( $E_2$ ) - GPa	23
Tranverse out-plane Modulus ( $E_3$ ) - GPa	23
In-plane Shear Modulus ( $G_{12}$ ) - GPa	6.894
Out-of-plane Shear Modulus ( $G_{23}$ ) - GPa	4.136
Out-of-plane Shear Modulus ( $G_{13}$ ) - GPa	6.894
Major in-plane Passion's ratio ( $\nu_{12}$ )	0.3
Out-of-plane Passion's ratio ( $\nu_{23}$ )	0.25
Out-of-plane Passion's ratio ( $\nu_{13}$ )	0.25
Characteristic Tensile Strength ( $f_t$ ) - MPa	3,400

Table 4: Coeficientes para o CFRP  
Fonte: Daud et al. (2015)

Com os coeficientes definidos foi estabelecido o modelo inicial como um tubo de 1 metro de diâmetro, 30 milímetros de espessura e 3 metros de comprimento, para representação no software Abaqus e efeito de comparação com a simulação realizada para o XLPE utilizaremos um modelo axissimétrico que representa a seção da tubulação.

O tipo de modelagem foi utilizada uma vez que a subrotina obtida para o XLPE foi criada para um modelo axissimétrico, por sua vez todos os seus parâmetros foram calibrados para um modelo similar, assim inviabilizando a alteração.

Figure 11: Modelo Axissimétrico Tubo de Captação de Água



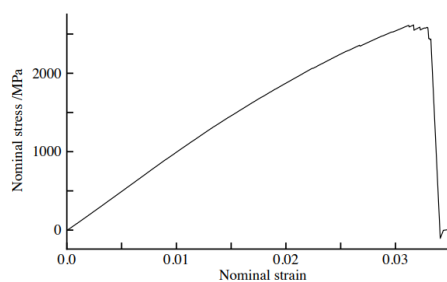
Fonte: Autoria Própria

Com a modelo construído defini-se as propriedades com base nos coeficientes da tabela acima, assim garantimos que a resposta do modelo seja próxima a esperada para o compósito em questão.

Como se trabalhou com um modelo axissimétrico não foi possível estabelecer um modo de falha para o material, sendo que os modos de falha disponíveis na literatura deste material se conectam diretamente ao descolamento das camadas do compósito e o modelo axissimétrico não permite a atribuição de camadas a modelagem.

Visando representar mais do que a parte elástica da modelagem optou-se pela extração de pontos do regime plástico de um gráfico Tensão x Deformação característico do material.

Figure 12: Stress vs. Strain - CFRP

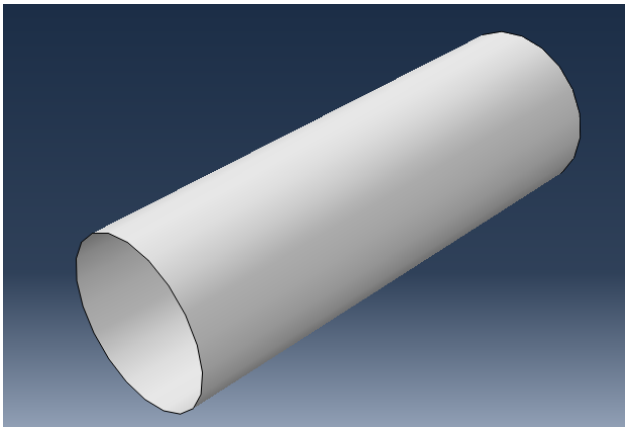


Fonte: Kamiya (2016)

### 6.2. Análise da Orientação de Fibras

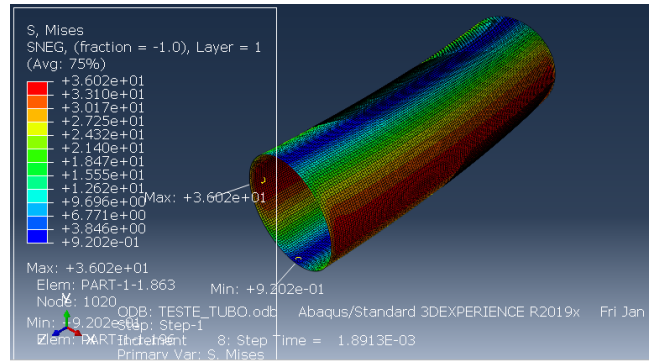
Realizou-se a construção de outro modelo para o material compósito para que assim seja possível o estudo do impacto na resposta mecânica do material da orientação das fibras na composição das camadas do compósito. Neste caso foi criado um modelo utilizando um corpo 3D em formato de tubo, respeitando as dimensões definidas inicialmente, sendo 1 metro de diâmetro externo, 3 metros de comprimento e neste caso sua espessura foi definida no momento da criação das camadas.

