Gestão:

Reunião de Acompanhamento e Avaliação - RAA 2026

MODELAGEM CONSTITUTIVA VISCOELÁSTICA NÃO LINEAR DE TUBULAÇÕES DE PEAD PARA APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS

Kühl, A.[1]; Pereira, J. T.[2]; Muñoz-Rojas, P. A[3]. [1]Bolsista do PRH 12/UFPR, Curso de Engenharia Mecânica, Curitiba – PR. E-mail: andrekuhl@yahoo.com.br. [2]Docente do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR. E-mail: jucelio.tomas@ufpr.br. [3]Docente do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Santa Catarina, Joinville – SC. E-mail: pablo.munoz@udesc.br

prh anp 12/UFPR

INTRODUÇÃO/ MOTIVAÇÃO:

TUBOS PEAD PARA GÁS



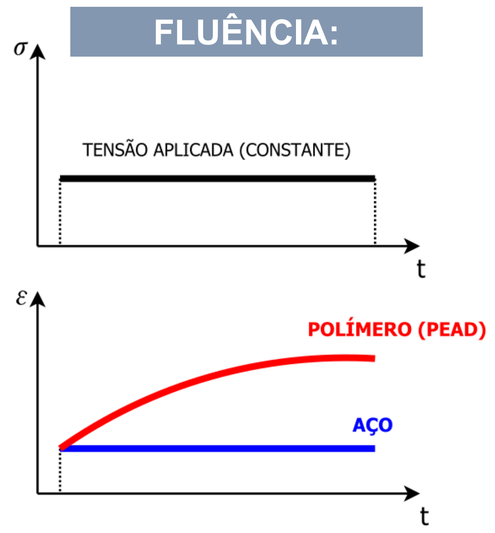
Uso

- Distribuição de gás natural
- Tubulações industriais de gás
- Abastecimento de gás doméstico

VANTAGENS DO PEAD:

1. Resistência à corrosão;
2. Resistência ao impacto;
3. Baixo peso;
4. Flexível;
5. Isolante elétrico.

FLUÊNCIA:



Ensaio de Fluência: deformação cresce com o tempo

PROBLEMÁTICA:

TEMPO
Avaliação da evolução da deformação ao longo do tempo.

NÃO LINEARIDADE
Comportamento dependente da tensão aplicada.

MÚLTIPLOS ENSAIOS
Integração simultânea de diferentes tipos de carregamento experimentais.

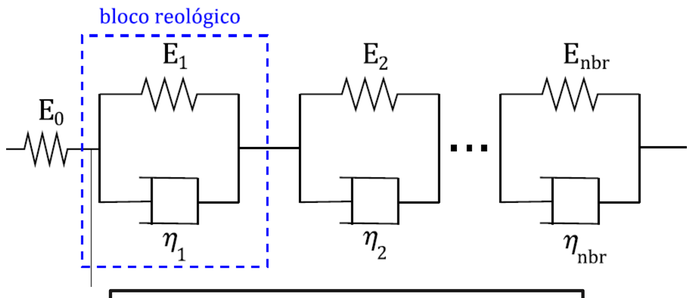
OBJETIVOS:

1. **FORMULAÇÃO** — Desenvolver o modelo não linear para o comportamento do PEAD
2. **IDENTIFICAÇÃO** — Determinar os parâmetros a partir de diferentes ensaios experimentais
3. **VALIDAÇÃO** — Avaliar a capacidade do modelo em reproduzir vários tipos de ensaios
4. **MODELO 3D** — Generalizar a formulação para o estado tridimensional de tensões
5. **SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL** — Implementar e simular no meio contínuo (elementos finitos)

OBJETIVO FINAL
Desenvolver formulação não linear para tubulações de PEAD em meio contínuo sob vários carregamentos

METODOLOGIA:

MODELO:

