

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CRISTIAN LUIZ SIMON

**MODELO TEÓRICO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE  
TUBULAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL EM PEAD PE-100**

CURITIBA

2017

CRISTIAN LUIZ SIMON

**MODELO TEÓRICO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE  
TUBULAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL EM PEAD PE-100**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, no Curso de mestrado em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração Fenômenos de Transporte e Mecânica dos Sólidos.

Orientador: Prof. Dr. Julio César de Almeida

CURITIBA

2017

---

SI594m

Simon, Cristian Luiz

Modelo teórico experimental do comportamento mecânico de tubulações de distribuição de gás natural em PEAD PE-100 / Cristian Luiz Simon. – Curitiba, 2017.  
71 f. : il. color. ; 30 cm.

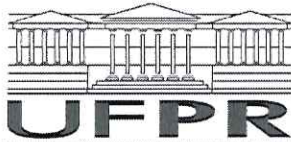
Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2017.

Orientador: Julio César de Almeida.

1. Gás natural. 2. Tubulações de polietileno de alta densidade. 3. Viscoelasticidade. 4. Redes neurais artificiais. I. Universidade Federal do Paraná. II. Almeida, Julio César de. III. Título.

CDD: 668.4234

---



## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **CRISTIAN LUIZ SIMON** intitulada: **MODELO TEÓRICO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TUBULAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL EM PEAD PE-100**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.


A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 20 de Setembro de 2017.

  
JULIO CÉZAR DE ALMEIDA  
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

  
KEY FONSECA DE LIMA  
Avaliador Externo (PUC/PR)

  
NILSON BARBIERI  
Avaliador Externo (PUC/PR)

  
ADRIANO SCHEID  
Avaliador Interno (UFPR)

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Julio César de Almeida, pela oportunidade, paciência, prontidão em todos os momentos da jornada e, principalmente, pelo incessante apoio e confiança ao longo desses dois anos de convivência.

À minha família, pelo apoio fraterno, paciência e pelas visitas inesperadas, sempre trazendo força para seguir a caminhada, em especial à minha irmã Ingrid pelas variadas sugestões e longas conversas que, com sua sabedoria, muito me ajudaram a pensar de forma diferente a estrutura do meu trabalho.

À Bruna, pela paciência, compreensão e amor, sempre me mantendo firme na trajetória e apoiando as minhas escolhas.

Aos meus amigos e colegas Guilherme e Marcus pelas conversas de corredores e visitas que me auxiliaram muito para que conseguisse atingir os objetivos do trabalho.

Ao Instituto LacTec, especialmente ao prof. Carlo Giuseppe Filippin pela oportunidade e parceria na execução dos ensaios experimentais. Aos colegas Cirino e Rodolfo pelo auxílio e parceria durante o período de execução dos testes.

À Capes, pela oportunidade e apoio financeiro.

## RESUMO

O uso do polietileno de alta densidade (PEAD) como matéria prima na fabricação de tubulações para distribuição e consumo de gás natural está em ascensão devido ao crescimento das redes de distribuição no Brasil. A melhoria nos processos de polimerização do PEAD possibilita a obtenção de compostos de melhor qualidade e por conta disso, maior resistência. Os ensaios previstos para o projeto das tubulações desconsideram, entretanto, a existência de eventuais defeitos nas paredes externas dos tubos. Dessa forma, o trabalho apresenta uma metodologia numérico-experimental baseada em ensaios de pressão destrutivos em corpos de prova (tubos de PEAD) com entalhes longitudinais e num modelo parametrizado utilizando Redes Neurais Artificiais. O respectivo modelo permite a correlação entre a pressão e tensão de ruptura, deformação e tempo até a falha, possibilitando o cálculo das deformações pelo princípio da correspondência viscoelástica mediante a aproximação das curvas obtidas experimentalmente. Os parâmetros do material são estimados a partir de dados da literatura, evidenciando a influência da taxa de deformação no comportamento viscoelástico do PEAD. Os resultados obtidos mostram que os corpos de prova com entalhes a partir de 20% da espessura apresentam ruptura frágil. A partir de 30% da espessura da parede a pressão de ruptura cai drasticamente, evidenciando com isso uma possível redução na previsão da vida útil de tubulações de PEAD.

Palavras-chave: Gás natural. Tubulações de polietileno de alta densidade. Testes de pressão.

Viscoelasticidade. Redes neurais artificiais.

## ABSTRACT

Polyethylene has been widely used as a raw material in piping lines of natural gas distribution due to the growth of network in Brazil. Production of quality HDPE polymers is improved by using new polymerization techniques producing better mechanical properties. The current tests do not forecast the effects of inherent flaws in outside pipe wall. Thus, the work presents a numerical-experimental methodology based on destructive pressure tests on test bodies (HDPE pipes) with longitudinal notches and on a parameterized model using Artificial Neural Networks. The respective model allows the correlation between pressure and rupture stress, strains and time to failure, and also the calculation of the deformations by the Correspondence Principle of viscoelasticity matching by approximation of the curves obtained experimentally. The material properties were estimated from literature data, evidencing the influence of the strain rate on the viscoelastic behavior of HDPE. The obtained results show that the specimens with notches from 20% of the wall thickness show brittle fracture. Above 30% of the wall thickness the rupture pressure drops dramatically, thus evidencing a possible decrease in the remaining lifetime of HDPE pipes.

Keywords: Natural gas. High-density polyethylene pipes. Pressure tests. Viscoelasticity. Artificial neural networks.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 1 – CARACTERÍSTICAS DOS COMPOSTOS DE POLIETILENO BIMODAL E UNIMODAL.....   | 17 |
| FIGURA 2 – DIAGRAMA DE FALHA CARACTERÍSTICO EM TUBULAÇÕES DE POLIETILENO.....   | 21 |
| FIGURA 3 – ASPECTO DO FENDILHAMENTO ( <i>CRAZING</i> ) EM UM POLÍMERO .....   | 22 |
| FIGURA 4 – IMAGEM DE MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV) DAS PONTES FIBRILARES .....  | 23 |
| FIGURA 5 – ENERGIA DE DEFORMAÇÃO VS. RAZÃO ENTRE PROFUNDIDADE DA TRINCA E ESPESSURA DO CORPO DE PROVA .....                                       | 24 |
| FIGURA 6 – SOBREPOSIÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS DA ABORDAGEM VIA <i>CRACK LAYER</i> (CL) .....                                   | 26 |
| FIGURA 7 – FLUÊNCIA SOB TENSÃO CONSTANTE – DEFORMAÇÃO COMO FUNÇÃO DO TEMPO.....   | 27 |
| FIGURA 8 – RELAXAÇÃO DE TENSÃO SOB DEFORMAÇÃO CONSTANTE.....  | 28 |
| FIGURA 9 – MODELOS CLÁSSICOS DA VISCOELASTICIDADE: A) FLUÍDO DE MAXWELL B) SÓLIDO DE KELVIN C) SÓLIDO LINEAR PADRÃO (MODELO DE KELVIN-VOIGT)..... | 28 |
| FIGURA 10 – TENSÕES CIRCUNFERENCIAIS .....  | 32 |
| FIGURA 11 – ASPECTO DA TOPOLOGIA E ARQUITETURA DE UMA REDE NEURAL ARTIFICIAL .....  | 35 |
| FIGURA 12 – DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA .....   | 38 |
| FIGURA 13 – POSICIONAMENTO DO CP NA BANCADA DE USINAGEM.....  | 39 |
| FIGURA 14 – ASPECTO ANGULAR DO CORPO DE PROVA.....  | 39 |
| FIGURA 15 – EXTENSÔMETROS HBM® 1-RY91-1,5/120 .....   | 40 |
| FIGURA 16 – MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA ENTRE TERMINAIS .....   | 41 |
| FIGURA 17 – EXTENSÔMETRO E TERMINAIS INSTALADOS NO CORPO DE PROVA .....   | 41 |
| FIGURA 18 – FLUXOGRAMA DO APARATO DE TESTES.....  | 42 |
| FIGURA 19 – CURVA AJUSTADA COM 20 NEURÔNIOS .....   | 46 |
| FIGURA 20 – PRESSÃO ATÉ A RUPTURA .....   | 49 |
| FIGURA 21– ASPECTO DE FALHA DÚCTIL .....  | 50 |
| FIGURA 22– TENSÃO CIRCUNFERENCIAL VERSUS DEFORMAÇÃO .....   | 50 |

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 23 – TAXAS DE PRESSÃO E DEFORMAÇÃO.....              | 51 |
| FIGURA 24 – CP1_060 .....                                   | 52 |
| FIGURA 25 – CP2_060 .....                                   | 53 |
| FIGURA 26 – CP1_075 .....                                   | 53 |
| FIGURA 27 – CP2_075 .....                                   | 54 |
| FIGURA 28 – CP3_075 .....                                   | 54 |
| FIGURA 29 – CP1_090 .....                                   | 55 |
| FIGURA 30 – CP1_100 .....                                   | 55 |
| FIGURA 31 – CP1_110 .....                                   | 56 |
| FIGURA 32 – CP1_120 .....                                   | 56 |
| FIGURA 33 – CP2_120 .....                                   | 57 |
| FIGURA 34 – CP_030 .....                                    | 57 |
| FIGURA 35 – CP_SEM_ENTALHE.....                             | 58 |
| FIGURA 36 – ASPECTO DA REDE NEURAL NO AMBIENTE MATLAB®..... | 59 |
| FIGURA 37 – RNA CP2_060.....                                | 59 |
| FIGURA 38 – RNA CP2_075 .....                               | 60 |
| FIGURA 39 – RNA CP1_090.....                                | 60 |
| FIGURA 40 – RNA CP1_110.....                                | 61 |
| FIGURA 41 – RNA CP1_120.....                                | 61 |
| FIGURA 42 – PRESSÃO DE RUPTURA NORMALIZADA POR ENTALHE..... | 62 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| TABELA 1 – CLASSIFICAÇÃO DO POLIETILENO DE ACORDO COM A DENSIDADE.<br>..... | 16 |
| TABELA 2 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO PEAD.....                              | 18 |
| TABELA 3 – CLASSIFICAÇÃO DO POLIETILENO PE-80 E PE-100 .....                | 19 |
| TABELA 4 – DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS.....                                  | 42 |
| TABELA 5 – EQUIPAMENTOS PARA AQUISIÇÃO DE DADOS .....                       | 43 |
| TABELA 6 – DESIGNAÇÃO E NOMENCLATURA UTILIZADA .....                        | 44 |
| TABELA 7 – PROPRIEDADES DO PEAD PE-100 .....                                | 45 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                  |   |
|------------------|---|
| $b$              | Espessura da parede do tubo                               |
| $C$              | Módulo de fluência  |
| $\delta_r$       | Deslocamento radial                                       |
| $D$              | Módulo de relaxação                                       |
| $\varepsilon$    | Deformação transversal                                    |
| $\varepsilon_0$  | Deformação unitária                                       |
| $\mathcal{E}(s)$ | Módulo de elasticidade longitudinal no domínio de Laplace |
| $E$              | Módulo de elasticidade longitudinal                       |
| $G(s)$           | Módulo de elasticidade transversal no domínio de Laplace  |
| $K(s)$           | Módulo de Bulk no domínio de Laplace                      |
| $\mathcal{L}$    | Operador Laplaciano                                       |
| $\eta$           | Viscosidade   |
| $\mathcal{N}(s)$ | Coefficiente de Poisson no domínio de Laplace             |
| $p$              | Pressão   |
| $r$              | Raio  |
| $\sigma$         | Tensão circunferencial                                    |
| $\sigma_0$       | Tensão unitária   |
| $t$              | Tempo   |
| $T$              | Temperatura   |
| $\tau$           | Tempo de relaxação  |
| $\nu$            | Coefficiente de Poisson                                   |

## SUMÁRIO

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                             | <b>11</b> |
| 1.1      | OBJETIVOS .....                                    | 13        |
| 1.2      | GERAL .....  | 13        |
| 1.3      | SECUNDÁRIOS .....                                  | 13        |
| 1.4      | ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....                      | 13        |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA .....</b>               | <b>15</b> |
| 2.1      | POLÍMEROS.....                                     | 15        |
| 2.2      | PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO PEAD .....     | 15        |
| 2.3      | TUBULAÇÕES DE PEAD .....                           | 18        |
| 2.4      | ANÁLISE DE FALHAS EM POLÍMEROS.....                | 20        |
| 2.4.1    | Análise qualitativa das deformações .....          | 21        |
| 2.4.2    | Modelos experimentais e numéricos associados ..... | 24        |
| 2.5      | VISCOELASTICIDADE .....                            | 26        |
| 2.5.1    | Fluência e relaxação de tensão .....               | 27        |
| 2.5.2    | Modelos viscoelásticos .....                       | 28        |
| 2.5.3    | Transformada de Laplace .....                      | 29        |
| 2.5.4    | Teorema da convolução .....                        | 30        |
| 2.5.5    | Princípio da superposição de Boltzmann.....        | 30        |
| 2.5.6    | Princípio da correspondência.....                  | 31        |
| 2.6      | REDES NEURAS ARTIFICIAIS .....                     | 33        |
| <b>3</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                   | <b>37</b> |
| 3.1      | PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....                    | 37        |
| 3.1.1    | Preparo dos corpos de prova.....                   | 37        |
| 3.1.2    | Instalação dos extensômetros .....                 | 39        |
| 3.1.3    | Aparato de testes.....                             | 42        |
| 3.1.4    | Aquisição de dados .....                           | 43        |
| 3.1.5    | Operação da bancada de testes.....                 | 44        |
| 3.2      | TESTES PRELIMINARES .....                          | 44        |
| 3.3      | SOLUÇÃO ANALÍTICA DO PROBLEMA VISCOELÁSTICO .....  | 45        |
| 3.4      | ANÁLISE DOS DADOS .....                            | 46        |
| 3.4.1    | Identificação dos mínimos .....                    | 46        |
| 3.4.2    | Identificação dos máximos .....                    | 47        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.4.3    | Modelo numérico em Redes Neurais Artificiais ..... | 47        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                | <b>49</b> |
| 4.1      | PRESSÃO DE RUPTURA.....                            | 49        |
| 4.2      | TAXA DE PRESSÃO E DEFORMAÇÃO .....                 | 51        |
| 4.3      | SOLUÇÃO ANALÍTICA.....                             | 52        |
| 4.4      | SOLUÇÃO NUMÉRICA .....                             | 59        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÃO.....</b>                              | <b>63</b> |
| 5.1      | MODELO EXPERIMENTAL.....                           | 63        |
| 5.2      | SOLUÇÃO ANALÍTICA.....                             | 63        |
| 5.3      | MODELO NUMÉRICO .....                              | 64        |
| 5.4      | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....              | 65        |
|          | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                            | <b>66</b> |
|          | <b>APÊNDICE 1 – CERTIFICADO PEAD PE-100.....</b>   | <b>70</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia 2024 (PDE-2024), elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética em 2015, o consumo de gás natural no Brasil deverá ultrapassar os 77 milhões de m<sup>3</sup> por dia em 2024 (BRASIL, 2015). O aumento será da ordem de 30% em relação à demanda atual, se for desconsiderado o consumo para a geração de energia elétrica. Uma parcela desse incremento é explicada pelo crescimento das redes de distribuição de GN para o consumo final em centros urbanos, enquanto a outra parte se refere ao uso em diversos segmentos da indústria, como por exemplo, na fabricação de vidro e cerâmica, refinarias e fertilizantes.

A COMPAGAS – Companhia Paranaense de Gás – é responsável por mais de 800 km de redes de distribuição de gás natural ao longo do estado do Paraná. Uma boa parcela desse total está localizada em redes subterrâneas na região central de Curitiba, atendendo principalmente a demanda comercial e residencial. Quando a demanda não exige altas pressões, o gás natural é transportado através de uma rede de distribuição composta por tubulações de polietileno de alta densidade (PEAD), conforme a designação: PE-80 se refere ao polietileno de alta densidade operando na pressão de 4 bar (0,4 MPa), enquanto que as tubulações designadas PE-100 operam a 7 bar (0,7 MPa).

Tendo em vista o crescimento das redes de distribuição com o aumento na demanda previsto pelo PDE-2024, é coerente afirmar que a atenção dos projetistas se direcione à integridade da malha visando prever qualquer intercorrência de falha que não tenha sido considerada ou prevista quando da instalação dos tubos.

A norma brasileira NBR 14462:2000 prevê a realização de uma variedade de ensaios para a caracterização dos compostos de polietileno PE-80 e PE-100 utilizados nas tubulações de transporte de gás natural. Os testes hidrostáticos de curta e de longa-duração, por exemplo, são realizados nos tubos ao final de seu processo de fabricação e, conseqüentemente antes da instalação na rede, porém desconsideram os efeitos de possíveis alterações nas propriedades materiais do PEAD, alterando assim a resposta sob um estado de tensões.

Uma alteração na forma das tubulações pode ser provocada pelo não seguimento no procedimento de instalação nas valas, cuja norma prevê que o operador responsável deve manusear os tubos adequadamente, evitando choques excessivos e o arraste por rochas ou objetos que venham a ocasionar defeitos na superfície externa das tubulações, a fim de garantir a integridade dos tubos. No entanto, a carência de dados de campo que apontem tal procedimento de instalação como um dos fatores de falhas prematuras em tubulações anseia

uma análise que integralize campos distintos, o operacional e o experimental, inserindo-se a análise de falhas como ferramenta de identificação e controle.

As propriedades mecânicas do PEAD são sensíveis a mudanças por alteração em fatores externos e intrínsecos ao material. A existência de tensões residuais, provenientes da diferença de temperatura durante a manufatura dos tubos de PEAD, a temperatura, a taxa de deformação e a frequência de carregamento são alguns parâmetros de controle que modificam a resposta do material dada uma condição pré-especificada ou em um ensaio padronizado.

A descrição de novos experimentos e modelos numéricos vem tentando, ao longo dos anos, reproduzir as condições de campo e ao mesmo tempo reduzir a duração dos ensaios. Dessa forma objetiva-se obter resultados de forma mais rápida e conseqüentemente mais barata que os testes tradicionalmente utilizados.

A contextualização e inserção do modelo experimental aos objetivos do trabalho são essenciais para que os resultados obtidos permitam a análise do comportamento mecânico da tubulação numa condição de falha catastrófica (ruptura). Para isso, é necessário descrever o modelo físico equivalente da tubulação de PEAD correspondente em um teste de pressão variável. A literatura apresenta duas maneiras para a determinação da solução do problema: a primeira através do teorema da superposição de *Boltzmann* pela aplicação de integrais hereditárias e a segunda pelo princípio da correspondência de *Alfrey*, onde se encontra uma solução das equações equivalentes da elasticidade e, por manipulação matemática utilizando-se transformadas de *Laplace*, se encontra a respectiva solução no domínio viscoelástico linear.

O polietileno de alta densidade é um polímero semicristalino, termoplástico, que apresenta propriedades mecânicas dependentes da temperatura e da taxa de deformação, importante característica dos materiais viscoelásticos. Alguns modelos da viscoelasticidade que descrevem o comportamento viscoelástico dos materiais utilizam sistemas de molas e amortecedores, representando tanto o comportamento de sólido-elástico (mola de *Kelvin*) quanto o de fluído viscoso (amortecedor de *Newton*).

Existe uma variedade de trabalhos científicos que contemplam a realização de modelos experimentais e aplicação de modelos numéricos aos problemas relacionados ao comportamento mecânico dos materiais de engenharia. Dentre alguns exemplos: a determinação do módulo de relaxação e fluência de materiais viscoelásticos, utilizando o modelo generalizado de *Maxwell*, através de ensaios de fluência e de tração (PAGLIOSA, 2004); influência do número de elementos de *Maxwell* em modelos numéricos de relaxação e fluência (CAREGLIO *et al.*, 2014); a representação, via redes neurais artificiais, do comportamento mecânico do aço inox AISI 410 em ensaios de tração para diferentes

temperaturas (PRESOTI *et al.*, 2016); a estimativa do módulo de relaxação de tensão em compostos viscoelásticos através de modelos de *Zener* fracionário considerando a influência da temperatura e pressão interpondo resultados experimentais e numéricos através da otimização via algoritmos genéticos e programação não linear (CINIELLO, 2016).

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.2 GERAL

O presente trabalho tem como objetivo principal propor uma metodologia numérico-experimental para avaliar o comportamento mecânico em tubos de PEAD-PE-100 que contém entalhes longitudinais na superfície da parede externa.

### 1.3 SECUNDÁRIOS

- Medir a pressão e as deformações no plano da parede externa do CP (corpo de prova) no transcorrer do ensaio até a ruptura do tubo.
- Obter a solução analítica pelo uso das equações constitutivas da viscoelasticidade aplicadas em cilindros de paredes finas.
- Utilizar valores da solução analítica como vetor de saídas esperadas (*target*) no algoritmo de treinamento da RNA (Rede Neural Artificial).
- Representar o comportamento mecânico do PEAD PE-100 via RNA retroalimentada com propagação de retorno do erro.
- Identificar a influência de profundidades de entalhes distintas na pressão de ruptura dos tubos.

### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O texto está organizado em 5 (cinco) capítulos distintos: o primeiro é uma introdução abrangendo aspectos relacionados à expectativa de aumento na demanda de gás natural, as características das redes de distribuição de GN, análise de falhas, modelos experimentais, viscoelasticidade e redes neurais artificiais.

O segundo capítulo trata de uma revisão da bibliografia onde são apresentados alguns dos principais trabalhos publicados nos últimos anos relacionados aos conceitos abordados na dissertação, como polímeros, tubulações de PEAD, modelos numérico-experimentais aplicados à análise de falhas, as equações e modelos da viscoelasticidade e aplicação de redes neurais em problemas de viscoelasticidade.

O terceiro capítulo detalha os materiais e a metodologia empregada para a realização dos ensaios previstos e do modelo numérico.

No quarto capítulo são apresentados os resultados dos ensaios e do modelo numérico e as discussões correspondentes.

O quinto e último capítulo apresenta as conclusões gerais, problemas encontrados no desenvolvimento do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

A revisão da bibliografia permite o leitor uma aproximação dos conceitos referentes aos materiais poliméricos e propriedades características, a análise de falhas em polímeros, aos modelos clássicos da viscoelasticidade e uma breve introdução às redes neurais artificiais.

### 2.1 POLÍMEROS

Polímeros são macromoléculas de origem natural ou sintética, compostos por unidades elementares denominadas monômeros. Um monômero, por sua vez, se refere à unidade que se repete numa cadeia polimérica (MESQUITA, 2010; CALLISTER, 2012).

