

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DE SISTEMA DE VEDAÇÃO DE CONECTORES DE DUTOS FLEXÍVEIS  
CONSIDERANDO EFEITOS VISCOSOS

por

Mateus Dandolini Pescador

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, maio de 2021

Mateus Dandolini Pescador

ANÁLISE DE SISTEMA DE VEDAÇÃO DE CONECTORES DE DUTOS FLEXÍVEIS  
CONSIDERANDO EFEITOS VISCOSOS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Rogério José Marczak

Coorientador: Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Comissão de Avaliação:

Prof. Rogério José Marczak

Prof. Felipe Tempel Stumpf

Prof. Edson Hikaro Aseka

Porto Alegre, maio de 2021

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho de conclusão de curso aos meus pais, Valentin Pescador e Ana Rita Dandolini Pescador e ao meu irmão Artur Dandolini Pescador por terem me dado todo o suporte financeiro e emocional para me tornar o homem que sou hoje.

Dedico também à minha namorada Vitória Viega por ter sido compreensiva em todos os momentos que precisei de um tempo a mais para me dedicar aos estudos.

E por fim, quero dedicar também a todos os meus amigos, que foram fundamentais na minha caminhada até o sonhado diploma de Engenheiro Mecânico. Destaco aqui meus amigos Gabriel Orso Garcia e Guilherme Menegol Turra, que foram meus colegas de apartamento durante a maior parte da minha vida acadêmica.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a oportunidade de ter participado como bolsista de iniciação científica no Grupo de Mecânica Aplicada da UFRGS (GMAp), porque foi onde adquiri meus primeiros conhecimentos sobre o comportamento mecânico de materiais poliméricos e estes conhecimentos serviram de inspiração para o desenvolvimento deste trabalho. Nessa etapa, professores, mestrandos e doutorandos do grupo sempre estiveram à disposição para me auxiliar nas minhas dúvidas e ajudaram na consolidação dos meus conhecimentos.

Além disso, agradeço também aos meus pais que tornaram a minha vida como estudante de Engenharia Mecânica mais tranquila e me ajudaram a chegar até esse momento. A todos, o meu muito obrigado.

Dandolini Pescador, Mateus. **Análise de sistema de vedação de conectores de dutos flexíveis considerando efeitos viscosos**. 2021. 15 páginas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

## RESUMO

O sistema de vedação de conectores de dutos flexíveis é de fundamental importância para evitar a interação entre o fluido externo e o interno. Esse sistema é formado por peças de materiais metálicos e poliméricos. Sendo assim, a utilização de modelos adequados para os materiais aumenta a representatividade do modelo numérico, evitando o dimensionamento incorreto da junta aparafusada do sistema de vedação e de seu aperto, e assim mitigando possíveis falhas não previstas ou necessidade de frequentes manutenções preventivas. Uma vez que um sistema de vedação pode ficar em operação por longos períodos, estes podem estar sujeitos significativamente à efeitos mecânicos dependentes do tempo, que normalmente não são considerados em análises numéricas. Assim, neste trabalho objetiva-se estudar a influência que a inclusão desses efeitos traz no projeto de uma junta aparafusada de um sistema de vedação. Para isto, a partir de curvas experimentais de literatura, usou-se um modelo elasto-plástico insensível ao tempo e um modelo viscoplástico implementado em software de elementos finitos, para quantificar o impacto dos efeitos viscosos na resposta do conjunto mecânico, e propor soluções para manutenção de sua funcionalidade para longos períodos. Comparando-se os resultados dos dois modelos para caracterizar a barreira termoplástica do duto flexível, identificou-se no cenário de utilização do modelo viscoplástico a perda da pressão de contato entre a vedação e a barreira termoplástica, ocasionado pela relaxação da força de reação que mantinha a junta aparafusada com os apertos projetados. Já o modelo elasto-plástico, comumente utilizado no projeto desta estrutura, não identificou falha. Como proposta de solução, é demonstrado que a falha de funcionalidade pode ser resolvida com o aumento do deslocamento prescrito da junta para que mesmo com a relaxação do sistema, a pressão de contato permaneça superior a pressão hidrostática após o período de operação do conjunto. Por fim, com esta metodologia, demonstrou-se que os efeitos viscosos devem ser considerados no projeto da junta aparafusada do sistema de vedação para o material termoplástico estudado.

**PALAVRAS-CHAVE:** junta aparafusada, sistema de vedação, efeitos viscosos, dados experimentais, modelo viscoplástico.

Dandolini Pescador, Mateus. **Analysis of end fitting sealing system of flexible pipe considering viscous effects**. 2021. 15 pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

## ABSTRACT

The sealing system of flexible pipe's end fittings is responsible for avoiding the interaction between the external and the internal fluid. This system consists of parts of metallic and polymeric materials. Thus, the use of suitable models for materials increases the representativeness of the numerical model, avoiding the incorrect design of the bolted joint of the sealing system and its tightening, and thus mitigating possible unforeseen failures or the need for frequent preventive maintenance. Since a sealing system can be in operation for long periods, these can be significantly subject to time-dependent mechanical effects, which are not normally considered in numerical analysis. Therefore, this work aims to study the influence that the inclusion of these effects brings to the design of a bolted joint of a sealing system. For this, based on experimental literature curves, a time-insensitive elasto-plastic model and a viscoplastic model implemented in finite element software were used to quantify the impact of viscous effects on the response of the mechanical system and to propose solutions for maintaining its functionality for long periods. Comparing the results of the two models to characterize the thermoplastic barrier of the flexible pipe, the loss of contact pressure over time between the seal and the thermoplastic barrier was identified in the viscoplastic model scenario. The loss of contact pressure was caused by the relaxation of the force that kept all parts of the bolted joint together with the designed torque. The elasto-plastic model, commonly used in the design of this structure, did not identify a failure. As a proposed solution, it is demonstrated that the failure can be solved by increasing the prescribed displacement of the joint so that even with the relaxation of the force, the contact pressure remains above the internal hydrostatic pressure after the end of the system operational life. Finally, with this methodology, it was demonstrated that the viscous effects must be considered in the design of a bolted joint of a sealing system for the studied thermoplastic material.

**KEYWORDS:** bolted joint, sealing system, viscous effects, experimental data, viscoplastic model.

## NOMENCLATURA

### Símbolos

$E$	Módulo de elasticidade	[MPa]
$H'$	Módulo de encruamento	[MPa]
$K_v$	Módulo de elasticidade na rede viscosa	[MPa]
$K_p$	Módulo de elasticidade na rede elastoplástica	[MPa]
$f$	Razão entre contribuições elásticas	[-]
$A$	Parâmetro 1 do modelo material	[-]
$m$	Parâmetro 2 do modelo material	[-]
$n$	Parâmetro 3 do modelo material	[-]
$\tilde{q}$	Tensão desviadora equivalente uniaxial	[MPa]
$\bar{\varepsilon}^{cr}$	Deformação equivalente de fluência	[mm/mm]
$F_{parafusos}$	Força axial no parafuso	[N]
$F_{ativação}$	Força de ativação da vedação	[N]
$p_{hidrost.}$	Pressão hidrostática do fluido interno	[MPa]
$A_{endcap}$	Área de atuação de endcap	[mm <sup>2</sup> ]

### Símbolos gregos

$\mu$	Coefficiente de atrito	[-]
$\nu$	Coefficiente de poisson	[-]
$\sigma_y$	Tensão de escoamento	[MPa]

### Abreviaturas e acrômimos

ASME	American Society of Mechanical Engineers
ISO	International Organization for Standardization
MITCalc	Mechanical, Industrial and Technical Calculations
API	American Petroleum Institute
RP	Reference Point
AISC	American Institute of Steel Construction
PA12	Poliamida 12
PET	Politereftalato de etileno
PC	Policarbonato
POM	Poliacetal
HDPE	Poliétileno de alta densidade
PPS	Polisulfeto de p-fenileno
PEEK	Poli(éter-éter-cetona)
PMMA	Poli(metacrilato de metila) - Acrílico

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO .....	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	2
3.1 Juntas aparafusadas.....	2
3.2 Polímeros .....	3
3.3 Conectores de dutos flexíveis .....	5
4. METODOLOGIA.....	6
4.1 Modelo mecânico.....	7
4.2 Modelos materiais.....	9
4.3 Critério de falha do sistema de vedação .....	10
5. RESULTADOS .....	10
5.1 Pressão de contato na vedação.....	10
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	16
ANEXO .....	17
1. Convergência de malha .....	17
2. Modelo reológico do modelo viscoplástico: “ <i>two layer viscoplasticity model</i> ”.....	18



## 1. INTRODUÇÃO

Juntas aparafusadas são utilizadas na indústria com o objetivo de unir componentes de forma não permanente, possibilitando a montagem e a desmontagem desses componentes conforme necessidade de manutenção, por exemplo. Para o dimensionamento dessas juntas são considerados a geometria dos componentes e os esforços envolvidos, estes últimos podendo ser, em relação à junta aparafusada, esforços axiais, de flexão ou de cisalhamento, principalmente nas roscas dos parafusos. Devido a esse estado não tão simples de carregamento, na indústria, diversas normas são utilizadas para o correto dimensionamento, como por exemplo a ASME B1.1, 2019 e a ASME B18.2, 2012. Com essas normas, pode-se então calcular os esforços atuantes nos parafusos, nas porcas, avaliar os concentradores de tensão nos filetes das roscas e também os esforços transmitidos para as peças que são fixadas pela junta. Outra importante método comumente utilizado para esse dimensionamento é a o demonstrada por BUDYNAS-NISBETT, 2006. Esses cálculos, feitos analiticamente para o dimensionamento das juntas aparafusadas, podem ser validados ao serem comparados com resultados obtidos numericamente.