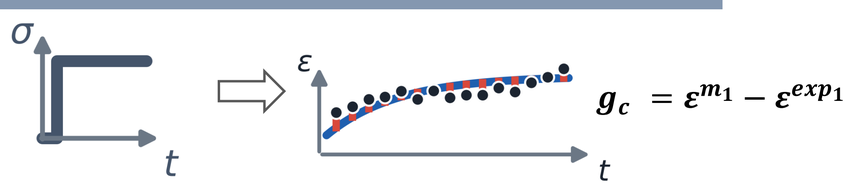


$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_c}{E_0} + \sum_{i=1}^{n_{br}} \frac{\sigma_c}{E_i}\left(1 - e^{-t/\tau_i}\right)$$

Equação Constitutiva:
Parâmetros do Material: E_0 e E_i

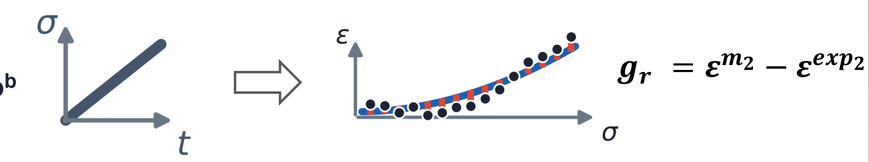
FUNÇÃO OBJETIVO[a]:

Fluência



$$g_c = \varepsilon^{m_1} - \varepsilon^{exp_1}$$

Taxa de Tensão[b]

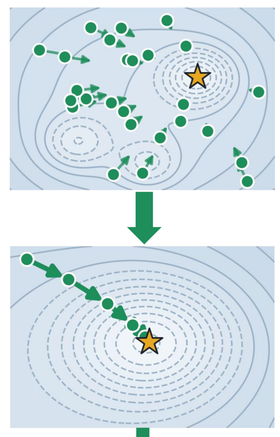


$$g_r = \varepsilon^{m_2} - \varepsilon^{exp_2}$$

$$W(\boldsymbol{\theta}) = w_c g_c + w_r g_r \Rightarrow \textit{Função Objetivo}$$

- **3 blocos** · **12 parâmetros θ** · tempos de relaxação τ pré-definidos;
- Parâmetros do material aproximados por uma equação do segundo grau do tipo $a\sigma^2 + b\sigma + c$ (não linearidade).

ALGORITMO:



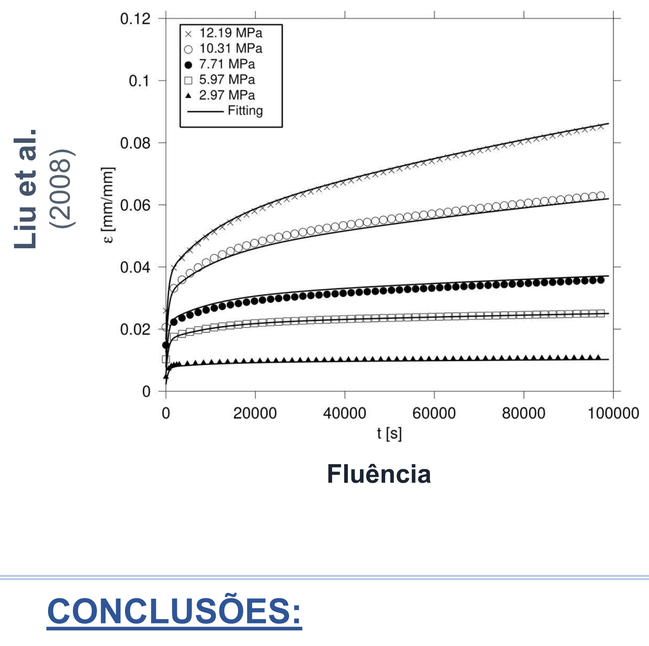
Enxame de partículas (PSO)
Busca global sem necessidade de derivada