Do ponto de vista químico, o polietileno é um polímero termoplástico parcialmente cristalino e flexível com as mais diversas aplicações e obtido pela polimerização do gás etileno em um sistema catalítico, geralmente do tipo *Ziegler-Natta*. Esse processo ocorre a partir da produção de monômeros insaturados através de um material ignitor e processos físicos, como calor, pressão e luz. As cadeias resultantes do processo se propagam e crescem continuamente até a terminação, que pode ocorrer pela combinação de radicais ou desproporcionamento de hidrogênios (NICHOLSON, 2012).

Entretanto sabe-se que os sistemas catalíticos empregados nos processos de polimerização são responsáveis pela diversidade de polietilenos, cada um com propriedades físico-químicas peculiares. Oliveira (2015) traz uma revisão detalhada de alguns sistemas catalíticos existentes (Catalisadores *Phillips*, *Ziegler-Natta*, metalocênicos e não-metalocênicos). De uma maneira geral, catalisadores do tipo *Ziegler-Natta* são os mais comuns na produção do polietileno de alta densidade. Estes propiciam a polimerização em temperaturas entre 20 e 80°C e pressões próximas da atmosférica. Nos trabalhos de Coutinho *et al.* (2003) e Oliveira (2015) constatou-se que os catalisadores metalocênicos proporcionam uma distribuição de peso molecular homogênea e ramificações de cadeias mais uniformes, produzindo assim polímeros de melhor qualidade.

### 2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO PEAD

O polietileno é um polímero formado por regiões cristalinas organizadas em formato lamelar com espessura de 10 a 20 nm e comprimento de 10 µm. Essas estruturas se dispõem em multicamadas entremeadas por moléculas aleatoriamente distribuídas, que caracterizam a

fase amorfa. A estrutura equivalente das camadas possui simetria circular e é denominada esferulito (CALLISTER, 2012).

A organização das cadeias poliméricas pode diferir entre compostos com a mesma composição química, como é o caso do polietileno de baixa densidade (PEBD - estrutura ramificada) e o de alta densidade (PEAD - estrutura linear) (WARD, SWEENEY, 2004; NICHOLSON, 2012). A classificação dos polietilenos de acordo com a densidade, segundo a norma ASTM D-4976, é reproduzida na Tabela 1. A classe 4 também é conhecida por polietileno de ultra-alto peso molecular (PEUAPM).

TABELA 1 – CLASSIFICAÇÃO DO POLIETILENO DE ACORDO COM A DENSIDADE.

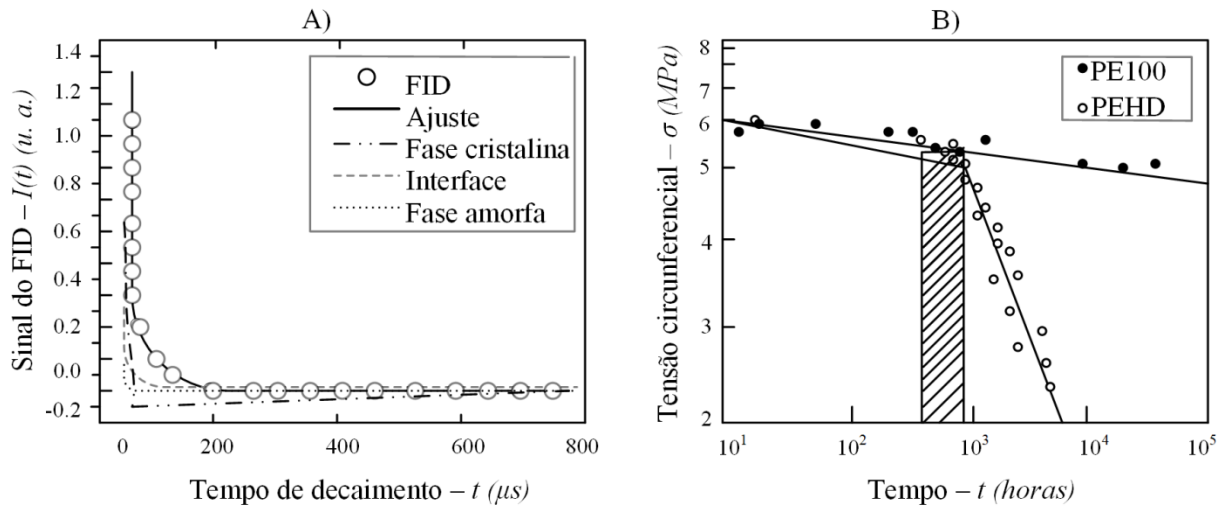
| Classe   | Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) | Denominação – Sigla                   |
|----------|--------------------------------|---------------------------------------|
| Classe 1 | 0,910 a 0,925                  | Polietileno de Baixa Densidade – PEBD |
| Classe 2 | > 0,925 a 0,940                | Polietileno de Média Densidade – PEMD |
| Classe 3 | > 0,940 a 0,960                | Polietileno de Alta Densidade – PEAD  |
| Classe 4 | > 0,960                        | Polietileno de Alta Densidade – PEAD  |

FONTE : Adaptado de ASTM D-4976.

A identificação das fases cristalina e amorfa é feita através da realização de ensaios específicos, por exemplo, a Espectrografia Fotoacústica no Infravermelho (IR), a Análise Térmica Diferencial (DTA) e a Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC). Caso exista interesse do leitor, o detalhamento desses ensaios pode ser encontrado em Canevarolo (2004).

Entretanto, Sun, Wenzel e Adams (2014), sugeriram que a morfologia do polietileno é mais complexa, necessitando assim de uma descrição precisa que contemple a existência de uma interface entre as fases cristalina e amorfa. A identificação dessa interface se dá através da medição do Decaimento por Indução Livre (*Free induction decay* - FID). O ajuste dos dados experimentais para cada fase foi obtido pela relação de funções de *Abragam* (fase cristalina), *Weibull* (interface) e exponencial (amorfa). A Figura 1 apresenta alguns resultados experimentais.

FIGURA 1 – CARACTERÍSTICAS DOS COMPOSTOS DE POLIETILENO BIMODAL E UNIMODAL



FONTE: Adaptado de SUN *et al.* (2014).

LEGENDA: A) Curva da intensidade do sinal versus tempo no ensaio FID.

B) Curva de regressão para o PE100 e PEHD.

A partir dos dados representados na Figura 1-A, Sun *et al.* (2014) mostraram que é possível medir o grau de cristalinidade através dos valores da intensidade do sinal em cada uma das fases no instante  $t$  igual a zero. A Figura 1-B apresenta a diferença entre os modos de falha entre os dois compostos de PEAD representados: o PE-100 apresenta falha dúctil no ensaio hidrostático com a tensão em torno de 5,5 MPa, já o composto denominado PEHD apresenta falha frágil na mesma tensão na região de transição, conforme área destacada do gráfico da Figura 1-B.

Os efeitos das mudanças morfológicas dos compostos poliméricos, de acordo com Sun *et al.* (2014), revelam a interdependência entre a densidade do entrelaçamento molecular (do inglês *tie molecules*), a mobilidade interfásica e a espessura das lamelas cristalinas com o comportamento mecânico do polietileno de alta densidade.

O comportamento mecânico do PEAD é oriundo de sua estrutura linear e da alta cristalinidade (acima de 90%). A orientação, a linearidade, o alinhamento e o empacotamento das cadeias ocorrem de forma mais eficiente resultando em forças intermoleculares (*Van Der Waals*) mais intensas. A temperatura de fusão cristalina ( $T_m$ ) é um exemplo de propriedade dependente do grau de cristalinidade, ou seja, a presença de grandes regiões cristalinas exige uma temperatura maior para a fusão do respectivo composto (COUTINHO *et al.*, 2003).

Em ensaios hidrostáticos de longa duração utilizados para determinar a vida útil de tubulações de PEAD, por exemplo, os valores médios da tensão de ruptura a uma temperatura de 20°C variam entre 12,5 e 15 MPa (ISO, 2012). A Tabela 2 apresenta algumas das

principais propriedades mecânicas de dois tipos distintos de PEAD, cada um diferindo do outro conforme a disposição das cadeias poliméricas.

TABELA 2 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO PEAD.

| Propriedades  | PEAD Altamente Linear | PEAD com baixo grau de ramificação |
|---|-----------------------|------------------------------------|
| Densidade, g/cm <sup>3</sup>                        | 0,962 – 0,968         | 0,950 – 0,960                      |
| Tensão de escoamento, MPa                           | 28 – 40               | 25 – 35                            |
| Módulo de elasticidade longitudinal, MPa            | 900 – 1200            | 800 – 900                          |
| Resistência à tração, MPa                           | 25 – 45               | 20 – 40                            |
| Módulo de elasticidade transversal, MPa             |                       | 1200 a 2500                        |
| Temperatura de fusão cristalina T <sub>m</sub> , °C |                       | > 130                              |

FONTE : Adaptado de COUTINHO *et al.* (2003).

### 2.3 TUBULAÇÕES DE PEAD

As primeiras tubulações plásticas que se têm notícia datam dos anos 1930, com um crescimento expressivo na década de 1950, quando os materiais poliméricos substituíram tubulações de argila, cobre, amianto, ferro fundido e concreto nas mais variadas aplicações (KRISHNASWAMY, 2005).

Os sistemas de distribuição de gás natural em polietileno foram alavancados pelo início da produção em série de tubos PE 32, PE 40 e PE 63 em 1965. A segunda geração se denomina PE 80. Essa classificação diz respeito à resistência mínima requerida da tubulação operando a 20°C durante uma expectativa de vida de 50 anos. Utilizando o mesmo critério de classificação, a terceira geração dos polietilenos (PE 100, PE 100-RC) podem resistir a mais de 100 anos, desde que mantidas as mesmas condições especificadas, como mostraram os resultados de experimentos realizados em ensaios de fluência por Nezbedova *et al.* (2013) e Chudnovsky (2014); e ensaios de fadiga por Frank e Pinter (2014).

A produção de tubulações de polietileno de alta densidade se dá por um processo denominado extrusão, onde a matéria-prima é fundida e pressionada através de um molde. Esse processo é viável em polímeros termoplásticos, pois estes se comportam como fluido

viscoso acima de uma temperatura característica (temperatura de fusão cristalina -  $T_m$ ). O produto final é resfriado gradativamente e enrolado em bobinas nos DE (diâmetro externo) DE 20 até DE 125, ou condicionado em barras de comprimento nominal de 12 m nos DE 125 até DE 315. Tanto a velocidade de extrusão quanto a taxa de resfriamento devem ser controladas para se evitarem tensões residuais e defeitos no acabamento (KALPAKJIAN; SHMID, 2009).

O projeto de tubulações de polietileno no Brasil para o uso em redes de distribuição de GN está condicionado a testes de curta e longa duração de pressão hidrostática baseados em normas internacionais, como a ISO/DIS 12162:2009. A norma brasileira NBR 14462:2000, que trata dos requisitos necessários para instalação de sistemas de distribuição de gás combustível para redes enterradas, propõe condições mínimas exigíveis para tubos de polietileno de alta densidade nas denominações PE 80 e PE 100.

A classificação dos compostos, de acordo com a NBR 14462:2000, é feita através da determinação da tensão hidrostática circunferencial de longa duração (LTHS – *long-term hydrostatic stress*). Segundo a norma ISO/DIS 12162, essa classificação se dá pela resistência mínima exigida (*Minimum required strength* – MRS), ou seja, a tensão circunferencial durante 50 anos na temperatura de 20°C definida pelo “Método de Extrapolação Padrão ISO TR 9080:2012”, com 97,5% do limite inferior de confiança. A Tabela 3 mostra os limites de tensão de acordo com a norma brasileira NBR 14462:2000.

TABELA 3 – CLASSIFICAÇÃO DO POLIETILENO PE-80 E PE-100

| Composto | MRS    | Limite inferior de confiança (LCL)                 |
|----------|--------|--|
| PE 80    | 8 MPa  | $8,0 \text{ MPa} \leq \text{LCL} < 10 \text{ MPa}$ |
| PE 100   | 10 MPa | $\text{LCL} \geq 10 \text{ MPa}$                   |

FONTE: NBR 14462:2000.

O modelo proposto pela norma ISO TR 9080:2012 para a extrapolação dos dados e estimativa de vida útil de uma tubulação contempla a aquisição de uma quantidade mínima de dados coletados, como a tensão circunferencial  $\sigma$  em MPa, e tempo até a falha  $t$  em horas. A equação 2.1 corresponde à representação dos dados experimentais.

$$\log_{10} t = c_1 + \frac{c_2}{T} + c_3 \cdot \log_{10}(\sigma) + \frac{c_4 \cdot \log_{10}(\sigma)}{T} + e \quad (2.1)$$

O tempo de duração do ensaio é representado por  $t$  e a temperatura por  $T$ . As constantes ( $c_1, c_2, c_3, c_4$ ) são os parâmetros que dependem do tipo de análise de dados, ou seja, para dados colhidos a uma mesma temperatura, o número de parâmetros reduz-se a dois. A variável erro ( $e$ ), de distribuição Gaussiana, possui média nula e variância constante. A presença de uma região de transição (ponto de inflexão) na curva de regressão resultante é fundamental quando se pretende estimar a vida útil de tubulações de PEAD, servindo como ferramenta para qualificar o modo de falha correspondente da tubulação a uma dada tensão e determinado tempo. Esta análise tipifica a falha predominante na tubulação do ensaio atribuindo uma faixa de valores de tensão correspondente ao aspecto da curva.

Os resultados das curvas de regressão são obtidos após a realização de diversos ensaios que demandam longos períodos de tempo (até 10.000 horas). Os resultados dos testes de curta-duração (165 horas) envolvem um aumento na temperatura e na pressão, dessa forma são considerados inadequados para representar a vida útil de tubulações - seja pela mudança no comportamento mecânico do material quanto pelo limite temporal na extrapolação dos resultados. Mesmo assim, esses testes são utilizados como ferramenta de classificação e de controle de qualidade em processos industriais (PERES, 2005).

## 2.4 ANÁLISE DE FALHAS EM POLÍMEROS

A análise de falhas é um trabalho multidisciplinar que combina diferentes campos de estudo da engenharia como fractografia, metalografia, microscopia, química, mecânica, projeto, ensaios não destrutivos, etc. Os principais objetivos são entender o porquê de uma falha ter ocorrido e sugerir modelos que reduzam ou impeçam a ocorrência no futuro (ZERBST; KLINGER; CLEGG, 2015).

A realização de ensaios padronizados se tornou inviável devido à melhoria na qualidade dos materiais envolvidos e conseqüentemente um incremento no tempo e custo desses ensaios (ZHAO; CHOI; CHUDNOVSKY, 2013). Por isso, o desenvolvimento de novas técnicas experimentais possibilitou a redução na duração dos ensaios, como é o caso do ensaio de fadiga denominado CRB (*Cracked round bar*) - utilizado na classificação de compostos de polietileno de alta resistência como o composto PE-100-RC (FRANK; PINTER, 2014).

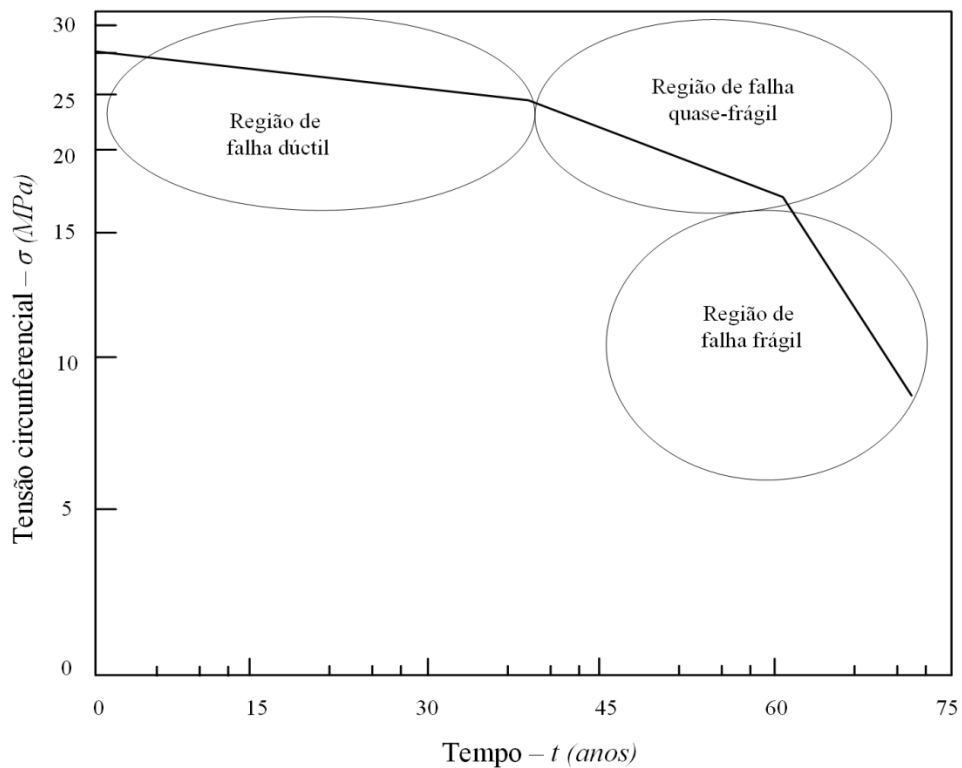
### 2.4.1 Análise qualitativa das deformações

Um metal, como o aço, possui rede cristalina, planos de discordância e contornos de grãos definidos. Dessa forma, o comportamento mecânico do ponto de vista da mecânica do contínuo é a abordagem preponderante, ou seja, os efeitos em escala atômica não alteram significativamente a resposta do material sob um estado de tensões.

Já o polímero, originalmente, é um emaranhado de macromoléculas com ligações primárias e secundárias, cujo efeito sobre o comportamento mecânico não deve ser desconsiderado. Diferentemente dos metais, existem várias abordagens do ponto de vista micro e macroscópico do comportamento mecânico dos polímeros, no entanto, é justificável para a engenharia a visualização do polímero como um meio contínuo, tendo em vista a abordagem dos fenômenos relacionados aos mecanismos de falha.

A Figura 2 apresenta um diagrama característico dos diferentes tipos de falhas em uma tubulação polimérica.

FIGURA 2 – DIAGRAMA DE FALHA CARACTERÍSTICO EM TUBULAÇÕES DE POLIETILENO

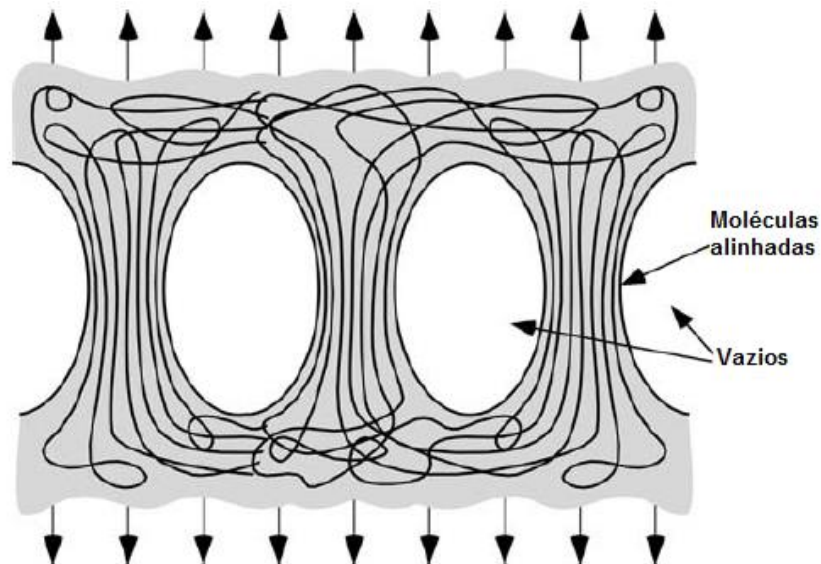


FONTE: Modificado de Lang *et al.* (2005).

A região A, ou de falha dúctil, se caracteriza pelas altas tensões envolvidas, superiores a tensão de escoamento do material e de grande deformação plástica. As deformações nessa região do diagrama podem ocorrer através da criação de superfícies internas, ou seja, há uma variação no volume do material em um fenômeno denominado fendilhamento (do inglês *crazing*). O outro fenômeno característico durante a deformação nessa região de falha ocorre sem a variação de volume do material denominado escoamento transversal (do inglês *shear yielding*).

O início e local de um fendilhamento não estão estabelecidos pela literatura, mas acredita-se que a presença de nanovazios associadas a uma condição de carregamento específica que permita a movimentação e agrupamento destes em determinadas regiões, preceda a formação de uma frente fendilhada. Esses vazios coalescem e, devido ao alinhamento molecular, há a interconexão através de pontes fibrilares (PERES, 2005; DEBLIECK *et al.*, 2011). A Figura 3 traz um esboço dos vazios agrupados e das respectivas pontes fibrilares (moléculas alinhadas) tracionadas.

FIGURA 3 – ASPECTO DO FENDILHAMENTO (*CRAZING*) EM UM POLÍMERO

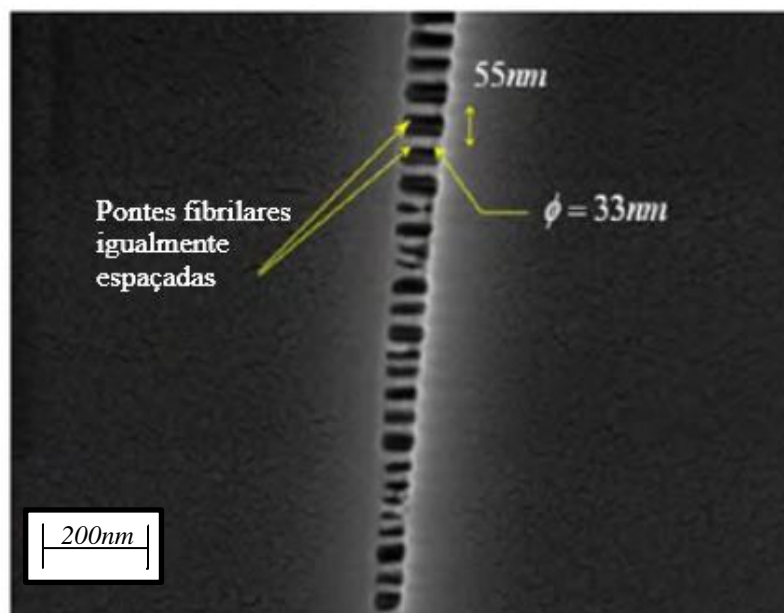


FONTE: Adaptado de ANDERSON (2005).