Dessa forma, para que uma junta aparafusada esteja corretamente dimensionada, ela deve cumprir as premissas de projeto, atendendo suas funcionalidades ou cumprir algum requisito de norma técnica que englobe o assunto. Uma das normas que trata de tal tópico é a ISO 898-1, 2013, que indica valores de torque de aperto dos parafusos a depender da classe do parafuso e da sua bitola. Além disso, outra metodologia utilizada para se verificar se a junta aparafusada está desempenhando corretamente seu papel com as características de projeto e que muitas vezes é utilizada na indústria é o coeficiente de abertura de junta quando esta está sujeita a um esforço trativo que tende a atuar na direção de separação da junta. Nesses casos, no momento de atuação do esforço trativo, uma força residual na junta aparafusada é necessária para que não haja separação da junta. A definição do valor dessa força residual depende do conservadorismo utilizado no projeto, quanto maior a força em relação ao esforço, mais conservadora é a abordagem. Essa metodologia é descrita na documentação do software de cálculo analítico de juntas aparafusadas MITCalc.

No caso do sistema de vedação de conectores de dutos flexíveis, foco deste trabalho, algumas juntas aparafusadas possuem materiais termoplásticos em sua composição. Na vedação, o termoplástico é submetido a uma força de aperto tal que este acaba sofrendo deformações permanentes, atuando em regime plástico. Assim, o material polimérico por si só, acaba trazendo um grau de complexidade na análise, pois este pode apresentar comportamento não linear, desde a região elástica da curva tensão-deformação. Além disso, sua resposta pode ser dependente do tempo, da temperatura (muito mais suscetíveis que os materiais metálicos) e da velocidade de aplicação de cargas, tanto na região elástica quanto na região plástica, por exemplo. Esses comportamentos associados a alta viscosidade intrínseca, não identificados em metais em condições de aplicação usual, podem levar uma junta a deixar de cumprir com alguma funcionalidade esperada ou com algum requisito de norma pré-determinado. Dessa forma, quando se projeta juntas aparafusadas de sistemas de vedação de conectores de dutos flexíveis com a atuação sobre materiais termoplásticos, normalmente a viscosidade do material não é levada em conta nas análises, apesar de ser uma característica marcante para o comportamento mecânico desses materiais.

## 2. OBJETIVO

Com este trabalho, tem-se o objetivo de estudar como a viscoplasticidade de materiais termoplásticos pode afetar a funcionalidade de uma junta aparafusada no sistema de vedação de conectores de dutos flexíveis, quando estes estiverem em funcionamento por longos

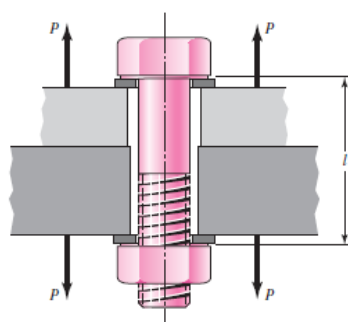
períodos de tempo. Para isso, pretende-se desenvolver um modelo mecânico representativo, incluindo a interação entre materiais termoplásticos e metálicos em uma junta aparafusada. Além disto, pretende-se incluir modelos de materiais adequados, onde serão usados dados experimentais adequados para este fim.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Juntas aparafusadas

As juntas aparafusadas são compostas de fixadores, de partes fixadas e, em casos específicos, de acessórios, conforme exemplo apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Desenho esquemático de junta aparafusada.



Normalmente, o cálculo analítico para diferentes tipos de juntas não permanentes é realizado utilizando procedimentos clássicos, como o apresentado em BUDYNAS-NISBETT, 2006, em que a metodologia é bastante aceita,

Na bibliografia, surgem opções para tentar otimizar o projeto de juntas aparafusadas, reduzindo custos e mantendo a funcionalidade. Por exemplo, em WILLIAMS et al., 2009, foi realizado uma comparação da metodologia apresentada por BUDYNAS-NISBETT, 2006 com resultados experimentais e numéricos. Neste estudo conclui-se que a teoria clássica aplicada é conservadora, principalmente em relação à porção da força que é suportada pelo parafuso. Já em relação ao modelo numérico abordado no estudo, o autor identifica que mesmo sem a consideração dos filetes de rosca, é possível caracterizar a junta adequadamente quando o resultado numérico é comparado com dados experimentais. Entretanto, os autores têm interesse apenas em demonstrar a comparação entre diferentes abordagens (analítica, numérica e experimental) no cálculo dos esforços de juntas aparafusadas compostas exclusivamente de materiais metálicos (na região elástica), e portanto não há qualquer análise que envolva não linearidade como plastificação, grandes deformações ou fenômenos dependentes do tempo e da temperatura. Abordagens mais modernas avaliam, através de modelos numéricos, a resposta de juntas aparafusadas a geometrias e condições mais complexas, como é o caso do estudo de JU; FAN; WU, 2004, onde é desenvolvido um modelo elastoplástico tridimensional de elementos finitos para representar o comportamento mecânico em uma análise dinâmica de uma junta aparafusada. Os resultados do modelo foram comparados com dados da AISC, 2016 e na maior parte dos casos analisados pelo autor, o modelo foi suficientemente representativo, mostrando a capacidade nominal dos parafusos e o modo de falha observado. Já REID; HISER, 2005, modelam juntas aparafusadas sujeitas a deslizamento. Nesse estudo três modelos são avaliados e comparados com dados experimentais e os resultados mostram que o modelo em que as arruelas são consideradas corpos deformáveis é capaz de prever o comportamento da junta com muito mais precisão em relação àqueles que utilizam corpo rígido para a representação das arruelas.

A partir destes trabalhos, observa-se que, para diferentes tipos de juntas aparafusadas, diferentes abordagens podem ser utilizadas: análise utilizando métodos analíticos ou utilizando o método dos elementos finitos, onde a escolha vai depender do nível de complexidade de análise e do tipo de carregamento.

Para casos de juntas aparafusadas com materiais que a resposta é dependente do tempo, e temperatura, também são encontradas metodologias numéricas alternativas incluindo modelos capazes de representar tais fenômenos. Em XU et al., 2020 é apresentada uma investigação do efeito viscoelástico em juntas aparafusadas de forma a prever o efeito de relaxação na junta. Para isso, o autor utilizou metodologias experimental e numérica (dependência do tempo e temperatura são considerados na análise). Com a comparação dos resultados experimentais e numéricos, concluiu-se que o modelo generalizado de Maxwell-Wiechert foi capaz de representar o comportamento de relaxação da junta em diferentes temperaturas. Neste caso, observou-se também uma considerável queda na carga resistida pela junta nos primeiros instantes, e com o aumento da temperatura, identificou-se uma diminuição considerável na sua rigidez. Além disso, na mesma linha de estudo, XIE et al., 2020 observou a influência do relaxamento do pré-aperto na durabilidade da junta através de um modelo numérico elasto-viscoplástico. Assim, primeiramente para validade do modelo, identificou-se que o erro em relação aos dados experimentais era inferior a 0,5% após 35 horas e que os resultados indicaram que após 20 anos, o pré-aperto perdido pela relaxação seria de 60% do valor inicial projetado. Estes resultados evidenciam que os efeitos de dependência do tempo no comportamento mecânico dos materiais podem ser relevantes no projeto de uma junta aparafusada que envolve esse tipo de material. Dessa forma, visto que sistemas de vedação compartilham certos requisitos e características de juntas aparafusadas, este efeito pode também se demonstrar significativo no objeto de estudo deste trabalho.

### 3.2 Polímeros

Para materiais poliméricos, o comportamento mecânico da curva de tensão-deformação pode variar, desde uma inclinação bem acentuada da região elástica e ruptura para os polímeros mais rígidos, até comportamento quase sem deformação plástica, e baixas cargas sendo suficientes para provocar uma deformação bastante não linear para os elastômeros. Assim, alguns polímeros, altamente dependentes de temperatura, taxa de deformação e ambiente que se encontram, precisam de dados experimentais para que suas propriedades e seu comportamento mecânico sejam corretamente caracterizados.