Figure 13: Modelo para Estudo da Orientação das Fibras - CFRP



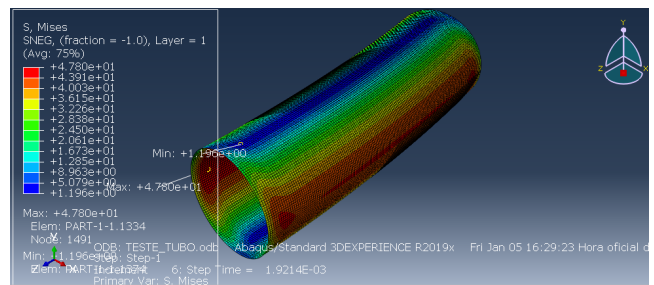
Fonte: Autoria Própria

Figure 15: Simulação 1 - CFRP



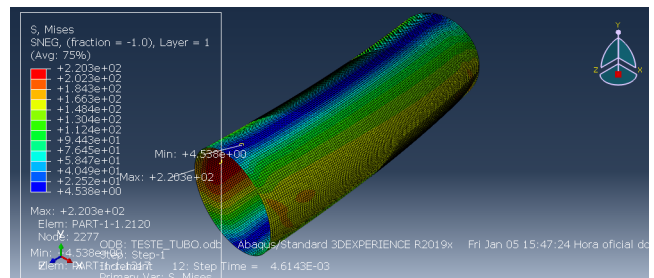
Fonte: Autoria Própria

Figure 16: Simulação 2 - CFRP



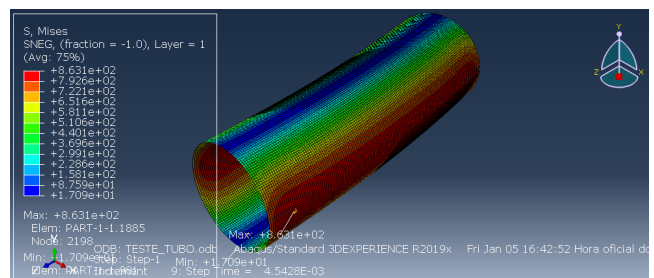
Fonte: Autoria Própria

Figure 17: Simulação 3 - CFRP



Fonte: Autoria Própria

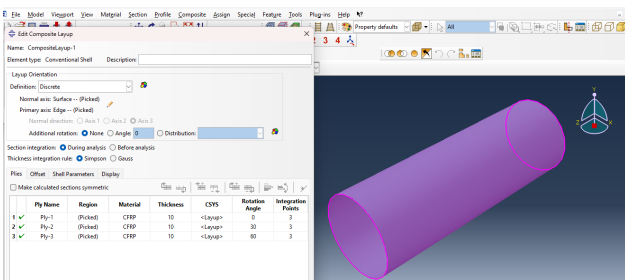
Figure 18: Simulação 4 - CFRP



Fonte: Autoria Própria

As constantes do material foram definidas da mesma forma que o modelo criado para comparação com a aplicação do polímero, a diferença está na criação das camadas de definição do compósito, no modelo em questão foram definidas três camadas com 10 milímetros cada, todas constituídas do mesmo material.

Figure 14: Definição das Camadas do Compósito - CFRP



Fonte: Autoria Própria

O estudo do impacto da orientação das camadas se deu pela simulação de quatro situações demonstradas abaixo, assim foram comparados os resultados em relação as tensões de Von Mises máximas de cada modelo.

- Simulação 1 - 0° / 0° / 0°
- Simulação 2 - 0° / 30° / 60°
- Simulação 3 - 30° / 60° / 90°
- Simulação 4 - 90° / 90° / 90°

Nas simulações acima foi utilizado o modelo descrito com uma das extremidades engastadas, com uma pressão interna de 36 MPa, que resulta em uma tensão circunferencial de metade da tensão de escoamento do material, com um deslocamento axial de 10 milímetros e rotação de 5 radianos na extremidade livre. Assim obtém-se os seguintes resultados:



Tensão de Von Mises	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Máxima Tensão(MPa)	36.0	47.8	220.3	863.1
Mínima Tensão(MPa)	0.92	1.20	4.54	17.1

Table 5: Resultados Simulações Orientação das Camadas - CFRP  
Fonte: Autoria Própria

Como pode-se observar os resultados obtidos não diferem significativamente no visual, porém a distribuição e a magnitude das tensões sofre grande alteração.

Por outro lado a tensão máxima se mostrou crescente durante as simulações, a simulação 1 com as camadas alinhadas igualmente de acordo com o eixo principal obteve-se a menor tensão, tendo em vista que em todos os casos as tensões máximas se encontram bem próximas do ponto de engaste opta-se pela situação de menor tensão máxima.

## 7. Comparação Inicial dos Materiais

Durante este estudo serão estudados três materiais, dois polímeros e um compósito, nesta seção temos uma análise preliminar desses materiais.

Propriedades	HDPE	XLPE	CFRP
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0.96	0.93	1.76
Tensile Strength (MPa)	23	42	2,438
Flexural Modulus (GPa)	0.682	0.600	0.650
Young's Modulus (GPa)	1	1.39	127.7
Temperatura de Fusão (°C)	134	150	280
Absorção de Água (%)	0.04	0.01	0.02

Table 6: Propriedades dos Materiais Estudados  
Fonte: Van Kooten (2020) , Daud et al. (2015) e Pruitt (2005)

O estudos desses materiais tem como objetivo a aplicação em ambientes submarinos, logo busca-se materiais que possuem maior tensão de escoamento, maior módulo de elasticidade, baixa absorção de água e alto módulo de flexão.

Comparando as propriedades dos materiais em termos de absorção de água todos se encontram com baixa absorção, já em relação a tensão de escoamento, módulo de elasticidade e flexão o compósito CFRP se destaca, logo apesar de apresentar a maior densidade entre os estudados o CFRP inicialmente se apresenta como melhor solução para ambientes com altos esforços.

