MARCOS ALVES RABELO

Investigação sobre a instabilidade axissimétrica de tubos de polietileno de alta densidade sujeitos a compressão axial e pressurização interna e um critério de previsão do fenômeno de ‘birdcaging’ em tubos flexíveis

São Paulo

2014

MARCOS ALVES RABELO

Investigação sobre a instabilidade axissimétrica de tubos de polietileno de alta densidade sujeitos a compressão axial e pressurização interna e um critério de previsão do fenômeno de ‘birdcaging’ em tubos flexíveis

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências

Orientador: Prof. Dr. Celso Pupo Pesce.

São Paulo

2014

MARCOS ALVES RABELO

Investigação sobre a instabilidade axissimétrica de tubos de polietileno de alta densidade sujeitos a compressão axial e pressurização interna e um critério de previsão do fenômeno de ‘birdcaging’ em tubos flexíveis

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Ciências

Área de Concentração: Engenharia de
Controle e Automação Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Celso Pupo Pesce.

São Paulo

2014

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 29 de outubro de 2014.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

Catálogo-na-publicação

Rabelo, Marcos Alves

**Investigação sobre a instabilidade axissimétrica de tubos de polietileno de alta densidade sujeitos a compressão axial e pressurização interna e um critério de previsão do fenômeno de “birdcaging” em tubos flexíveis / M.A. Rabelo. -- versão corr. -- São Paulo, 2014.
262 p.**

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

**1.Tubos flexíveis 2.Polímeros (Materiais) 3.Birdcaging
4.Tubos de PEAD 5.Critério limite plástico 6.Instabilidade 7.Com-
portamento estrutural I.Universidade de São Paulo. Escola Po-
litécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.**

DEDICATÓRIA

A meus pais Sebastião e Maria,

A meus irmãos Cláudia, Ricardo e Cristina,

A minha esposa Kerstin.

AGRADECIMENTOS

A meus pais Sebastião e Maria, a meus irmãos Cláudia, Ricardo e Cristina e a minha esposa Kerstin pelo constante apoio e incentivo durante o desenvolvimento dessa tese.

A meu orientador, Prof. Dr. Celso Pupo Pesce, pela orientação, discussões e ensinamentos ao longo desses anos de pesquisa.

Aos profs. Drs. Roberto Ramos Junior, Clóvis de Arruda Martins, Claudio Schön e Carlos E. N. Mazzilli pelo sempre pronto auxílio e discussões durante este trabalho.

Ao Dr. Anderson Barata Custódio, do CENPES/Petrobras, pelo apoio sempre presente, através dos projetos de pesquisa apoiados por aquela empresa junto ao Laboratório de Mecânica Offshore (LMO).

Ao Prof. Dr. Marcílio Alves, ao Dr. Rafael Celeghini Santiago e aos técnicos Wallace e Henrique do Grupo de Mecânica dos Sólidos e Impacto em Estruturas (GMSIE), pela inestimável ajuda nos ensaios experimentais e processamento das imagens geradas pelo sistema DIC.

Meu especial agradecimento aos Profs. Drs. Guilherme R. Franzini e Alfredo Gay Neto, à Dra. Flávia Milo dos Santos e ao Eng. Caio César Pereira Santos pelas discussões técnicas e inestimável ajuda no desenvolvimento dos programas e interpretações dos resultados.

Ao Prof. Claudio Ruggieri e seus orientados Diego Burgos, Leonardo Mathias e Rafael Savioli, do Núcleo em Mecânica da Fratura e Integridade Estrutural (NAMEF), pelo apoio nos ensaios experimentais.

Meus agradecimentos especiais ao Prof. Dr. José Renato M. de Sousa da COPPE/UFRJ pela colaboração com essa pesquisa, compartilhando importante e precioso conjunto de resultados numéricos em elementos finitos utilizados nesta tese.

Ao habilidoso técnico do Departamento de Engenharia Mecânica Douglas Silva pela fundamental ajuda na montagem e preparação do experimento e aos senhores Oygres Siqueira e José Trevelin pela impecável instrumentação das amostras.

Aos senhores Álvaro e Daniel Fontes da empresa Jaguaré Protótipos pela parceria no desenvolvimento e construção do dispositivo e meios necessários à realização dos experimentos.

A empresa BRASTUBO que forneceu os tubos de PEAD usados nos ensaios e em especial ao senhor Luiz Carlos dos Santos, Gerente da Qualidade, pela intermediação na aquisição dos tubos. Sempre prestativo e atencioso nas minhas solicitações de informações, forneceu valiosas informações sobre os tubos de PEAD e seu processo de fabricação.

A equipe técnica da MTS Brasil, que sempre atendeu prontamente a meus pedidos de ajuda para a compreensão dos programas, detalhes da máquina e auxílio na programação.

A meus colegas de laboratório Caio Santos, Edna Moratto, Edite Maria de Almeida, Eduardo Malta, Flávia Milo, Leonardo Garcez, Leonardo Casetta, Luigi Grego, Marilda Nagamini, Marta Veris, Paula Falcon, Rafael Salles e Rodrigo Provazi pelas colaborações, discussões e momentos de diversão.

A todos aqueles que durante esses anos prestaram, de alguma forma, auxílio no desenvolvimento dessa tese.

Especiais agradecimentos são dirigidos à Petrobras, pelo apoio continuado à pesquisa no tema mecânica de tubos flexíveis e *risers*, através do financiamento de diversos projetos desenvolvidos no Laboratório de Mecânica Offshore. Em particular, menciona-se o projeto conduzido no triênio 2007-2009, vinculado à Rede de Estruturas Submarinas, e que deu motivação à presente investigação: "Desenvolvimento de um Modelo Analítico-Numérico para a Avaliação da Instabilidade de Armaduras de Dutos Flexíveis sob Carregamentos Combinados.

À Prysmian Surflex, pela cooperação científica e tecnológica com o LMO, o que possibilitou o desenvolvimento do software PipeDesign, utilizado como ferramenta de cálculo.

À FAPESP, pela ajuda financeira, por meio do Projeto 2012/10274-8, intitulado “Investigação experimental da instabilidade de tubos de polietileno de alta densidade (PEAD) sob compressão axial e pressurização interna” que proveu os recursos financeiros para o desenvolvimento e construção do aparato experimental e realização dos experimentos sem os quais não seria possível a realização e conclusões desse trabalho.

A CAPES e à Seção de Pós Graduação da Engenharia Mecânica da Escola Politécnica pelo suporte financeiro oferecido pelo seu programa de bolsas de doutorado.

RESUMO

Tubos flexíveis são estruturas complexas compostas de várias camadas metálicas e poliméricas empregados pela indústria *offshore* na exploração de hidrocarbonetos. O estudo do comportamento estrutural e das falhas que podem advir do lançamento e uso desses sistemas em campo é uma área vasta e fecunda da mecânica estrutural.

Apesar dos progressos alcançados na análise e nos vários estudos conduzidos ao longo dos anos, no sentido de explicar o surgimento do fenômeno conhecido por *birdcaging* pesquisando o comportamento das camadas conhecidas como armadura de tração, pouca atenção foi direcionada ao comportamento estrutural da capa plástica externa.

A presente tese contribui com os estudos do mecanismo deflagrador do *birdcaging* à luz do comportamento estrutural da capa plástica e apresenta um critério limite para a previsão do fenômeno.

Estudos analíticos, numéricos e principalmente experimentais foram realizados em tubos de PEAD simulando a capa plástica com a finalidade de investigar a instabilidade axissimétrica desta quando sujeita a compressão axial e pressurização interna.

Utilizando o modelo analítico adaptado, foi criado um diagrama de limite de instabilidade com o uso de força e pressão interna adimensionalizadas. Este diagrama, testado com simulações realizadas em elementos finitos, ensaios experimentais em tubos de PEAD, e com valores de ensaios experimentais em tubos flexíveis, oferece um critério de engenharia para a predição do fenômeno em questão.

Palavras-Chave: Tubos flexíveis, *birdcaging*, polímeros, tubos de PEAD, critério limite plástico, instabilidade, comportamento estrutural.

ABSTRACT

Flexible pipes are complex structures composed of several metallic and polymeric layers employed by the offshore industry in oil and gas exploration. The study of the structural behavior and failures that may arise from the laying down operations and use of these systems in the field is a vast and fruitful field of structural mechanics.

Despite the progress in the analysis and several studies conducted over the years in order to explain the appearing of the birdcaging phenomenon through the research of the behavior of layers known as tensile armors, not too much attention was directed to the structural behavior of outer plastic layer.

This thesis contributes with the studies of the birdcaging mechanism regarding the structural behavior of the plastic cover and presents a simple criterion to triggering the phenomenon.

Analytical, numerical and mainly experimental studies were conducted with HDPE pipes simulating the outer plastic cover in order to investigate the axisymmetric instability under compressive loading and internal pressure.

Using an adapted analytical model, a limit instability chart was constructed using dimensionless axial compressive load and internal pressure. This chart, tested with finite element simulations, experimental tests on HDPE pipe, and with values of experimental tests on flexible pipes, may offer an engineering criterion to predict the phenomenon in question.

Keywords: Flexible pipes, birdcaging, polymers, HDPE tubes, plastic limit criterion, instability, structural behavior.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – (a) Corte de um tubo flexível – Technip Publications (http://www.technip.com/sites/default/files/technip/publications/attachments/Flexible_pipe_April_2013_Web.pdf), (b) Cabo umbilical Prysmian (http://www.prysmianclub.com.br/revista/PCLub_11/sucesso.htm)– Consultados em 23/01/2014	2
Figura 2 - Aspecto da capa externa e da armadura externa no local da falha por <i>birdcaging</i> (Braga, 2003) - (Ramos e Pesce, 2003)	3
Figura 3 - Flambagem tipo casca – Deflagrada por compressão axial (Pesce e Ramos, 2009).....	6
Figura 4 - Instabilidade de membrana ou do tipo “bolha”. Deflagrada por pressão interna e deformação axial compressiva (Pesce e Ramos, 2009).....	7
Figura 5 – (a) Tubo no estado inicial, com flambagem axissimétrica e em forma de losango (Antman, 005); (b) outros modos de flambagem (Hart-Smith, 1970)	7
Figura 6 – Demanda global por PEAD. (a) Fonte: http://www.plasteurope.com/news/HDPE_t221400 : consultado em 12/12/2013; (b) Fonte:IHS - http://www.ptq.pemex.com/productosyservicios/eventosdescargas/Documents/Foro%20PEMEX%20Petroqu%C3%ADmica/2012/PEMEX%20PE.pdf : consultado em 13/12/2013	8
Figura 7 – Experimento e gráfico da compressão axial x deformação (Sousa et al, 2012)	16
Figura 8 – Ponto de bifurcação e ponto limite via análise não linear (Singer et al, 2002)	19
Figura 9 – Sistema de ensaios de cascas cilíndricas – RZ 100 – DLR <i>Braunschweig</i> (Singer et al, 2002).....	25
Figura 10 – Gráfico de estabilidade - força de compressão axial versus pressão externa (Błachut, 2014)	26
Figura 11 – Fotografia e esquema do dispositivo experimental para ensaios em tubos (Bardi e Kyriakides, 2006)	27
Figura 12 – Desenho esquemático do dispositivo de testes (Paquette e Kyriakides, 2006)	28
Figura 13 – Amostras apresentando ondulações após ensaio com $D/e = 28,3$ – (a) $p_{int} = 0,147\text{py}$ e (b) $p_{int} = 0,688\text{py}$ - Paquette e Kyriakides (2006). p_{int} – Pressão interna - py – Pressão de escoamento.....	28