Nesse aspecto, destacam-se os efeitos viscosos que podem ser aplicados tanto à região elástica quanto à região plástica e possuem sua resposta altamente dependente do tempo. No caso de juntas aparafusadas formadas por polímeros, relaxação das tensões provocados pelos efeitos viscosos a partir de uma deformação constante pode levar a influenciar na resposta de força da junta, responsável muitas vezes por garantir o contato entre as peças. Dessa forma, como juntas aparafusadas de dutos flexíveis, objeto de estudo desse trabalho, ficam em operação por longos períodos de tempo, até 30 anos de operação, o estudo do comportamento mecânico viscoso, tanto na região elástica e plástica, respectivamente denominados viscoelasticidade e viscoplasticidade se faz necessário, principalmente o estudo desse efeito em materiais plásticos, muito utilizados em determinadas camadas de dutos flexíveis. Entretanto, em virtude da complexidade de estudo, constantemente surgem novas propostas na tentativa de representar o comportamento mecânico viscoso de polímeros. Essas propostas, de modelos materiais, tentam caracterizar o comportamento, e diferentes abordagens são utilizadas de acordo principalmente com o carregamento, material e condições do ambiente.

Alguns autores desenvolvem metodologias para caracterizar experimental e numericamente o comportamento mecânico de polímeros cristalinos, como é o caso de ZAÏRI et al., 2008, que propôs um modelo com dano elasto-viscoplástico para polímeros. O modelo se desenvolve por uma extensão do modelo de Bodner-Partom (que considera comportamento de polímero cristalinos e efeitos de dano). Já os dados experimentais para alimentação do modelo foram obtidos através de técnicas ópticas que permitiram a medição de deformação localizada e tensão verdadeira. Por fim, concluiu-se que o modelo proposto foi capaz de representar materiais que se deformam a partir de diferentes mecanismos. De maneira diferente, WANG et al., 2019 se aprofundou mais no estudo e adicionou influência viscosa também à parte elástica, analisando então o comportamento viscoelástico e viscoplástico de polímeros cristalinos. Os autores relataram que a dificuldade de modelamento do comportamento viscoso da região pós escoamento foi a motivação do desenvolvimento do trabalho. Para isso, testes uniaxiais de compressão para caracterização da relaxação e recuperação de carregamento e descarregamento foram realizados. O modelo desenvolvido foi então comparado com dois outros modelos da literatura e para os casos analisados, àquele desenvolvido no estudo demonstrou maior assertividade.

No entanto, mesmo tratando apenas de plásticos, tem-se uma variedade bem ampla de materiais e os seus respectivos comportamentos, por isso, trata-se, neste trabalho, de forma mais específica de termoplásticos, principal tipo de plástico utilizado em dutos flexíveis, e assim consegue-se restringir a área focal de estudo que é abordada nesse trabalho.

GHORBEL, 2008 apresentou um modelo viscoplástico para materiais poliméricos amorfos e semicristalinos. Os resultados obtidos através de ensaios de tração e compressão uniaxiais de PA12, PC, POM e PET mostraram a influência de cada um dos parâmetros do modelo proposto à resposta atingida. O modelo ainda apresenta bons resultados para se adequar aos dados dos ensaios monocíclicos, mas diferenças entre os dados experimentais e os numéricos são observadas para a situação de carregamento e descarregamento. O trabalho, por fim, aponta a causa da diferença na escolha dos parâmetros de regra de endurecimento e sugere a utilização de medição em três dimensões das deformações para uma maior precisão no ajuste da curva através dos parâmetros do modelo. Há também estudos que apontam a combinação de modelos como, por exemplo, o trabalho de FRANK; BROCKMAN, 2001 combinando modelos viscoelástico e viscoplástico para polímeros cristalinos e assim obtiveram uma captação da maior parte do comportamento dependente do tempo e da resposta não linear observada nesses polímeros, destacando-se: a dependência do módulo de elasticidade e do escoamento em relação à taxa e à pressão; decréscimo do módulo de elasticidade e aumento da taxa de relaxação com aumento da deformação; deformação permanente a partir do escoamento; e endurecimento a altas deformações.

REIS; MOTTA; DA COSTA MATTOS, 2015 estudaram o comportamento elasto-viscoplástico do PVDF, termoplástico bastante utilizado em barreiras poliméricas de dutos flexíveis. Para a análise realizou-se testes experimentais em diferentes taxas de deformação e propôs-se um modelo fenomenológico dividido em duas partes para parametrizar cada uma das duas regiões da curva tensão-deformação verdadeira: região inicial até escoamento e região pós escoamento. Ao fim, concluiu-se do estudo que o comportamento mecânico do PVDF é depende fortemente da taxa de deformação aplicada em testes de tração e, com isso, o modelo elasto-viscoplástico proposto foi eficaz para obter o máximo de informação a respeito do comportamento mecânico do material com o mínimo possível de testes laboratoriais, sendo necessário a definição de oito parâmetros para a completa definição do modelo.

Por fim, AYOUB et al., 2010 modelou o comportamento de grandes deformações sob carregamento e descarregamento de polímeros semicristalinos. O objetivo foi analisar a resposta do material não linear dependente do tempo. Para isso, testes monotônicos a

temperatura ambiente e deformação verdadeira constante provocando relaxação da tensão foram realizados em HDPE (*high density polyethylene*).

Ainda no âmbito de modelamento de termoplásticos, alguns autores decidem por utilizar modelos já implementados em softwares comerciais de elementos finitos e utilizam de dados experimentais para realizar a adequação da resposta mecânica a fim de caracterizar o material e verificar se o modelo é adequado para representar o tipo de resposta obtida em termoplásticos. Dentro desse tema, alguns autores utilizaram um modelo viscoplástico de duas camadas (*two-layer viscoplasticity model*) para caracterizar diferentes termoplásticos. A grande vantagem desse modelo em relação aos citados anteriormente é que não necessita de implementação já que pode ser encontrado no software comercial de elementos finitos Abaqus, inclusive esse sendo o maior argumento para sua utilização. ABDEL-WAHAB; ATAYA; SILBERSCHMIDT, 2017 realizaram ensaios de tração uniaxial e de flexão em PMMA em diferentes temperaturas e com isso concluíram que o modelo viscoplástico de duas camadas consegue representar o comportamento mecânico do acrílico com muito mais assertividade ao ser comparado com um modelo elastoplástico comum. BEREZVAI; KOSSA, 2017 realizaram a caracterização de polietileno também através do mesmo modelo para diferentes temperaturas e identificaram um comportamento viscoso considerável para todas as temperaturas ensaiadas, ressaltando que esse comportamento se torna mais evidente em temperaturas mais elevadas, como era esperado. Ainda, concluiu-se que o modelo viscoplástico apresentado é capaz de modelar adequadamente as deformações permanentes e a relaxação do material depois que o carregamento é mantido constante. Por fim, DOH; HUR; LEE, 2019 estudaram o mesmo modelo aplicado ao PPS – polisulfeto de p-fenileno – em diferentes temperaturas. Vale ressaltar que em todos os estudos os parâmetros são obtidos através de procedimentos de caracterização numérico-experimentais desenvolvidos para representar o fenômeno de interesse, de forma a garantir que a resposta mecânica obtida numericamente seja representativa.

### 3.3 Conectores de dutos flexíveis

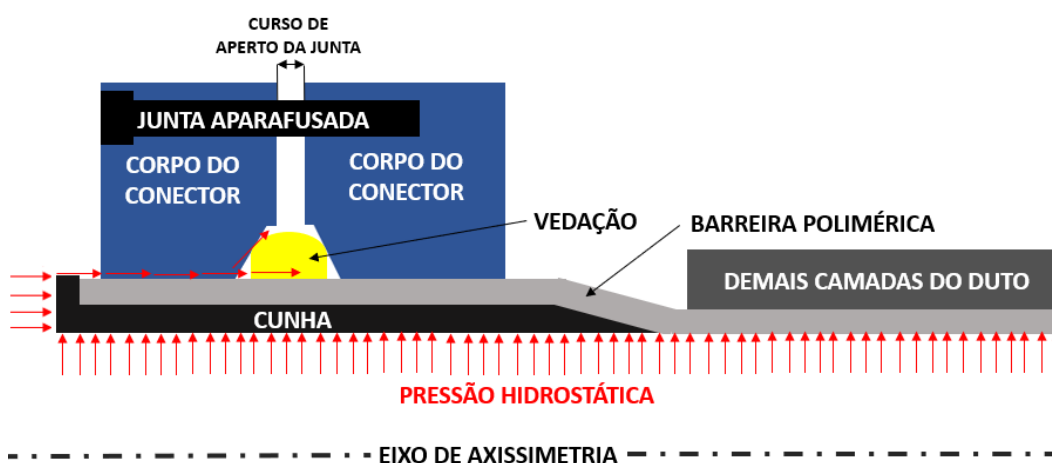
Os conectores de dutos flexíveis são os responsáveis por realizar a conexão entre dois trechos de dutos e manter a integridade operacional no transporte de diferentes tipos de fluídos, como por exemplo óleo e gás, que permanecem sob altas pressões no interior desse sistema. Para isso, é imprescindível que os conectores sejam dotados de um sistema de vedação capaz de isolar o meio externo do meio interno, e assim evitar a mistura de fluídos e um possível prejuízo ao meio ambiente. Na Figura 2, observa-se um duto flexível composto por camadas metálicas e poliméricas e um conector comercial. Já na Figura 3, observa-se uma figura esquemática de um sistema de vedação convencional encontrado na indústria.