Este ponto será debatido nas seções posteriores, já que apresentar as melhores propriedades mecânicas é um bom indicativo mas é necessário o estudo da resposta mecânica ao esforço estudado, para que assim a escolha do material apresente melhor aderência aos requisitos da função final a que será aplicado.

## 8. Resultados XLPE

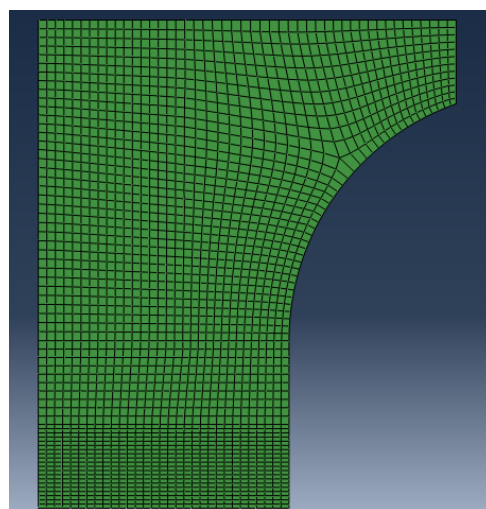
O primeiro passo referente as simulações e resultados obtidos do XLPE é a validação do modelo utilizado, neste caso para definição do material no software de modelagem (Abaqus) utilizou-se a subrotina da ferramenta *User Material* (UMAT)

criada por Johnsen et al. (2019) como abordado nas seções anteriores.

Esta validação se dá pela comparação dos resultados obtidos pelo grupo na repetição das simulações presentes na referência, assim foi utilizado um corpo de prova similar ao descrito por Johnsen et al. (2019), com as mesmas condições de contorno e realizou-se simulações com os seguintes *strain rates*:

- $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$
- $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$
- $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$

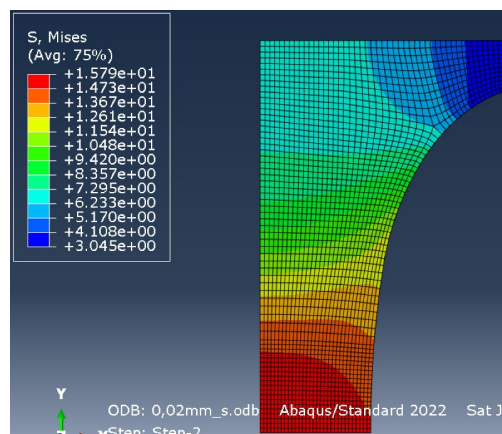
Figure 19: Modelo Base Referência



Fonte: Autoria Própria

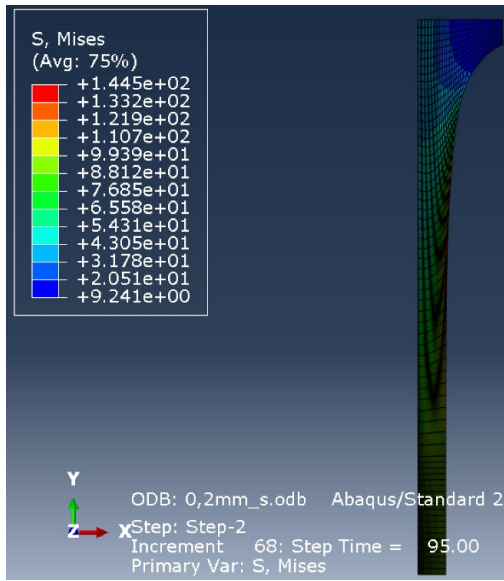
Partindo do modelo demonstrado na referência realizou-se as três simulações, cada simulação foi dividida em dois *steps* o primeiro com 5 segundos e o segundo com 95 segundos, totalizando como tempo de simulação 100 segundos. Logo obteve-se a seguinte aproximação dos resultados.

Figure 20: Simulação Strain Rate  $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$



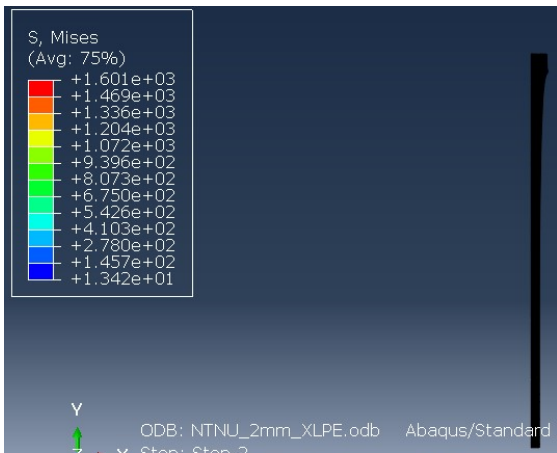
Fonte: Autoria Própria

Figure 21: Simulação Strain Rate  $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$



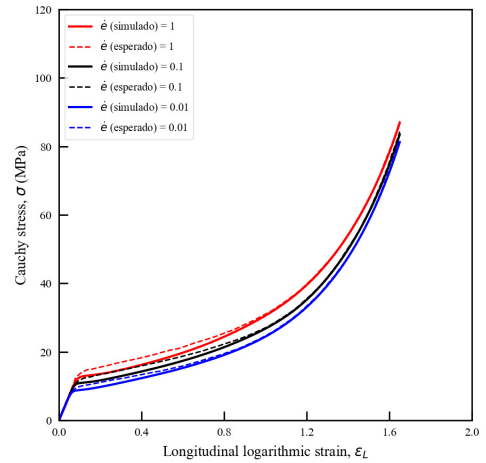
Fonte: Autoria Própria

Figure 22: Simulação Strain Rate  $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$