Figura 14 – Dados experimentais da resposta tensão x deformação para diferentes valores de pressão interna com relação $D/e = 28,3$ - Paquette e Kyriakides (2006). $P = p_{int}$; $P_0 = p_y$; $t = e$	29
Figura 15 – Fluxograma apresentando os passos da pesquisa	30
Figura 16 – Representações esquemáticas do PEAD (Coutinho e al, 2003)	33
Figura 17 - Representação esquemática de cadeias de polietilenos (Wasilkoski, 2002)	34
Figura 18 – Propriedades térmicas, físicas, elétricas e mecânicas do PEAD (Coutinho et al, 2003).....	34
Figura 19 – MTS Landmark 250kN – Laboratório de Mecânica Offshore (LMO) - USP	37
Figura 20 – (a) Preparação dos corpos de prova: 1-Setor do tubo, 2-Tira para usinagem, 3-Corpo de prova; (b) Corpo de prova tipo 1 com as áreas de fixação na máquina de ensaios expandidas Comprimento total aumentado de A para A' (ISO 6259-3); (c) Foto do corpo de provas	38
Figura 21 – Corpo de provas para ensaios de compressão (altura = 25mm / diâmetro = 17mm)	39
Figura 22 – Tipos de garras/dispositivo utilizados nos ensaios de caracterização do material	39
Figura 23 – Extensômetro axial.....	41
Figura 24 – Exemplo de escolha dos pontos pelo TW4. (Extraído do Manual da MTS “Using TestWorks4”)	43
Figura 25 – Curva média tração – 1,5mm/min – módulo de elasticidade tangente ...	43
Figura 26 – Exemplos de gráficos tensão-deformação, obtidos nos ensaios de caracterização – tração	45
Figura 27 – Exemplos – Corpo de provas 01: (a) variação do módulo de elasticidade com a deformação e (b) Curva tensão verdadeira x deformação verdadeira.....	46
Figura 28 – Definição de ponto de escoamento intrínseco e extrínseco em polímeros (Brinson e Brinson, 2008).....	47
Figura 29 – Tensão x Deformação - Tração - Gráfico médio das 3 medições a 1,5mm/min – Indicação dos pontos intrínseco (15MPa) e extrínseco (8MPa) segundo o método de Considere.	48
Figura 30 - Exemplos de gráficos obtidos nos ensaios de caracterização - compressão.....	51
Figura 31 – Fotos exemplificando os ensaios de compressão (a) sem cisalhamento da amostra (b) com cisalhamento da amostra	52
Figura 32 – Figura ilustrativa de fluência em tração (Brinson e Brinson, 2008)	52

Figura 33 – Corpo de provas 32 - Exemplos de gráficos obtidos nos ensaios de caracterização – Fluência sob tração	54
Figura 34 – Gráficos ilustrativos da variação do módulo de elasticidade aparente com o tempo.....	55
Figura 35- Simulação do fator de multiplicação W para cinco tempos de relaxação – equação (6)	57
Figura 36 – Comparação entre dados experimentais e formulação analítica - amostras 32 (3MPa) e 34 (8MPa)	58
Figura 37 - Gráfico ilustrativo de fluência em compressão (disponível em: http://www.learneasy.info/MDME/MEMmods/MEM30007A/properties/Properties.html , consultado em 05/12/2013)	59
Figura 38 – Corpo de provas 43 - Exemplos de gráficos obtidos nos ensaios de caracterização – Fluência compressão	60
Figura 39 - Figura ilustrativa de relaxação (Brinson e Brinson, 2008)	61
Figura 40 – Corpo de provas 49 - Exemplos de gráficos obtidos nos ensaios de caracterização – Relaxação sob tração	62
Figura 41 – Corpo de provas 64 - Exemplos de gráficos obtidos nos ensaios de caracterização – Relaxação compressão.....	64
Figura 42 – Croquis tubo com extremidades fechadas	68
Figura 43 – Croquis tubo com extremidades livres	70
Figura 44 – Resultados típicos para compressão sob pressurização interna. (a) tensão x deformação (b) evolução das ondulações em uma seção de teste. $P = \text{pint}$; $P_0 = p_y$; $t = e.$; w/R – leitura axial da evolução das ondulações - Paquette e Kyriakides (2006)	72
Figura 45 – Curvas experimentais de tração (caracterização do material) e curvas hiperbólicas ajustadas.....	74
Figura 46 – (a) pressão interna igual a 0MPa, (b) pressão interna igual a 2MPa – força crítica marcada com um ponto vermelho.....	76
Figura 47 – Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada – Modelo P_K (modelo Paquette e Kyriakides (2006)) e analítico. Apresenta-se também neste diagrama limite de instabilidade plástica o caminho percorrido na simulação (Figura 46) para dois níveis distintos de pressão interna.	77
Figura 48 – Ilustrações do tubo hipotético geradas com o programa PipeDesign.....	80
Figura 49 – Relação entre pressão interfacial e força resistida pela capa plástica calculada pelo PipeDesign	81
Figura 50 - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada com o tubo hipotético calculado pelo PipeDesign incluso	82

Figura 51 – Exemplo da malha gerada	83
Figura 52 - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada com os pontos obtidos nas simulações com EF.....	84
Figura 53 – Sequência de imagens da simulação mostrando a evolução das tensões de von Mises – $k = 0,0282$ – extremidades fixas – situação C.....	86
Figura 54 – Deformação local nas proximidades das condições de contorno – Pata de Elefante – Silva (2011)	87
Figura 55 – (a) tensão circunferencial; (b) tensão axial no momento da instabilidade - $k = 0,0282$ – extremidades fixas – situação C.....	88
Figura 56 - (a) tensão circunferencial; (b) tensão axial no momento da instabilidade - $k = 0,0282$ – extremidades livres – situação C.....	88
Figura 57 - Sequência de imagens da simulação mostrando a evolução das tensões de von Mises – $k = 0,0282$ – extremidades livres – situação C.....	89
Figura 58 – Vista do dispositivo montado e preparado para ensaio.....	92
Figura 59 – Componentes do dispositivo	93
Figura 60 – Alinhamento do dispositivo.....	94
Figura 61 – Posição das seções medidas (ANEXO A).....	95
Figura 62 – Croquis mostrando a posição dos meridianos (E) e seções (S).....	96
Figura 63 – Amostra 10 – Análise do dispositivo e sensores	98
Figura 64 – (a) Sistema de aquisição Lynx e (b) <i>strain gages</i>	99
Figura 65 – Sistema de pressurização – (a) mangueiras e sensores (b) bomba de pressurização.....	100
Figura 66 – (a) Anel de vedação de borracha nitrílica, (b) anel de vedação de PEAD	101
Figura 67 – Diagrama com os ensaios em tubos de PEAD	104
Figura 68 – Amostra 01 após o ensaio de compressão pura	105
Figura 69 – Amostra 01 após 8 dias do ensaio	106
Figura 70 – Amostra 01 - Evolução do carregamento medido pela MTS – Ensaio de compressão pura; (a) carregamento x deslocamento; (b) acomodação inicial do material; (c) momento em que as paredes internas do tubo se tocam.....	107
Figura 71 – Amostra 02 – Pronta para ensaio e proteção de policarbonato com tela	108
Figura 72 – (a) Bomba de pressurização e acessórios, (b) vista geral da entrada e saída da água/pressão, (c) parte inferior, (d) parte superior	109

Figura 73 – Amostra 02 – ensaio a - (a) Variação da pressão, (b) Pressão interna versus deformação circunferencial na seção SIII	111
Figura 74 – Amostra 02 – ensaio a - (a) Deformação circunferencial x tempo, (b) Deformação axial x tempo – ambas na seção SIII	112
Figura 75 - Amostra 02 – ensaio b - (a) Deformação axial seção SIII x tempo, (b) Deformação axial Seções SI e SV x tempo.....	114
Figura 76 – Amostra 02 – ensaio b - (a) Pressão aplicada, (b) Variação do raio na região central. Ambos ao longo do tempo	115
Figura 77 – Amostra 02 – ensaio bb - (a) Início do ensaio, (b) deformação de aproximadamente 13%	116
Figura 78 – Amostra 02 – ensaio bb – Pressão aplicada	117
Figura 79 - Amostra 02 – ensaio bb - Carregamento compressivo medido pela MTS em função do tempo e do deslocamento	118
Figura 80 - Amostra 02 – ensaio bb - (a) Deformação axial seção SIII x tempo, (b) Deformação axial Seções SI e SV x tempo.....	119
Figura 81 - Amostra 02 - ensaio bb - Evolução das deformações axiais e circunferenciais via DIC.....	120
Figura 82 - Amostra 02 – ensaio cc - (a) Início do ensaio, (b) deformação de aproximadamente 33%	121
Figura 83 - Amostra 02 – ensaio cc – Pressão aplicada	122
Figura 84 - Amostra 02 – ensaio cc - Carregamento compressivo medido pela MTS em função do tempo e do deslocamento	123
Figura 85 – Amostra 02 – ensaio cc - (a) Deformação axial seção SIII x tempo, (b) Deformação axial Seções SI e SV x tempo.....	124
Figura 86 - Amostra 02 - ensaio bb - Evolução das deformações axiais e circunferenciais via DIC.....	125
Figura 87 – Formação de protuberâncias durante o ensaio da amostra 04	127
Figura 88 - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada – regiões críticas para cada experimento.....	128
Figura 89 – Amostra 03 – ensaio a - Perfil de pressão aplicada à amostra	129
Figura 90 – Amostra 03 – ensaio a - Carregamento compressivo medido pela MTS em função do tempo e do deslocamento	130
Figura 91 – Amostra 03 - ensaio a - (a) instante anterior ao vazamento e (b) no instante do vazamento	131
Figura 92 – Amostra 03 – ensaio a - Evolução das deformações axiais nas extremidades e na região central da amostra	132