Solução por gradiente - SQP
Refino local com gradientes analíticos

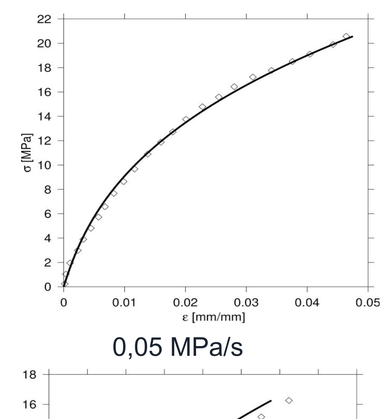
θ* único conjunto de parâmetros capaz de descrever o comportamento simultâneo de carregamentos diferentes

RESULTADOS:

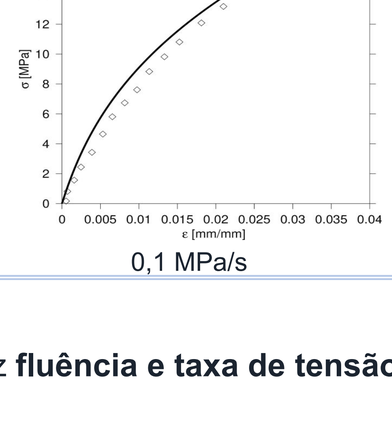
AJUSTE DO MODELO:



Fluência

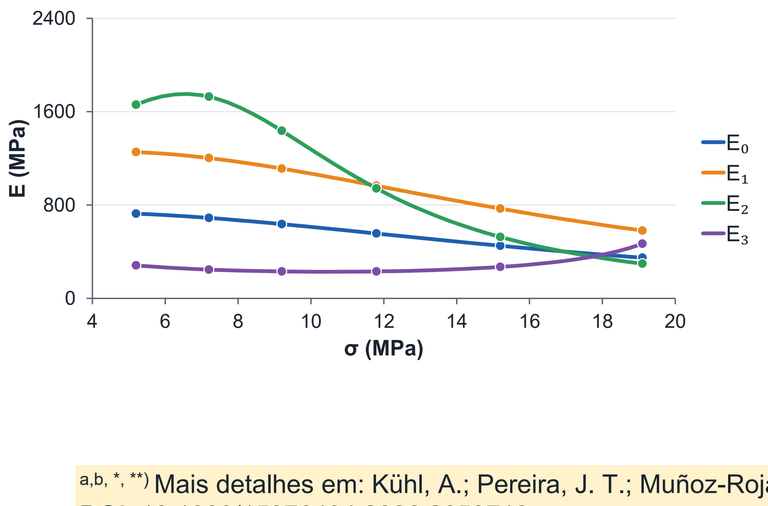


0,05 MPa/s



0,1 MPa/s

MÓDULOS E(σ) [MPa]:



DESEMPENHO:

	Liu	Zhang & Moore
R^2 global	0,997	0,910
W^*	$1{,}147\times10^{-3}$	$5{,}110\times10^{-3}$
Tempo	245 s	129 s
Redução do erro	99,99 %	99,999 %

R^2: coeficiente de determinação.
W^*: valor final da função objetivo. PSO-SQP com 4000 (Liu) e 2500 (Zhang & Moore) partículas.

[a,b, *, **] Mais detalhes em: Kühl, A.; Pereira, J. T.; Muñoz-Rojas, P. A. (2026). DOI: 10.1080/15376494.2026.2653718

CONCLUSÕES:

- Um único conjunto de parâmetros reproduz **fluência e taxa de tensão** em dois conjuntos independentes de ensaios experimentais;
- O **ajuste do modelo** em ambos os ensaios **mostrou-se preciso** e dentro de margem de erros aceitável.
- Assim, com essa formulação, é possível **prever com maior precisão o comportamento do PEAD** e, possivelmente, de tubulações, o que pode contribuir para **reduzir vazamentos, manutenções e danos ambientais relacionados**.

AGRADECIMENTOS:

Agradecemos ao apoio financeiro do Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - PRH-ANP, gerido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo n° 2025/02686-4.