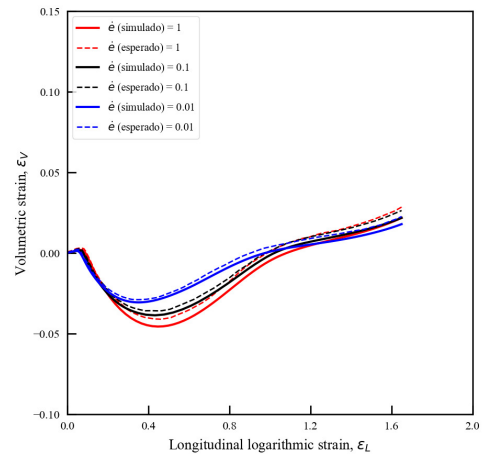
Fonte: Autoria Própria

Figure 23: Comparação Resultados - Stress x Strain



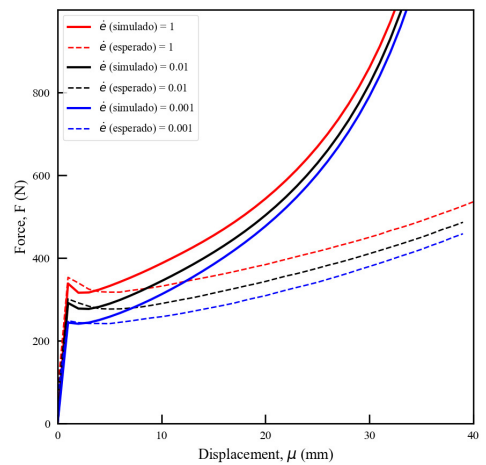
Fonte: Autoria Própria

Figure 24: Comparação Resultados - Strain x Volumetric Strain



Fonte: Autoria Própria

Figure 25: Comparação Resultados - Reaction Force x Displacement



Fonte: Autoria Própria

Nos gráficos abaixo têm-se a representação dos principais resultados retirados destas simulações, assim é possível a realização da comparação com os resultados disponíveis na referência Johnsen et al. (2019).

Pode-se observar nos dois primeiros gráficos uma grande aderência dos dados aos disponibilizados na referência Johnsen et al. (2019), as pequenas diferenças se dão principalmente pelo processamento computacional durante a simulação, esse parâmetro pode variar dependendo da máquina utilizada para a realização da simulação, no entanto essas diferenças não são de ordem relevante.

No gráfico de Força x Deslocamento vemos um descolamento dos dados após o período inicial da simulação, isso ocorre pois esses parâmetros podem diferir de acordo com o ponto de referência escolhido, este ponto não foi disponibilizado pelo autor do artigo de referência, logo pode-se comparar o comportamento da curva mas não os dados em si. Em relação ao comportamento das curvas pode-se perceber uma proximidade dentro das simulações realizadas e as disponibilizadas na referência.

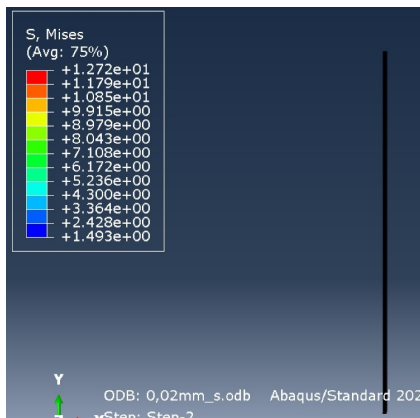
Com a validação da subrotina pode-se seguir para a aplicação da mesma no modelo desenvolvido pelo grupo, no caso foi utilizado elementos e configurações semelhantes as simulações já realizadas pois a subrotina é calibrada especificamente para modelos axissimétricos do tipo CAX4RT dentro do software Abaqus.

Logo utilizou-se o mesmo modelo descrito na seção de modelagem do compósito, um tubo representado no modelo axis-simétrico com uma extremidade engastada e a outra livre. Na extremidade livre temos a aplicação de uma rotação de 0.5 radianos e ao mesmo tempo foi definido um deslocamento com velocidade definindo assim o respectivo *strain rate*, além desses pontos ainda foi aplicado com a aplicação de pressão interna ao longo do corpo.

As simulações realizadas acompanham os mesmos *Strain Rates* realizados nas últimas, sendo eles:  $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$ ,  $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$  e  $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$ .

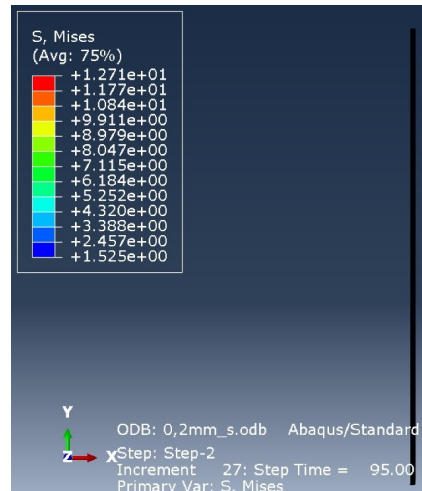
A subrotina utilizada não foi calibrada para aplicação de pressão interna, logo para contornar este problema foi retirado das simulações do modelo do compósito o deslocamento lateral da região interna do tubo que sofre a pressão aplicada, com isso foi definido que houve um deslocamento de 4.94 milímetros no total e nas simulações do XLPE foi incluído uma velocidade que simule o mesmo deslocamento durante a simulação.