Ao visualizar a figura 3, nota-se o alinhamento e empacotamento molecular entre os vazios já coalescidos. O fendilhamento corresponde a um fenômeno que precede o início de uma trinca e esta pode ocasionar uma falha do tipo frágil, dependendo das condições de carregamento e temperatura. Não obstante, o fendilhamento também pode preceder o escoamento do material. A tensão de fendilhamento é, porém, constante ao longo das pontes

fibrilares (KRISHNASWAMY, 2005; ZHANG, 2005). A Figura 4 apresenta uma imagem de microscópio eletrônico de varredura (MEV) da região fendilhada.

FIGURA 4 – IMAGEM DE MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV) DAS PONTES FIBRILARES



FONTE: VENKATESAN E BASU (2015).

O escoamento transversal (do inglês *shear yielding*) ocorre sem a formação de superfície interna no material, ou seja, não ocorre variação de volume. Do ponto vista da taxa de dissipação de energia, esse fenômeno é mais eficiente que o fendilhamento, pois a plastificação ocorre de forma generalizada por todo o material – não há a formação de novas superfícies de fratura.

A transição entre o fendilhamento e o escoamento transversal ocorre quando uma tensão se sobrepõe a outra. Zhao e colaboradores (2013) acrescentaram que essa transição dúctil-frágil – ponto de inflexão entre as regiões A e B da figura 2 – é sensível às condições de operação, seja em campo ou laboratório, e deve ser observada experimentalmente.

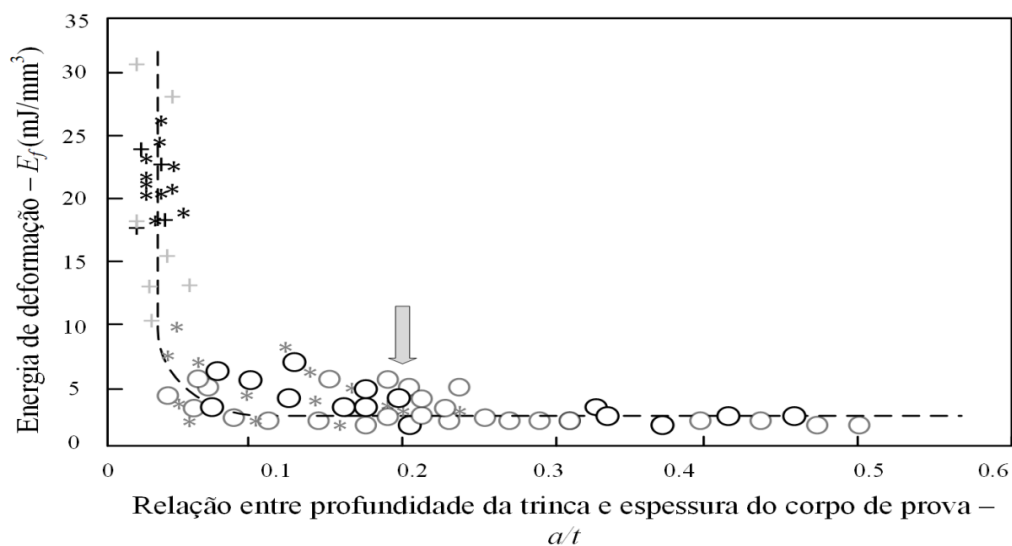
A região B da figura 2, falha *quasi-frágil*, é caracterizada por baixas tensões, inferiores ao limite de escoamento do material, dominadas pelo fenômeno do crescimento lento e estável de trincas (SCG – do inglês *slow crack growth*). O SCG é o responsável pelo mecanismo de falha predominante em tubulações de polietileno de alta densidade (DEBLIECK, *et al.*, 2011). A falha frágil é subdividida em três estágios distintos: incubação, crescimento estável da trinca (SCG), crescimento instável seguido de propagação rápida (RCP – do inglês *rapid crack propagation*) e ruptura. O primeiro estágio, correspondente ao

surgimento da trinca, consome a maior parte da vida útil de tubulações de PEAD. Chudnovsky *et al.* (2012), Zhao, Choi e Chudnovsky (2013) e Chudnovsky (2014), estimam que esse período corresponda a cerca de vinte a oitenta por cento da vida útil prevista nas tubulações de PEAD. Inclusões microscópicas provenientes de resíduos catalíticos e diversos aditivos, por exemplo, são fatores acumuladores de dano, os quais favorecem o aparecimento de trincas. Por outro lado, a parede externa das tubulações geralmente está acondicionada em ambientes agressivos, acelerando a degradação química do polímero – ocorre uma redução no peso molecular médio e conseqüente aumento da cristalinidade na camada mais externa da tubulação. Essa cadeia de acontecimentos propicia o aparecimento de tensões residuais ao longo da espessura, que pode ser acelerado na presença de um defeito na parede externa, antecipando o surgimento de trincas (CHUDNOVSKY *et al.*, 2012).

#### 2.4.2 Modelos experimentais e numéricos associados

Laiarinandrasana *et al.* (2014) realizaram ensaios de fluência em anéis circulares retirados de tubulações de PEAD. Os valores medidos da taxa de abertura de trinca, da tensão aplicada, de um fator de escala e do expoente de fluência foram utilizados em uma equação parametrizada ao modelo experimental cujo intuito é o cálculo do módulo de fluência. A taxa de liberação de energia e os valores do módulo de fluência do ensaio permitem estimar a vida remanescente da tubulação pela manipulação dos resultados e interpretação do gráfico contido na Figura 5.

FIGURA 5 – ENERGIA DE DEFORMAÇÃO VS. RAZÃO ENTRE PROFUNDIDADE DA TRINCA E ESPESSURA DO CORPO DE PROVA



FONTE: Modificado de LAIARINANDRASANA *et al.*, 2014.

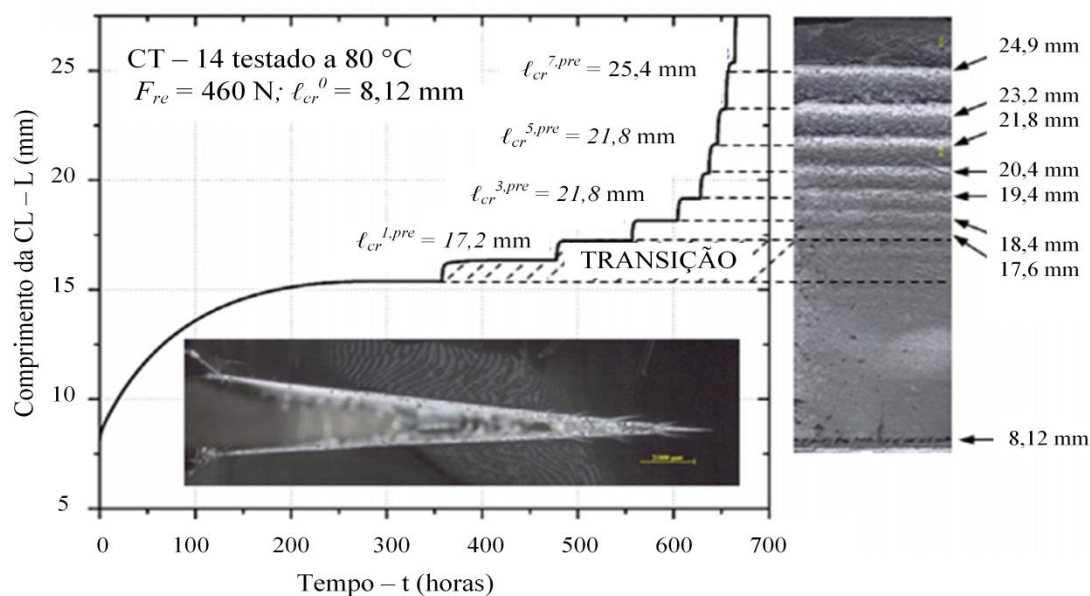
Os símbolos da Figura 5 representam as diferentes velocidades de avanço em cada rodada de testes. A seta vertical indica o limite da razão entre o tamanho da trinca e a espessura do CP. Ao se atingir aproximadamente 20% da espessura do corpo de prova, a taxa de liberação de energia tende a zero, ou seja, o material atingiu o limite de absorção de energia de deformação e a trinca avança no corpo de prova até a ruptura catastrófica (LAIARINANDRASANA *et al.*, 2014).

Outra abordagem experimental de falhas em PEAD ocorre, num primeiro momento, definindo-se as zonas ou regiões de processo (PZ – do inglês *process zone*). Essas regiões de interesse são utilizadas para avaliar qualitativamente o avanço de uma trinca num corpo de prova definido. O trabalho pioneiro de Chudnovsky (1983 - 1984), Sehanobish, Moet e Chudnovsky (1987) e Kasaevich, Moet e Chudnovsky (1990) destacam que o crescimento de trincas preexistentes nos corpos de prova ocorre em etapas e se dispõe em camadas contidas na região de processo correspondente. Na zona ativa uma parcela da força motriz favorece o crescimento da trinca através da taxa de liberação de energia elástica, enquanto a outra absorve energia para a formação de uma nova superfície de fratura (CHUDNOVSKY, 2014).

Choi *et al.* (2009), Chudnovsky *et al.* (2012), e Zhang, Zhou e Chudnovsky (2014) utilizaram métodos experimentais e numéricos para observar as características geométricas e quantificar a cinética do SCG. Em um desses trabalhos, os autores apresentaram um exemplo da aplicação do modelo apresentado, concluindo que no instante em que se observam diferentes aspectos do SCG em função da tensão, da temperatura e da taxa de deformação, se torna difícil estabelecer uma relação entre esses parâmetros. Isto ocorre, à primeira vista, devido ao PEAD possuir propriedades mecânicas dependentes tanto da temperatura quanto da taxa de deformação, devido ao comportamento viscoelástico do respectivo material.

Os valores dos esforços motrizes responsáveis pelo avanço da trinca são computados pelas derivadas parciais do potencial de *Gibbs* em relação aos comprimentos da trinca e da respectiva zona ativa. Os resultados dos ensaios e do modelo matemático correspondente mostram uma aproximação eficiente da abordagem via CL (do inglês – *Crack Layer*) para a cinética do crescimento estável da trinca. A figura 6 apresenta uma ilustração contendo os resultados de ensaios de fluência em corpos de prova tipo CT (do inglês – *Compact Tension*).

FIGURA 6 – SOBREPOSIÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS DA ABORDAGEM VIA *CRACK LAYER* (CL)



FONTE: Modificado de ZHANG *et al.* (2014).

A Figura 6 ilustra a região de transição entre o modo contínuo e descontínuo do SCG – curvas parabólica e escalonada, respectivamente. A transição é identificada entre 15 e 17 mm (ZHANG *et al.*, 2014). Os símbolos da Figura 6 representam:  $F_{re}$  – força de tração igual a 460N,  $l_{cr}^0$  – comprimento da trinca, cujo sobrescrito 0 (zero) indica o comprimento inicial da trinca e de 1 a 7 indicam a posição no corpo de prova do modo descontínuo (escalonado) do crescimento da trinca.

## 2.5 VISCOELASTICIDADE

Muitos materiais de engenharia exibem características, ora de sólidos elásticos, ora de fluídos viscosos. Materiais com este comportamento são denominados viscoelásticos. A característica dos sólidos elásticos é a sua capacidade de absorção da energia mecânica associada às deformações dado um estado de tensões. Já num fluxo viscoso a energia associada às deformações é liberada continuamente (BETTEN, 2008).

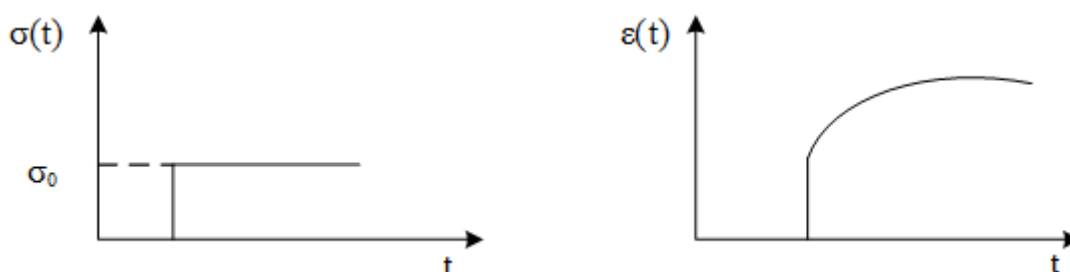
As condições do ambiente e o regime de carregamento são fundamentais para identificar o comportamento viscoelástico do material. De forma geral, na temperatura ambiente um polímero apresenta um comportamento viscoelástico linear. Entretanto sabe-se que um aumento na taxa de carregamento e na temperatura provoca uma mudança no

comportamento mecânico do respectivo material de forma significativa, como mostram os resultados de Ciniello *et al.* (2016).

### 2.5.1 Fluência e relaxação de tensão

A fluência se caracteriza num material polimérico quando este é submetido a uma tensão constante apresentando uma deformação como função do tempo. A Figura 7 ilustra esquematicamente o ensaio de fluência.

FIGURA 7 – FLUÊNCIA SOB TENSÃO CONSTANTE – DEFORMAÇÃO COMO FUNÇÃO DO TEMPO



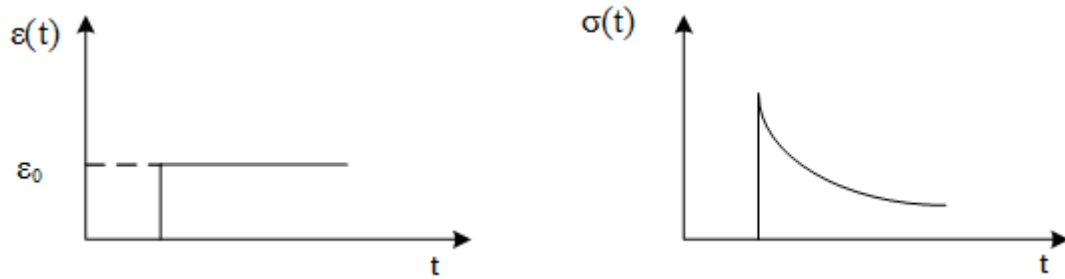
FONTE: O autor (2017).

A definição do módulo de “compliance” ou módulo de fluência (do inglês - *creep compliance*), representado por  $C(t)$ , resulta da razão entre a deformação no tempo  $\epsilon(t)$  e a tensão unitária aplicada  $\sigma_0$ .

$$C(t) = \frac{\epsilon(t)}{\sigma_0} \quad (2.2)$$

A relaxação de tensão é a resposta da tensão dado uma deformação inicial e constante. A Figura 8 ilustra esquematicamente o fenômeno da relaxação de tensão.

FIGURA 8 – RELAXAÇÃO DE TENSÃO SOB DEFORMAÇÃO CONSTANTE



FONTE: O autor (2017).

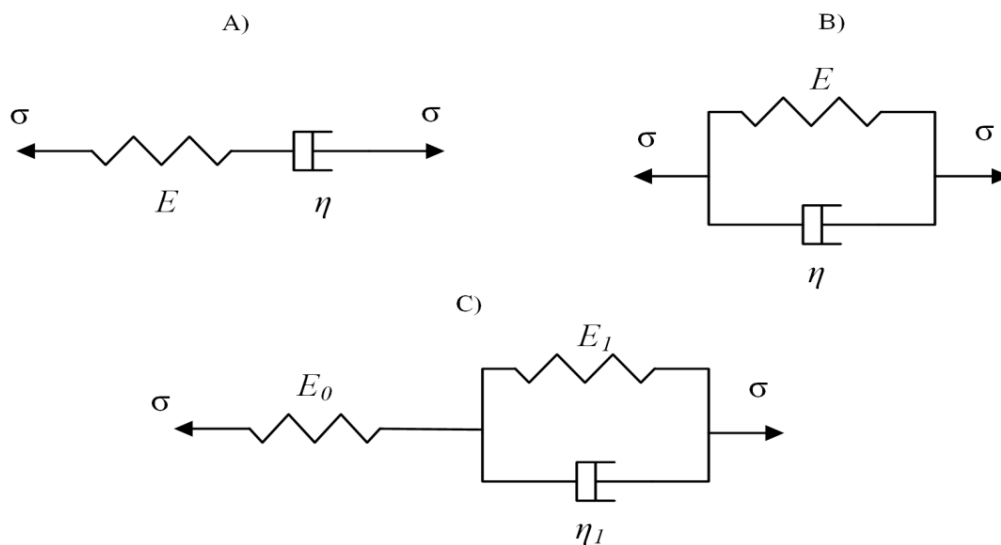
De forma análoga, o módulo de relaxação é obtido a partir da relação:

$$D(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} \quad (2.3)$$

### 2.5.2 Modelos viscoelásticos

Os modelos utilizados para descrever o comportamento viscoelástico dos polímeros, de maneira geral, seguem um padrão de combinações de molas (sólido elástico) e amortecedores (fluido viscoso). A Figura 9 ilustra alguns modelos mecânicos elementares.

FIGURA 9 – MODELOS CLÁSSICOS DA VISCOELASTICIDADE: A) FLUÍDO DE MAXWELL B) SÓLIDO DE KELVIN C) SÓLIDO LINEAR PADRÃO (MODELO DE KELVIN-VOIGT)



FONTE: Adaptado de Brinson (2008).

As constantes  $E$ ,  $E_0$  e  $E_1$  são as constantes elásticas das molas, que representam o comportamento de sólido elástico através do módulo de elasticidade longitudinal. As constantes  $\eta$  e  $\eta_1$  representam o comportamento viscoso do material, cuja grandeza física de um modelo de fluído diferencial é a viscosidade.

A composição ou agrupamento de modelos elementares resulta em modelos com molas e amortecedores em série ou paralelo, como nos modelos de *Maxwell* e *Kelvin* generalizado. A interposição dos modelos forma um conjunto de parâmetros materiais, ordenados pelo número de modelos interconectados. Por exemplo, um modelo generalizado de *Maxwell* com 9 elementos possui a mesma quantidade de molas e amortecedores, totalizando 18 parâmetros materiais.

As equações diferenciais resultantes são combinações lineares entre os parâmetros materiais e as respectivas derivadas até sua ordem “ $n$ ”. A equação 2.4 é utilizada no modelo generalizado de *Maxwell* com “ $n$ ” igual a 3 elementos. O sobrescrito representa a correspondente derivada temporal das grandezas de tensão e deformação.

$$p_0\sigma + p_1\dot{\sigma} + p_2\ddot{\sigma} + p_3\ddot{\sigma} = q_1\dot{\epsilon} + q_2\ddot{\epsilon} + q_3\ddot{\epsilon} \quad (2.4)$$

O sólido linear padrão (modelo de *Kelvin-Voigt*), por sua vez, é representado pela equação 2.5.

$$p_0\sigma + p_1\dot{\sigma} = q_1\dot{\epsilon} + q_2\ddot{\epsilon} \quad (2.5)$$

As variáveis  $p$  e  $q$  representam os polinômios característicos da solução das equações diferenciais correspondentes. As relações constitutivas dos modelos da viscoelasticidade são deduzidas a partir das equações de equilíbrio e de movimento, assim como elaborado para sólidos elásticos lineares. No entanto a solução de cada caso depende de uma série de manipulações algébricas e aplicação de conceitos matemáticos, dentre os quais estão as Transformadas de *Laplace* e o Teorema da Convolução.

### 2.5.3 Transformada de Laplace

Seja  $f(t)$  uma função contínua por partes no domínio  $(0, \infty)$ , cuja integral exista,

$$F(s) = \mathcal{L}(f) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt \quad (2.6)$$

$\mathcal{L}(f)$  é a transformada de Laplace de  $f(t)$ , representada por  $F(s)$ . A transformada inversa de uma função no domínio de Laplace é:

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}(F) \quad (2.7)$$

Essa ferramenta é fundamental na solução de problemas de valor inicial na viscoelasticidade – um exemplo é a aplicação do Princípio da Correspondência na análise de tensões em cilindros de paredes finas (ROYLANCE, 2001).

#### 2.5.4 Teorema da convolução

Dada duas funções  $f(t)$  e  $g(t)$ , cujas transformadas de *Laplace* sejam conhecidas, geralmente:

$$\mathcal{L}(fg) \neq \mathcal{L}(f)\mathcal{L}(g) \quad (2.8)$$

A interpretação correta para a transformada de duas funções é  $\mathcal{L}(f)\mathcal{L}(g)$  sendo denominada a convolução de  $f$  e  $g$  na notação padrão  $f * g$  e definida pela integral:

$$h(t) = (f * g)(t) = \int_0^t f(\theta) g(t - \theta) d\theta \quad (2.9)$$

#### 2.5.5 Princípio da superposição de Boltzmann

Os materiais poliméricos, de maneira geral, exibem uma resposta mecânica dependente do tempo devido ao seu comportamento viscoelástico. Supondo um cilindro de paredes finas, as tensões oriundas de pressão aplicada são independentes dos parâmetros relativos aos materiais. No entanto os deslocamentos associados às deformações devido ao movimento intermolecular apresenta a forma da equação 2.10 (ROYLANCE, 2001).

$$\delta_r = \left(1 - \frac{\nu}{2}\right) \frac{pr^2}{bE} \quad (2.10)$$

Onde:  $\delta_r$  – Incremento radial;

$\nu$  – Coeficiente de *Poisson*;

$p$  – Pressão;  
 $b$  – Espessura da parede;  
 $E$  – Módulo de elasticidade longitudinal.

O incremento radial, expresso por  $\delta_r$ , é uma função da pressão, do raio interno, da espessura da parede do cilindro, do inverso do módulo de elasticidade longitudinal  $E$  e do coeficiente de *Poisson*  $\nu$ . O inverso do módulo elástico é o módulo de fluência do material  $C_{crp}(t)$  num modelo do sólido linear padrão como referência:

$$C_{crp}(t) = C_g + (C_r - C_g)(1 - e^{-t/\tau}) \quad (2.11)$$

Onde:  $C_{crp}(t)$  – Módulo de fluência;  
 $C_r$  – Módulo de fluência vítreo;  
 $C_g$  – Módulo de fluência borrachoso;  
 $t$  – Tempo;  
 $\tau$  – Tempo de relaxação.