Figura 93 – Amostra 03 – ensaio a - Fotos ilustrando o ensaio e o momento em que a amostra perde a estanqueidade (vermelho)	133
Figura 94 – amostra 03 – ensaio b - Perfil de pressão aplicada à amostra.....	135
Figura 95 – Amostra 03 – ensaio b – Carregamento compressivo medido pela MTS em função do tempo e do deslocamento	136
Figura 96 – Amostra 03 – ensaio b - (a) pontos para utilização com o sistema DIC, (b) região deformada.....	137
Figura 97 – Amostra 03 - ensaio b - Evolução das deformações axiais e circunferenciais via DIC.....	138
Figura 98 – Amostra 03 – ensaio b - Fotos ilustrando o ensaio e o momento do início da resposta axial (vermelho) e circunferencial (azul)	139
Figura 99 – Amostra 3 – ensaio b - Sequência de fotos entre os instantes 165s e 250s	140
Figura 100 – Amostra 03 – ensaio b - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada com o segmento indicativo do processo de instabilidade obtido no experimento	141
Figura 101 – Amostra 04 – ensaio a - Perfil de pressão aplicada à amostra	142
Figura 102 – Amostra 04 – ensaio a - Carregamento compressivo medido pela MTS em função do tempo (a) e do deslocamento (b)	143
Figura 103 - Amostra 04 – ensaio a – (a) Início do ensaio, (b) deformação de aproximadamente 16%	144
Figura 104 – Amostra 04 – ensaio a - Evolução das deformações axiais e circunferenciais via DIC.....	145
Figura 105 – Amostra 04 – ensaio a - Fotos ilustrando o ensaio e o momento de início da resposta da instabilidade axial (vermelho) e circunferencial (azul)	146
Figura 106 – Amostra 04 – ensaio a - Sequência de fotos entre os instantes 415s e 430s	147
Figura 107 – Amostra 04 – ensaio a - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada com o segmento indicativo do processo de instabilidade obtido no experimento	148
Figura 108 - Amostra 04 – ensaio b – (a) Início do ensaio, (b) deformação de aproximadamente 30%	149
Figura 109 – Amostra 04 – ensaio b - Carregamento medido pela MTS em função do tempo e do deslocamento	150
Figura 110 – Amostra 04 – ensaio b - Evolução das deformações axiais e circunferenciais via DIC.....	151

Figura 111 – Amostra 04 - ensaio b - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada com o segmento indicativo do processo de instabilidade obtido no experimento	152
Figura 112 – Amostra 04 – ensaio b - Fotos ilustrando o ensaio e o momento do início da resposta da instabilidade axial (vermelho) e circunferencial (azul)	153
Figura 113 – Amostra 04 – ensaio b - Sequência de fotos entre os instantes 200s e 255s	154
Figura 114 – Amostra 05 – ensaio a - Perfil de pressão aplicada à amostra	155
Figura 115 – Amostra 05 – ensaio a – Carregamento compressivo medido pela MTS em função do tempo (a) e do deslocamento (b)	156
Figura 116 - Amostra 05 – ensaio a – (a) Início do ensaio, (b) deformação de aproximadamente 16%	157
Figura 117 – Amostra 05 – ensaio a - Evolução das deformações axiais e circunferenciais via DIC	158
Figura 118 – Amostra 05 – ensaio a - Fotos ilustrando o ensaio e o momento do início da resposta da instabilidade axial (vermelho) e circunferencial (azul)	159
Figura 119 – Amostra 05 – ensaio a - Sequência de fotos entre os instantes 340s e 400s	160
Figura 120 – Amostra 05 - ensaio a - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada com o segmento indicativo do processo de instabilidade obtido no experimento	161
Figura 121 – Amostra 05 – ensaio b - Perfil de pressão aplicada à amostra	162
Figura 122 – Amostra 05 – ensaio b – Carregamento compressivo medido pela MTS em função do tempo e do deslocamento	163
Figura 123 - Amostra 05 - ensaio b –(a) Início do ensaio, (b) deformação de aproximadamente 20%	164
Figura 124 – amostra 05 – ensaio b - Evolução das deformações axiais e circunferenciais via DIC	165
Figura 125 – Amostra 05 – ensaio b - Fotos ilustrando o ensaio e o momento do início da resposta da instabilidade axial (vermelho) e circunferencial (azul)	166
Figura 126 – Amostra 05 – ensaio b - Sequência de fotos entre os instantes 300s e 330s	167
Figura 127 – Amostra 05 – ensaio b - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada com o segmento indicativo do processo de instabilidade obtido no experimento	168
Figura 128 - Perfil de pressão aplicada à amostra	169

Figura 129 – Amostra 06 – ensaio a - Carregamento compressivo medido pela MTS em função do tempo e do deslocamento	170
Figura 130 - Amostra 06 – ensaio a – (a) Início do ensaio, (b) deformação circunferencial aproximadamente 30%	171
Figura 131 – Amostra 06 – ensaio a - Evolução das deformações axiais e circunferenciais via DIC.....	172
Figura 132 – Amostra 06 – ensaio a - Fotos ilustrando o ensaio e o momento do início da resposta da instabilidade axial (vermelho) e circunferencial (azul)	173
Figura 133 – Amostra 06 – ensaio a - Sequência de fotos entre os instantes 285s e 340s	174
Figura 134 – Amostra 06 – ensaio a - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada com o segmento indicativo do processo de instabilidade obtido no experimento.....	175
Figura 135 – Amostra 06 – ensaio b - Perfil de pressão aplicada à amostra	176
Figura 136 – Amostra 06 – ensaio b - Carregamento compressivo medido pela MTS em função do tempo e do deslocamento	177
Figura 137 - Amostra 06 – ensaio b – (a) Início do ensaio, (b) deformação circunferencial aproximadamente 25%	178
Figura 138 – Amostra 06 – ensaio b - Evolução das deformações axiais e circunferenciais via DIC.....	179
Figura 139 – Amostra 06 – ensaio b - Fotos ilustrando o ensaio e o momento do início da resposta da instabilidade axial (vermelho) e circunferencial (azul)	180
Figura 140 – Amostra 06 – ensaio b - Sequência de fotos entre os instantes 245s e 340s	181
Figura 141 – Amostra 06 ensaio b - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada com o segmento indicativo do processo de instabilidade obtido no experimento.....	182
Figura 142 - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada – Modelo P_K.....	184
Figura 143 - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada – Modelo analítico	185
Figura 144 - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada com os pontos derivados das simulações com MEF.....	186
Figura 145 – Curvas médias de caracterização do PEAD em três velocidades distintas – Ensaios de tração.....	187
Figura 146 - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada com as linhas de instabilidade para cada experimento	189

Figura 147 – Figura gerada a partir dos dados da Tabela 18	193
Figura 148 – Dados da Figura 147 inseridos no diagrama de instabilidade	194
Figura 149 - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada com os pontos dos tubos flexíveis testados e simulação em EF.....	197
Figura 150 - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada com as trajetórias percorridas em cada amostra e os pontos assinalados	197
Figura 151 – Análogo mecânico para o modelo de Maxwell (Hammerand, 1999) ..	221
Figura 152 - Análogo mecânico para o modelo de Kelvin (Hammerand, 1999)	222
Figura 153 – Análogo mecânico para o modelo sólido linear padrão (Hammerand, 1999)	223
Figura 154 – Generalização dos modelos de Maxwell (a) e Kelvin (b) (Hammerand, 1999)	226
Figura 155– Respostas tensão x deformação medidas para valores diferentes de pressão interna para tubos com relação $D/e = 28,3$. A marca ^ no gráfico indica a carga limite de instabilidade (Paquette e Kyriakides – 2006).	238
Figura 156 - Tensão Crítica (a), Deformação crítica (b) e comprimento de onda axial crítico (c) como função da pressão interna para $D/e = 28,3$. Experimentos e previsões (Paquette e Kyriakides – 2006).	239
Figura 157 - Modo de flambagem axissimétrico de uma casca cilíndrica sob compressão axial	240
Figura 158 – Posicionamento dos pontos para as medições com o DIC	251
Figura 159 – Pontos marcados nas amostras para o acompanhamento via DIC ...	252
Figura 160 – Ilustração do processamento da amostra 3 – ensaio b com o programa de análise	253

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos ensaios de tração monotônicos.....	41
Tabela 2 – Módulos de Elasticidade a tração obtidos nos ensaio – Média dos ensaios.....	42
Tabela 3 – Módulo de Elasticidade a tração obtido nas curvas médias dos ensaios – tangentes à curva no início.....	42
Tabela 4 - Resumo dos ensaios de compressão monotônicos	49
Tabela 5 - Módulos de Elasticidade em compressão obtidos nos ensaio (TW4) – Média dos ensaios	50
Tabela 6 - Módulos de Elasticidade em compressão calculados a partir das curvas médias dos ensaios – tangentes à curva no início	50
Tabela 7 - Resumo dos ensaios de fluência em tração.....	53
Tabela 8 - Resumo das condições dos ensaios de fluência em tração.....	59
Tabela 9 - Resumo das condições dos ensaios de relaxação em tração.....	61
Tabela 10 - Resumo das condições dos ensaios de relaxação em compressão	63
Tabela 11- Valores de ajuste da função hiperbólica.....	73
Tabela 12 – Dados geométricos e das camadas do tubo hipotético utilizado nas simulações com o PipeDesign (Pesce et al, 2009).	79
Tabela 13 – casos simulados em Elementos Finitos.....	85
Tabela 14 – Matriz de ensaios - Resumo.....	102
Tabela 15 – Dados dos carregamentos críticos experimentais e de elementos finitos (Sousa et al, 2012)	190
Tabela 16 – Dados do tubo flexível; Sousa et al (2012).....	191
Tabela 17 – resumo dos dados do tubo flexível artigo Sousa et al (2012).....	191
Tabela 18 – Cálculos obtidos por Sousa (2014) a partir do qual foi determinado o ponto de instabilidade (Elementos Finitos) – Sousa (2014)	192
Tabela 19 – Cálculos utilizando o modelo de Ramos e Pesca (2004)	195
Tabela 20 – Características gerais dos tubos flexíveis nomeados por TF1 e TF2..	196

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto romano

E	Módulo de elasticidade.
e	Espessura.
r	Raio médio.
D	Diâmetro médio.
p_{int}	Pressão interna.
p_y	Pressão associada ao escoamento do material.
T	Período.
$J(t)$	Função de fluência.
E_f	Módulo de elasticidade aparente.
t	Tempo.
r_0	Raio externo.
r_i	Raio interno.
p_0	Pressão externa.
F_{med}	Força de compressão medida.
A_i	Área seccional interna – tubo.
A_s	Área seccional resistente – tubo.
F_s	Força resistida pela parede do tubo.
a_1	Constante positiva.
F_{adm}	Força adimensional.
p_{adm}	Pressão adimensional.
F^*	Força crítica.
p^*	Pressão crítica.
k	Constante.
$G(t)$	Função de relaxação.