Figura 2 – Vista em corte de conector comercial e duto flexível.



Como pode ser visto na Figura 3, a junta aparafusada é responsável por fixar as partes do conector, criando um certo enclausuramento da vedação entre as peças metálicas do corpo do conector e a barreira polimérica do duto flexível. Dessa forma, a peça de vedação fica comprimida, garantindo contato entre essas partes e impedindo que o fluido vá até a região mais externa do corpo do conector e acabe escapando para o meio externo (geralmente ar ou água marinha). Essa compressão é proporcionada por um deslocamento prescrito promovido pela junta aparafusada a partir do aperto no parafuso e esse deslocamento pode variar de zero até o fim do curso do aperto, dependendo da necessidade de compressão que a vedação deve sofrer de acordo com o projeto do sistema para que o contato continue mesmo quando o conjunto é colocado em operação. Os parâmetros, então, a serem controlados para que o projeto seja adequado são a pressão de contato entre vedação e a barreira polimérica do duto e a força de ativação para dimensionamento da junta aparafusada e da sua força de aperto.

Figura 3 – Desenho esquemático do duto flexível e conector – região do sistema de vedação.



Conforme observado na literatura, quando se incorpora peças com geometrias complexas e materiais com comportamento mecânico não linear e dependentes de temperatura e do tempo, métodos analíticos podem não ser mais viáveis para o cálculo de juntas aparafusadas e com isso, pode-se optar pelo método dos elementos finitos para obter a solução desejada para o problema. Esse método de solução é abordado, por motivos diferentes, em JU; FAN; WU, 2004 e REID; HISER, 2005 para o dimensionamento de juntas aparafusadas. Portanto, como o problema de estudo traz geometria não convencional, materiais de comportamento não linear, sujeito a grandes deformações, e deseja-se incorporar efeitos dependentes do tempo, pode-se optar por utilizar o software comercial de elementos finitos Abaqus® para representar o problema pelo método de elementos finitos.

#### 4. METODOLOGIA

Atualmente, o projeto do sistema de vedação não considera efeitos dependentes no tempo e, como mencionado anteriormente, o conjunto fica em operação por longos períodos de tempo. Dessa maneira, através da bibliografia, pode-se observar que o estudo dos efeitos viscosos para esse tipo de conjunto mecânico se faz necessário. Por isso, neste trabalho é realizada uma comparação entre um modelo clássico elastoplástico, utilizado em projeto para caracterizar o termoplástico constituinte da barreira polimérica do duto flexível e um modelo viscoplástico que inclua efeitos viscosos observados experimentalmente.

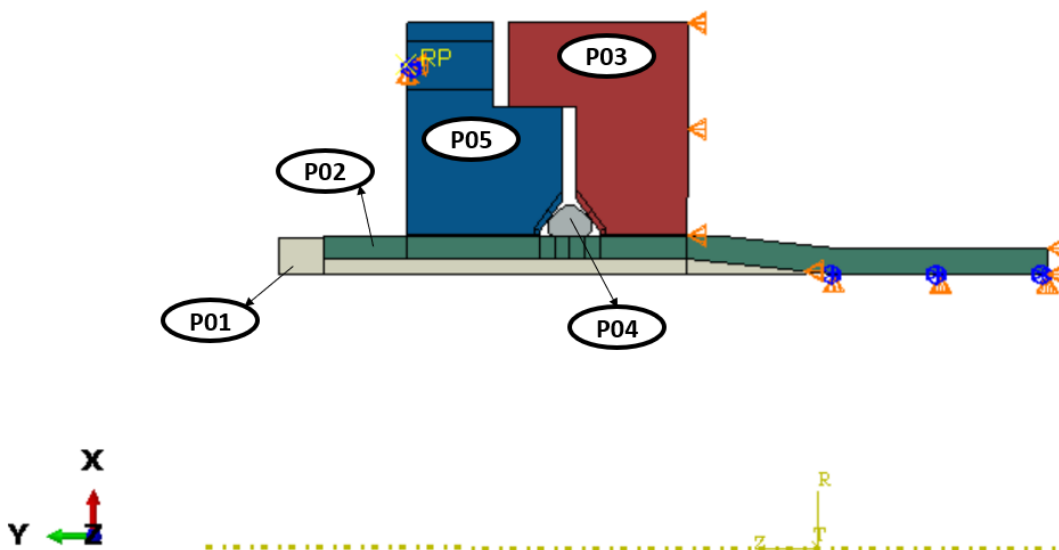
#### 4.1 Modelo mecânico

O modelo de elementos finitos axissimétrico segue o desenho esquemático do sistema de vedação e do duto flexível representados na Figura 3. Na Figura 4 identifica-se a região do conector em que o sistema de vedação está contido (região representada no modelo) e na Figura 5 tem-se a representação de suas partes e as condições de contorno conforme desenvolvido no software de elementos finitos Abaqus®.

Figura 4 – Vista isométrica do conector e do duto (ressalta-se em vermelho onde o sistema de vedação do conector está localizado globalmente no conector).



Figura 5 – Modelo axissimétrico de EF do problema.



Na Tabela 1, observa-se a lista de peças do modelo numérico.

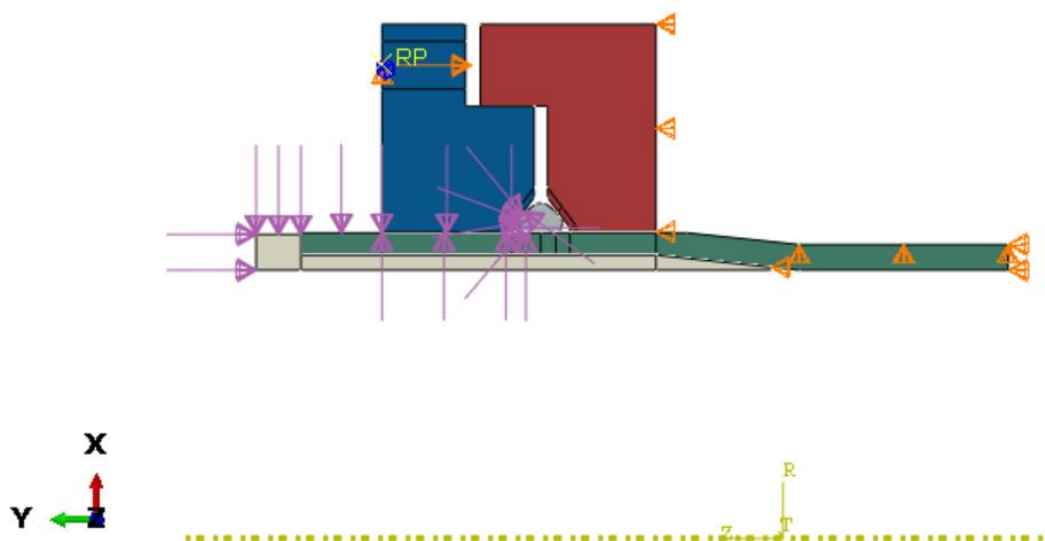
Tabela 1 – Lista de partes do modelo.

Parte	Descrição	Material
P01	Cunha	Metal
P02	Barreira termoplástica	Termoplástico
P03	Flange intermediário	Metal
P04	Vedação	Termoplástico
P05	Ativador da vedação	Metal

As condições de contorno são: apoio horizontal na barreira termoplástica – representando a continuação do duto que está fixado em algum outro trecho de duto ou conector; na cunha – inserida entre camadas do duto e por isso não se desloca longitudinalmente; e no flange intermediário – onde há batente de outras peças do conector que estão fixadas junto ao duto. Além disso, há deslocamento inicial zero no ativador da vedação (representado pelo RP – “reference point” – da Figura 5) e condição de contorno adicional na barreira termoplástica (impedir deslocamento vertical devido a inexistência no modelo das demais camadas do duto, que foram representadas esquematicamente na Figura 3).

Já o carregamento se divide em duas partes. A primeira é uma condição imposta de deslocamento prescrito (no ponto da junta aparafusada onde inicialmente tinha-se deslocamento nulo, representado pela flecha laranja na Figura 6); já a segunda, é a imposição da pressão hidrostática do fluido que flui internamente no duto flexível e só age na estrutura durante a operação, representado pelas setas lilás na Figura 6. Pela representação se tratar de um sistema de vedação interno, não há qualquer pressão externa atuando no conjunto.

Figura 6 - Modelo axissimétrico de elementos finitos do problema apresentado na etapa de operação do duto flexível.



Ainda vale ressaltar que entre as partes do modelo, utilizou-se contato tangencial e normal de forma a representar a interação entre as peças. Na Tabela 2, identifica-se o par de peças em interação e as propriedades de contato, conforme estudado por PATIL *et al.*, 2017 e PUHAN; WONG, 2019.



Tabela 2 – Propriedades de interação do modelo.