O módulo de fluência borrachoso  $C_r$  é da ordem de 100 vezes maior que o módulo vítreo  $C_g$  em alguns polímeros semicristalinos (ROYLANCE, 2001). O símbolo  $\tau$  é o tempo de relaxação característico em um ensaio de fluência.

### 2.5.6 Princípio da Correspondência

O princípio da correspondência é uma proposta de solução de problemas de viscoelasticidade com ambas as funções, pressão e deformação, dependentes do tempo. Trata-se de um conceito para a abordagem de problemas de engenharia pelo espectro da análise de tensões partindo de uma solução equivalente no campo da elasticidade. Em resumo, a partir de uma equação adaptada da elasticidade e que pode ser aplicada ao problema viscoelástico correspondente, a solução de problemas viscoelásticos ocorre através da transformação dos parâmetros envolvidos na equação original (elasticidade) para o domínio de Laplace sem a perda de seu significado físico no espaço transformado (ROYLANCE, 2001).

Em Gao *et al.* (2015), foi proposta a solução do problema do combustível sólido para foguetes a partir da aplicação do princípio da correspondência através da combinação de um

tubo de aço (linear-elástico) e o combustível interior no formato de um cilindro de parede espessa. A análise de tensões para um cilindro de paredes finas, determinado pela razão entre a espessura de parede e o raio de um cilindro como sendo menor ou igual a 1/20, no domínio do tempo e no domínio de *Laplace*, apresenta a deformação na direção circunferencial na forma das equações 2.12 e 2.13 respectivamente.

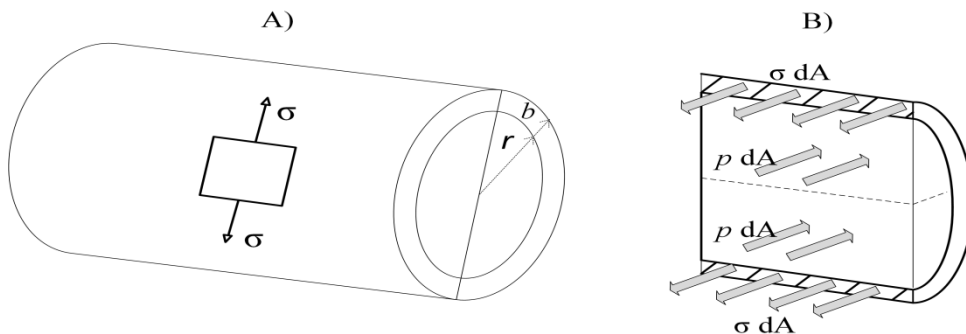
$$\varepsilon(t) = \frac{p(t)r(1-\nu)}{bE} \quad (2.12)$$

$$\varepsilon(s) = \frac{p(s)r(1-\nu)}{bE} \quad (2.13)$$

A tensão circunferencial, representada pela Figura 10, é oriunda da pressão interna aplicada e independente dos parâmetros materiais correspondentes quando considerado um cilindro de paredes finas. A expressão na forma da equação 2.14 é obtida da relação entre a pressão  $p$  multiplicada pela razão entre o raio interno  $r$  e a espessura da parede do cilindro  $b$ .

$$\sigma = p \frac{r}{b} \quad (2.14)$$

FIGURA 10 – TENSÕES CIRCUNFERENCIAIS



FONTE: O autor (2017).

As constantes do módulo de elasticidade longitudinal  $E$  e do coeficiente de *Poisson*  $\nu$ , no domínio de Laplace, podem ser relacionadas pelo módulo volumétrico (módulo de *Bulk*)  $K$  e pelo módulo de elasticidade transversal  $G$ , considerando o material isotrópico linear e homogêneo.

$$\mathcal{E}(s) = \frac{9G(s)K(s)}{3K(s)+G(s)} \quad (2.15)$$

$$\mathcal{N}(s) = \frac{3K(s)-2G(s)}{6K(s)+2G(s)} \quad (2.16)$$

O módulo volumétrico (módulo de *Bulk*)  $K$  é constante, conforme equação 2.17.

$$K = K_e \quad (2.17)$$

O módulo de elasticidade transversal é função do módulo vítreo  $G_g$  e borrachoso  $G_r$ , analogamente ao apresentado para a função do módulo de fluência (equação 2.11). No domínio de Laplace o módulo de elasticidade transversal  $G$  é dado pela equação 2.18.

$$G = G_r + \frac{(G_g - G_r)s}{s+1/\tau} \quad (2.18)$$

A solução viscoelástica é resultado da manipulação algébrica dos operadores nas equações 2.15, 2.16 e 2.17. Em seguida, os valores dos operadores são substituídos na equação 2.12 e retorna-se ao domínio do tempo através de transformadas inversas de *Laplace*, resultando assim na equação 2.19.

$$\varepsilon = \sigma \times \frac{(4G_r + 3K_e)}{(36 \times G_r \times K_e)} - \frac{\sigma \times e^{(-tG_r)/(\tau G_g)} \times (G_g - G_r)}{(12 \times G_g \times G_r)} \quad (2.19)$$

Onde:  $\varepsilon$  – deformação circunferencial;

$\sigma$  – tensão circunferencial (tensão de *Hoop*);

$G_r$  – Módulo de elasticidade transversal borrachoso;

$G_g$  – Módulo de elasticidade transversal vítreo;

$K_e$  – Módulo de *Bulk*;

$t$  – Tempo;

$\tau$  – Tempo de relaxação.

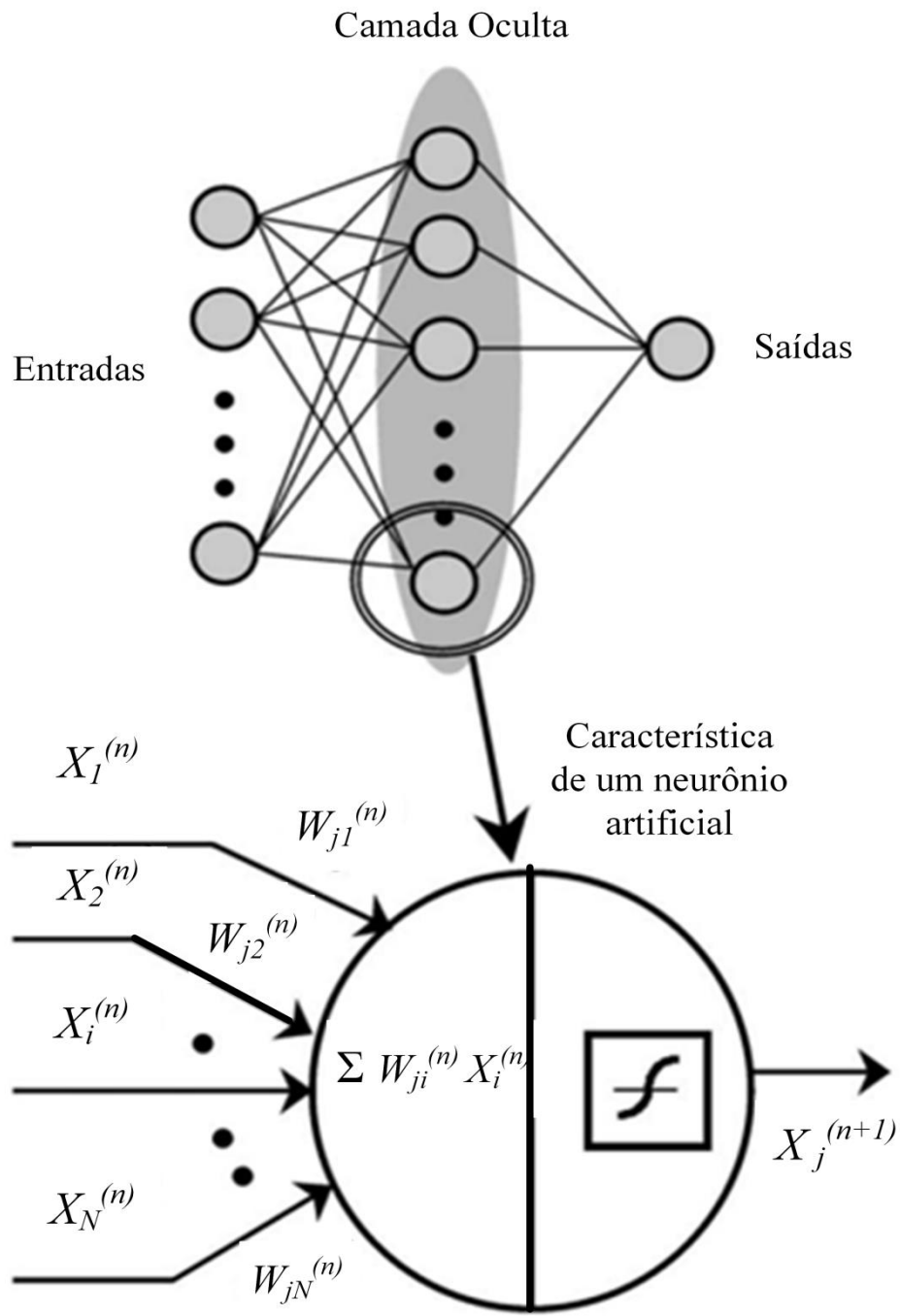
## 2.6 REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS

Para Zhang e Friederich (2003), a grande vantagem da aplicação de redes neurais em problemas de engenharia é a capacidade de modelagem de sistemas não-lineares complexos sem a necessidade de se conhecer a natureza das relações entre os parâmetros de entrada e as saídas esperadas. O procedimento de criação de uma rede neural artificial contempla alguns passos, dentre os mais importantes e recorrentes na literatura:

- Coleta de dados: fase inicial que inclui a escolha dos dados que serão utilizados como parâmetros de entrada da rede neural. Nesta etapa é fundamental a normalização dos dados para valores limites das funções de ativação dos neurônios;
- Escolha da arquitetura e topologia da rede: para redes neurais retroalimentadas com propagação de retorno do erro é comum utilizar apenas uma camada oculta com “N” neurônios. Existe um limiar na quantidade dos neurônios por camada. Ao ultrapassar esse limiar, a rede pode sofrer um processo conhecido por *overfitting*.
- Treinamento da rede: os dados selecionados são treinados através de algoritmos de treinamento.
- Teste da rede: avalia o desempenho da rede. Nesse estágio buscam-se melhorar a eficiência através da sintonização dos parâmetros e/ou características definidas no passo anterior, prezando pela convergência acurada e com baixo custo computacional;
- Simulação da rede: uso da rede propriamente dito. Aqui a rede construída e treinada a partir de dados experimentais, pode ser utilizada para o ajuste de curvas, simulação de dados.

As aplicações em áreas diversas, como ferramenta de reconhecimento de padrões, previsão de dados, ajuste de curvas, otimização de processos, dentre outros aplicados na medicina, engenharia, biologia e economia demonstra o potencial das redes neurais artificiais para resolução de problemas oriundos de uma grande quantidade de parâmetros e /ou dados experimentais (HAYKIN; S., 2008).

FIGURA 11 – ASPECTO DA TOPOLOGIA E ARQUITETURA DE UMA REDE NEURAL ARTIFICIAL



FONTE: Adaptado de Zhang e Friederich (2003).

A Figura 11 apresenta a característica de um neurônio artificial. Os valores representados por  $X$  são combinados linearmente com os pesos  $W$  e testados em uma função,

denominada função de ativação. Caso o valor estiver em consonância com os limiares dessa função, o sinal avança até a próxima camada, que pode contar com mais neurônios que a anterior, dependendo de como a arquitetura da rede foi definida.

O algoritmo de *Levenberg-Marquadt* é baseado em dois métodos utilizados para a minimização de funções, sendo eles: método de *Newton* e o método do Gradiente Descendente. Ocorre através da manipulação algébrica do vetor gradiente da RNA e a respectiva matriz *Hessiana* e funciona sistematicamente conforme a propagação de retorno do erro definido pela respectiva rede. Quanto maior a rapidez na atualização dos pesos sinápticos pela aplicação do algoritmo de otimização, maior será a taxa de convergência da rede neural artificial.

O fenômeno do *overfitting* ocorre, por vezes, devido a grande quantidade de dados e/ou neurônios nas camadas intermediárias de uma RNA. O *overfitting* provoca a perda na habilidade de generalização dos padrões similares entre as entradas e saídas esperadas de uma RNA. A fim de se evitar a ocorrência desse fenômeno, Haykin (2008) sugeriu que a generalização é afetada por 3 fatores distintos: o tamanho da amostra de treinamento e o quão representativa esta é no ambiente de interesse, a arquitetura utilizada na construção da RNA e o grau de complexidade dos fenômenos envolvidos.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Essa seção aborda os materiais, equipamentos e acessórios utilizados para a execução dos ensaios experimentais, bem como os processos utilizados na aquisição, tratamento e pré-processamento dos dados. Todos os procedimentos descritos nesse capítulo, com exceção à manufatura dos corpos de prova e soldagem por eletrofusão dos tampões, foram realizados nos Institutos Lactec – LEME.

O detalhamento do modelo numérico contempla a topologia e arquitetura da rede neural, funções de ativação, algoritmo de treinamento utilizado e um exemplo de aplicação do modelo através do uso de dados coletados em um corpo de prova.

A geometria dos corpos de prova é a mesma estabelecida pela NBR 8415:2007 e a variação da profundidade dos entalhes segue a sequência lógica dos ensaios efetuados por Majid e Elghorba (2017), no entanto, diferentemente das referências citadas, a pressão aplicada é elevada até a ruptura do corpo de prova, ou seja, varia no tempo.

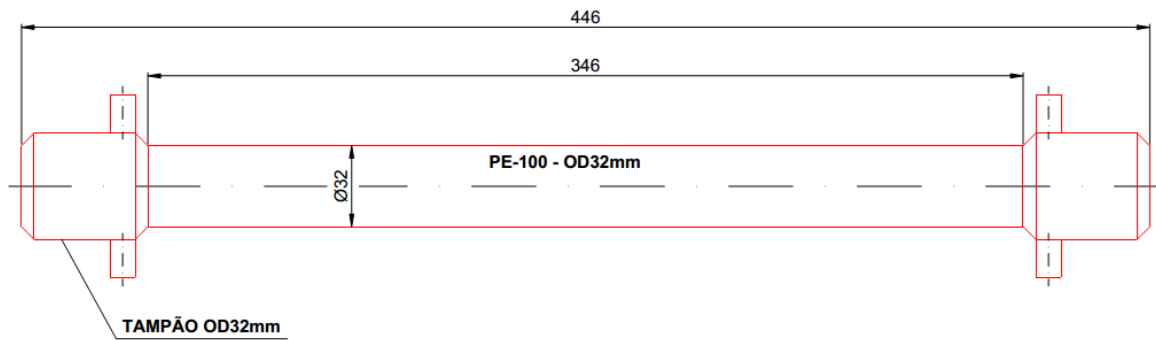
#### 3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental consiste na pressurização de corpos de prova até a ruptura, medindo-se as deformações e pressão ao longo do ensaio. Após a coleta de todos os dados, foi utilizado um algoritmo em Matlab® para pré-processamento e implantação da rede neural artificial conforme o objetivo do presente trabalho.

##### 3.1.1 Preparo dos corpos de prova

Os corpos de prova com os tampões soldados nas duas extremidades foram disponibilizados pela COMPAGAS. O detalhamento dimensional dos CPs está contido na Figura 12. As cotas estão em milímetros e a espessura do corpo de prova, conforme definido pela norma NBR 14462:2000, é igual a 3 milímetros.

FIGURA 12 – DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA



FONTE: O autor (2017).

Os corpos de prova foram dimensionados de acordo com a NBR 8415:2007, que delimita o comprimento livre dos tubos em 3 vezes o diâmetro externo (32 mm) somados a 250 mm, totalizando 346 mm, como pode-se observar na Figura 12. A sequência do plano de usinagem do entalhe e do furo rosqueado dos CPs é apresentada a seguir:

- Posicionamento e centralização da peça na fresa.
- Posicionamento da ferramenta de corte na superfície da peça.
- Usinagem da profundidade do entalhe.
- Usinagem horizontal de 35 e 50 milímetros.
- Furo rosqueado de  $\frac{3}{4}$ " em uma das extremidades (*cap*).

Alguns cuidados devem ser tomados para prevenção de usinagem vertical excessiva e posterior não uniformidade na profundidade do entalhe. O posicionamento do CP na prensa da fresa deve ser tal que a superfície inferior esteja no mesmo plano da mesa do equipamento (Figura 13).

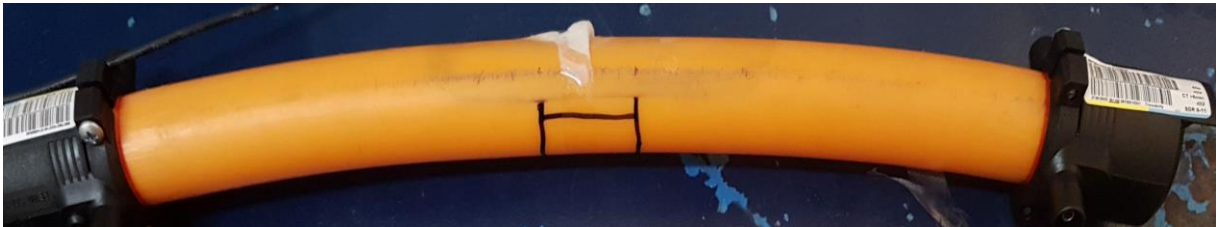
FIGURA 13 – POSICIONAMENTO DO CP NA BANCADA DE USINAGEM



FONTE: Acervo do autor (2017).

Os CPs foram posicionados de modo que os planos ortogonais à curva do tubo fossem paralelos ao eixo da ferramenta de corte. Assim evitou-se que a usinagem do entalhe fosse afetada pela angulação do tubo – Figura 14.

FIGURA 14 – ASPECTO ANGULAR DO CORPO DE PROVA



FONTE: Acervo do autor (2017).

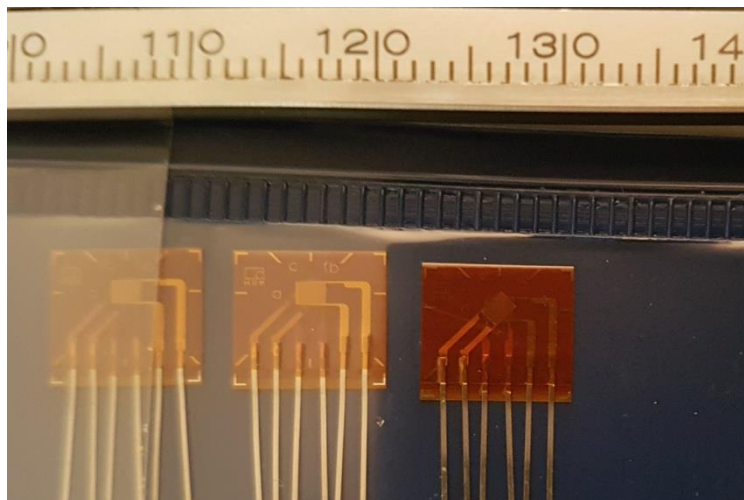
É válido ressaltar que, segundo a norma NBR 14462:2000, os tubos enrolados em bobinas podem apresentar uma ovalização máxima admissível de 6% do respectivo diâmetro externo. A Figura 14 apresenta o aspecto angular do corpo de prova e os tampões das extremidades.

### 3.1.2 Instalação dos extensômetros

Para medir as deformações na direção tangente à circunferência e longitudinal no corpo de prova, um extensômetro HBM® modelo 1-RY91-1,5/120 (ver Figura 15) foi

posicionado a 180° do entalhe a fim de evitar o efeito de concentração de tensões na região de interesse.

FIGURA 15 – EXTENSÔMETROS HBM® 1-RY91-1,5/120



FONTE: Acervo do autor (2017).

Os procedimentos descritos a seguir apresentam os passos utilizados e estão detalhados visando esquematizar as etapas e facilitar o entendimento e reprodução dos processos:

- Foi efetuado o preparo da superfície do corpo de prova por abrasão (lixa) e posterior limpeza com álcool isopropílico.
- Os extensômetros foram posicionados na região pré-definida através de guias desenhadas no corpo de prova – utilizou-se uma pinça e fita adesiva para correto posicionamento.
- A mistura do adesivo ocorreu em recipiente adequado para a respectiva aplicação no corpo do extensômetro.
- O extensômetro foi levemente pressionado até a cura do adesivo – em torno de 2 minutos.
- As placas condutoras foram adaptadas nos CPs com o auxílio de adesivo cianoacrilato.
- A soldagem dos terminais ocorreu ao final dos procedimentos anteriores o que possibilitou medir a resistência elétrica entre cada ponto de solda – não foi ultrapassado o limite de 120  $\Omega$ .

A aplicação da mistura do adesivo X60 ocorre na face oposta do extensômetro, seguido de leve pressão com um dos dedos até a cura, que pode ser percebida pelo aquecimento e endurecimento do adesivo no recipiente de mistura. A cura do adesivo ocorre em torno de 2 minutos após a aplicação. A Figura 16 mostra a medição da resistência elétrica de um terminal.

FIGURA 16 – MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA ENTRE TERMINAIS



FONTE: Acervo do autor (2017).

Já a Figura 17 apresenta um corpo de prova preparado para o ensaio.

FIGURA 17 – EXTENSÔMETRO E TERMINAIS INSTALADOS NO CORPO DE PROVA



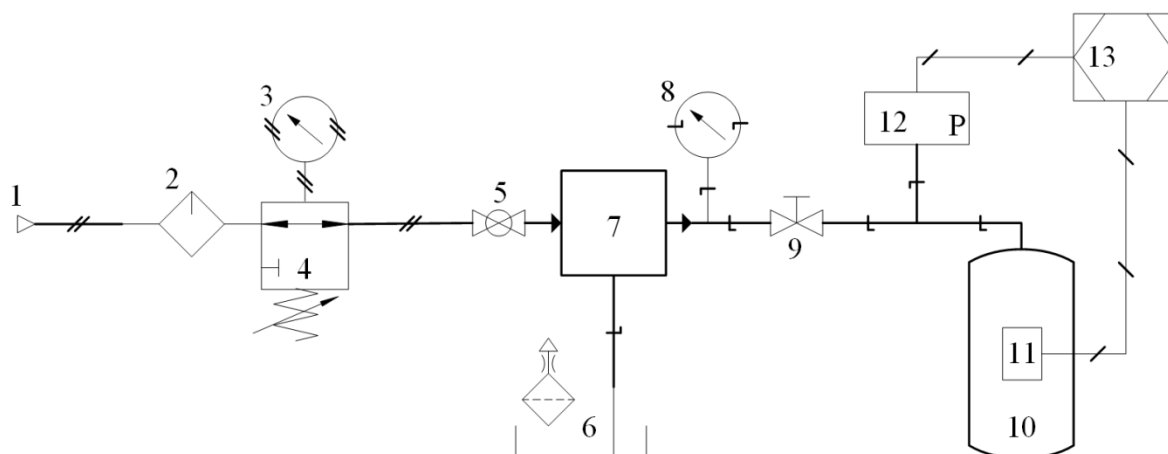
FONTE: Acervo do autor (2017).