Alfabeto grego

σ^*	Tensão crítica.
ν	Coeficiente de Poisson.
λ	Comprimento de onda.
σ_x	Tensão axial.
σ_θ	Tensão circunferencial.
ε	Deformação.
σ_0	Tensão constante aplicada nos ensaios de fluência.
η, η_i	Coeficiente de viscosidade.
τ, τ_i	Tempo de relaxação.
ε_0	Deformação constante aplicada nos ensaios de relaxação.
σ_z	Tensão na direção z.
σ_r	Tensão na direção radial.
$\bar{\sigma}_\theta$	Tensão circunferencial média.
$\hat{\sigma}_\theta$	Tensão de membrana.
σ	Tensão verdadeira.
α	Constante positiva.
σ_e	Tensão equivalente.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação e objetivos.....	1
1.2 Estrutura do texto.....	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1 Considerações iniciais	12
2.2 Tubos flexíveis	14
2.2 Cascas cilíndricas - Flambagem	17
2.4 Imperfeições iniciais.....	21
2.5 Trabalhos experimentais envolvendo tubos e cascas cilíndricas.....	23
2.6 Fluxograma – Metodologia de Pesquisa	29
3 CARACTERIZAÇÃO DO POLIETILENO.....	32
3.1 Polietileno de Alta Densidade (PEAD)	32
3.2 Materiais viscoelásticos	34
3.3 Caracterização experimental do PEAD.....	36
3.3.1 Ensaio de tração monotônicos	40
3.3.1.1 Determinação da tensão de escoamento em materiais poliméricos....	46
3.3.2 Ensaio de compressão monotônicos	48
3.3.3 Ensaio de fluência na tração.....	52
3.3.4 Ensaio de fluência na compressão	58
3.3.5 Ensaio de relaxação na tração.....	61
3.3.6 Ensaio de relaxação na compressão	63
4 ABORDAGEM TEÓRICA E SIMULAÇÕES	66
4.1 Modelo clássico da teoria da elasticidade linear	66
4.2 Solução do problema experimental de um tubo pressurizado internamente submetido a uma força de compressão	67
4.2.1 Tubo com extremidades fechadas.....	67
4.2.2 Tubo com extremidades abertas.....	70
4.3 Modelo de Paquette e Kyriakides (2006) para tubos de aço inoxidável.....	71

4.4 Aplicação do modelo de Paquette e Kyriakides para tubos de PEAD e a proposição de um critério limite para o fenômeno de <i>birdcaging</i> em tubos flexíveis	72
4.5 Estudo da instabilidade de tubo flexível hipotético	78
4.6 Estudo da instabilidade de tubos de PEAD com o uso do Método de Elementos Finitos	82
4.6.1 Casos simulados.....	84
5 ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	90
5.1 Premissas fundamentais	90
5.2 Desenvolvimento do dispositivo de testes e preparação das amostras dos tubos	91
5.2.1 Instrumentação das amostras.....	95
5.3 Equipamentos de medição e aquisição de dados	96
5.4 Metodologia experimental	97
5.4.1 Análise inicial do funcionamento do dispositivo, bomba de pressurização e sensores	97
5.4.2 Detalhamento da metodologia experimental.....	101
5.4.3 Matriz de ensaios.....	102
5.5 Ensaios experimentais	103
5.5.1 Amostra 01 - Compressão axial pura.....	104
5.5.2 Amostra 02 - Pressurização interna pura.....	108
5.5.2.1 Amostra 02 – Ensaio a	110
5.5.2.2 Amostra 02 – Ensaio b	113
5.5.2.3 Amostra 02 – Ensaio bb	116
5.5.2.4 Amostra 02 – Ensaio cc.....	121
5.5.3 Pressurização mantida constante e deslocamento variável	126
5.5.3.1 Amostra 03 – Ensaio a	128
5.5.3.2 Amostra 03 – Ensaio b	134
5.5.3.3 Amostra 04 – Ensaio a	141
5.5.3.4 Amostra 04 – Ensaio b	148
5.5.3.5 Amostra 05 – Ensaio a	155
5.5.3.6 Amostra 05 – Ensaio b	161
5.5.3.7 Amostra 06 – Ensaio a	168
5.5.3.8 Amostra 06 – Ensaio b	175

6 DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	183
6.1 Estudos analíticos	183
6.2 Estudos numéricos.....	185
6.3 Estudos experimentais.....	186
6.3.1 Análise de experimentos com tubos flexíveis	189
7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	199
REFERÊNCIAS.....	202
APÊNDICE A – Matriz ensaios - Caracterização PEAD.....	210
APÊNDICE B – Controle temperatura e umidade relativa.....	216
APÊNDICE C – Gráficos MTS - caracterização material	219
APÊNDICE D – Modelos reológicos - viscoelasticidade	220
D1 Modelos reológicos básicos – tensão uniaxial	220
D 1.1 Sólido elástico	220
D 1.2 Fluido viscoso	220
D 2 Viscoelasticidade linear com o uso de modelos matemáticos simples.....	221
D 2.1 Modelo de Maxwell ou Modelo Fluido de Maxwell	221
D 2.2 Modelo de Kelvin-Voight ou Modelo Sólido de Kelvin	222
D 2.3 Sólido Linear Padrão	223
D 3 Viscoelasticidade linear utilizando modelos matemáticos generalizados...226	
D 3.1 Modelo generalizado de Kelvin-Voight.....	227
D 3.2 Modelo generalizado de Maxwell.....	228
D 4 Comportamento viscoelástico linear.....	229
D 4.1 Equações constitutivas – Forma integral	230
D 5 Comportamento viscoelástico não linear.....	232
APÊNDICE E – Modelo Lee	234
APÊNDICE F – Modelo Analítico Paquette e Kyriakides.....	237
APÊNDICE G – Modelo P_K.....	244
APÊNDICE H – Componentes dispositivo	250

APÊNDICE I – DIC – Correlação Digital de Imagens.....	251
APÊNDICE J – Modelo de Liu, Polak e Penlidis	254
ANEXO A – Dimensional das amostras	258
ANEXO B – Certificado MTS.....	260
ANEXO C - Dispositivo.....	261
ANEXO D - Dispositivo.....	262

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo introdutório apresenta-se a motivação e objetivo deste trabalho, bem como a estruturação do texto.

1.1 Motivação e objetivos

A exploração de petróleo e gás em campos *offshore* no Brasil e no mundo tem crescido rapidamente nos últimos anos de forma contínua e progressiva, aumentando as reservas mundiais e a produção de petróleo e gás no Brasil.

A exploração de bacias petrolíferas brasileiras em lâminas de águas profundas e ultraprofundas exigiram e exigem o desenvolvimento de sistemas mais eficientes de comunicação, controle e condução dos hidrocarbonetos à superfície. Esses sistemas são denominados tubos flexíveis, para a condução dos fluidos, e cabos umbilicais, para a comunicação e controle do sistema de válvulas no leito do oceano.

Os tubos flexíveis são estruturas formadas por diversas camadas metálicas e plásticas de reforço e proteção combinadas e concentricamente dispostas em relação ao eixo do tubo. Possuem em sua parte mais interna uma carcaça intertravada por onde escoar o fluido produzido e na parte externa uma capa plástica.

Já os cabos umbilicais também são constituídos por camadas de reforço e proteção e têm, em sua parte central, um núcleo eletro-hidráulico por onde a comunicação com os sistemas submersos é realizada. A Figura 1 ilustra essas estruturas.

Tubos flexíveis típicos são compostos pelas seguintes camadas organizadas do centro para fora: carcaça intertravada de aço, camada plástica interna, armadura de pressão, armadura de tração interna e armadura de tração externa, fitas e capa plástica externa.

A carcaça intertravada, além de conduzir o fluido, evita o colapso do tubo devido à pressão hidrostática externa e à pressão de estrangulamento gerada pelas armaduras de tração quando o tubo é submetido à tração. A camada plástica interna garante a estanqueidade do tubo durante o transporte dos fluidos. A armadura de

pressão da suporte à camada plástica interna na ocorrência de grandes pressões internas.

(a)

(b)

Figura 1 – (a) Corte de um tubo flexível – Technip Publications

(http://www.technip.com/sites/default/files/technip/publications/attachments/Flexible_pipe_April_2013_Web.pdf), (b) Cabo umbilical Prysmian

(http://www.prysmianclub.com.br/revista/PClub_11/sucesso.htm) – Consultados em 23/01/2014

Em seguida aparecem as armaduras de tração que conferem resistência axial ao tubo. Envolvendo-as são enroladas as bandagens de reforço que mantém as armaduras de tração na posição correta evitando a sobreposição dos fios. Por fim, a capa plástica externa promove a estanqueidade do tubo protegendo-o contra danos externos, corrosão e abrasão.

O estudo do comportamento estrutural dos tubos flexíveis e dos cabos umbilicais, bem como de seus modos de falha, é essencial ao desenvolvimento de tecnologias de ponta, viabilidade econômica e preservação ambiental.

A instabilidade estrutural desses sistemas e as falhas que dela podem advir são aspectos extremamente importantes no que tange a temas ambientais e, principalmente, econômicos. A falha de um tubo flexível implicará em possível

vazamento de fluido, ocasionando danos ambientais devastadores e elevados custos econômicos.

Destaca-se, dentre as possíveis falhas, o chamado *birdcaging* ou *gaiola de passarinho* que ocorre nas armaduras de tração (o nome refere-se à topologia dos arames após a falha), quando o tubo flexível é sujeito a cargas compressivas reais (Figura 2). Segundo Braga (2003), “A flambagem dos arames segundo seu eixo de menor inércia é a clássica gaiola de “passarinho”: defletem os arames na direção radial vencendo a resistência das bandagens”.

Durante investigação experimental recentemente desenvolvida por Rabelo (2009), com barras retas e helicoidalmente conformadas e realizadas em dispositivo projetado e construído com a finalidade de estudar a instabilidade de barras retas e helicoidais de seção circular e retangular, a carga crítica de instabilidade dos arames helicoidais não pôde ser alcançada.

As barras helicoidais possuíam dimensões e geometrias usadas em tubos flexíveis aplicados em campo. Em algumas barras foi possível observar falha por deformação plástica excessiva, mas não por instabilidade.

Esses experimentos permitiram a compreensão fenomenológica do problema das barras e levantaram questões relativas ao mecanismo deflagrador da instabilidade radial ou *birdcaging*.

Figura 2 - Aspecto da capa externa e da armadura externa no local da falha por *birdcaging* (Braga, 2003) - (Ramos e Pesce, 2003)

A observação da não ocorrência da instabilidade das barras helicoidais durante os ensaios experimentais, a análise dos resultados obtidos com modelos computacionais criados para a determinação de esforços internos em tubos flexíveis por Pesce e Ramos (2009) e Ramos e Pesce (2009), por meio de projeto desenvolvido para a Petrobras e pelo exame do fenômeno do *birdcaging* em campo, cuja visualização externa característica do fenômeno é a de formação de uma "bolha" na capa polimérica externa, com comprimento aproximado de um diâmetro do tubo, suscitou o surgimento de uma conjectura acerca do fenômeno e de sua possível relação com o comprimento de 'flambagem' do fio da armadura e de sua interação com a capa polimérica e as bandagens.

Existiria uma relação entre o comportamento estrutural da capa polimérica e bandagens e o comprimento de 'flambagem' do fio no mecanismo deflagrador do *birdcaging*? Cumpre notar que a capa plástica e as bandagens, que envolvem as armaduras de tração, são responsáveis pela resistência à expansão radial dos tubos flexíveis.

Tal questão, de um lado, se inspira nos conhecimentos adquiridos da análise teórica e experimental de trabalhos na área; de outro, resposta afirmativa pode ser inferida a partir da observação de um conhecido fenômeno de instabilidade de tubos elastoméricos quando submetidos à pressão interna.

De fato, tubos *elastoméricos*, quando submetidos a progressivo aumento de pressurização interna, acabam por se instabilizar como membrana, com a evidente formação de uma "bolha", que se forma com comprimento inicial de cerca de um diâmetro. Tal "bolha" é inflada repentinamente, quando a pressão atinge um valor crítico. A partir deste ponto a "bolha" aumenta de tamanho, de forma não linear, aumentando progressivamente a rigidez radial de membrana, à medida que se tenta elevar a pressão interna. No decorrer deste processo, a "bolha" acaba por se instabilizar e seu comprimento aumenta rapidamente. Durante a expansão da "bolha", o valor da pressão permanece praticamente constante. A literatura técnica especializada refere-se genericamente a tal expansão como 'propagação de instabilidade'.