Figure 26: Simulação Tubo XLPE Strain Rate  $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$



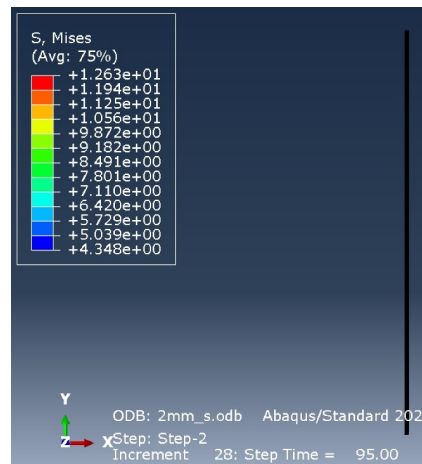
Fonte: Autoria Própria

Figure 27: Simulação Tubo XLPE Strain Rate  $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$



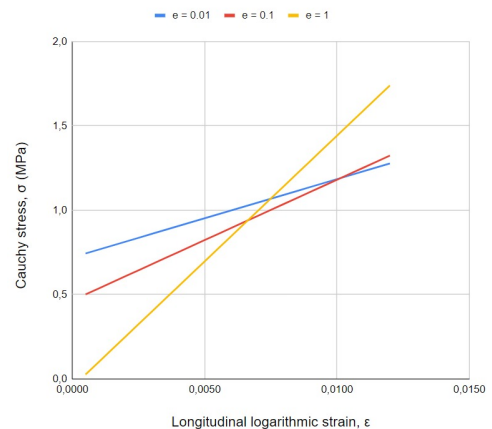
Fonte: Autoria Própria

Figure 28: Simulação Tubo XLPE Strain Rate  $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$



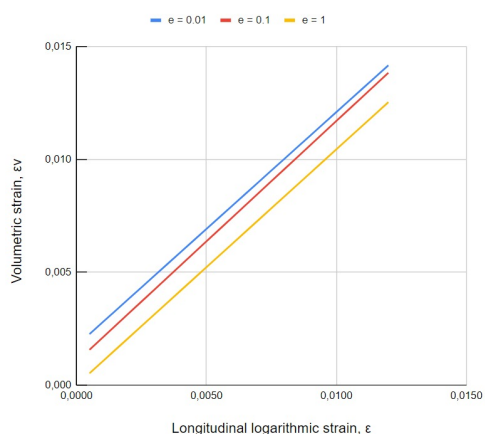
Fonte: Autoria Própria

Figure 29: Simulação Tubo XLPE Tensão x Deformação



Fonte: Autoria Própria

Figure 30: Simulação Tubo XLPE Deformação Volumétrica x Deformação



Fonte: Autoria Própria

Os gráficos apresentados ainda se encontram na região linear, ao aumentar os esforços os gráficos tendem ao comportamento observado nos gráficos da referência Johnsen et al. (2019).

Os resultados acima representados apresentam coerência com os vistos anteriormente nas referências, se compararmos com o corpo de prova da simulação criado por Johnsen et al. (2019), vemos uma grande diferença entre as tensões máximas e mínimas no corpo, isso se dá por dois principais motivos.

O primeiro é que o modelo de tubo estudado é muito maior que o da referência, para efeito de comparação o modelo de referência tem como maior dimensão 5 milímetros, enquanto o tubo estudado tem 3 metros de comprimento logo aplicando o mesmo *strain rate* espera-se uma tensão máxima muito menor que a vista nas outras simulações.

O segundo ponto importante é o efeito observado em polímeros chamado de *Strain Hardening*, ou seja, durante a simulação a eventual diminuição da seção transversal do modelo gera um aumento da rigidez do material, que por sua vez como observado neste caso aumenta sua resistência a tração.

Com os resultados obtidos pode-se comprovar a aptidão deste material em meios de esforços extremos, e se justifica a escolha do mesmo para a composição de sistemas submarinos e de captação de água marítima.

## 9. Resultados Compósito Polimérico

Para as simulações finais utilizaremos o modelo construído na seção de modelagem do compósito, porém para efeito de comparação aplicaremos outras condições de contorno. Também, traremos o mesmo corpo de prova utilizado no paper base do XLPE (Johnsen et al. (2019)), para se poder ter uma comparação mais fácil e justa entre os materiais.

Vale ressaltar que para ambos os processos foram-se utilizadas as aproximações de "bulk" para o material, logo não houveram as definições de camada. Porém, como o estudo se refere à uma análise do comportamento elástico do material, sem olhar para as questões associadas à falhas, uma das consequências principais das camadas, o processo de falha por delaminação, de todo modo não é influente.

Tanto no modelo do tubo axisimétrico, quanto no corpo de prova do paper de referência, Figura 19, o processo se referiu ao aproveitamento do construído para o XLPE, mexendo apenas dentro das configurações do ABAQUS de propriedades dos materiais, carga e afins.