O limite de  $120 \Omega$  entre os terminais não foi ultrapassado, indicando que os extensômetros não foram danificados durante a instalação, no entanto não foi possível identificar possíveis danos relativos à curvatura dos CPs.

### 3.1.3 Aparato de testes

O aparato de testes foi montado de acordo com o proposto pelo fluxograma da Figura 18.

FIGURA 18 – FLUXOGRAMA DO APARATO DE TESTES



FONTE: O autor (2017).

Os equipamentos do aparato de testes estão numerados de acordo com a Figura 18 e descritos conforme a Tabela 4.

TABELA 4 – DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

| Indicação numérica | Equipamento                              | Descrição/comentário                          |
|--------------------|--|---|
| 1                  | Ar comprimido                            | Alimentação de ar de 2 kgf/cm <sup>2</sup>    |
| 2                  | Filtro de ar                             | Evita o acúmulo de umidade na rede            |
| 3                  | Manômetro de ar integrado à Bomba        | Indica a pressão de alimentação de ar         |
| 4                  | Regulador de ar da Bomba                 | Mantém a alimentação de ar constante          |
| 5                  | Válvula esfera                           | Liga e desliga a Bomba                        |
| 6                  | Reservatório de água com filtro          | Evita a presença de sólidos na água           |
| 7                  | Bomba hidropneumática Magral® 10013L3125 | Pressão máxima: 15000 psi                     |
| 8                  | Manômetro de teste Salcas® SAPI 160      | Faixa de medição: 0 a 100 kgf/cm <sup>2</sup> |
| 9                  | Válvula esfera                           | Regula a pressão de saída de água             |
| 10                 | Corpo de prova em PEAD PE-100            | -   |
| 11                 | Extensômetro HBM® 1-RY91-1.5/120         | Sensibilidade 0.4%                            |
| 12                 | Transdutor de pressão Velki® VKP-039     | Faixa de 0 a 150 kgf/cm <sup>2</sup>          |
| 13                 | Central de processamento de sinais       | -   |

Alguns comentários são pertinentes no instante anterior a cada rodada de ensaio: o preenchimento do CP com água evitou o acúmulo de ar na rede hidráulica; o condicionamento do CP em recipiente adequado evitou vazamentos indesejados de água após a ruptura; a utilização de fita veda-rosca entre as conexões rosqueadas evitou o vazamento de água.

### 3.1.3.1 Funcionamento da bomba hidropneumática

A bomba hidropneumática opera segundo o princípio de áreas diferenciais. O acionamento ocorre por ar comprimido percorrendo seu ciclo à máxima velocidade, produzindo assim um fluxo mínimo de água presente no reservatório interno. Nesse estágio pode-se controlar a pressão do receptor através da válvula de saída. A bomba então começará a operar as velocidades menores enquanto aumenta a pressão no receptor, oferecendo mais resistência ao pistão diferencial reciprocamente.

### 3.1.4 Aquisição de dados

A Tabela 5 apresenta os equipamentos utilizados na aquisição dos dados dos extensômetros e do transdutor de pressão Velki® modelo VKP-039 calibrado para medir até 150 kgf/cm<sup>2</sup> de pressão.

TABELA 5 – EQUIPAMENTOS PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

| Extensômetros |                         | Transdutor de pressão |                              |
|---------------|-------------------------|-----------------------|------------------------------|
| NI PXI e 4331 | Módulo de extensometria | NI cDAQ 9188          | Chassi padrão cDAQ           |
| NI PXI 1065   | Chassi padrão PXI       | NI 9208               | Placa de leitura de corrente |
| NI PXIe 8880  | Controladora padrão PXI | -                     | -                            |

Os sensores foram conectados aos controladores e placas de leitura de corrente por cabos de transmissão. Os sinais foram transformados dentro de um algoritmo criado no ambiente LabView® capaz de iniciar, gravar e registrar instantaneamente os dados medidos. A taxa de aquisição de dados foi definida dentro de uma faixa de capacidade dos instrumentos e medida em Hz (Hertz), representando a quantidade de dados registrados por segundo de gravação. Para o ensaio, a taxa de aquisição de dados utilizada foi de 10 Hz. A taxa de

aquisição próxima da condição estática representa a realidade da utilização dos tubos em campo.

### 3.1.5 Operação da bancada de testes

A operação da bancada de testes ocorreu após verificação das conexões hidráulicas dos tubos e elétricas dos instrumentos. Nesse momento um operador foi responsável por “zerar” os medidores de pressão e deformação e iniciar a gravação de dados. No mesmo instante a válvula de saída da bomba pode ser acionada. A operação e controle da válvula ocorreram de maneira suave para evitar picos de pressão no sistema.

Uma vez que a pressão aumentou foi necessário equalizar a saída de água da bomba até a ruptura do corpo de prova, isto é, abriu-se suavemente a válvula quando ocorreu uma redução do gradiente de pressão, e analogamente reduziu-se o fluxo quando um aumento excessivo da pressão. Esses dois passos foram fundamentais para manter o gradiente de pressão uniforme.

## 3.2 TESTES PRELIMINARES

A variação da profundidade do entalhe pré-definida se dá em passos de 5% da espessura do tubo, de 5% até 20%. No entanto, a realização de um teste preliminar com uma amostra de 10% da espessura (0,30 mm) conduziu a reavaliação do modelo. O CP em questão falhou apresentando grandes deformações plásticas, denominada bico de pato, em uma região distante do entalhe. Assim, foi realizado um segundo teste com 20% da espessura (0,60 mm) – os dados foram coletados normalmente e o CP rompeu na região do entalhe.

Pelo caráter investigativo do trabalho, foi proposta uma nova divisão dos CPs por profundidade de entalhe, cujos valores estão contidos na Tabela 6.

TABELA 6 – DESIGNAÇÃO E NOMENCLATURA UTILIZADA

(continua)

| Amostra | Quantidade | Profundidade do entalhe (mm) | Designação         | Número de pontos |
|---------|------------|------------------------------|--------------------|------------------|
| 1       | 1          | Sem entalhe                  | CP_sementalhe      | 3674             |
| 2       | 1          | 0.30                         | CP_030             | 968              |
| 3       | 2          | 0.60                         | CP1_060<br>CP2_060 | 1905<br>1185     |

TABELA 6 – DESIGNAÇÃO E NOMENCLATURA UTILIZADA

(continuação)

| Amostra | Quantidade | Profundidade do entalhe (mm) | Designação | Número de pontos |
|---------|------------|------------------------------|------------|------------------|
| 4       | 3          | 0.75                         | CP1_075    | 1871             |
|         |            |                              | CP2_075    | 1756             |
|         |            |                              | CP3_075    | 799              |
| 5       | 1          | 0.90                         | CP_090     | 772              |
| 6       | 1          | 1.00                         | CP_100     | 2582             |
| 7       | 1          | 1.10                         | CP_110     | 1873             |
| 8       | 2          | 1.20                         | CP1_120    | 1507             |
|         |            |                              | CP2_120    | 947              |

O número de pontos representa a quantidade de dados adquiridos nas medições de pressão e deformação em cada rodada de teste e está listado na Tabela 6. Cada instante de aquisição contém um valor de pressão e deformação correspondente. Como se pode observar, cada CP apresenta uma quantidade distinta de números, o que torna a parametrização do modelo em redes neurais mais difícil.

### 3.3 SOLUÇÃO ANALÍTICA DO PROBLEMA VISCOELÁSTICO

A solução do problema viscoelástico decorre da aplicação do Princípio da Correspondência de *Alfrey*, onde uma solução do problema equivalente no campo da elasticidade é proposta utilizando-se as propriedades materiais equivalentes ao PEAD PE-100. As propriedades estão contidas na Tabela 7 e os respectivos valores foram substituídos na equação 2.19 para obter a respectiva deformação na direção circunferencial oriunda da pressão interna e crescente ao longo de cada rodada de ensaio.

TABELA 7 – PROPRIEDADES DO PEAD PE-100

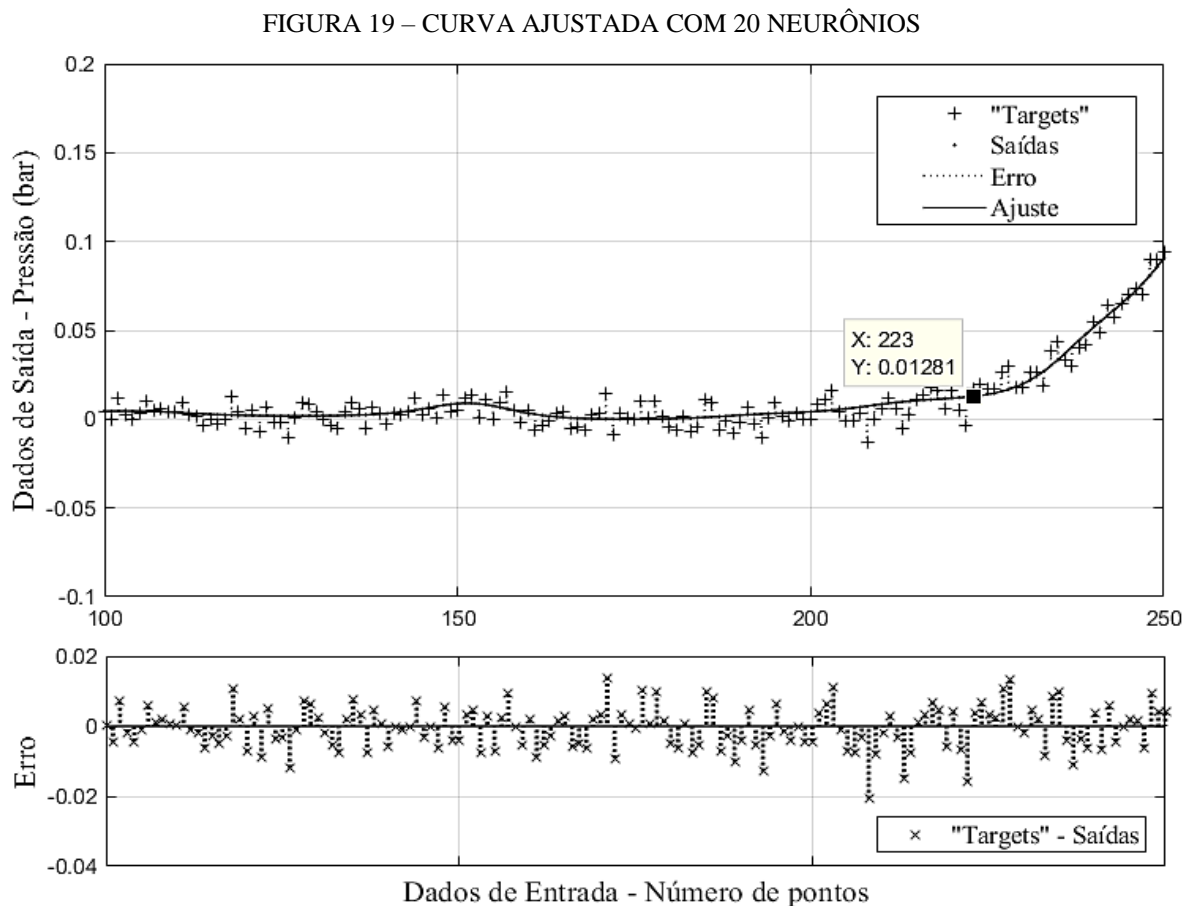
| Propriedades – unidade                                    | PEAD PE-100 |
|---|-------------|
| Tempo de relaxação $\tau$ – s                             | 100         |
| Módulo de Elasticidade transversal borrachoso $G_r$ – GPa | 4           |
| Módulo de Elasticidade transversal vítreo $G_g$ – MPa     | 200         |
| Módulo de <i>Bulk</i> $K_e$ – GPa                         | 1.5         |

### 3.4 ANÁLISE DOS DADOS

A fase que precede a análise dos dados é fundamental para a simulação da rede neural, pois depende da correta parametrização entre o número de dados utilizados nas entradas e nas saídas esperadas (*targets*). São propostas algumas etapas de seleção, ajuste e organização dos dados coletados no decorrer da execução dos ensaios experimentais.

#### 3.4.1 Identificação dos mínimos

O início da aquisição de dados é anterior à pressurização do sistema e não é sincronizado com a abertura da válvula da bomba. Entende-se que os dados contidos nesse intervalo devem ser evitados na análise numérica. A Figura 19 ilustra o ajuste dos dados de pressão no intervalo de 100 a 250 (posição).



O ajuste proposto via a utilização de uma RNA com 20 neurônios na camada oculta auxilia na visualização no intuito de verificar o exato momento em que a curva apresenta uma

tendência positiva, localizada na posição  $X = 223$  e  $Y = 0,01281$ . Na Figura 19 ainda está representado o erro entre os valores de saída calculados pela RNA correspondente ao ajuste e os valores esperados, ou *targets*.

### 3.4.2 Identificação dos máximos

Os máximos valores medidos são identificados através de laços de programação com condições específicas para tal. Para as deformações, os máximos medidos são identificados pelo máximo valor do vetor que contém as deformações.

Já a pressão de ruptura é identificada pelo laço condicional abaixo, sendo “A” o vetor de pressões em análise. A função *length* retorna como valor de saída o comprimento do vetor e a função *find* identifica todos os valores não nulos do respectivo vetor conforme algoritmo abaixo:

```
teste_ruptura=0.5;

for pp = inicio+1:length(A)
    if A(pp-1,4)-A(pp,4)>=teste_ruptura;
        A(pp:length(A),4)=0;

        end
end

rup = find(A(:,4));
max_ruptura = rup(end,1);
```

### 3.4.3 Modelo numérico em Redes Neurais Artificiais

O uso das Redes Neurais Artificiais se justifica pela alta capacidade de generalização entre dados de entrada e saída de um problema de qualquer natureza física. As equações constitutivas dos polímeros apresentam uma série de propriedades físicas que variam ao longo do tempo, portanto a aproximação de tais funções utilizando-se RNAs é razoável quando não se tem conhecimento dos fenômenos físicos envolvidos ou dados sobre a natureza de tais fenômenos.

É proposto utilizar os dados medidos de pressão e deformação em conjunto com os resultados da solução analítica em uma RNA multicamada retroalimentada com propagação de retorno do erro (*feedforward backpropagation*).

O número de camadas escolhido para as primeiras simulações é: uma camada para os dados de entrada, uma camada oculta e uma para os dados de saída. O número de neurônios por camada será testado ao longo das simulações, logo é variável, mas de acordo com testes prévios e resultados presentes na literatura (ZHANG, Z., FREDERICH, K., 2003; GAO *et al.*, 2015; PRESSOTI *et al.*, 2016) são necessários em torno de 12 e 20 neurônios na camada oculta, dependendo do tipo de parametrização utilizada e da quantidade de dados de entrada da rede neural.

A função de ativação escolhida é a função logística (Sigmoidal), o algoritmo de treinamento de *Levenberg-Marquadt* (HAYKIN, 2008) e o critério de convergência do erro quadrático médio. Os dados são simulados no ambiente *MatLab*® através da ferramenta *nntool*.

Parâmetros de entrada: dados de pressão medidos das posições mínima até a ruptura, normalizados para valores entre 0 e 1 – estabelece a coesão à função de ativação escolhida e a sensibilidade da rede neural.

Saídas esperadas (*targets*): valores de deformação medidos entre o mínimo e máximo identificado pelo pré-processamento dos dados e os valores de deformação calculados analiticamente para CPs pré-definidos. Ambos os valores são concatenados num vetor de mesmo tamanho das entradas da rede neural. Cada CP deverá possuir a sua rede neural e deverá ser treinado apresentando os valores preestabelecidos. A convergência da rede pode ocorrer de duas formas distintas: quando se atingir o número máximo de 1000 iterações ou 6 épocas (também denominadas ciclos).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

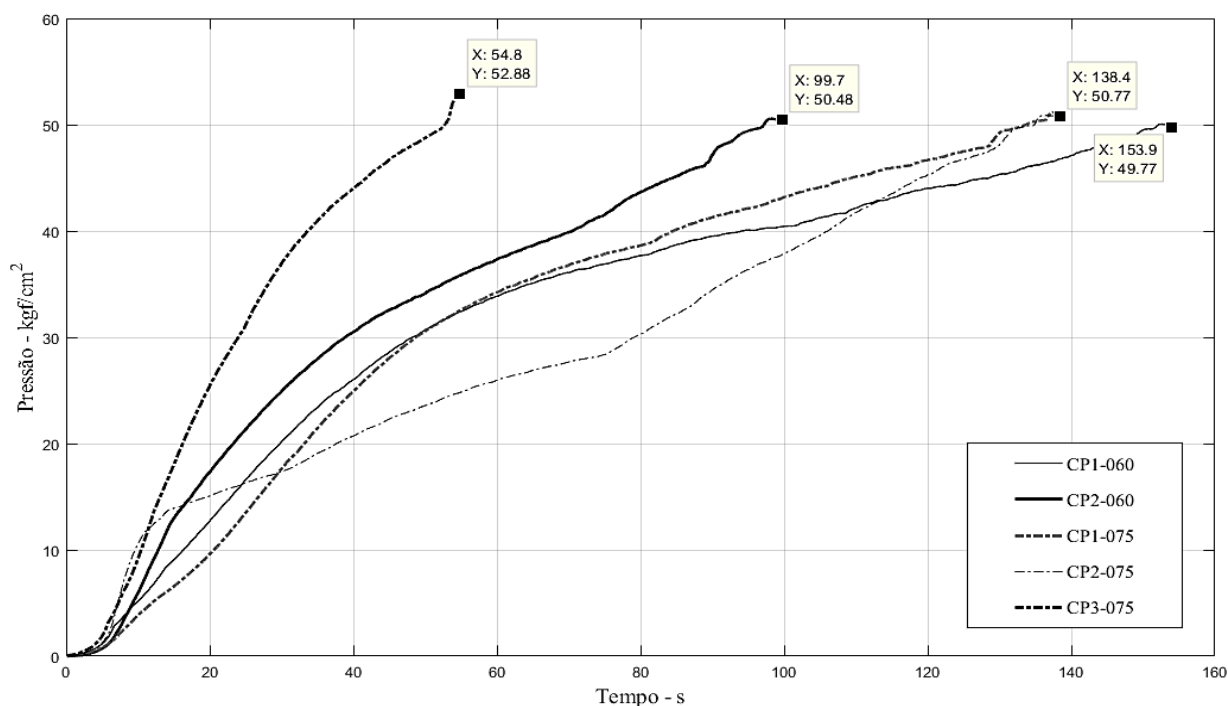
Os dados obtidos experimentalmente foram manipulados computacionalmente por meio dos softwares Matlab® e Mathematica®. O equipamento utilizado: notebook ASUS modelo GL752VW, processador Intel core i7-6700HQ @ 2.60GHz, memória RAM de 16Gb.

### 4.1 PRESSÃO DE RUPTURA

A pressão de ruptura considerada foi calculada através de um laço de programação condicional. O vetor de medidas de pressão teve seus respectivos valores subsequentes submetidos à condição de maior ou igual a  $0,5 \text{ kgf/cm}^2$ . No instante em que a condição de ruptura foi atendida os valores seguintes foram desconsiderados nos cálculos subsequentes.

A Figura 20 ilustra a variação de pressão em alguns CPs durante os testes, desde o instante do mínimo ajustado até a pressão de ruptura correspondente.

FIGURA 20 – PRESSÃO ATÉ A RUPTURA



As pressões de ruptura, indicadas por Y na Figura 20, são de  $52,88 \text{ kgf/cm}^2$  para o CP3\_075 e  $50,77 \text{ kgf/cm}^2$  para o CP1\_075. O símbolo X representa o tempo até a ruptura. Os corpos de prova CP\_030 e CP\_sementalhe apresentaram falha dúctil (ver Figura 21) e

possuem uma característica peculiar no instante anterior à ruptura: a pressão decresce logo após se atingir o limite de escoamento do material e inicia-se o processo de deformação plástica, caracterizado pelo fenômeno de escoamento transversal.

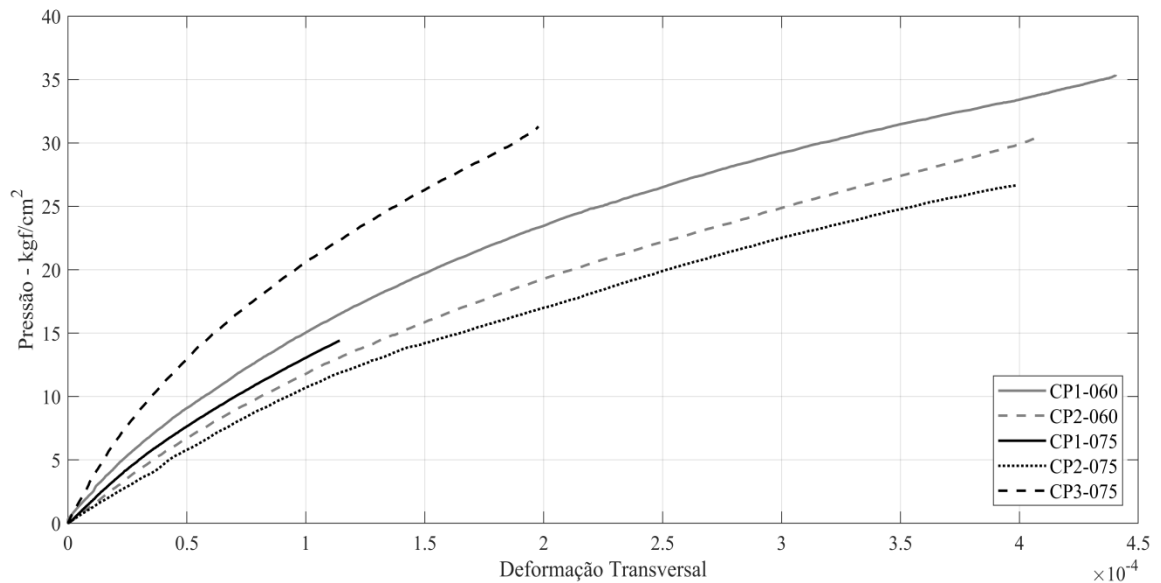
FIGURA 21– ASPECTO DE FALHA DÚCTIL



FONTE: Acervo do Autor (2017).