Aprofundado estudo teórico-experimental deste fenômeno pode ser encontrado em Kyriakides e Chang (1990) e Kyriakides e Chang (1991).

Mas o que o fenômeno acima relatado teria de associação ao fenômeno de *birdcaging*? Evidentemente, tal associação dar-se-ia devido ao comportamento pós-crítico apresentado pela capa externa. No entanto, tal capa é polimérica (plástica) e não elastomérica e, portanto, resistente não apenas como membrana, mas também como casca, o que lhe permite sustentar cargas normais compressivas, até certo valor limite. Tal propriedade, por si só, ensejaria um estudo específico de instabilidade, sob a ação simultânea de carga normal de compressão e de pressurização interna.

E é justamente no carregamento de pressurização interna que residiria o segundo aspecto de similaridade. No caso de estudo de instabilidade da capa polimérica externa do tubo flexível, o carregamento de pressão interna é de origem interfacial, proporcionado pelo contato com a bandagem de reforço ou, na sua ausência, diretamente aplicado pelo conjunto dos arames helicoidais que compõem a camada externa da armadura. Tal pressão interfacial decorre, efetivamente, da expansão radial (diferencial) das diversas camadas do tubo flexível quando submetido à compressão axial.

A afirmativa acima é corroborada por modelos desenvolvidos pelo grupo de pesquisa do LMO - Laboratório de Mecânica *Offshore* da EPUSP, para o cálculo das pressões interfaciais em tubos flexíveis.

Ramos e Pesce (2004) e Ramos e Pesce (2009), observaram que o carregamento de pressão interna é de origem interfacial na capa polimérica de tubos flexíveis. Esses estudos evidenciaram que a ordem de magnitude da pressão interfacial transmitida pelas bandagens de reforço à capa externa, é a mesma do valor crítico de instabilidade da capa.

Esse tipo de comportamento descrito, a busca pelo mecanismo deflagrador do *birdcaging*, bem como o conhecimento dos tipos de instabilidade que ocorrem em tubos submetidos a diversos tipos de carregamento, tem levado cientistas e profissionais da indústria a trabalhar profundamente no tema.

Diversos pesquisadores, tais como Legget (1946), Hart-Smith (1970), Bardi e Kyriakides, parte 1 (2006) e parte 2 (2006), Paquette e Kyriakides (2006), Błachut (2014) dentre outros, têm estudado o surgimento da instabilidade em tubos

metálicos, de aço, de aço inoxidável ou de alumínio utilizando a compressão axial em conjunto com pressurização interna.

Nenhum estudo similar foi encontrado com respeito a tubos poliméricos, particularmente de PEAD (polietileno de alta densidade), o que motivou a criação de ensaios experimentais para o estudo da instabilidade de tubos de PEAD.

Ramos e Pesce (2009) analisaram a instabilidade estrutural de cascas cilíndricas e mostraram que a instabilidade pode ocorrer de duas maneiras distintas. A primeira, do tipo axissimétrico, é evidenciada no regime pós-crítico por meio de ondulações da superfície cilíndrica, de forma senoidal. Esta forma de instabilidade é mobilizada pela aplicação de esforços de compressão axial. A Figura 3 exibe uma ilustração de simulação numérica desse tipo de instabilidade. O modo apresentado tem caráter senoidal com axissimetria. Modos mais altos apresentam superfícies senoidais mais complexas, com defasagem perimetral.

Figura 3 - Flambagem tipo casca – Deflagrada por compressão axial (Pesce e Ramos, 2009)

A segunda forma, também axissimétrica de instabilidade localizada, é evidenciada pela formação de uma “bolha”, que surge repentinamente, com comprimento da ordem do diâmetro da casca cilíndrica, conforme ilustrado na Figura 4. Esta forma de instabilidade é aqui denominada “de membrana”, ou do tipo “bolha”, e é essencialmente deflagrada por carregamento de pressão interna, combinado à deformação axial compressiva.

Figura 4 - Instabilidade de membrana ou do tipo “bolha”. Deflagrada por pressão interna e deformação axial compressiva (Pesce e Ramos, 2009)

A modelagem numérica, que gerou a Figura 3 e a Figura 4, consistiu na geração de um modelo axissimétrico, cuja solução foi obtida com o uso do software ANSYS®.

Como exemplificação de modos de flambagem axissimétrica e não axissimétrica apresenta-se, na Figura 5, exemplos de modos de flambagem em cascas cilíndricas retirados da literatura.

(a)

(b)

Figura 5 – (a) Tubo no estado inicial, com flambagem axissimétrica e em forma de losango (Antman, 2005); (b) outros modos de flambagem (Hart-Smith, 1970)

Afora a motivação original desta proposição, ressalta-se que a demanda de PEAD cresce em todo o mundo como pode ser observado na Figura 6.

(a)

(b)

Figura 6 – Demanda global por PEAD. (a) Fonte: http://www.plasteurope.com/news/HDPE_t221400: consultado em 12/12/2013; (b) Fonte: IHS - <http://www.ptq.pemex.com/productosyservicios/eventosdescargas/Documents/Foro%20PEMEX%20Petroqu%C3%ADmica/2012/PEMEX%20PE.pdf>: consultado em 13/12/2013

A investigação pretende também contribuir para o entendimento de fenômenos de instabilidade em outras aplicações de tubos de PEAD como, por exemplo, em redes de distribuição de gás, em redes, ramais e adutoras de água, esgotos pressurizados, emissários submarinos, sistemas de comunicação, dragagem e transportes de sólidos, produtos químicos e efluentes industriais.

Esta tese tem então como objetivo o estudo analítico, numérico e experimental do problema da instabilidade axissimétrica de tubos de polietileno de alta densidade (PEAD) quando submetidos à compressão axial e pressurização interna e assim contribuir com o estudo do problema de instabilidade radial de tubos flexíveis.

Com essa finalidade, experimentos fundamentais, utilizando tubos de PEAD, foram desenvolvidos e executados de forma a permitir a observação da instabilidade nesses tubos, sua análise e a busca de conclusões significativas. Esse estudo traz, por si só, resultados experimentais originais não disponíveis na literatura técnica consultada.

Foram projetados e construídos os meios necessários à realização dos experimentos de compressão e pressurização com tubos de PEAD, tal como o dispositivo que permite a utilização de tubos de vários diâmetros e diferentes espessuras.

Assim, o planejamento do estudo teórico e dos experimentos foi elaborado de forma a permitir abordar as seguintes questões:

1. Quais tipos de instabilidade em tubos de PEAD serão observados para os casos estudados;
 - a. Qual relação entre carregamento compressivo axial e pressão interna que promove o fenômeno da instabilidade observada em cada caso analisado;
 - b. Mantendo a pressão interna constante e aplicando o carregamento compressivo progressivamente controlado por deslocamento, para qual nível de carregamento ocorrerá o fenômeno de instabilidade e qual o tipo;

- c. Controlando o deslocamento de maneira a aplicar o carregamento compressivo progressivamente e sem pressurização interna, qual será o carregamento crítico e qual o tipo de instabilidade que surgirá;
 - d. Pressurizando o tubo paulatinamente de forma a aumentar a pressão interna até que ocorra instabilidade, para qual pressão interna ocorrerá o fenômeno de instabilidade;
 - e. Qual é a influência das imperfeições iniciais nos resultados dos ensaios;
 - f. Qual é a influência dos parâmetros geométricos no fenômeno de instabilidade (espessura (t), comprimento da amostra (L) e diâmetro do tubo (D) – L/D e D/t).
2. Investigar a veracidade da conjectura formulada: a de que a capa plástica é a deflagradora do *birdcaging*.

Algumas destas questões puderam ser detalhadamente estudadas e analisadas. Outras foram rapidamente analisadas e serão sugeridas para trabalhos futuros.

1.2 Estrutura do texto

O texto está estruturado com a seguinte sequência. O capítulo 2, a seguir, apresenta a revisão bibliográfica do problema de cascas cilíndricas e tubos a partir da citação dos principais trabalhos realizados ao longo dos anos bem como breve fundamentação teórica do problema em estudo. Uma descrição das imperfeições iniciais que podem ocorrer em cascas cilíndricas é apresentada e os trabalhos experimentais envolvendo cascas cilíndricas e tubos flexíveis são mencionados. Um fluxograma ilustrando os caminhos da pesquisa é apresentado.

Os ensaios de caracterização do PEAD são apresentados no capítulo 3 bem como uma breve descrição desse material. O capítulo 4 trata de abordagem teórica percorrendo brevemente sobre modelos elastoplásticos, modelo elastoplástico usado em tubos de aço inoxidável, a proposição da hipótese da tese e um breve estudo com elementos finitos analisando possíveis casos de instabilidade estudados nos experimentos.

O capítulo 5 discute o aparato experimental e os equipamentos usados nos ensaios. A metodologia experimental é apresentada bem como a matriz de ensaios e os ensaios propriamente ditos.

A discussão e análise dos resultados são apresentadas no capítulo 6. No capítulo 7, as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros são tratados.

As referências bibliográficas apresentadas ao longo do trabalho encontram-se no final deste texto, que são acompanhadas por apêndices e anexos contendo teoria, matrizes de ensaios, acompanhamento de temperatura e desenhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objeto apresentar uma revisão bibliográfica da literatura técnica e científica relacionada às pesquisas em cascas cilíndricas, tubos flexíveis e tubos submetidos à compressão axial, pressurização interna e à combinação desses carregamentos, abordando questões fundamentais ao tema. Ao mesmo tempo, os fundamentos teóricos são discutidos e analisados e um resumo dos trabalhos experimentais com cascas cilíndricas e tubos flexíveis é apresentado.

O cunho dessa tese é essencialmente experimental e, portanto, ênfase mais detalhada é dada a este tipo de abordagem, reservando à fundamentação teórica e numérica, citações e breves resumos. As formulações e equacionamentos que lhe dão suporte são apresentados nos apêndices.

2.1 Considerações iniciais

Do ponto de vista de fundamentação teórica, o problema em questão é clássico. A excelente introdução histórica do livro de Love (1927) discorre sobre a evolução da teoria da elasticidade desde os primeiros registros de trabalhos na área. Esta obra cita, por exemplo, que o problema de placas e cascas curvas foi primeiramente abordado, sob o ponto de vista das equações gerais da elasticidade, por H. Aron em 1874. Love (1927), nos itens 336 a 341 de sua obra trata de cascas cilíndricas, tubos submetidos à pressão e a estabilidade de tubo submetido à pressão externa.

Durante o século XX, diversas outras obras importantes foram escritas, incluindo as teorias de placas, cascas, tubo de paredes finas e tubos de paredes espessas, como Timoshenko (1976), Timoshenko e Gere (1961), Timoshenko e Woinowsky-Krieger (1959), Arbocz (1968), dentre outros.