Parte 1	Parte 2	Contato 1	Contato 2
Cunha (P01)	Barreira termoplástica (P02)	Normal - Hard	Tangencial – $\mu = 0,2$
Flange intermediário (P03)	Barreira termoplástica (P02)	Normal - Hard	Tangencial – $\mu = 0,2$
Flange intermediário (P03)	Vedação (P04)	Normal - Hard	Tangencial – $\mu = 0,3$
Flange intermediário (P03)	Ativador da vedação (P05)	Normal - Hard	Tangencial – $\mu = 0,4$
Ativador da vedação (P05)	Barreira termoplástica (P02)	Normal - Hard	Tangencial – $\mu = 0,2$
Ativador da vedação (P05)	Vedação (P04)	Normal - Hard	Tangencial – $\mu = 0,3$
Vedação (P05)	Barreira termoplástica (P02)	Normal - Hard	Tangencial – $\mu = 0,2$

E por fim, no modelo axissimétrico, em termos de malha, dois elementos foram utilizados para definir as partes do modelo. Para as peças metálicas e para a vedação, em virtude das pequenas deformações, o elemento quadrilátero axissimétrico linear de 4 nós com integração reduzida foi escolhido. Já para a parte de interesse, a barreira termoplástica, onde os efeitos viscosos são considerados, optou-se pelo elemento quadrilátero axissimétrico de 8 nós com integração reduzida.

#### 4.2 Modelos materiais

Peças metálicas (P01, P03 e P05): modelo elástico linear característico de aços ( $E = 210$  GPa;  $\nu = 0,3$ ).

Peça de vedação (P04): modelo elastoplástico perfeito ( $E = 3600$  MPa;  $\nu = 0,28$ ;  $\sigma_y = 107$  MPa; – propriedades mecânicas de acordo com o estudo de GARCIA-GONZALEZ *et al.*, 2015).

Barreira termoplástica (P02): a fim de mostrar a comparação de resultados entre o modelo com e sem efeitos viscosos, utilizou-se dados experimentais obtidos por BEREZVAI; KOSSA, 2017. Para os dados do modelo elastoplástico, utilizou-se a curva do ensaio de tração para 21°C obtidos pelo autor, e se fez o ajuste dos parâmetros, e para o modelo viscoplástico, utilizou-se os parâmetros encontrados também pelo próprio autor para o polietileno ensaiado.

- Modelo elastoplástico: modelo elastoplástico bilinear clássico [Abaqus User Manual – 4.3.2 Isotropic elasto-plasticity]. Elasticidade isotrópica linear seguida de plasticidade linear. Os parâmetros desse modelo são módulo de elasticidade  $E$ , coeficiente de poisson  $\nu$ , tensão de escoamento  $\sigma_y$  e módulo de encruamento  $H'$ .
- Modelo viscoplástico (two-layer viscoplasticity model): modelo proposto por KICHENIN, 1992. Este modelo é representado analogamente pelo modelo reológico da Figura A 2 e é encontrado já implementado em software comercial.

Nesse modelo, tem-se os parâmetros de rigidez  $K_v$  (elasticidade na rede viscosa) e  $K_p$  (elasticidade na rede plástica), a Tensão de escoamento  $\sigma_y$  e Módulo de encruamento  $H'$ . O comportamento viscoso é governado pela Equação 1:

$$\frac{d}{dt} \bar{\epsilon}^{cr} = \{A\tilde{q}^n [(m + 1) \bar{\epsilon}^{cr}]^m\}_{\frac{1}{m+1}} \quad (1)$$

onde  $A$ ,  $n$ ,  $m$  e  $f$  são parâmetros de material do modelo proposto por KICHENIN, 1992 para caracterização de polímeros. Além disso,  $\tilde{q}$  é tensão desviadora equivalente uniaxial e  $\bar{\epsilon}^{cr}$ , a deformação equivalente de fluência, parcela de deformação recuperável.

Para obtenção dos parâmetros de material do modelo, BEREZVAI; KOSSA, 2017 realizou ensaios experimentais de fluência em diferentes níveis de temperatura, de forma a deformar o corpo de prova permanentemente. Com os dados experimentais em mãos, realizou-se uma minimização entre a curva numérica e a experimental e os parâmetros obtidos pelo ajuste feito por BEREZVAI; KOSSA, 2017 para o material a 21°C são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros do modelo elastoplástico e viscoplástico.

Modelo	T [°C]	E [MPa]	v	f	$\sigma_y$ [MPa]	H [MPa]	A	n	m
Elastoplástico	21	369,78	0,4	-	7,983	24,77	-	-	-
Elasto-viscoplástico	21	685,08	0,4	0,817	4,099	29,51	4,46e-4	2,5	-0,553

Com a apresentação dos modelos utilizados, cada uma das peças teve seu material e respectivo modelo definido. A Tabela 4 apresenta o modelo usado para o restante das peças.

Tabela 4 – Resumo dos modelos utilizados em cada material.

Peça	Material - Modelo
P01	Metal – Elástico linear
P03	Metal – Elástico linear
P04	Termoplástico – Elastoplástico perfeito
P05	Metal – Elástico linear

Por fim, vale ressaltar que apesar duas peças sofrerem influência de efeitos dependentes do tempo em seu comportamento mecânico, optou-se por incorporar esses efeitos apenas a barreira termoplástica como uma primeira etapa desse estudo.

#### 4.3 Critério de falha do sistema de vedação

Para que o sistema de vedação esteja adequadamente projetado, além de atender às resistências dos materiais envolvidos, há outros dois parâmetros que devem ser observados. A pressão de contato entre a vedação e a barreira termoplástica deve ser maior que a pressão hidrostática aplicada ao duto flexível nos pontos de contato e a componente axial da força de reação desse contato deve ser suportada pela junta aparafusada, ou seja, os parafusos da junta devem ter a classe, bitola e quantidade suficientes para suportar esse esforço axial. Para a junta aparafusada, geralmente utiliza-se o critério de que com a aplicação da pressão hidrostática ainda exista uma força na junta (que evite a separação) capaz de ativar a vedação conforme projeto. Isso é dado pela Equação 2:

$$F_{parafusos} = F_{ativação} + p_{hidrost.} * A_{endcap} \quad (2)$$

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Pressão de contato na vedação

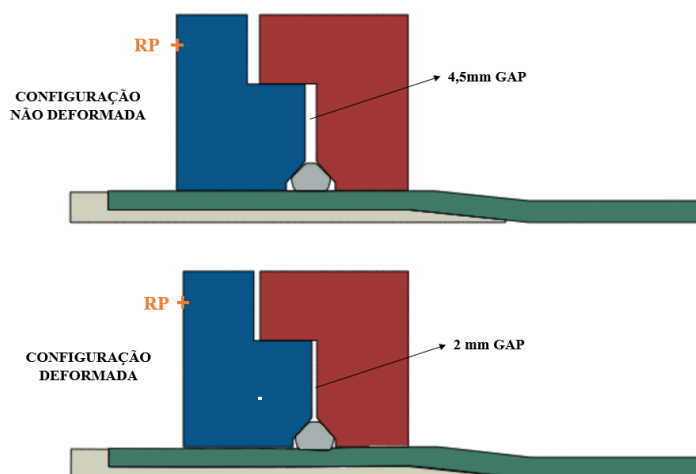
Como mencionado, a utilização dos modelos de materiais pode afetar significativamente os resultados obtidos a partir de uma simulação numérica. A seguir, observa-se as considerações realizadas e os valores utilizados para pressão interna e deslocamento de ativação.

O valor de pressão hidrostática do fluido, de 24,2 MPa, foi selecionado a partir da faixa de valores de pressão cobertos pela API 6A Specification for Wellhead and Christmas Tree

Equipment, 2011 e a ativação da vedação é um valor inicial que possa ser suficiente para atender os critérios de falha mencionados no item 4.3, mas que deve ser analisado, porque depende da geometria e do material das peças do sistema de vedação.