A Figura 22 ilustra o instante da ocorrência de falha no extensômetro nos CPs indicados conforme a ilustração.

FIGURA 22– TENSÃO CIRCUNFERENCIAL VERSUS DEFORMAÇÃO



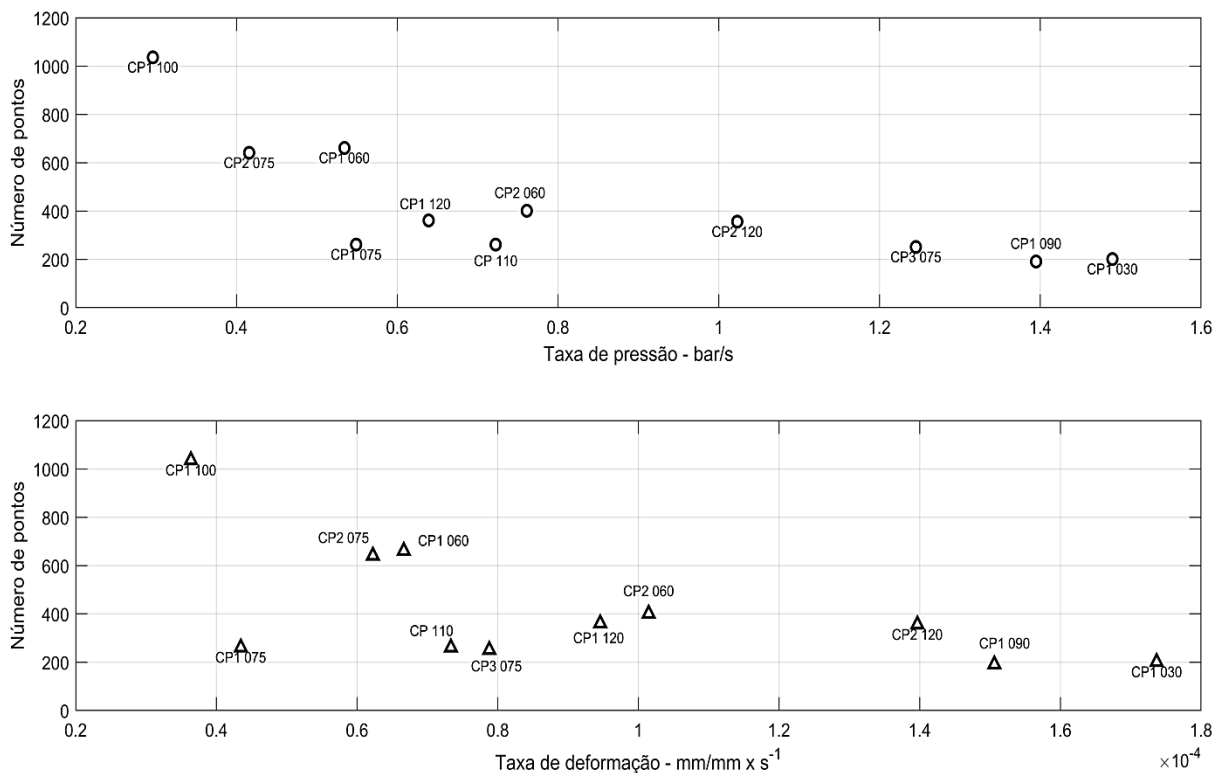
Ao longo dos primeiros testes foi identificado que os extensômetros mediam apenas até o respectivo limite de sensibilidade transversal, igual a 0.4%. Entretanto, como todos os extensômetros já estavam instalados nos CPs foi decidido dar sequência na programação dos ensaios normalmente.

Observando a Figura 22 nota-se que o comportamento mecânico de cada CP é distinto. Isto ocorre devido às diferentes taxas de pressão aplicadas, o que pode ser um indício de alteração das propriedades mecânicas do PEAD PE-100 como função das diferentes taxas de deformação, conforme observado em Roylance (2001), Peres (2005), Ciniello *et al.* (2016).

#### 4.2 TAXA DE PRESSÃO E DEFORMAÇÃO

A taxa de pressão aplicada, indicada por  $\dot{p}$ , e da resposta em deformação  $\dot{\epsilon}$  até o instante de falha dos extensômetros estão dispostos na Figura 23.

FIGURA 23 – TAXAS DE PRESSÃO E DEFORMAÇÃO



É possível visualizar a boa relação entre a taxa de pressão aplicada e a respectiva taxa de deformação. Os CPs cuja taxa de pressão aplicada são inferiores a 0,6 bar/s foram

desconsiderados na análise numérica devido ao fato de estes não apresentarem uma solução analítica compatível com os parâmetros materiais utilizados, conforme será abordado no tópico a seguir.

### 4.3 SOLUÇÃO ANALÍTICA

A sequência de figuras a seguir (figura 24 a 35) apresenta a solução analítica do problema viscoelástico para cada um dos CPs. As linhas cheias representam a solução e as pontilhadas são os dados medidos de deformação ao longo de cada rodada de teste. Nota-se que alguns CPs apresentam uma solução mais próxima aos dados coletados experimentalmente, o que sugere uma convergência dos parâmetros materiais estimados no presente trabalho.