Ainda no século XX, pesquisadores como Lee (1961), Harris et al (1957), Hutchinson (1965), Hoff (1971), Hutchinson et al (1971), Miyazaki (1988), entre outros, publicaram artigos sobre cascas cilíndricas circulares submetidas à compressão axial, à pressurização interna e externa e estudaram o efeito das imperfeições no comportamento de cascas cilíndricas. Esses trabalhos consideram cascas de paredes finas e de comprimento infinito.

Mais recentemente e em especial no atual século, importantes trabalhos têm sido desenvolvidos, abordando placas, cascas e tubulações aplicadas nas mais diversas áreas do conhecimento utilizando materiais metálicos e não metálicos.

Como exemplo, cita-se os trabalhos de Bardi e Kyriakides (2006), Bardi et al (2006), Paquette e Kyriakides (2006) e Sato e Patel (2007), em materiais metálicos e voltados para a área de petróleo e gás e, mais recentemente, Silva (2011) e Błachut (2014).

Silva (2011) estudou, em sua tese de doutorado, o problema da flambagem de cascas cilíndricas muito finas e metálicas, submetidas a carregamentos combinados de pressão interna, compressão axial, flexão e cisalhamento. Utilizou ferramentas numéricas e experimentais no desenvolvimento do estudo e analisou a influência das imperfeições iniciais no processo de instabilidade. Confrontou os resultados obtidos à aplicação de duas normas, NASA SP8007 e Eurocode 3, elaboradas no âmbito da engenharia aeroespacial.

O objetivo de Błachut (2014), em seu recente artigo de revisão, foi dar complemento ao excelente compêndio de Singer et al (2002). O artigo revisa a estabilidade estática, simples ou combinada, de cascas cilíndricas, cascas cônicas, cascas toroidais e com extremidades em forma de domo, todas metálicas e de paredes finas. Os efeitos de imperfeições geométricas, espessura de parede irregular e a influência das condições de contorno são alguns dos pontos abordados.

Já o enfoque dado a cascas de materiais não metálicos é mais escasso e recente, podendo ser destacados os trabalhos de Guan e Boot (2001), Zhao et al (2003), Faluhelyi (2006), Le Grogne e Le Van (2007) e Ao et al (2011).

Em particular, estudos numéricos e experimentais em cascas cilíndricas e tubos não metálicos de paredes espessas não foram encontrados na literatura técnica aberta consultada, especialmente considerando-se carregamentos combinados de compressão axial e pressurização interna.

Este capítulo tem como objetivo apresentar um resumo da bibliografia existente sobre o comportamento estrutural de tubos flexíveis, cascas cilíndricas com breve fundamentação teórica, discussão sobre imperfeições iniciais e os trabalhos experimentais publicados.

2.2 Tubos flexíveis

Tubos flexíveis são estruturas complexas, largamente utilizadas na exploração *offshore*, com a finalidade de escoar a produção de hidrocarbonetos e em especial a comunicação entre o poço e a unidade de produção.

Conhecer os modos de falha por instabilidade estrutural destes tubos é um aspecto importantíssimo no que diz respeito tanto a aspectos econômicos quanto ambientais. A falha de um tubo flexível implicará em paralização de atividades, necessidade de substituição do equipamento, possível vazamento de fluido, dentre outros problemas que advêm da falha, gerando custos econômicos e ambientais elevadíssimos.

Importantes trabalhos na área estrutural vêm sendo realizados ao longo das últimas décadas buscando soluções para os problemas enfrentados e novas tecnologias de construção e exploração.

Nas décadas de oitenta e noventa, trabalhos como os de Sparks (1984), Witz e Tan (1992), Witz (1996), Taylor e Tran (1996) estudaram essas estruturas teórica e experimentalmente.

Sparks (1984), com uma proposital abordagem elementar, discorre sobre problemas envolvendo flexão, flambagem, escoamento e deformações no comportamento de tubos e *risers*. Trabalha as interpretações de tração e tensão efetiva de forma a facilitar a visualização das mesmas e fornece exemplos da influência da tração, pressão e peso no comportamento de tubos e *risers*.

No começo do século XXI, a preocupação com o comportamento estrutural de tubos flexíveis submetidos a carregamentos combinados gerou trabalhos como os de Leroy e Estrier (2001), Novitsky e Sertã (2002), Braga (2003), Zhang et al (2003), Ramos e Pesce (2003) e (2004), Bectarte e Coutarel (2004), Kaleff e Braga (2003) e Custódio (2005).

Braga (2003), em sua tese de doutorado intitulada “Instabilidade de armaduras de tração de linhas flexíveis”, realiza um estudo experimental aprofundado sobre instabilidade das armaduras de tração de tubos flexíveis e avalia o comportamento de linhas flexíveis quando submetidas a carregamento cíclico. A Figura 2 exemplifica uma das falhas estruturais estudadas e conhecida por *birdcaging* ou gaiola de

passarinho. O autor comenta que a flambagem dos arames da armadura de tração segundo o eixo de menor inércia faz com que os arames se movimentem na direção radial promovendo o surgimento do *birdcaging*.

Zhang et al (2003) discutem em seu artigo, ferramentas analíticas para a otimização de tubos flexíveis não aderentes (*unbonded*) submetidos a diversos tipos de carregamento. Citam um estudo em elementos finitos utilizado para encontrar a carga de flambagem para os arames da armadura de tração e realizaram ensaios com a finalidade de estudar o fenômeno do *birdcaging* e calibrar o modelo de elementos finitos.

Mais recentemente, autores como Rizzo (2010), Vaz e Rizzo (2011), Sousa et al (2012), Sertã et al (2012), Saevik e Thorsen (2012), Gay Neto e Martins (2013), Malta e Martins (2014) e Saevik e Guomin (2014) trabalharam no tema explorando o problema do *birdcaging* por meio do método de elementos finitos e ensaios experimentais.

Vaz e Rizzo (2011) apresentam em seu artigo, um estudo sobre instabilidade dos arames da armadura do tubo flexível utilizando o método de elementos finitos. Desenvolvem um modelo com a finalidade de estimar a carga crítica de instabilidade e os modos de flambagem.

Por sua vez, Sousa et al (2012) apresentam um modelo tridimensional não linear em elementos finitos destinado a prever a resposta mecânica de tubos flexíveis submetidos a cargas axissimétricas e em especial na resposta à compressão. Ensaios foram realizados com o objetivo de validar o modelo desenvolvido. Exemplo do aparato experimental e resultados obtidos em elementos finitos e experimento são mostrados na Figura 7.

Malta e Martins (2014), em recente artigo, trabalharam sobre o aparecimento de cargas compressivas axiais nas armaduras de tração e a instabilidade que pode surgir ao longo da vida útil de um tubo flexível devido à variação de pressão. Um modelo tridimensional foi construído em Abaqus e os casos estudados são apresentados.

(a)

(b)

Figura 7 – Experimento e gráfico da compressão axial x deformação (Sousa et al, 2012)

Em geral, abordagens teóricas, sendo analítica ou numérica, concentram-se nos fios helicoidais da armadura de tração considerados como uma barra curva submetida à compressão. No entanto, o efeito da capa plástica externa como uma possível deflagradora da instabilidade radial em tubos, embora aventado em Pesce et al (2009), não foi profundamente investigada.

O estudo da capa plástica como deflagradora da instabilidade radial em tubos flexíveis, conjectura desta tese, será desenvolvida ao longo deste trabalho.

O *birdcaging* é um fenômeno conhecido e bastante estudado, por exemplo, em cabos de aço. Um trabalho interessante é o de Stump e van der Heijden (2001).

2.2 Cascas cilíndricas - Flambagem

Cascas cilíndricas são estruturas muito empregadas nos mais diversos setores da indústria, tais como espacial, aviação, petróleo e gás, automobilístico, etc.

A busca incessante por soluções para os problemas de cascas em engenharia tem levado cientistas e indústrias a grandes progressos auxiliados por métodos numéricos e computadores cada vez mais potentes e eficientes e por métodos e meios experimentais que, com equipamentos modernos, precisos e eficientes na coleta de informações, fornecem dados valiosos para a compreensão dos fenômenos e alimentam os modelos numéricos, calibrando-os.

Os primeiros desenvolvimentos em cascas cilíndricas começaram no século XIX com pesquisas envolvendo cascas de paredes finas e os primeiros ensaios experimentais envolvendo compressão axial, pressurização externa e interna. Segundo Blachut (2014), as primeiras motivações para ensaios experimentais e estudos em cascas no século XX foram os projetos de submarinos e revestimentos de túneis. Em termos de cascas cilíndricas finas, a grande motivação para os estudos realizados foram os projetos de aeronaves, os quais cobriram a relação raio - espessura em uma ampla faixa (r/e – de 35 a 1440).

Uma das obras clássicas na área de estabilidade de cascas foi escrita por Timoshenko e Gere (1961) e que tem sido citada e usada em diversos trabalhos ao longo dos anos. No capítulo 11 dessa obra, a flambagem de cascas finas é discutida para diversos tipos de carregamentos tais como a compressão axial, a pressurização externa e a combinação desses.

Os autores consideram uma casca cilíndrica uniformemente comprimida na direção axial e derivam o equacionamento para a tensão crítica de flambagem axissimétrica e o meio comprimento de onda associado. Generalizam a formulação e chegam à

expressão clássica da tensão crítica para cascas cilíndricas finas submetida à compressão axial.

$$\sigma^* = \frac{Ee}{r\sqrt{3(1-\nu^2)}} \quad (1)$$

Sendo, E o módulo de elasticidade, e a espessura, r o raio médio e ν o coeficiente de Poisson.

O comprimento de onda associado λ é expresso por

$$\lambda = \frac{l}{m} = \frac{2\pi}{(12(1-\nu^2))^{1/4}} \sqrt{re} \quad (2)$$

Sendo l o comprimento do cilindro e m um número inteiro.

Outro cientista que desenvolveu amplo estudo em estabilidade axissimétrica de cascas cilíndricas finas foi L. H. Donnell (1976). Além de sua obra, a teoria desenvolvida por Donnell (1976) pode ser também consultada em Singer et al (2002). Nesta última referência, são discutidas cascas cilíndricas submetidas a compressão axial considerando cilindros de comprimento curto, médio e longo. Discute, na sequência, a combinação de compressão axial e pressurização externa, cascas submetidas à compressão axial e torção e, por último, compressão axial e flexão.

Um trabalho analítico e experimental sobre flambagem de cascas cilíndricas submetidas à compressão axial e pressurização interna utilizando tubos de liga de alumínio foi publicado por Lee (1961). Ele desenvolve a relação tensão-deformação para o problema e utiliza o trabalho das tensões externas e internas para deduzir as expressões da tensão crítica e do meio comprimento de onda associado. O APÊNDICE E apresenta um resumo do artigo de Lee (1961) e as principais equações por ele desenvolvidas.

Mais recentemente, Paquette e Kyriakides (2006) desenvolveram ensaios experimentais e estudo analítico para a análise da flambagem plástica e colapso de tubos longos de aço inoxidável, submetidos à compressão axial e pressurização interna. A parte experimental é comentada nesta tese no item dedicado aos trabalhos experimentais.