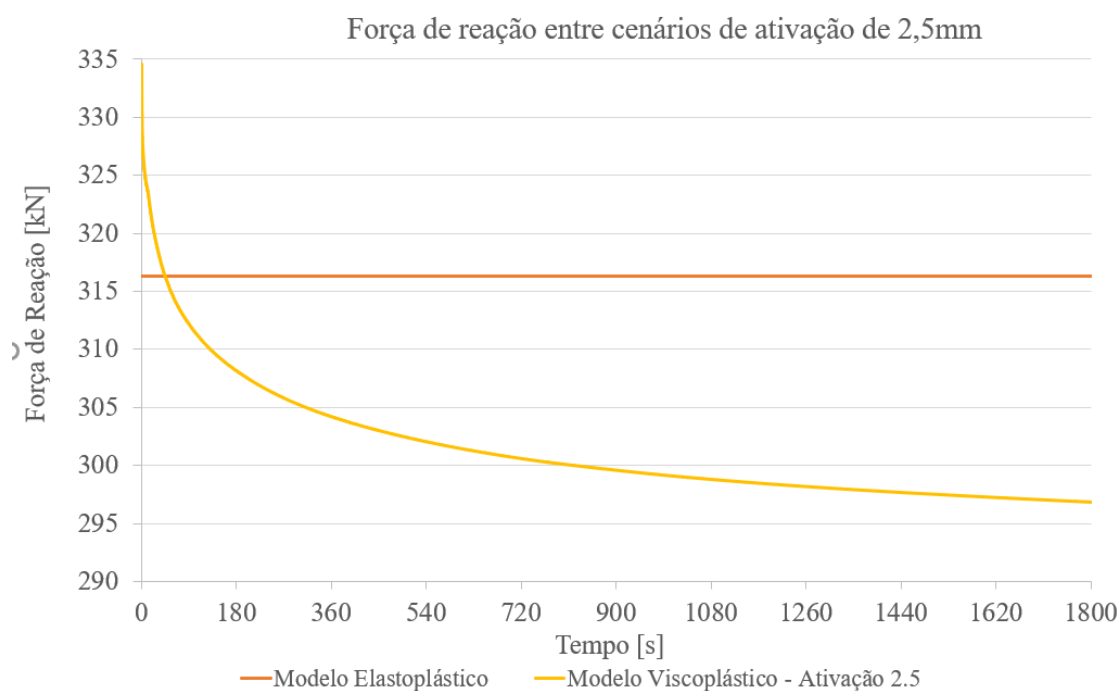
Na Figura 7, observa-se tanto a pressão hidrostática aplicada quanto a forma não deformada e deformada do sistema de vedação, indicando claramente o deslocamento prescrito inicial utilizado para a ativação da vedação. Além disso, pode-se visualizar também o RP utilizado para obtenção dos valores de força de reação que é utilizado para dimensionamento da junta aparafusada.

Figura 7 – Configuração não deformada e deformada do modelo.



Ao usar os diferentes modelos de material, aplicar as cargas, e deixar o modelo em condição de operação por um ano, a força de reação avaliada na junta aparafusada durante esse período no ponto de referência indicado teve o comportamento indicado na Figura 8.

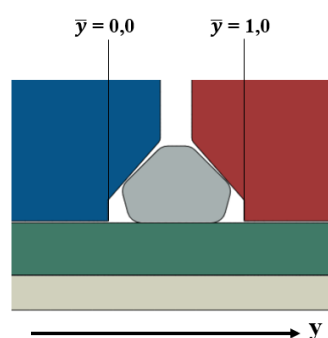
Figura 8 – Força de reação obtida a partir do modelo elastoplástico e viscoplástico.



Na situação apresentada, observa-se a influência dos efeitos viscosos do modelo viscoplástico na resposta da força de reação na junta aparafusada. No cenário em que se utiliza modelo elastoplástico para a barreira termoplástica, observa-se uma força constante ao longo de todo o período de operação (linha laranja no gráfico). Já no cenário em que o modelo elasto-viscoplástico é utilizado, observa-se a queda da força de reação (linha amarela no gráfico) com o passar do tempo e, conseqüentemente, a relaxação da força de aperto da junta no sistema de vedação com o tempo.

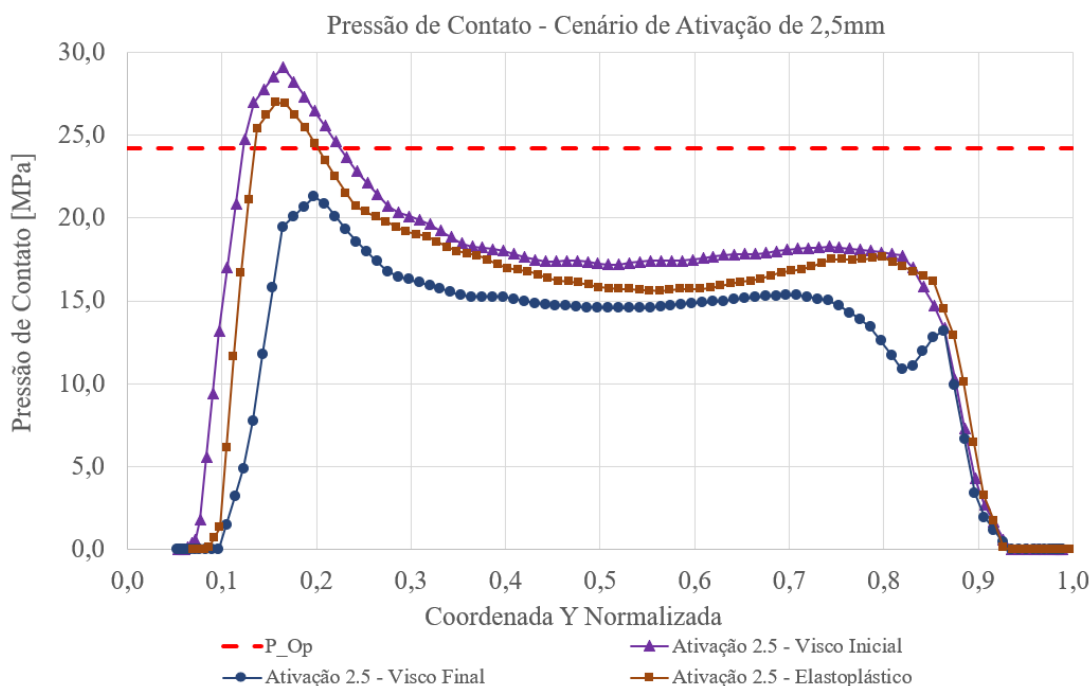
Ao abordar com mais profundidade o caso em que se utiliza o modelo elasto-viscoplástico para a barreira termoplástica, pode-se observar o comportamento da pressão de contato na região entre a vedação e a barreira termoplástica. A Figura 10 mostra o comportamento dessa pressão de contato ao longo da coordenada  $y$  normalizada, da região indicada na Figura 9.

Figura 9 – Detalhe na região da vedação, com a distância em  $y$  normalizada.



Portanto, analisando os gráficos, observa-se uma queda na força de reação, conforme Figura 8 e uma conseqüente perda de pressão de contato entre a vedação e a barreira polimérica no caso de utilização do modelo viscoplástico. No modelo elastoplástico, indicado no gráfico pela linha marrom, há manutenção na pressão de contato ao longo do tempo (Figura 10).

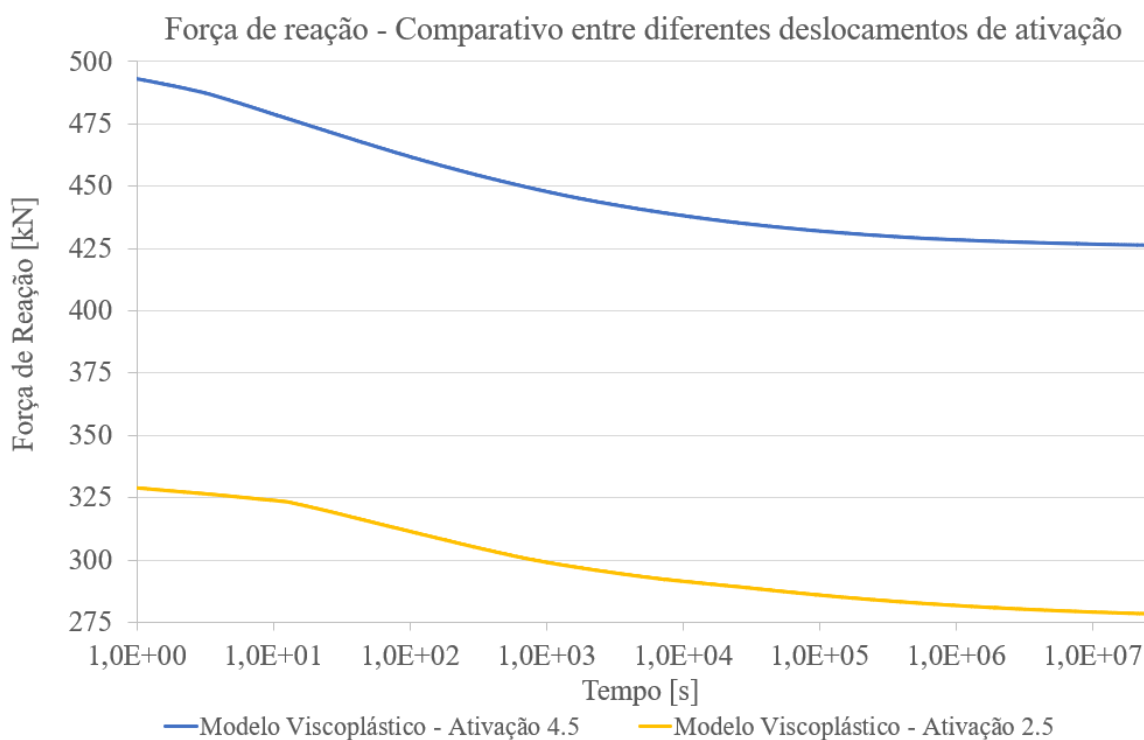
Figura 10 – Pressão de contato do modelo elasto-viscoplástico com deslocamento de 2,5mm



No gráfico, a linha roxa representa a pressão de contato inicial ao colocar o sistema em operação e a linha azul escura representa a pressão de contato no fim de dois anos de operação. Por fim, a linha vermelha representa a pressão de operação do conector, sendo este um critério de falha. Portanto, estando a linha azul escura em toda a distância axial abaixo da linha vermelha no gráfico, haveria falha na vedação em algum momento ao longo do período de operação. Assim sendo, para que a falha não aconteça, faz-se necessário aumentar o deslocamento prescrito de ativação da vedação.