FIGURA 24 – CP1\_060

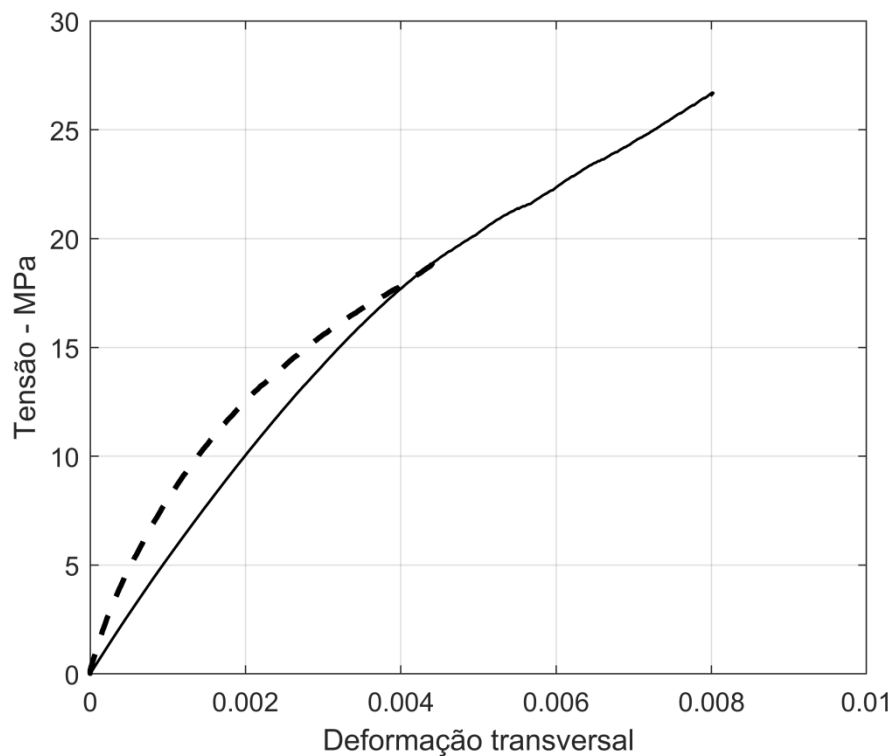


FIGURA 25 – CP2\_060

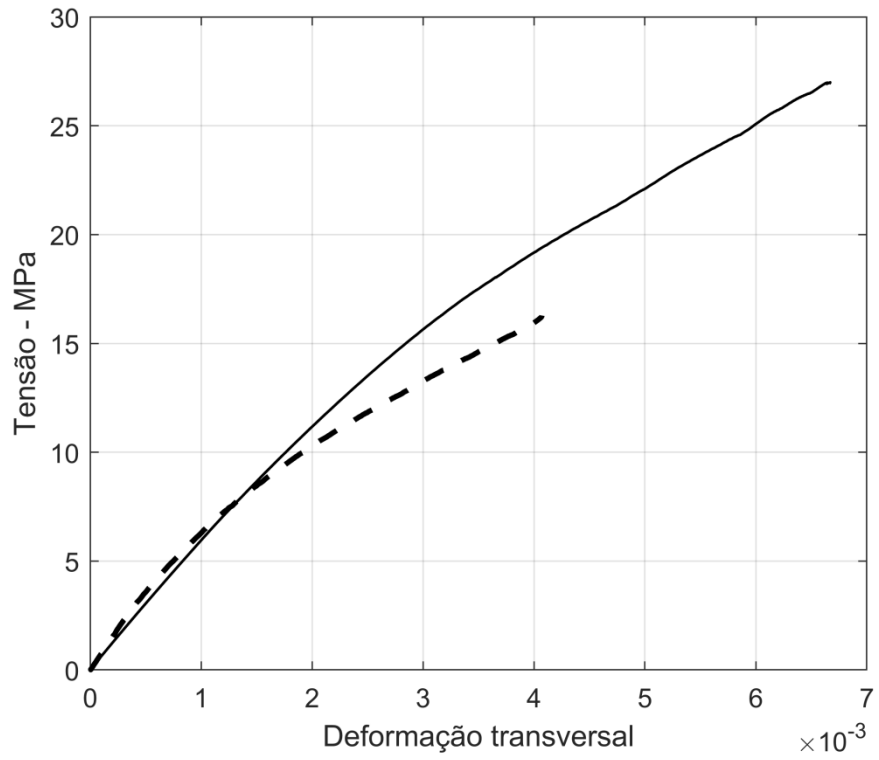


FIGURA 26 – CP1\_075

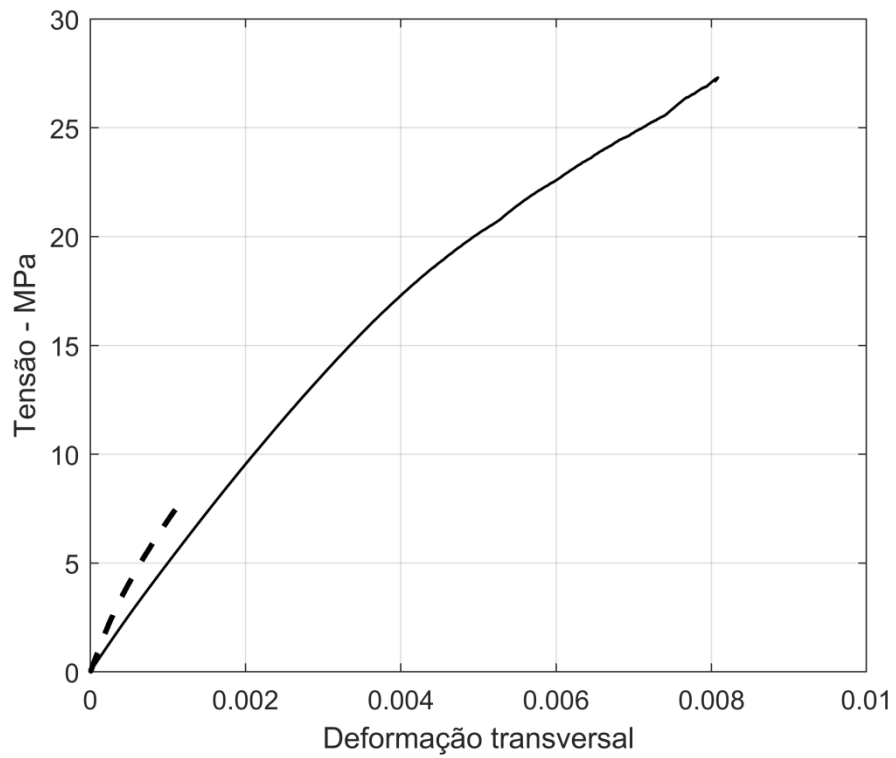


FIGURA 27 – CP2\_075

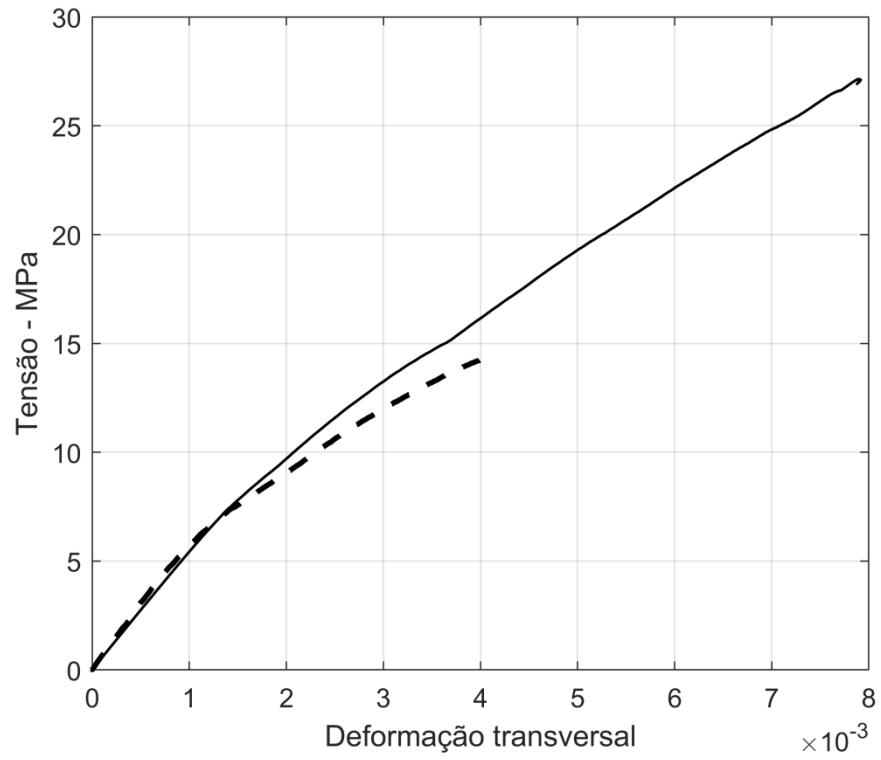


FIGURA 28 – CP3\_075

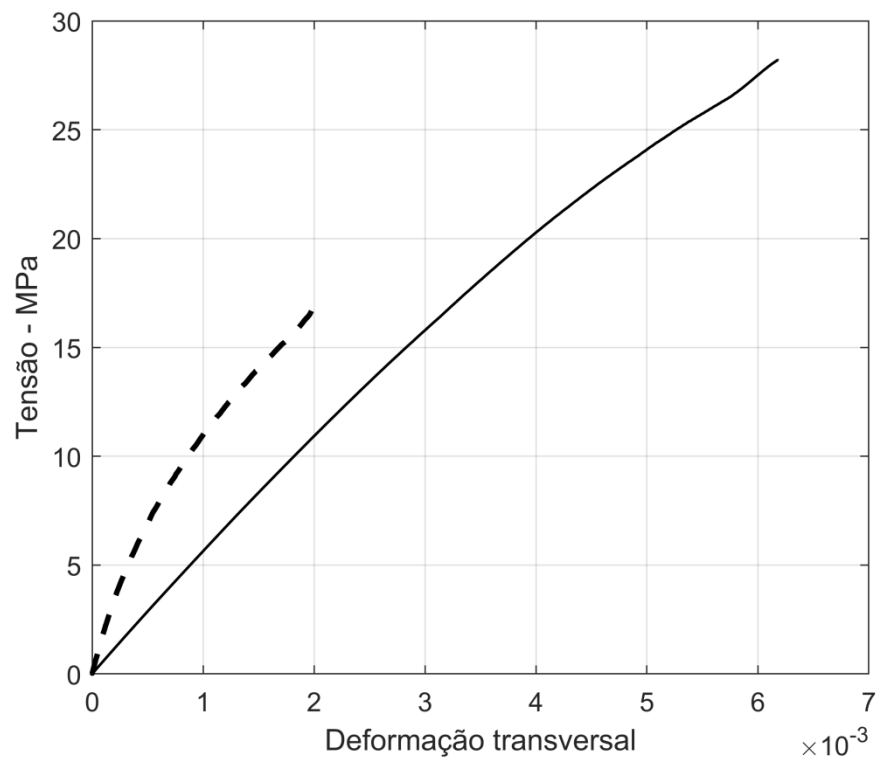


FIGURA 29 – CP1\_090

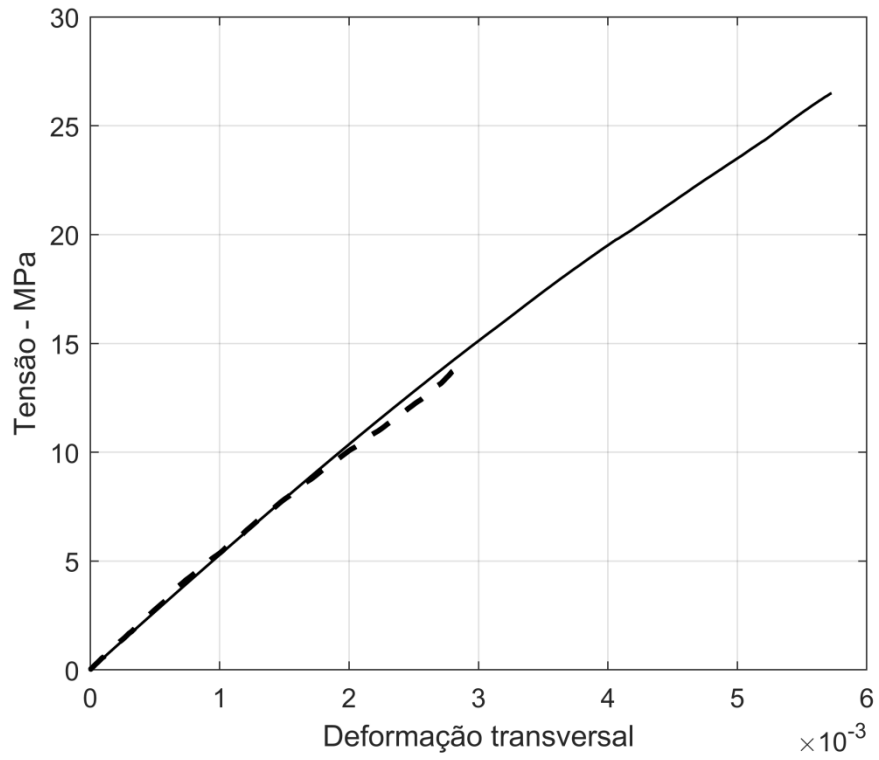


FIGURA 30 – CP1\_100

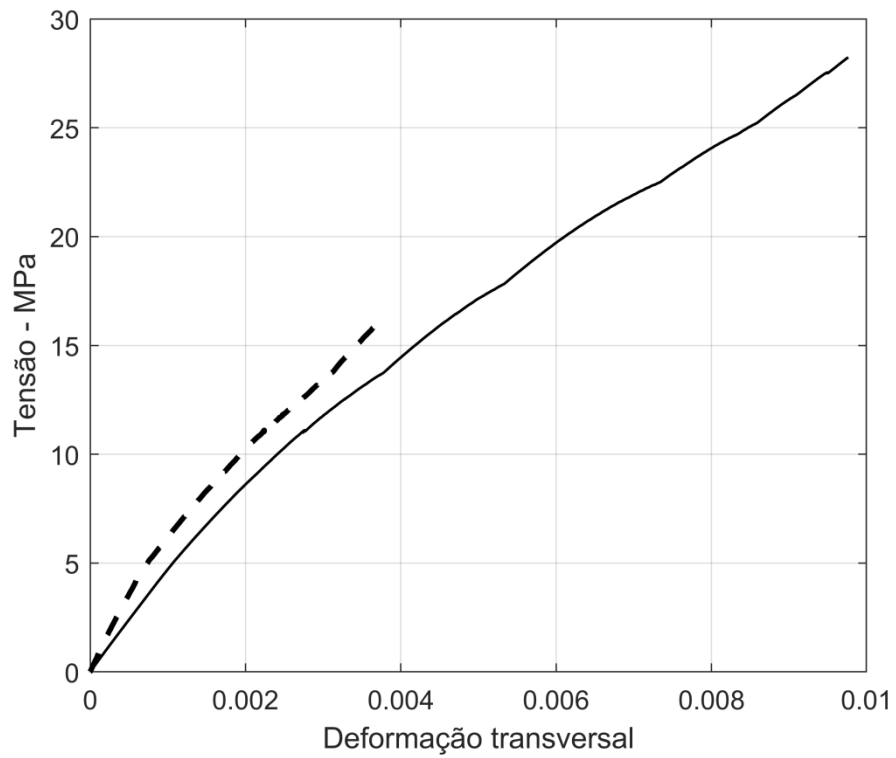


FIGURA 31 – CP1\_110

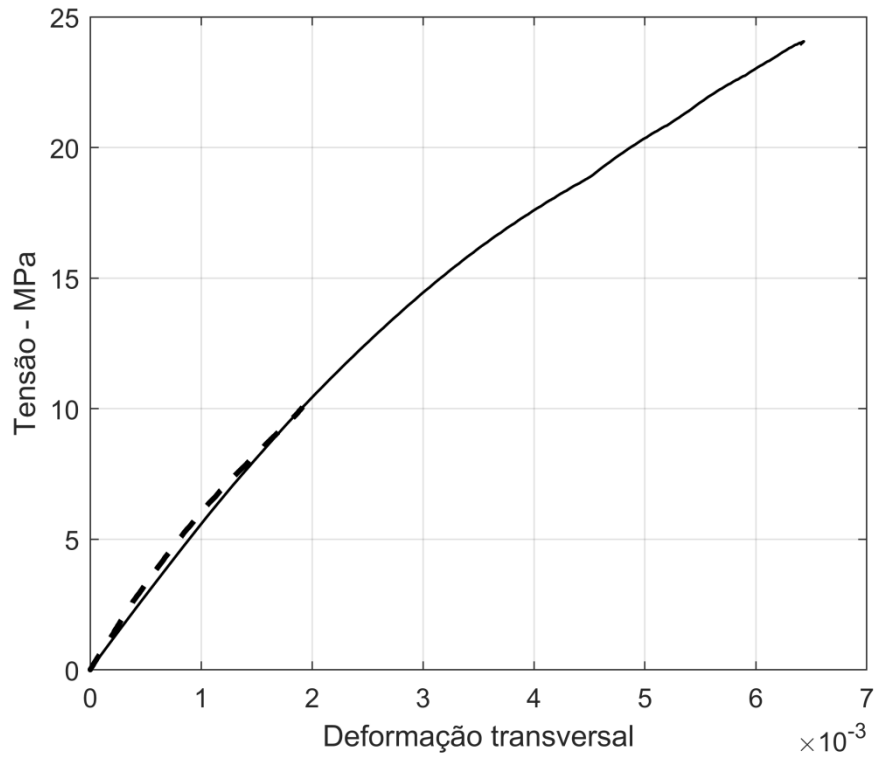


FIGURA 32 – CP1\_120

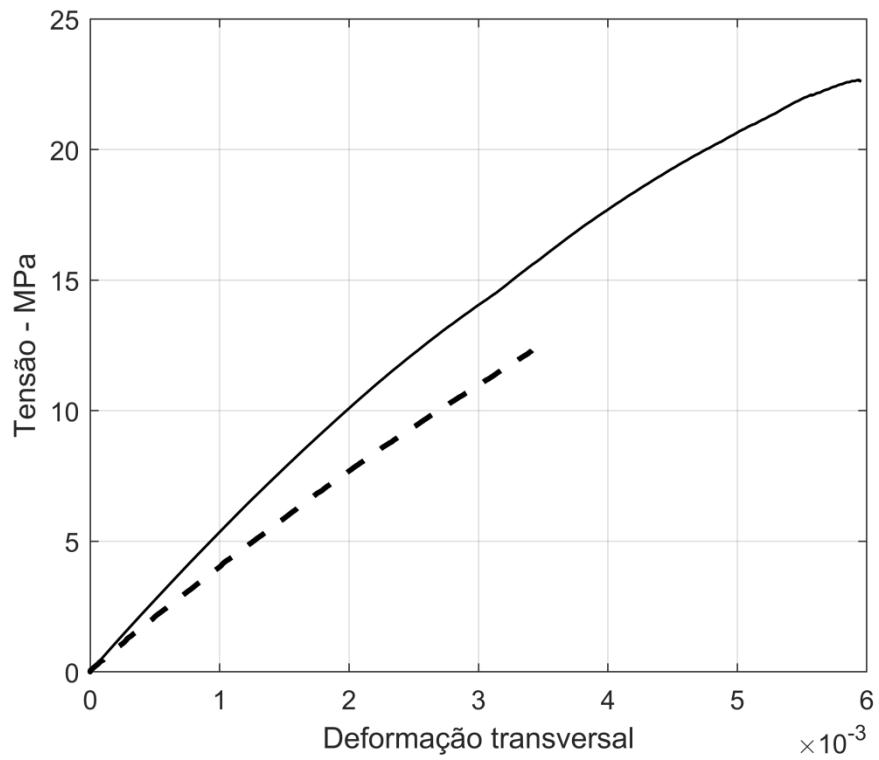


FIGURA 33 – CP2\_120

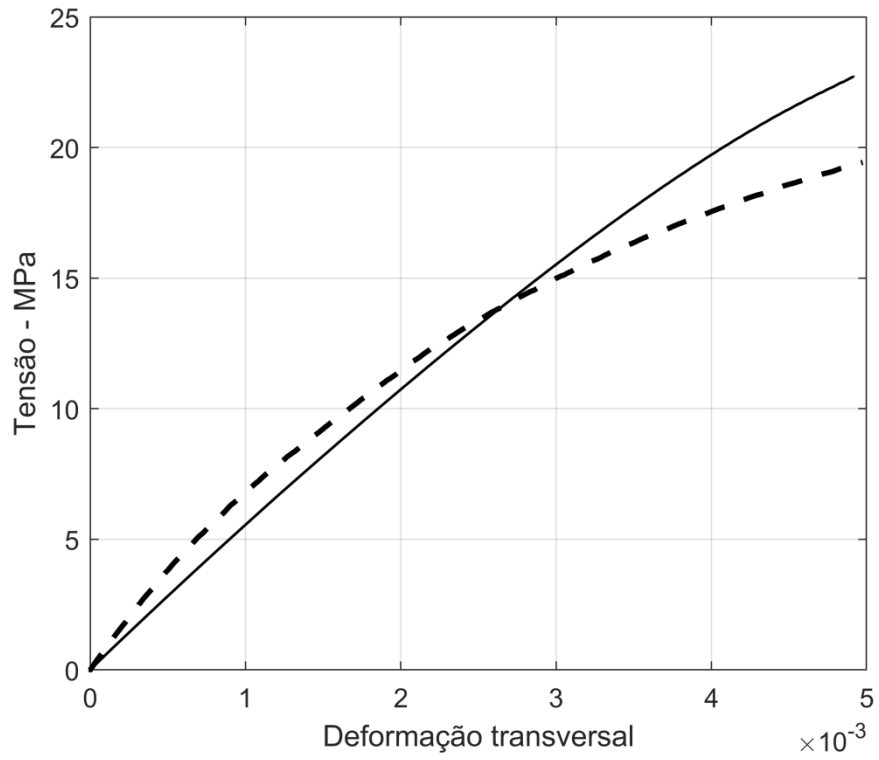


FIGURA 34 – CP\_030

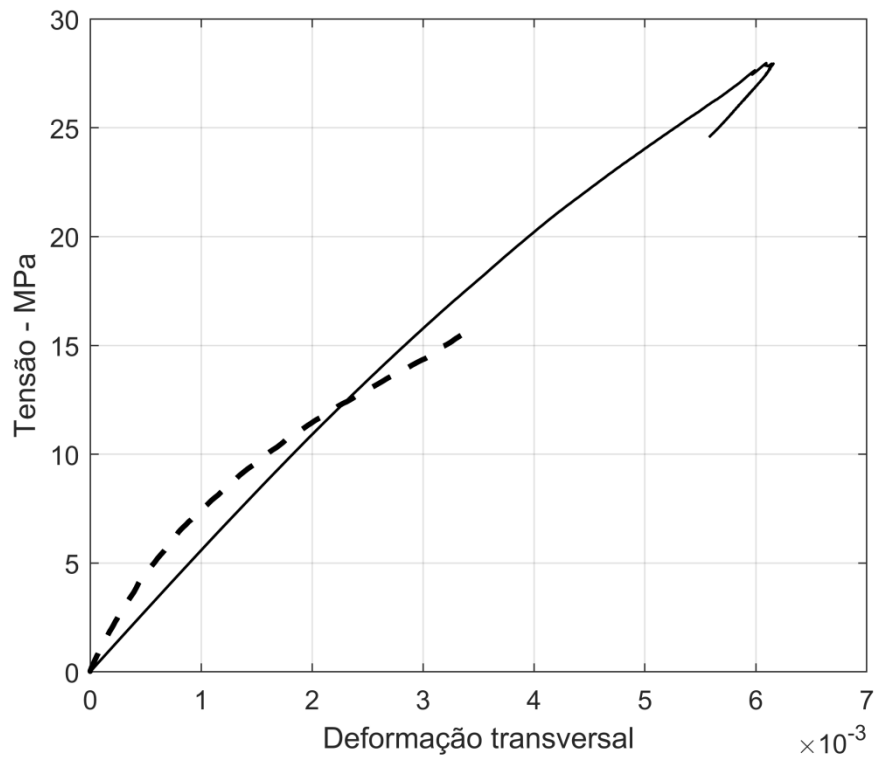
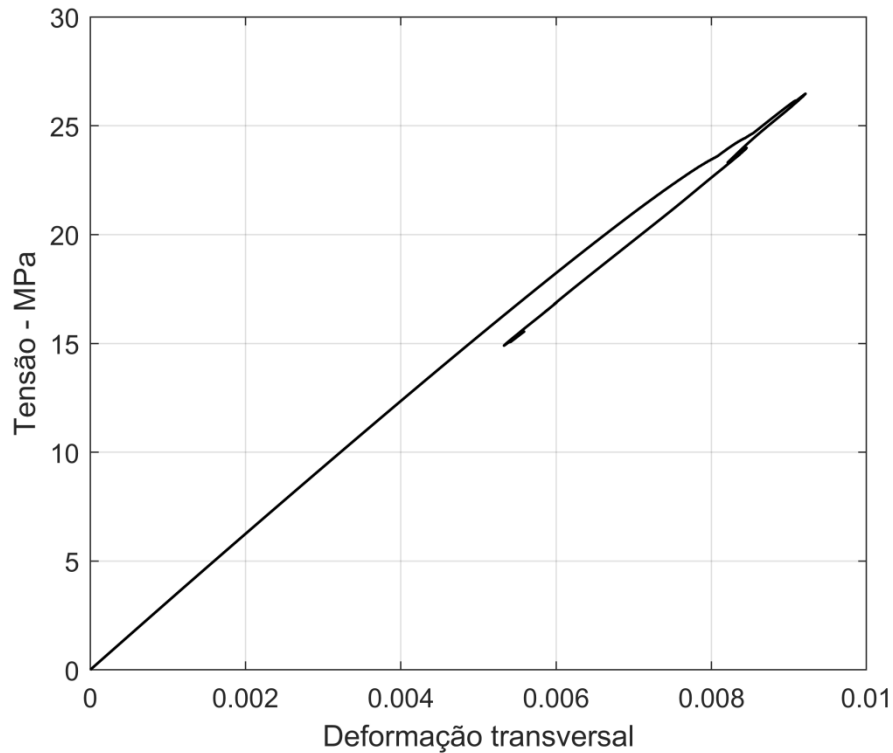


FIGURA 35 – CP\_SEM\_ENTALHE



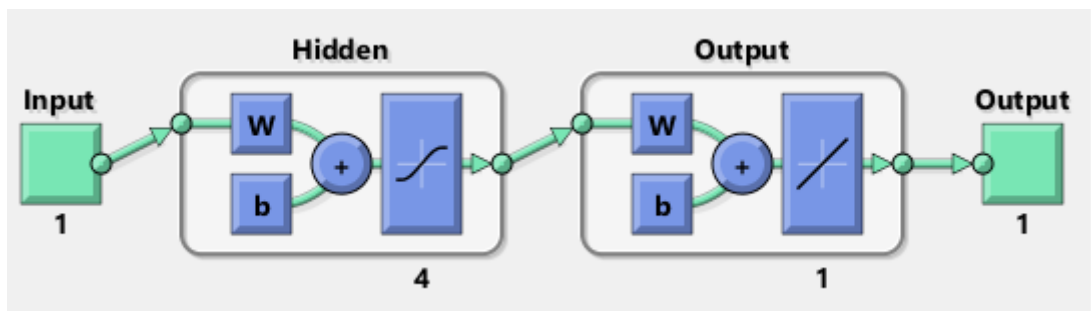
As Figuras 34 e 35 contemplam valores analíticos de deformação que não representam a realidade do comportamento mecânico observado no ensaio. As curvas das respectivas figuras não estão representando um descarregamento em ensaio de tração, como observado nos metais. É fato que os CPs CP\_030 e sem entalhe não poderiam apresentar uma solução coerente, tendo em vista as deformações estarem distantes da região de falha. Outro ponto é que a resposta em deformação é proporcional à pressão aplicada (conforme observado pela equação 2.19), pois não considera efeitos de mudança de regime – elástico para plástico, por exemplo.

De forma geral, os resultados representam, de forma aproximada, o comportamento mecânico viscoelástico dos CPs: CP2-060, CP2-075, CP1-090, CP1-110, CP1-120. Os CP3-075 e CP2-120 apresentaram resultados adequados, mas foram desconsiderados na análise numérica por já contemplarem uma amostra (CP2\_075 e CP1\_120). O corpo de prova designado CP-030 e o CP\_sentalhe apresentaram falha distante da região do entalhe, por conta disso não foram utilizados na RNA.

#### 4.4 SOLUÇÃO NUMÉRICA

A simulação dos CPs CP2-060, CP2-075, CP1-090, CP1-110, CP1-120 estão representadas nas Figuras 37 a 41. A linha pontilhada representa os dados de entrada e resultados esperados da rede (*targets*), a linha cheia são os dados de saída. A RNA utilizada possui 4 neurônios na respectiva camada oculta, pois ao se aumentar a quantidade de neurônios foi observado o fenômeno de ajuste excessivo, ou *overfitting*.

FIGURA 36 – ASPECTO DA REDE NEURAL NO AMBIENTE MATLAB®



A Figura 36 mostra o aspecto da RNA no ambiente computacional. A caixa *input* é a camada de entrada da rede e contém os respectivos valores de entrada. A caixa intermediária contém os 4 neurônios ocultos (*hidden layer*) e a caixa intermediária de saída (*output*) contém os valores dos resultados esperados (*targets*).

FIGURA 37 – RNA CP2\_060

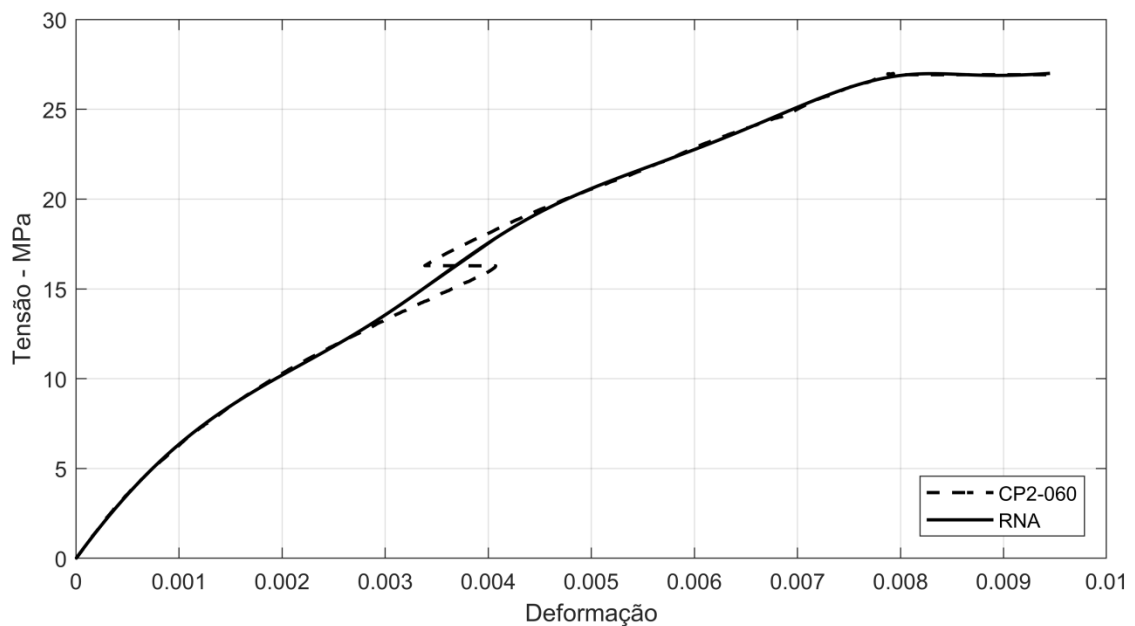


FIGURA 38 – RNA CP2\_075

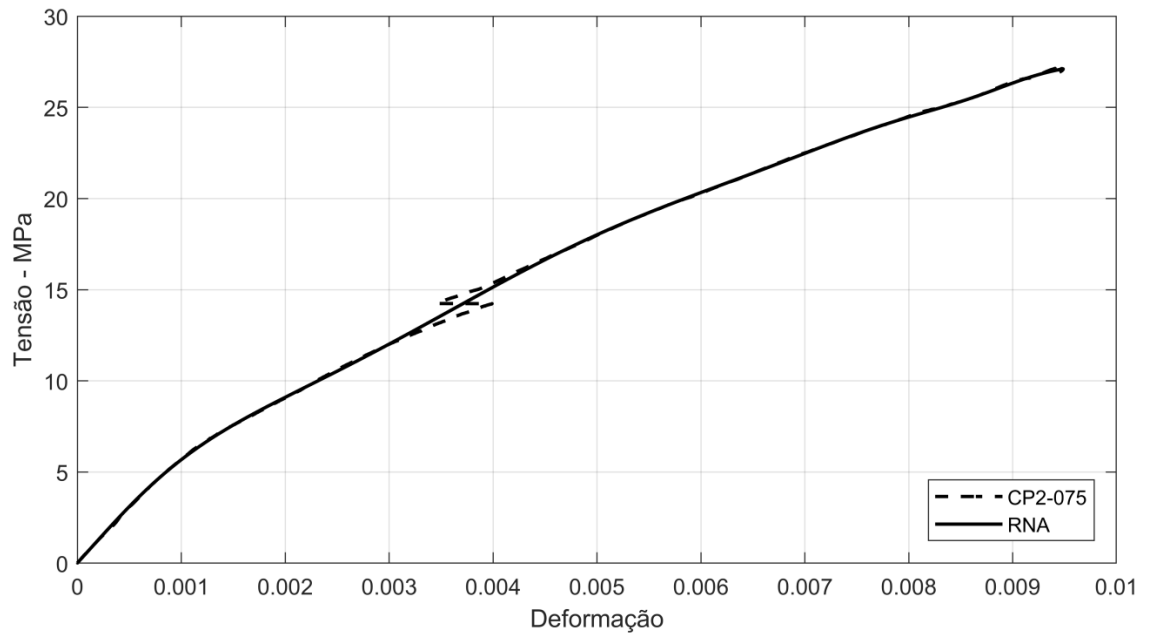


FIGURA 39 – RNA CP1\_090

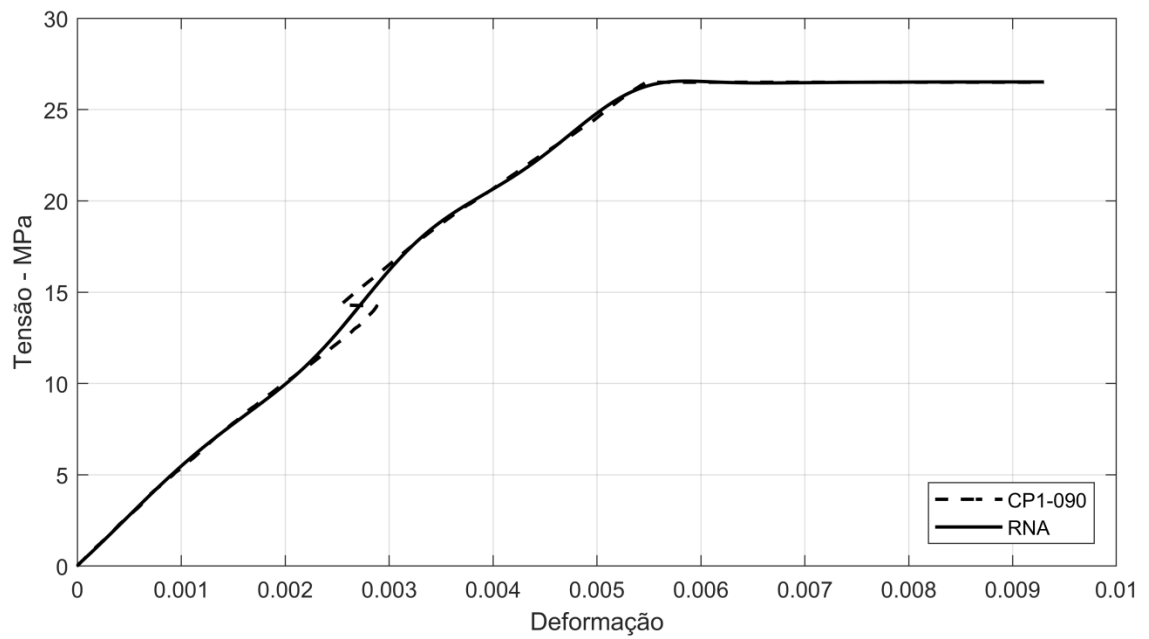


FIGURA 40 – RNA CP1\_110

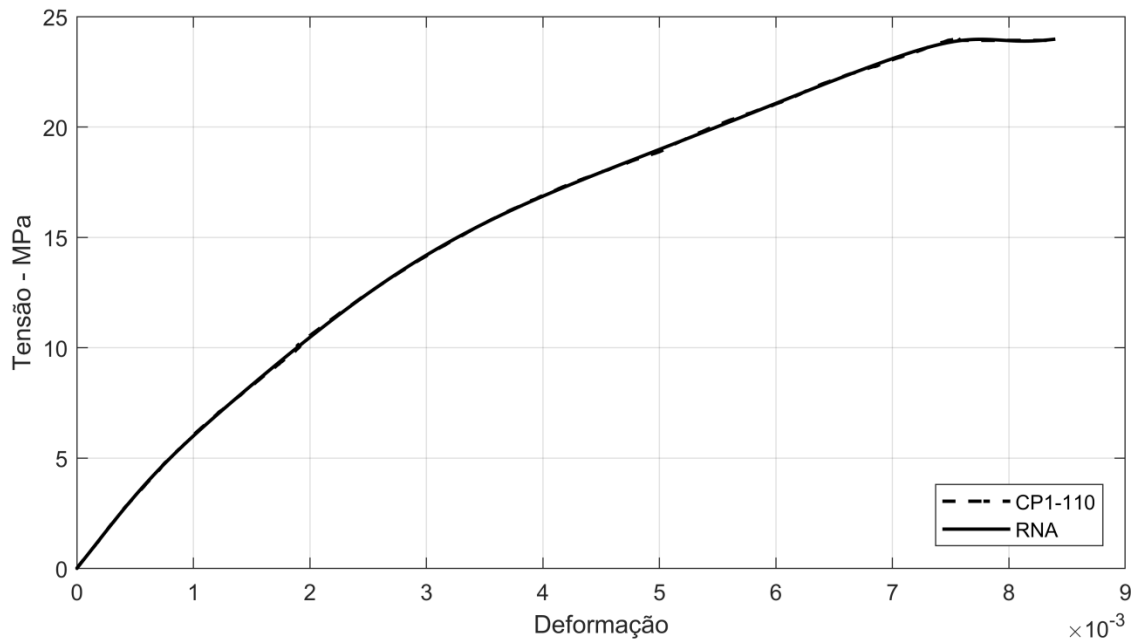
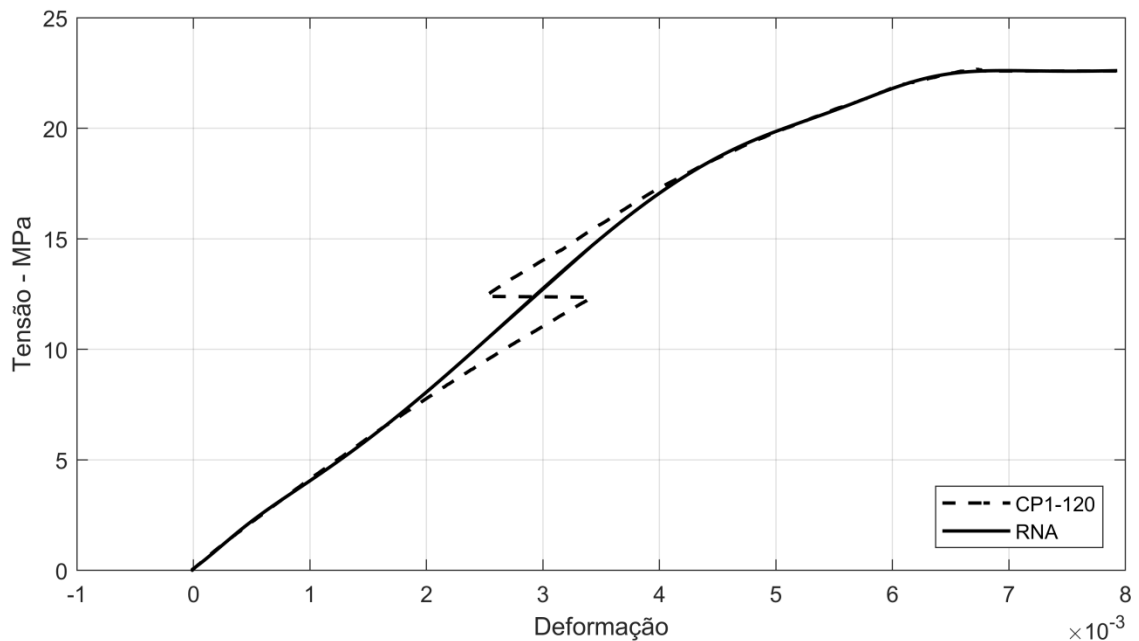