Em termos analíticos, os autores estabelecem a tensão crítica e o meio comprimento de onda crítico associado utilizando a teoria clássica de bifurcação plástica baseada na teoria da plasticidade e modelam o comportamento inelástico do material. Analisam o início das ondulações axissimétricas e a evolução das mesmas citando que a bifurcação das ondulações axialmente uniformes seguem os mesmos passos para o caso da compressão axial pura (Bardi e Kyriakides – 2006). Simulam a tensão crítica e o meio comprimento de onda crítico para o caso isotrópico e anisótropo e comparam com os experimentos. Percebe-se claramente que as simulações do caso anisótropo estão mais próximas dos experimentos. No final do artigo, apresentam um estudo paramétrico dos estados limite e crítico, assumindo que o material escoar isotropicamente e utilizam a expressão de Ramberg-Osgood para estudo paramétrico da tensão – deformação (Kyriakides e Corona – apêndice C – 2007) para os ajustes.

Figura 8 – Ponto de bifurcação e ponto limite via análise não linear (Singer et al, 2002)

Com relação ao comportamento da flambagem em cascas de paredes finas perfeitas, Singer et al (2002) citam que se pode classificar o tipo de instabilidade em duas categorias: (i) ponto-limite (ponto máximo da curva carregamento–deslocamento); (ii) flambagem por bifurcação (Figura 8).

Comentam que, empregando análise não linear ao estudo de uma casca isotrópica perfeita submetida à compressão axial, esta inicialmente deforma-se axissimetricamente ao longo do caminho OA até atingir o ponto limite A. Contudo, podem existir pontos de bifurcação ao longo deste caminho. Desta forma, uma vez

alcançada a carga de bifurcação, a falha da estrutura se caracterizará pelo rápido crescimento da deformação assimétrica ao longo do caminho BD.

Recentemente, Silva (2011), em sua tese de doutorado, estudou o problema de cascas cilíndricas finas submetidas a carregamentos combinados de pressão interna, compressão, flexão e cisalhamento em cobre, aço e alumínio. O seu trabalho apresenta os conceitos fundamentais de flambagem, a teoria de cascas finas de Donnell, estuda cada carregamento e a interação entre eles, além de discutir regras de dimensionamento segundo as normas NASA SP8007 e Eurocode 3, comparando-as entre si. A metodologia de investigação combina técnicas numéricas e experimentais com ênfase ao estudo da flambagem de cascas finas pressurizadas. Finalizando, expõe recomendações para o dimensionamento de alguns casos aplicados à indústria, particularmente a aeroespacial.

No que concerne a cascas cilíndricas de paredes espessas, em abordagem já clássica, Timoshenko (1959), no artigo 40 de sua obra, estuda um cilindro de paredes espessas com espessura constante e sujeito a pressões externa e interna uniformemente distribuída, que produzem deformação elástica simétrica em relação ao eixo do cilindro. Deduz as expressões para a tensão axial e circunferencial e discute os casos considerando somente pressão interna ou pressão externa.

Já no artigo 70, Timoshenko (1959) discute a deformação plástica de cilindros de paredes espessas submetido somente à pressão interna. Resultado importante e sobejamente conhecido, a máxima tensão tangencial e a máxima tensão radial ocorrem na superfície interna do cilindro. Conforme a pressão interna é aumentada, as tensões na superfície interna aumentam até que o material nessa superfície começa a escoar e plastificar. Neste momento, a tensão de cisalhamento máxima torna-se igual à tensão de escoamento.

Em termos de equilíbrio elastoplástico, Kachanov (2004) dedica o capítulo 3 de sua obra à discussão de problemas simples envolvendo equações de equilíbrio elastoplástico. Um dos exemplos apresentados é o de um tubo cilíndrico longo sujeito à pressão interna. Escreve que a análise rigorosa deste problema apresenta dificuldades consideráveis e que os resultados dos estudos são alcançados utilizando métodos numéricos ou de aproximação sucessivas. Comenta também

que, justificado pelos resultados de integração numérica, simplificações podem ser introduzidas nos modelos para obter soluções aproximadas simples.

Kachanov (2004) inicia esse exemplo apresentando a distribuição de tensões por meio das conhecidas equações de Lamé aplicando-as ao caso de um tubo de paredes finas. Em seguida, discute o estado elastoplástico de um tubo de paredes espessas apresentando a distribuição de tensões ao longo da espessura do tubo e finaliza analisando o estado limite (pressão limite).

Outra obra clássica em plasticidade aplicada é a de Chakrabarty (2010), onde o autor discorre sobre os princípios fundamentais da plasticidade, problemas axissimétricos e correlatos, análise plástica de cascas, anisotropia plástica, flambagem plástica, dentre outros temas.

No que tange a cascas cilíndricas, o autor apresenta diversos estudos, como por exemplo, para um cilindro longo sujeito a ação combinada de pressão interna e carregamento axial em estado ulterior totalmente plástico. Analisa a plasticidade em cascas cilíndricas para diversos tipos de carregamento e condições de contorno. No final do capítulo 5, analisa rapidamente uma casca cilíndrica circular com extremidades fechadas e submetidas à pressão interna uniforme.

Percebeu-se, no decorrer da análise da bibliografia voltada para cascas cilíndricas que as obras, em sua grande maioria, abrangem o estudo de cascas cilíndricas finas e tubos longos com extremidades livres.

2.4 Imperfeições iniciais

Em geral, as hipóteses assumidas nos desenvolvimentos teóricos consideram os sistemas a serem estudados perfeitos. Já nas estruturas reais, as imperfeições iniciais são uma realidade. As imperfeições podem ser de natureza geométrica ou de material. As de natureza geométrica podem estar associadas à própria estrutura ou aos dispositivos de sustentação e/ou de aplicação de carga. Quando associadas à estrutura em estudo são, em geral, consequência do processo de fabricação, como por exemplo, a excentricidade de um cilindro (imperfeição geométrica), a tensão residual em sistemas soldados, variação de espessura em cilindros, entre outras.

Singer et al (1998, 2002), nos dois volumes dedicados à flambagem experimental, citam como exemplo de imperfeições iniciais, as excentricidades causadas por cargas indesejadas em colunas, o desvio de planicidade em placas e as ondulações em uma casca cilíndrica. Discutem que investigações teóricas e experimentais mostraram que a presença de imperfeições iniciais pode afetar a carga de flambagem para uma particular combinação de carregamento e tipo de estrutura.

O capítulo 10 do volume 2 da obra de Singer et al (2002), é dedicado ao exame de diversos tópicos ligados às imperfeições iniciais em cascas. Os autores observam a existência de vasta literatura que trata da influência de imperfeições iniciais nesse tipo de estrutura, sob abordagem, em geral, analítica. Nas últimas décadas, desenvolvimentos experimentais tornaram-se mais frequentes.

Os autores discorrem sobre os trabalhos realizados e equipamentos utilizados nas medições das imperfeições iniciais. Exemplificam medições de concentricidade de cilindros, de espessuras em tubos, entre outras. Dedicam alguns itens para apresentar técnicas de avaliação dos dados obtidos nas medições de imperfeições iniciais.

Arbocz (1968) em sua tese de doutorado, lista cinco fatores de discrepância entre a teoria e a experimentação:

1. Imperfeições geométricas iniciais da ordem de uma fração da espessura;
2. A não uniformidade da distribuição de carregamento ao redor da circunferência da casca;
3. Influência das condições de contorno;
4. Efeito de deformação pré flambagem causada pelas restrições de borda;
5. Núcleos de deformação plástica.

Nos tubos e cascas cilíndricas, as principais imperfeições iniciais observadas, e que são importantes nas avaliações de corpos de provas, são a seguir listadas.

1. Excentricidade (imperfeição geométrica);
2. Variação de espessura (imperfeição geométrica);
3. Ondulações no sentido axial (imperfeição geométrica) e
4. Paralelismo entre os planos gerados pelas extremidades do tubo.

Outra fonte de consulta relacionada a imperfeições iniciais é a dissertação de mestrado de Mazzilli (1979) onde o autor estuda a instabilidade de estruturas elásticas sensíveis a imperfeições, explicando a mecânica do fenômeno e organizando e sistematizando os cálculos fundamentais da teoria da estabilidade. Apresenta, dentre outros, exemplos de cascas cilíndricas de paredes espessas para exemplificar a teoria da estabilidade estrutural e apresenta algumas estruturas que na prática podem ser sensíveis a imperfeições.

Silva (2011), no capítulo 1 de sua tese, trata da influência das imperfeições geométricas no comportamento de estruturas utilizando a teoria de Koiter para o regime pós-crítico. Registra que essa teoria apresenta forte sensibilidade da carga crítica de flambagem às imperfeições. No capítulo seguinte, analisa a influência das imperfeições geométricas axissimétricas, aplicando métodos analíticos e numéricos, bem como métodos de análise determinísticos para estruturas de escala laboratorial e métodos estatísticos para estruturas reais.

2.5 Trabalhos experimentais envolvendo tubos e cascas cilíndricas

A análise de artigos e livros publicados acerca de trabalhos experimentais envolvendo tubos e cascas cilíndricas mostra que a execução de experimentos tem sido permanente, frequente e de grande valia, quando trata de estruturas metálicas, como, por exemplo, o aço, o alumínio e o cobre. No contexto da sempre crescente capacidade computacional, os métodos de modelamento e simulação numérica e experimentos têm oferecido proveitosos resultados e avanços na área. Já para materiais não metálicos e, em especial, o PEAD, nada pode ser encontrado na literatura técnica disponível.

Como citado no item anterior, Singer, Arbocz e Weller publicaram um importante compêndio intitulado *Buckling Experiments – Experimental methods in buckling of thin-walled structures* em dois volumes (1998), (2002). Discorrem sobre experimentos em barras, colunas, placas, cascas, e estruturas. Esses dois volumes contêm ampla descrição de experimentos realizados por diversos cientistas, universidades e empresas ao redor do mundo e em diversas épocas.

No volume 1 (1998), os autores trabalham os conceitos físicos básicos de estabilidade, comportamento de estruturas na flambagem e pós flambagem,

considerações sobre modelamento e descrição de experimentos. Discutem elementos básicos na experimentação de flambagem de estruturas, experimentos clássicos como o de Von Kármán, modelos mecânicos e métodos como o de Southwell. Os experimentos são descritos com vasto material de apoio como desenhos, gráficos e fotografias que facilitam o entendimento e, se necessário, a reprodução em laboratório.

No volume 2 (2002), os autores discutem o estado da arte em métodos experimentais relacionados à flambagem de estruturas pelo ponto de vista do experimentador, enfatizando a forte dependência entre experimentação e teoria. Neste volume são examinadas placas, cascas, estruturas compostas, condições de contorno, condições de carregamentos, influência de imperfeições, ensaios não destrutivos e comentários sobre medições. Como no primeiro volume, os autores fazem farto uso de desenhos, fotografias e gráficos na explanação da teoria e dos experimentos.

Como exemplo de experimentos descritos por Singer et al (2002) em cascas submetidas a carregamento axial compressivo, pode-se citar os realizados por Robertson na *Royal Aircraft Establishment* em 1915 em quatro conjuntos de pequenos tubos com várias relações entre raio e espessura (r/e) de (i) aço níquel – cromo, (ii) aço carbono comum, (iii) construído com tiras de aço de alta resistência e (iv) confeccionado com finas tiras de prata. Robertson escreve que o comportamento de tubos de paredes grossas e tubos de paredes finas, no momento do colapso, indica diferentes padrões de falha, bem como diferentes diagramas tensão versus deformação.