Com o aumento do deslocamento prescrito na junção, pode-se alcançar forças de reação e distribuições de pressões que satisfaçam os requisitos de projeto. Na Figura 11, compara-se os dois casos em que se utiliza um modelo elasto-viscoplástico para a barreira termoplástica. A linha amarela indica o caso para a ativação de 2,5mm (exatamente como apresentado no caso anterior) e a linha azul apresenta o caso para a ativação de 4,5mm, indicando uma alteração significativa na intensidade da força de reação.

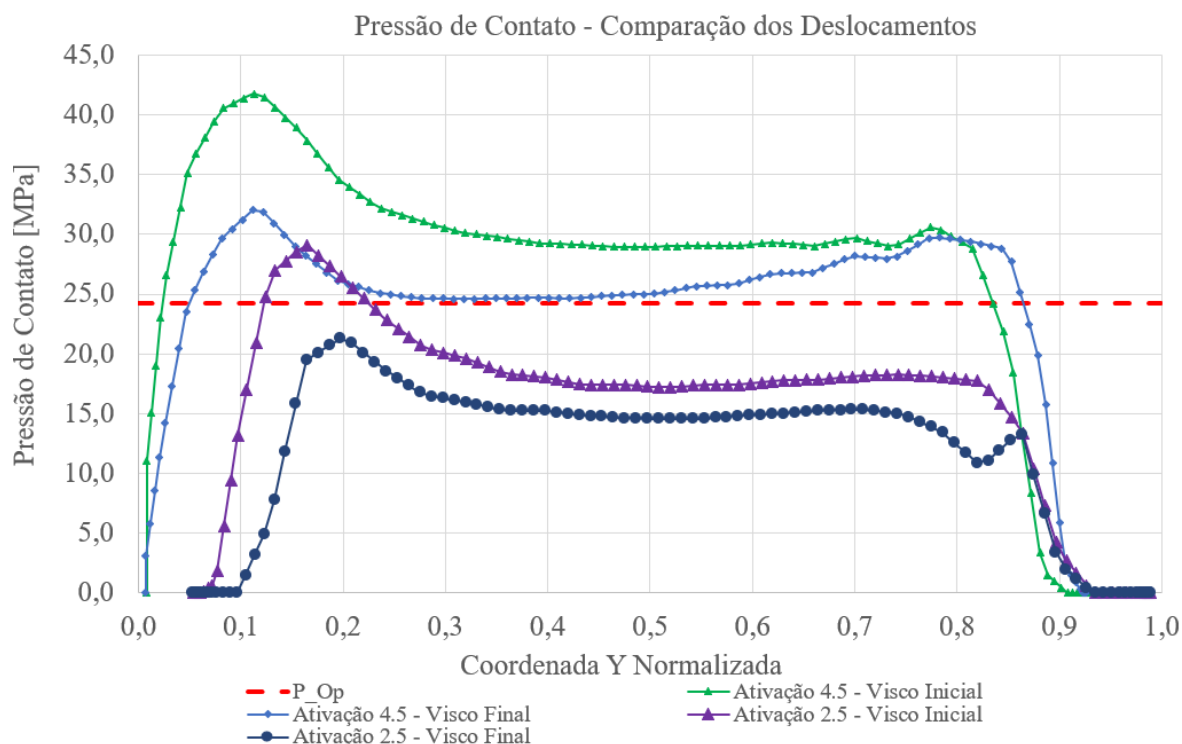
Figura 11 – Força de reação para diferentes deslocamentos de ativação da vedação.



Dessa forma, com o aumento da força de reação apresentada, tem-se também um conseqüentemente aumento na pressão de contato entre a vedação e a barreira termoplástica, conforme pode ser visualizado na Figura 12.

As linhas roxas e azul escura representam o caso apresentado na Figura 10, em que há perda na pressão de contato até um patamar de falha da vedação (pressão de operação maior do que a pressão de contato). Já as linhas verde (tempo zero de operação) e azul mais clara (tempo dois anos após início da operação) apresentam o caso em que há um aumento no deslocamento prescrito de ativação para 4,5mm e assim após os dois anos de operação a pressão de contato entre vedação e barreira termoplástica continua acima da pressão de operação, garantindo a funcionalidade da vedação. Após esses dois anos, manutenção de reaperto da junta passa a ser necessária para que as condições da junta retornem aos patamares inicialmente previstos e a junta fique em funcionalidade por pelo menos mais dois anos.

Figura 12 - Pressão de contato inicial e final dos casos elasto-viscoplástico com deslocamento prescrito de ativação de 2,5mm e 4,5mm.



É importante ressaltar que de acordo com os modelos, ambos estariam projetados corretamente se apenas o instante inicial fosse levado em consideração. No entanto, ao analisarmos os resultados em função do tempo, o caso com menor força de reação passa a indicar falha no sistema de vedação, podendo assim fazer com que o fluido interno ultrapasse os limites do conector e alcance o meio externo, trazendo prejuízos ao meio ambiente.

Pode-se então observar como a avaliação da pressão de contato e da força de reação impacta no dimensionamento da junta aparafusada para os três cenários. Recapitula-se os três cenários na Tabela 5.

Tabela 5 – Cenários e parâmetros

Cenário	Pressão hidrostática	Ativação
Elastoplástico	24,2 MPa (3500 psi)	2,5 mm
Elasto-viscoplástico 1	24,2 MPa (3500 psi)	2,5 mm
Elasto-viscoplástico 2	24,2 MPa (3500 psi)	4,5 mm

Considerando a geometria do conector apresentado, tem-se área de *endcap* é de 37840 mm<sup>2</sup>. Utilizando a expressão 2 para a força no parafuso, chega-se aos resultados observados na Tabela 6 para força no parafuso, área da seção resistente e configuração da junta para os cenários apresentados. Para os cálculos, considerou-se um coeficiente de segurança de 1,5 e uma tensão de escoamento de parafusos para classe 12.9 ( $\sigma_y = 1098 \text{ MPa}$ ).

Tabela 6 – Dados de projeto da junta aparafusada para os diferentes cenários apresentados.

<b>Caso</b>	<b>Força na junta</b>	<b>Seção resistente</b>	<b>Configuração</b>
Elastoplástico	1230 kN	1120 mm <sup>2</sup>	12xM14
Viscoplástico 1	1250 kN	1135 mm <sup>2</sup>	8xM16
Viscoplástico 2	1415 kN	1290 mm <sup>2</sup>	24xM12

Esses resultados garantem que nas condições indicadas e com a configuração de junta selecionada, a vedação se manteria ativada durante os dois primeiros anos de operação. No entanto, ressalva-se que apesar de ativada, como visto anteriormente, a falta de pressão de contato já seria suficiente para causar falha na vedação.

## 5. CONCLUSÃO

Com a metodologia de análise proposta, foi possível estudar como um sistema de vedação com material polimérico se comporta ao longo de sua operação. Os resultados demonstraram que a inclusão de fenômenos viscosos, observados experimentalmente, podem levar a resultados bem diferentes daqueles obtidos com modelos clássicos de elastoplasticidade.

Os resultados e a não consideração do efeito viscoplástico tende a gerar erros de projeto, podendo levar à falha do sistema, ou apenas sobredimensionamento, gerando gastos desnecessários a empresa que estiver projetando e com isso diminuindo a sua competitividade no mercado.

No sistema de vedação de dutos flexíveis representado, percebe-se uma considerável queda tanto na força de reação quanto na pressão de contato entre a camada termoplástica do duto flexível e a vedação. A queda nesses parâmetros devido a relaxação do termoplástico depois de ser colocado sob compressão chega a quase 20% na força de reação e mais de 30% na pressão de contato, valores esses que são fundamentais para o projeto do sistema de vedação como um todo, incluindo o da junta aparafusada. Este problema poderia ser resolvido através do aumento do deslocamento de ativação, porém traria mudança significativa de projeto. Se os valores obtidos para os diferentes cenários (Tabela 6) forem considerados para uma análise de custos, que não é o foco do trabalho, ter-se-ia um impacto gigantesco nos gastos com fixadores.