FIGURA 41 – RNA CP1\_120

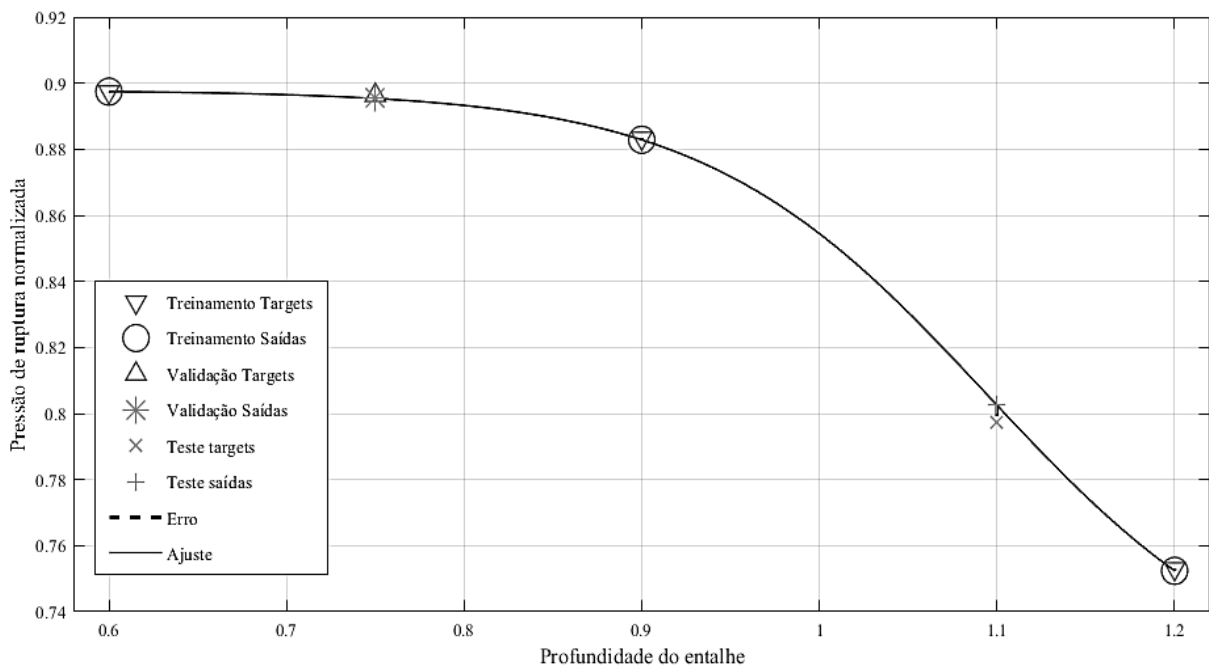


As 5 simulações apresentaram uma característica peculiar. Os dados de entrada (deformação) e *targets* (tensão) da RNA, representados pela linha pontilhada, apresentam uma descontinuidade, aproximadamente na metade de todas as curvas. Essa característica é resultado da concatenação dos vetores de deformação experimental, de 0 (zero) até o limiar contínuo e deformação analítica nos valores subsequentes. Essa descontinuidade foi suavizada

pela rede neural, conforme se pode observar nas Figuras 37, 39 e 41. As figuras 38 e 40 tiveram resultados mais próximos àqueles observados na solução analítica – CP2\_075 e CP1\_110.

A Figura 42 ilustra uma simulação efetuada a partir dos dados de pressão de ruptura normalizados – valores entre 0 e 1 no eixo das ordenadas.

FIGURA 42 – PRESSÃO DE RUPTURA NORMALIZADA POR ENTALHE



A Figura 42 mostra uma queda acentuada na pressão de ruptura a partir de, aproximadamente 0,90 mm de profundidade de entalhe. O ajuste da curva ocorreu através da utilização de apenas 1 neurônio na camada oculta da RNA correspondente. Cada símbolo da legenda da Figura 42 representa a distribuição dos dados de entrada entre dados de validação dos *targets*, dados de validação das saídas, dados de teste dos *targets* e de teste das saídas. Estas são características inerentes às redes neurais artificiais e servem para dar robustez à análise e contribuir na rapidez da convergência dos resultados esperados, elucidando dessa forma a eficiência das RNAs no ajuste de curvas de natureza diversa.

## 5 CONCLUSÃO

### 5.1 MODELO EXPERIMENTAL

O modelo experimental descrito no presente trabalho se mostrou eficiente e abrangente, pois descreve os procedimentos para medição da pressão e das deformações nos CPs, é um teste rápido e conseqüentemente barato para ser reproduzido. A medição da deformação nos CPs foi prejudicada, pois a quantidade de dados medidos foi pequena e variável ao longo dos testes o que dificultou uma análise integral dos fenômenos relacionados. Considerando os erros sistemáticos envolvidos nas medições como equivalentes para todos os CPs, pode-se dizer que o PEAD possui um comportamento viscoelástico linear para pequenas deformações, ou seja, a relação entre a tensão e a deformação pode ser representada por uma reta. Ao passo que a pressão vai aumentando, o material inicia os processos de deformação característicos. Nessa etapa é fato que a visualização da deformação microscópica MEV é fundamental para visualizar o mecanismo de falha preponderante na região do entalhe, portanto sugere-se tal avaliação em trabalhos subsequentes.

Os procedimentos de pressurização e aquisição de dados se mostraram eficientes e úteis aos objetivos do trabalho. Sugere-se aqui controlar a vazão de saída da bomba de água por meio de uma válvula de controle. Independentemente do tipo de curva associada à pressão, a ruptura ocorreu de forma frágil, ou seja, sem escoamento aparente do material e sem o crescimento do entalhe. As exceções são as amostras do entalhe 0.30 e sem entalhe, onde houve grandes deformações plásticas.

Oportunamente pode-se escolher um extensômetro que seja capaz de aferir grandes deformações. Assim, a gama de dados adquiridos poderá abranger todo o espectro das deformações circunferenciais do modelo experimental.

### 5.2 SOLUÇÃO ANALÍTICA

A solução via princípio da correspondência está representada no anexo 1 do presente trabalho. Pode-se observar que alguns CPs estão com a solução mais próxima aos dados medidos, o que pode ser um indício de convergência dos parâmetros materiais utilizados. Pode-se, futuramente, aplicar técnicas de otimização para avaliar o comportamento mecânico dos CPs dado uma gama de parâmetros materiais. Com isso, a comparação dos resultados possibilitará verificar a sensibilidade das propriedades ao histórico de carregamento.

Os parâmetros como módulo volumétrico (*bulk modulus*) e de cisalhamento (*shear modulus*) são associados às deformações em volume e forma do material, respectivamente. Os parâmetros que influenciam a solução do modelo analítico mais significativamente são: o módulo de *Bulk* vítreo  $G_g$  e o tempo de relaxação  $\tau$ . Ao se aumentar o módulo volumétrico para valores superiores a 2 GPa, as deformações tendem a um comportamento na forma de uma curva exponencial suave. Diminuindo-se o módulo volumétrico, o módulo elástico associado  $K_e$  é o parâmetro preponderante na análise, a forma da curva se aproxima a uma reta de coeficiente linear baixo, distante dos valores medidos. As deformações em volume são sensíveis à pressão interna, dessa forma para valores pequenos do módulo volumétrico, a deformação total é mal representada.

Outro parâmetro sensível é o tempo de relaxação  $\tau$ . Para valores pequenos, de 1 a 10 segundos, as tensões provocam deformações independentes do histórico de carregamento envolvido, ou seja, o material não sofre a influência da sobreposição de efeitos em curto intervalo de tempo. Para tempos de relaxação da ordem de 1000 segundos, o material se deforma mais, pois a sobreposição de efeitos ocorre de forma mais intensa. Foi escolhido  $\tau$  inicial igual a 100 segundos, pois os resultados se aproximaram a realidade do ensaio.

### 5.3 MODELO NUMÉRICO

A rede neural convergiu com 4 neurônios na camada oculta. Acrescentando neurônios na rede ocorre o fenômeno do *overfitting*. A convergência para a representação das curvas pressão x deformação foi rápida pelo fato de se terem uma quantidade suficientes de dados experimentais e calculados analiticamente. A normalização dos dados de tensão melhorou a eficiência da rede, pois limitou os valores entre os limites da função de ativação 0 e 1. As pressões de ruptura para valores intermediários de entalhe podem ser estimadas pela visualização da figura 26 mostrando uma queda significativa para entalhes superiores a 0.90 mm, 30% da espessura da parede do CP. Os corpos de prova com baixas taxas de pressão apresentaram a ruptura num local distante daqueles representados na figura 26, o que indica que a taxa de deformação envolvida e os parâmetros dos materiais se modificam sob uma condição de taxas de deformação baixa. No modelo proposto não foram considerados os parâmetros materiais na arquitetura da rede neural, o que é justificado pela utilização de uma solução analítica como ferramenta de auxílio da rede. É válido lembrar que as redes neurais são modelos não determinísticos, ou seja, independem dos fenômenos físicos envolvidos, portanto se trata de uma ferramenta puramente matemática.

#### 5.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se a realização de novos ensaios com um aumento na amostragem e nos diâmetros dos CPs utilizados, no intuito de validar o modelo proposto no presente trabalho. Pode-se comparar a solução analítica considerando-se modelos viscoelásticos distintos, como os generalizados de Maxwell, Kelvin e Zener.

Modelagem do CP via elementos finitos a fim de avaliar o comportamento mecânico do material e posterior análise comparativa com as respectivas curvas das tensões circunferenciais vs. deformação do modelo numérico via redes neurais.

A realização de testes hidrostáticos de longa duração nos CPs com entalhes no intuito de avaliar uma possível redução no tempo de vida útil remanescente através do método da extrapolação padrão.

## REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT. NBR 14462:2000 – Sistemas para distribuição de gás combustível para redes enterradas – Tubos de polietileno PE 80 e PE 100 – Requisitos. São Paulo, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TUBOS POLIOLEFÍNICOS E SISTEMAS. **Manual de Boas Práticas** - Procedimentos de Reparo. 2013. Disponível em: <[http://www.abpebrasil.com.br/cartilha/4\\_5.pdf](http://www.abpebrasil.com.br/cartilha/4_5.pdf)>. Acesso em: 02 jun. 2016.

BETTEN, Josef. **Creep Mechanics**. 3. ed. Aachen: Springer, 2008.

BRINSON, Hal F.; BRINSON, L. Catherine. **Polymer engineering science and technology: an introduction**. New York: Springer, 2008.

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G. **Material Science and Engineering: An Introduction**. 8. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2012.

CANEVAROLO JUNIOR, Sebastião V. **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo: Artliber, 2004.

CAREGLIO, C. A.; CANALES, C.; PAPELEUX, L.; PONTHOT, J.-P.; MIRASSO, A. E. An implementation of the generalized maxwell viscoelastic constitutive model. **Mecânica Computacional**, v. XXXIII, n. 1215, p. 1179–1192, 2014.

CINIELLO, Ana Paula Delowski . **Aplicação do cálculo fracionário na identificação do módulo de relaxação de materiais viscoelásticos no domínio do tempo**. 2016. 156 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; SANTA MARIA, L. C. D. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. **Polímeros**, v. 13, p. 01-13, 2003.

CHOI, Byoung-ho et al. Experimental and theoretical investigation of stress corrosion crack (SCC) growth of polyethylene pipes. **Polymer Degradation and Stability**. v. 94, p. 859-867. 2009.

CHUDNOVSKY, Alexander. **Crack Layer Theory**: NASA Contractor Report 174634. Cleveland: Ntis, 1983.

CHUDNOVSKY, A.; KACHANOV, M. Interaction of a crack with a field of microcracks. **International Journal of Engineering Science**, v. 21, n. 8, p. 1009-1018, 1983.

CHUDNOVSKY, Alexander. Statistics and thermodynamics of fracture. **International Journal of Engineering Science**, v. 22, n. 8–10, p. 989-997, 1984.

CHUDNOVSKY, Alexander et al. Ductile-Brittle Transition in Mechanisms of Slow Crack Growth in Engineering Thermoplastics. **Procedia Engineering**, v. 10, p. 1473-1478, 2011.

CHUDNOVSKY, Alexander et al. Lifetime assessment of engineering thermoplastics. **International Journal of Engineering Science**. v. 59, p. 108-139. Oct. 2012.

CHUDNOVSKY, A. Slow crack growth, its modeling and crack-layer approach: A review. **International Journal of Engineering Science**, v. 83, p. 6-41, Oct. 2014.

DEBLIECK, R. A. C. et al. Failure mechanisms in polyolefines: The role of crazing, shear yielding and the entanglement network. **Polymer**, v. 52, n. 14, p. 2979-2990, 2011.

FRANK, A.; PINTER, G. Evaluation of the applicability of the cracked round bar test as standardized PE-pipe ranking tool. **Polymer Testing**, v. 33, p. 161-171, 2014.

GAO, Y.; LI, H.; WEI, G.; HE, Y. Viscoelastic analysis of a sleeve based on the BP neural network. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 29, n. 11, 2015.

HAYKIN, SIMON. **Neural Networks and Learning Machines**. 3. ed. New Jersey: Pearson Education, Inc. 2008.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. EN ISO 9080: Plastics piping and ducting systems - Determination of the long-term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation. Brussels: Cen, 2012.

KALPAKJIAN, S., SHMID, S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**. New York: Prentice Hall, 2009.

KREYSZIG, Erwin. **Advanced Engineering Mathematics**. Ohio: Jon Wiley & Sons Inc., 2006.

KRISHNASWAMY, R. K. Analysis of ductile and brittle failures from creep rupture testing of high-density polyethylene (HDPE) pipes. **Polymer**, v. 46, n. 25, p. 11664-11672, 2005.

LAIARINANDRASANA, L. et al. Experimental study of the crack depth ratio threshold to analyze the slow crack growth by creep of high density polyethylene pipes. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 122, p. 22-30, 2014.

LANG, R.W., PINTER, G., BALIKA, W. "Ein neues Konzept zur Nachweisführung für Nutzungsdauer und Sicherheit von PE-Druckrohren bei beliebiger Einbausituation". **3R international**, v. 44(1-2), p. 33-41, 2005.

MAJID, F.; ELGHORBA, M. HDPE pipes failure analysis and damage modeling. **Engineering Failure Analysis**, v. 71, p. 157-165, 2017.

MESQUITA, Fábio Agnelli. **Modificação das propriedades do polietileno de alta densidade por diferentes condições de extrusão**. 2010. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

NEZBEDOVÁ, E. et al. The applicability of the Pennsylvania Notch Test for a new generation of PE pipe grades. **Polymer Testing**, v. 32, n. 1, p. 106-114, 2013.

OLIVEIRA, Emanuel Igor da Silva et al. A VERSATILIDADE DOS COMPOSTOS DE COORDENAÇÃO NA PRODUÇÃO DE POLIETILENOS: UMA REVISÃO DOS SISTEMAS CATALÍTICOS. **Quím. Nova**, São Paulo, v. 38, n. 1, p. 97-105, 2015.

PAGLIOSA, Cleber. **Determinação experimental de propriedades viscoelásticas de material polimérico**. 2004. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

PERES, Fabiano Moreno. **Desenvolvimento de métodos alternativos para a avaliação da resistência à fratura por fluência de resinas de polietileno utilizadas para a extrusão de tubos de água**. 2005. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

PRESOTI, M.; MARTINS, F. V. C.; WANNER, E. F.; LOPES, W. Simulation via Artificial Neural Networks and Mechanic Behavior Analysis of Steel AISI 430. **IEEE Latin America Transaction**, v. 14, n. 4, p. 1972–1979, 2016.

ROYLANCE, David. Engineering viscoelasticity. **Department of Materials Science and Engineering—Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA**, v. 2139, p. 1-37, 2001.

SEHANOBISH, K.; MOET, A.; CHUDNOVSKY, A. Crack layer analysis of nonmonotonic fatigue crack propagation in high density polyethylene. **Polymer**, v. 28, n. 8, p. 1315-1320, 1987.

SUN, N.; WENZEL, M.; ADAMS, A. Morphology of high-density polyethylene pipes stored under hydrostatic pressure at elevated temperature. **Polymer**, v. 55, n. 16, p. 3792-3800, 2014.

VENKATESAN, S.; BASU, S. Investigations into crazing in glassy amorphous polymers through molecular dynamics simulations. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 77, p. 123-145, 2015.

WARD, Ian Macmillan; SWEENEY, John. **An introduction of solid mechanics properties of solid polymers**. 2 ed. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2004.

ZERBST, U.; KLINGER, C.; CLEGG, R. Fracture mechanics as a tool in failure analysis - Prospects and limitations. **Engineering Failure Analysis**, v. 55, p. 376-410, 2015.

ZHANG, Jingyu. **Experimental Study of Stress Cracking in High Density Polyethylene Pipes**. 2005. 164 f. Tese (Ph.D.) - Geotechnical Engineering, Drexel University, Philadelphia, 2005.


ZHANG, H.; ZHOU, Z.; CHUDNOVSKY, A. Applying the crack-layer concept to modeling of slow crack growth in polyethylene. **International Journal of Engineering Science**, v. 83, p. 42-56, 2014.

ZHANG, Y.; BEN JAR, P.-Y., Quantitative assessment of deformation induced damage in polyethylene pressure pipe. **Polymer Testing**. V. 47, p. 42-50, 2015.

ZHANG, Z.; FRIEDRICH, K. Artificial neural networks applied to polymer composites : a review. **Composites Science and Technology**, v. 63, p. 2029–2044, 2003.

ZHAO, Y.; CHOI, B. H.; CHUDNOVSKY, A. Characterization of the fatigue crack behavior of pipe grade polyethylene using circular notched specimens. **International Journal of Fatigue**. v. 51, p. 26-35, 2013.

## APÊNDICE 1 – CERTIFICADO PEAD PE-100

|   |  |                                      |
|---|--|--------------------------------------|
|  | <b>TIGRE S.A. - TUBOS E CONEXÕES</b><br>Rua dos Bororós, 84 - Joinville - SC - Brasil<br>Tel.: (+47) 3441 - 5000<br>Fax: (+47) 3441 - 5225 | <b>Protocolo Nº</b><br><b>500114</b> |
|   | <b>RELATÓRIO DE TESTES - PHI</b>   |                                      |
| 18-06-2014  |  |                                      |
| <b>Informação do cliente</b>  |  |                                      |
| Id Cliente:   | TIGRE SA TUBOS E CONEXÕES  |                                      |
| Telefone:   | 47 3441 5333   |                                      |
| Contato:  | CLAITO OLIVEIRA  |                                      |
| <b>Descrição</b>  |  |                                      |
| Remessa:  | 252/253/254  |                                      |
| Lote de produção:   | E008   |                                      |
| Produto:  | TUBO PE 100 GAS PN 7 SDR 11 63X5,8/ 200X18,2/ 32 X 3,0   |                                      |
| Observações:  | ENSAIO REALIZADO CONFORME NBR 8415   |                                      |
| <b>Parametros do ensaio</b>   |  |                                      |
| ID Dispositivo:   | DRUCK MITTEL TRP2-0025   |                                      |
| Est./Ramif.:  | 5 /4   |                                      |
| Tanque/Estufa:  | 2  |                                      |
| Temperatura:  | 79,5   | °C                                   |
| Pressão nom.:   | 10,6   | BAR                                  |
| Pressão max.:   | 10,8   | BAR                                  |
| Pressão Min.:   | 10,5   | BAR                                  |
| Tempo mínimo:   | 1000:00:00   |                                      |
| <b>Resultados do ensaio</b>   |  |                                      |
| Início cronometro:  | 00:00:00   |                                      |
| Data de início:   | 25/04/2014   |                                      |
| Hora de início:   | 12:41:29   |                                      |
| Data do fim:  | 06/06/2014   |                                      |
| Hora do fim:  | 10:27:12   |                                      |
| Fim cronometro:   | 1000:00:00   |                                      |

# APÊNDICE 1 – CERTIFICADO PEAD PE-100



**TIGRE S.A. - TUBOS E CONEXÕES**  
Rua dos Bororós, 84 - Joinville - SC - Brasil  
Tel.: (+47) 3441 - 5000  
Fax: (+47) 3441 - 5225

**Protocolo Nº**  
**500114**

**18-06-2014**

## RELATÓRIO DE TESTES - PHI

Gráficos dos registros de acompanhamento do teste