Para efeito de comparação adotou-se as mesmas taxas de deformação adotadas para o XLPE, no que se refere à velocidade de tração, buscando uma igualdade nas comparações, apesar de que pela metodologia simplificada adotada para o compósito os efeitos de taxa de deformação não estão presentes.

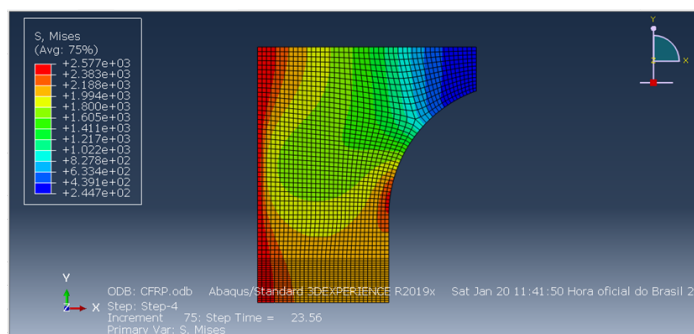
- $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$
- $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$
- $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$

### 9.1. Corpo de prova CFRP

Partindo-se de 19, realizou-se 1 ensaio, com a velocidade de tração de 0,02mm/s, ou seja um *strain rate*  $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$ , com o objetivo de estudar inicialmente o comportamento do CFRP comparado com o XLPE que sabia-se estar correto. Assim, garantido uma comparação mais controlada, uma vez que havia-se base para a qualidade das respostas do XLPE e da qualidade do objeto construído no ABAQUS.

Abaixo segue a Figura 31 o resultado, em questão de campo de tensões e deformações, do ensaio com velocidade de tração de 0,02mm/s:

Figure 31: Simulação CFRP  $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$



Fonte: Autoria Própria

Em primeira análise, observa-se uma diferença considerável no que diz respeito à distribuição das tensões no corpo, respeitando a queda na direita conforme há aumento da largura, o corpo apresenta suas máximas tensões na superfície da esquerda, provavelmente devido às restrições impostas ao material de não-deslocamento em X e Z.

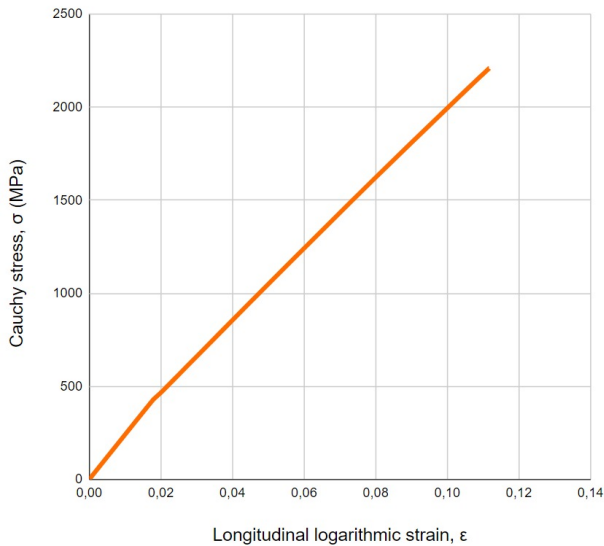
Em segunda análise, os valores apresentados também são muito maiores, mais de 100x, devido ao fato das propriedades do material mecânicas do material serem muito maiores que o XLPE, tornando assim o corpo muito rígido, levando à uma criação de altas tensões conforme ocorre a deformação do corpo.

Por último, vale ressaltar que não existe no compósito nenhuma influência de temperatura no seu ensaio, como também,

dada a ideia da simulação ser simples, contida dentro das capacidades do ABAQUS, não se tem a utilização de UMAT.

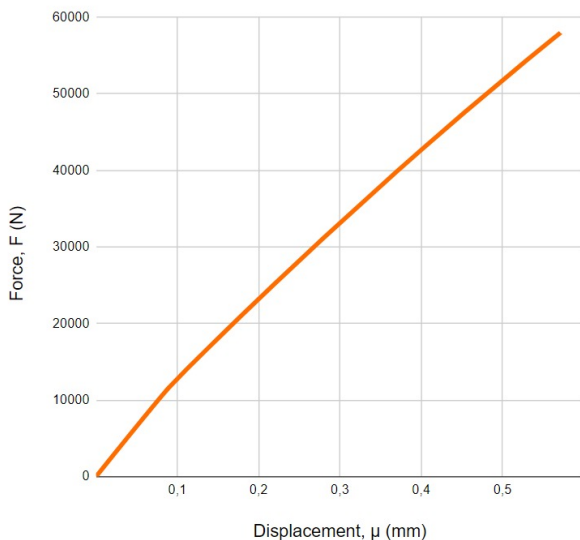
Porém, também é necessário se olhar para os gráficos para se ter uma análise mais quantitativa e precisa das diferenças dos materiais, como segue abaixo na Figura 32:

Figure 32: Simulação tubo CFRP  $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$



Fonte: Autoria Própria

Figure 33: Simulação tubo CFRP  $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$



Fonte: Autoria Própria

Vale ressaltar que são usados os mesmos pontos do ensaio em XLPE, elemento do canto inferior direito para para tensão e deformação, e elemento superior esquerdo para as forças e deslocamentos.