Por fim, a relevância da aplicação de modelos de material representativos é primordial para aplicações que envolvam longos períodos e materiais com efeitos viscosos. Como continuação desse trabalho, propõe-se que esta metodologia seja validada, com a obtenção de mais dados experimentais de um sistema de vedação real. Assim, extensômetros poderiam ser adicionados ao corpo de parafusos da junta aparafusada para que a força transmitida por eles pudesse ser analisada durante a operação de um conector e os resultados pudessem ser comparados com o que foi obtido nesse trabalho. Além disso, um modelo que considerasse efeitos viscosos poderia ser utilizado também para caracterizar o polímero vedante (representado pela P04 na Figura 5). E também, pode-se testar outros modelos viscoelásticos e viscoplásticos para analisar qual seria capaz de representar de forma ainda mais adequada o sistema de vedação modelado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABDEL-WAHAB, A. A.; ATAYA, S.; SILBERSCHMIDT, V. V. Temperature-dependent mechanical behaviour of PMMA: Experimental analysis and modelling. **Polymer Testing**, [s. l.], v. 58, p. 86–95, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.12.016>
- [2] AYOUB, G. *et al.* Modelling large deformation behaviour under loading-unloading of semicrystalline polymers: Application to a high density polyethylene. **International Journal of Plasticity**, [s. l.], v. 26, n. 3, p. 329–347, 2010. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2009.07.005>
- [3] BEREZVAI, S.; KOSSA, A. Characterization of a thermoplastic foam material with the two-layer viscoplastic model. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], v. 4, n. 5, p. 5749–5754, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.040>
- [4] BUDYNAS-NISBETT. Mechanical Engineering: Shigley's Mechanical Engineering Design 8th Edition. [s. l.], p. 1059, 2006.
- [5] DOH, J.; HUR, S. H.; LEE, J. Viscoplastic parameter identification of temperature-dependent mechanical behavior of modified polyphenylene oxide polymers. **Polymer Engineering and Science**, [s. l.], v. 59, n. November, p. E200–E211, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1002/pen.24910>
- [6] FRANK, G. J.; BROCKMAN, R. A. A viscoelastic-viscoplastic constitutive model for glassy polymers. **International Journal of Solids and Structures**, [s. l.], v. 38, n. 30–31, p. 5149–5164, 2001. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(00\)00339-5](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(00)00339-5)
- [7] GARCIA-GONZALEZ, D. *et al.* Low temperature effect on impact energy absorption capability of PEEK composites. **Composite Structures**, [s. l.], v. 134, n. August, p. 440–449, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.090>
- [8] GHORBEL, E. A viscoplastic constitutive model for polymeric materials. **International Journal of Plasticity**, [s. l.], v. 24, n. 11, p. 2032–2058, 2008. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2008.01.003>
- [9] JU, S. H.; FAN, C. Y.; WU, G. H. Three-dimensional finite elements of steel bolted connections. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 26, n. 3, p. 403–413, 2004. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2003.11.001>
- [10] PATIL, C. K. *et al.* Tribological Analysis of SAE 4140 Steel. [s. l.], v. 7, n. 7, p. 45–49, 2017.
- [11] PUHAN, D.; WONG, J. S. S. Properties of Polyetheretherketone (PEEK) transferred materials in a PEEK-steel contact. **Tribology International**, [s. l.], v. 135, n. March, p. 189–199, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.028>
- [12] REID, J. D.; HISER, N. R. Detailed modeling of bolted joints with slippage. **Finite Elements in Analysis and Design**, [s. l.], v. 41, n. 6, p. 547–562, 2005. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.finel.2004.10.001>
- [13] REIS, J. M. L.; MOTTA, E. P.; DA COSTA MATTOS, H. S. Elasto-viscoplastic behaviour of a polyvinylidene fluoride (PVDF) in tension. **Polymer Testing**, [s. l.], v. 46, p. 9–13, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2015.06.013>
- [14] WANG, J. *et al.* A finite strain thermodynamically-based constitutive modeling and analysis of viscoelastic-viscoplastic deformation behavior of glassy polymers. **International Journal of Plasticity**, [s. l.], v. 122, n. July, p. 135–163, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2019.06.013>
- [15] WILLIAMS, J. G. *et al.* Analysis of externally loaded bolted joints: Analytical, computational and experimental study. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, [s. l.], v. 86, n. 7, p. 420–427, 2009. Available at:



<https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2009.01.006>

[16] XIE, Y. *et al.* Influence of creep on preload relaxation of bolted composite joints: Modeling and numerical simulation. **Composite Structures**, [s. l.], v. 245, n. November 2019, p. 112332, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112332>

[17] XU, P. *et al.* The investigation of viscoelastic mechanical behaviors of bolted GLARE joints: Modeling and experiments. **International Journal of Mechanical Sciences**, [s. l.], v. 175, n. November 2019, p. 105538, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105538>

[18] ZAÏRI, F. *et al.* Modelling of the elasto-viscoplastic damage behaviour of glassy polymers. **International Journal of Plasticity**, [s. l.], v. 24, n. 6, p. 945–965, 2008. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2007.08.001>

[19] ASME B1.1 Unfinned Inch Screw Threads (UN, UNR and UNJ Thread Forms). 2019.

[20] ASME B18.2 Square, Heavy Hex and Askew Head Bolts and Hex, Heavy Hex, Hex Flange, Lobed Head and Lag Screw (Inch Series). 2012

[21] ISO 898-1 Mechanical Properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel – Part 1: Bolts, screws with specified property classes – Coarse thread and fine pitch thread. 2013.

[22] AISC Specification ASTM Standards for Structural Steel Fabrication. 2019.

[23] API 6A Specification for Wellhead and Christmas Tree Equipment. 2011.

[24] Abaqus User Manual. Version 6.6. 2006.

[25] Mechanical, Industrial and Technical Calculation – User Documentation.

## ANEXO

### 1. Convergência de malha

A fim de garantir que a malha adotada esteja suficientemente detalhada para obter os resultados mais adequados, realizou-se convergência de malha em relação pressão de contato na região de possível falha do sistema de vedação. Observa-se a convergência dos resultados na Figura A 1.

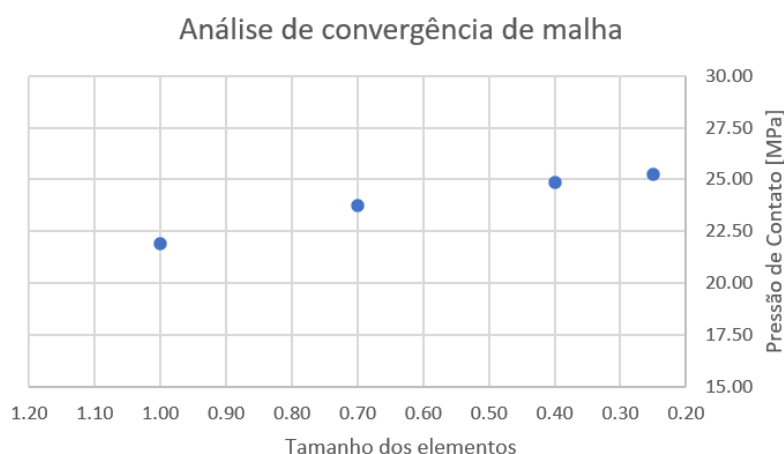


Figura A 1 – Análise de convergência de malha. Tensão de von Mises x tamanho dos elementos.

Com os dados obtidos, optou-se por utilizar a malha de elementos de tamanho 0,4 mm na região analisada. Além disso, realizou-se um estudo sobre a influência da integração reduzida

na resposta mecânica do modelo. Ao realizar a comparação entre o modelo com integração reduzida e sem integração reduzida, a diferença ficou em torno de 0,5% para a força de reação na junta aparafusada. Dessa forma, conforme já mencionado anteriormente, optou-se pelos elementos com integração reduzida.

## 2. Modelo reológico do modelo viscoplástico: “two layer viscoplasticity model”

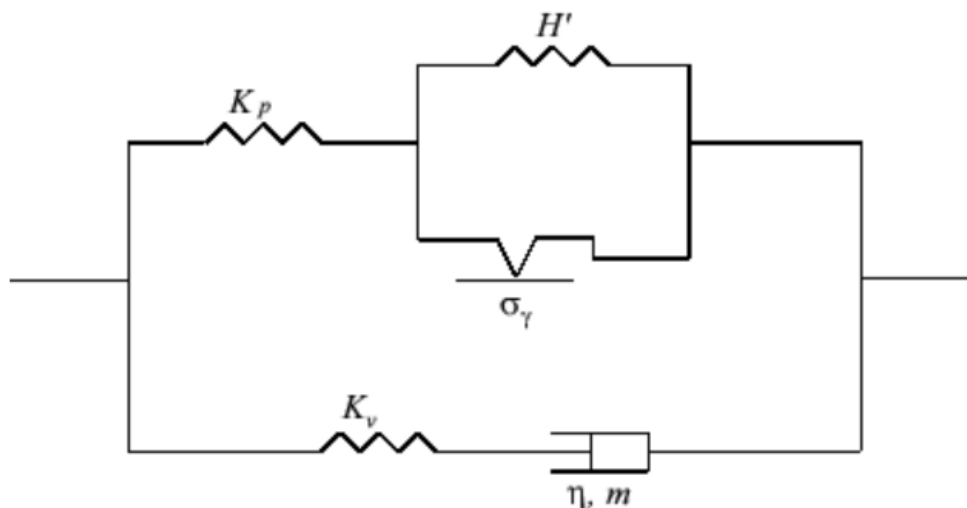


Figura A 2 – Representação reológica do modelo viscoplástico utilizado.