Como é possível observar pelo gráfico a cima, que para o ensaio em questão a resposta do compósito mal deixa de se comportar linearmente devido à baixa taxa de deformação e sua alta

rigidez, comportamento já esperado.

De modo resumido, é possível observar na Tabela 8 o quanto mais forte é o compósito, com tensões aproximadamente 160x maiores, e visualmente muito menores deformações apresentadas.

$[\text{s}^{-1}]$	$[\text{MPa}]$	$[\text{MPa}]$	$[\text{MPa}]$	$[\text{MPa}]$
$\dot{\epsilon}$	$\sigma_{Max}^{CFRP}$	$\sigma_{Min}^{CFRP}$	$\sigma_{Max}^{XLPE}$	$\sigma_{Min}^{XLPE}$
0,01	2577	244,7	15,79	3,0

Table 7: Valores máximos e mínimos das tensões do corpo de prova

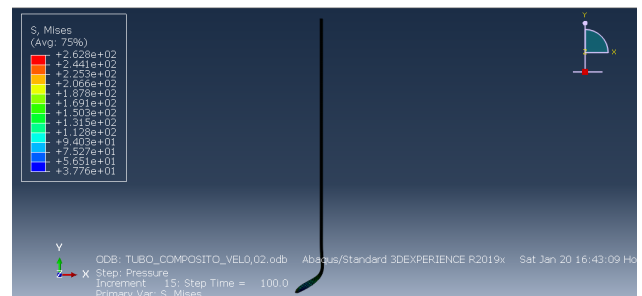
## 9.2. Tubo em CFRP

Agora, após uma verificação de que o comportamento do compósito estava coerente, parte-se para um estudo do comportamento agora no Tubo de CFRP.

Vale ressaltar, que diferente do tubo em XLPE, que a rotina não permitia a aplicação de pressão interna, nesse caso foise aplicado uma pressão que levasse à uma tensão de 50% da tensão de escoamento do material, o que deu aproximadamente 120MPa considerando a espessura e diâmetro.

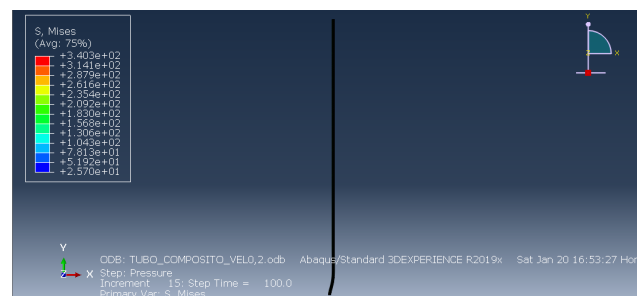
Apresentam-se abaixo os resultados das simulações:

Figure 34: Simulação tubo CFRP  $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$



Fonte: Autoria Própria

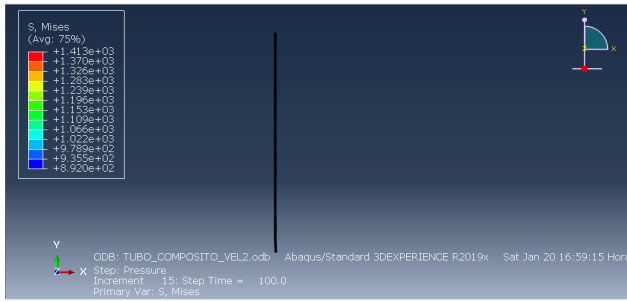
Figure 35: Simulação tubo CFRP  $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$



Fonte: Autoria Própria



Figure 36: Simulação tubo CFRP  $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$



Fonte: Autoria Própria

Devido ao tamanho do corpo após à simulação, a visualização do campo de deformações é um tanto difícil, porém de maneira resumida ela se comporta de modo praticamente constante e baixa durante a maior parcela do comprimento do corpo, apenas se alterando mais próxima da extremidade superior, face tracionada, e inferior, face engastada.

Também, com velocidade menores houve uma maior deformação aparente devida à pressão, pois há um menor efeito de aumento da resistência do polímero devido ao *strain hardening*, levando assim à uma menor resistência à deformação causada radialmente.

É possível analisar visualmente que o corpo em compósito em toda as situações deformou mais que o corpo em XLPE, o que a priori é incongruente, já que esse se apresenta mais rígido, aguentando uma maior sollicitação antes de dissipar a energia através de deformação. Por isso, o grupo imagina que exista alguma relação de limitação com a capacidade de ABAQUS de lidar com grandes deformações que acontecem nesse ensaio, levando à um comportamento atípico.

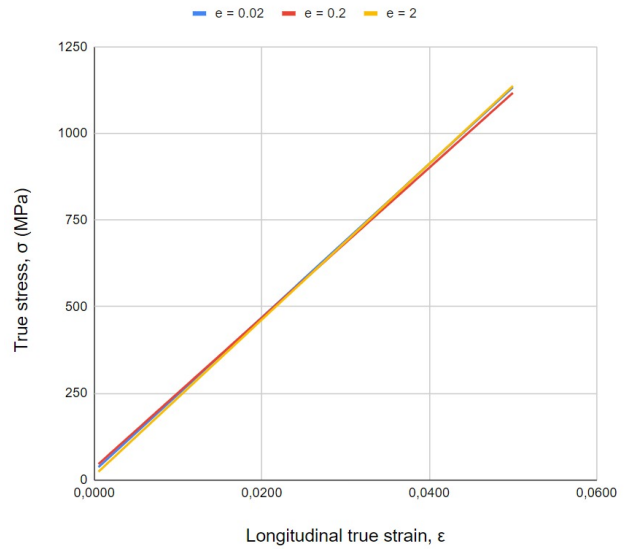
Com relação aos valores do tubo de CFRP, em relação ao tubo de XLPE seguem na tabela a seguir:

$[\text{s}^{-1}]$	$[\text{MPa}]$	$[\text{MPa}]$	$[\text{MPa}]$	$[\text{MPa}]$
$\dot{\epsilon}$	$\sigma_{Max}^{CFRP}$	$\sigma_{Min}^{CFRP}$	$\sigma_{Max}^{XLPE}$	$\sigma_{Min}^{XLPE}$
0.01	262,8	37,7	12,7	1,5
0.1	340,3	25,7	12,7	1,5
1	1413	892	12,7	4,3

Table 8: Valores máximos e mínimos das tensões do tubo

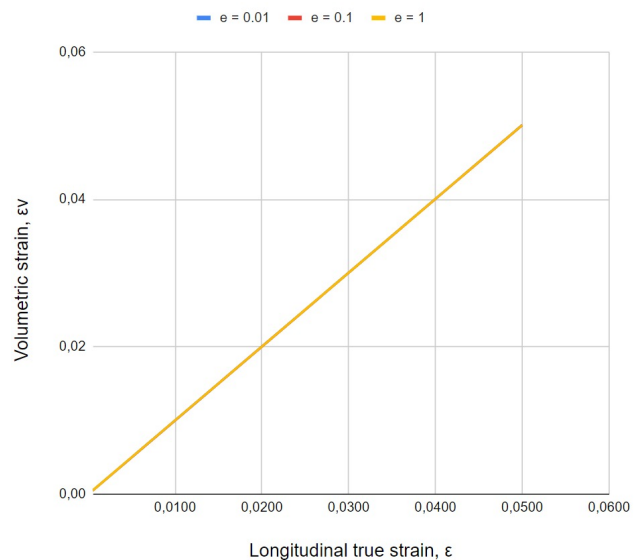
Assim como para o estudo do XLPE, trazem-se os gráfico das tensões e deformações:

Figure 37: Simulação tubo CFRP Tensão x Deformação



Fonte: Autoria Própria

Figure 38: Simulação tubo CFRP Deformação volumétrica x Deformação



Fonte: Autoria Própria

Antes da análise, justifica-se a não apresentação do gráfico de força e deslocamento pois como foi constatado anteriormente, a distorção física do elemento se encontra um tanto incoerente.

Analisando os gráficos, é possível ver a mesma resposta linear que obtivemos na simulação do corpo de prova, esperada dada à alta rigidez do material e a simulação, considerando o nosso tempo de simulação e deformação alcançada.



## 10. Conclusão

Com base nos resultados encontrados, confirma-se que o comportamento do Polietileno Reticulado (XLPE) é muito semelhante ao do Polietileno de Alta Densidade (HDPE), o que pode viabilizá-lo como um possível substituto ao material.

O Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (CFRP) apresentou grande discrepância no comportamento em comparação aos polímeros, como era esperado, e manifestou uma elevada rigidez, característica que pode não ser desejada em *pipelines* com aplicação *offshore*, como é o caso do sistema OTEC.

Ademais, observa-se que a rotina UMAT utilizada é extremamente sensível, o que restringe muito a modelagem e simulação de modelos mais complexos, demandando uma abordagem mais cautelosa na elaboração e interpretação dos resultados.

Por fim, para o prosseguimento do estudo, sugere-se buscar entender mais a fundo o processo computacional e operacional do *software* Abaqus e da sua comunicação com a linguagem de programação Fortran, estudar outras possibilidades de UMAT para o XLPE, além de obter ou desenvolver uma para materiais compósitos e para o HDPE, e realizar simulações de fadiga, flexão, cisalhamento e de falha para obter uma comparação mais abrangente dos materiais.

## References

- Charlesworth, D., Hatton, S., 2018. Carbon fiber extending options for deep-water production systems .
- Daud, R., Cunningham, L., Wang, Y., 2015. Non-linear fe modelling of cfrp-strengthened rc slabs under cyclic loading. Athens Journal of Technology & Engineering .
- Johnsen, J., Clausen, A., Grytten, F., Benallal, A., 2019. A thermo-elastic-viscoplastic constitutive model for polymers. Journal of the Mechanics and Physics of Solids .
- Johnsen, J., Grytten, F., Hopperstad, O., Clausen, A., 2017. Influence of strain rate and temperature on the mechanical behaviour of rubber-modified polypropylene and cross-linked polyethylene. Mech Mater .
- Kamiya, R.; Oya, T., 2016. Mechanical behavior of fiber/matrix interfaces in cfrp sheets subjected to plastic deformation. MATEC Web of Conferences .
- Nithesh, K., Chatterjee, D., 2016. Numerical prediction of the performance of radial inflow turbine designed for ocean thermal energy conversion system .
- Pruitt, L., 2005. Conventional and cross-linked polyethylene properties. In: Bellemans, J., Ries, M.D., Victor, J.M. (eds) Total Knee Arthroplasty .
- Van Kooten, R.L., 2020. Installation of a large diameter cold water pipeline for a 3mw onshore based otec plant .