Uma configuração mais moderna dedicada ao estudo da flambagem em cascas cilíndricas submetidas à compressão axial e constante do compêndio de Singer et al (2002) é o sistema de ensaios chamado RZ100 da DLR *Institut für Strukturmechanik* em *Braunschweig*, Alemanha mostrado na Figura 9.

É um sistema desenvolvido e aperfeiçoado ao longo das décadas de 80 e 90. Tem uma capacidade instalada de 1MN (~100ton) podendo ensaiar amostra com diâmetro de até 1,1m. O projeto foi direcionado utilizando os seguintes requisitos:

1. O sistema deve acomodar corpos de prova de tal maneira que tensões residuais e distorções de borda não ocorram;
2. Condições de contorno bem definidas;
3. Alinhamento axial;
4. O movimento de partes móveis limitado a alguns micra.

Figura 9 – Sistema de ensaios de cascas cilíndricas – RZ 100 – DLR *Braunschweig* (Singer et al, 2002)

Utiliza três células de carga com um sistema de equalização do carregamento e em ensaios típicos, aproximadamente 100 extensômetros (*strain gages*) são utilizados com a finalidade de verificar a uniformidade do carregamento e determinação da rigidez da casca.

Com o objetivo de complementar o compêndio de Singer et al (2002), Błachut (2014) publicou recentemente um artigo apresentando uma perspectiva experimental para a flambagem de cascas cilíndricas, cônicas e com extremidades na forma de domos, visando os projetos de componentes de vasos de pressão.

Segundo o autor, as cascas cilíndricas são a espinha dorsal dos vasos de pressão. Desenvolve um histórico resumido dos trabalhos realizados na área, apresentando diversas referências.

Em seguida, comenta os ensaios com pressurização externa, listando vários exemplos, a influência da corrosão nessas estruturas, em especial em submarinos, e os vários códigos de elementos finitos empregados com as respectivas referências.

Prosseguindo, apresenta exemplos de estudos e ensaios experimentais em cascas submetidas à compressão axial, acompanhados de diversos exemplos.

No último item dedicado a cascas cilíndricas, discorre sobre a combinação de carregamentos em cilindros retos e em cascas abauladas (Figura 10). Comenta que o papel das imperfeições geométricas é de particular interesse e enfatiza que a pressurização interna inibe a influência das imperfeições na flambagem das cascas.

Figura 10 – Gráfico de estabilidade - força de compressão axial versus pressão externa (Blachut, 2014)

Com relação a experimentos dedicados ao estudo de materiais utilizados na indústria de petróleo e gás e realizados nos últimos anos enumeram-se os produzidos por Bardi e Kyriakides (2006) e Paquette e Kyriakides (2006) na University of Texas at Austin nos Estados Unidos.

Bardi e Kyriakides (2006), na parte um do artigo, descrevem o dispositivo e resultados obtidos nos ensaios de compressão axial em tubos de aço SAF 2507 superduplex (Figura 11)

Figura 11 – Fotografia e esquema do dispositivo experimental para ensaios em tubos (Bardi e Kyriakides, 2006)

Os ensaios foram conduzidos com taxa de deformação constante de aproximadamente $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ e todo o processo foi monitorado por um sistema de aquisição que gravava sinais da célula de carga, do transdutor de deslocamento (LVDT) da máquina de ensaios, extensômetros e *strain gages* de forma a manter a mesma base de tempo. Estudaram a carga e deformação críticas, bem como a formação das ondulações.

Como último exemplo de desenvolvimentos experimentais recentes, cita-se o artigo de Paquette e Kyriakides (2006) que realizaram experimentos de flambagem plástica em tubos submetidos à compressão axial e pressurização interna (Figura 12). Utilizaram o mesmo material de Bardi e Kyriakides (2006).

Os autores estudaram a flambagem plástica em tubos de aço inoxidável combinando carregamento axial e pressurização interna. Observaram que a pressão interna interage plasticamente com a compressão axial diminuindo a resposta tensão-deformação axial e aumentando o comprimento de onda das ondulações formadas. Comentam que até um determinado nível de deformação plástica, os cilindros apresentam ondulações axissimétricas uniformes (Figura 13).

Figura 12 – Desenho esquemático do dispositivo de testes (Paquette e Kyriakides, 2006)

Figura 13 – Amostras apresentando ondulações após ensaio com $D/e = 28,3$ – (a) $p_{int} = 0,147p_y$ e (b) $p_{int} = 0,688p_y$ - Paquette e Kyriakides (2006). p_{int} – Pressão interna - p_y – Pressão de escoamento

Além desse limite, as ondulações crescem de forma estável reduzindo a rigidez da estrutura e conduzindo eventualmente à instabilidade por carga limite. Por fim, citam que todos os cilindros testados pressurizados internamente, permaneceram axissimétricos.

Os experimentos foram realizados em cilindros com relações diâmetro por espessura (D/e) de 28,3 e 39,8. Com a pressão interna (p_{int}) aplicada (Figura 14) fixada em determinado valor ($0 \leq p_{int} < 0,75p_y$), os cilindros foram comprimidos até a falha. A variável p_y é a pressão associada ao escoamento do material do cilindro sob simples pressurização.

Figura 14 – Dados experimentais da resposta tensão x deformação para diferentes valores de pressão interna com relação $D/e = 28,3$ - Paquette e Kyriakides (2006). $P = p_{int}$; $P_0 = p_y$; $t = e$

2.6 Fluxograma – Metodologia de Pesquisa

Este item apresenta na Figura 15 os passos realizados durante a pesquisa para a elaboração desta tese nas áreas experimental, analítica e numérica.

O retângulo referente à viscoelasticidade no ramo NUMÉRICO está tracejado visto que, não houve tempo hábil para explorar tal ramo e pelos resultados positivos obtidos com a elastoplasticidade. Será sugerido como trabalho futuro.

Duas vertentes principais foram seguidas nessa tese: a teórica e a experimental. A teórica foi dividida em analítica e numérica.

Figura 15 – Fluxograma apresentando os passos da pesquisa

Na teórica, utilizou-se a teoria elasto-plástica para desenvolver os modelos analíticos usados e que permitiram criar o diagrama de instabilidade apresentado no capítulo 4. Já a parte numérica, através de modelo elasto-plástico e alimentada pelos dados de caracterização do material, forneceu as simulações utilizadas no diagrama citado.

A parte experimental consistiu, em primeiro lugar da caracterização do PEAD utilizado nos experimentos e que abasteceram de dados tanto as simulações numéricas quanto o modelo analítico elastoplástico. Em seguida, ensaios em tubos de PEAD, simulando a capa externa, foram conduzidos e seus resultados alocados no diagrama de instabilidade.

Por fim, dados de experimentos em tubos flexíveis, encontrados na literatura disponível, foram plotados no diagrama, auxiliando na análise da conjectura citada no capítulo 1.

3 CARACTERIZAÇÃO DO POLIETILENO

Nos últimos anos, novos materiais têm substituído, com larga vantagem, os de uso corrente na indústria como, por exemplo, os plásticos em substituição ao aço.

A substituição de antigos materiais por polímeros é frequente, nas mais diversas áreas, devido ao baixo custo de produção, à facilidade de manipulação, à redução de peso e às propriedades mecânicas oferecidas.

Com a evolução da pesquisa aplicada aos polímeros, novos empregos para esses materiais têm sido descobertos e se mostrados de grande valia, como, por exemplo, nas áreas médica, de petróleo e gás e na automobilística.

3.1 Polietileno de Alta Densidade (PEAD)

Polímeros, em termos químicos, são estruturas formadas por moléculas de cadeias muito longas e elevado peso molecular, produzidas pela reação de polimerização de unidades monoméricas, os meros, unidas em cadeias por ligações covalentes (Sperling, 2006). Essas macromoléculas caracterizam-se por sua estrutura química, por suas interações intramoleculares e intermoleculares e pelo número de átomos de carbono que as formam.

Dentre os diversos polímeros produzidos na atualidade, o polietileno é sem dúvida o mais utilizado. É originado pela reação de polimerização do monômero etileno $CH_2 = CH_2$ formando cadeias de átomos de carbono que contêm de 1000 a 3000 carbonos, cuja estrutura planar conforma-se em zig-zag como mostrado na Figura 16. Sua estrutura química pode ser representada por $(-CH_2 - CH_2 -)_n$.

Segundo Coutinho et al (2003), o polietileno é um polímero parcialmente cristalino e flexível, cujas propriedades são influenciadas pelas quantidades das fases amorfa e cristalina. Como possuem alto peso molecular, têm natureza parafínica e apresentam estrutura parcialmente cristalina. São inertes com relação à maioria dos produtos químicos mais usados.

Figura 16 – Representações esquemáticas do PEAD (Coutinho e al, 2003)

Ainda conforme Coutinho et al (2003), cinco tipos diferentes de polietileno podem ser produzidos, dependendo do sistema catalítico usado e das condições a que as reações químicas são submetidas para polimerização. São eles:

1. Polietileno de baixa densidade (PEBD ou *LDPE*);
2. Polietileno de alta densidade (PEAD ou *HDPE*);
3. Polietileno linear de baixa densidade (PELBD ou *LLDPE*);
4. Polietileno de ultra-alto peso molecular (PEUAPM ou *UHMWPE*) e
5. Polietileno de ultra-baixa densidade (PEUBD ou *ULDPE*).

A Figura 17 representa esquematicamente as cadeias de alguns polietilenos.

O objeto de estudo do presente trabalho é o polietileno de alta densidade (PEAD), material do qual é em geral composta a camada cilíndrica externa de tubos flexíveis utilizados na exploração de petróleo no mar. Outros materiais usados com essa finalidade (CAIRE, 2011) são a Poliamida 11 (PA-11) e o Fluoreto de Vinilideno (PVDF).

O PEAD ou HDPE, segundo Danieletto (2007), é um hidrocarboneto olefínico, originado pelo *cracking* da nafta do petróleo e muitas vezes chamado de resina poliolefínica por possuir somente carbono e hidrogênio em sua molécula. Apresenta cadeias com grande linearidade e é mais denso que o PEBD. Suas propriedades mecânicas e elétricas (Figura 18) permitem sua aplicação em tubulações, utensílios domésticos, filmes, laminados, fios e cabos, embalagens, dentre outras.

Figura 17 - Representação esquemática de cadeias de polietilenos (Wasilkoski, 2002)

Devido à longa cadeia de carbono dos materiais poliméricos, suas características viscoelásticas são mais pronunciadas e tais características serão discutidas a seguir.

Propriedades	Altamente linear	Baixo grau de ramificação
Densidade, g/cm ³	0,962 - 0,968	0,950 - 0,960
Índice de refração	1,54	1,53
Temperatura de fusão, °C	128 - 135	125 - 132
Temperatura de fragilidade, °C	-140 - -70	-140 - -70
Condutividade térmica, W/(m.K)	0,46 - 0,52	0,42 - 0,44
Calor de combustão, kJ/g	46,0	46,0
Constante dielétrica à 1 MHz	2,3 - 2,4	2,2 - 2,4
Resistividade superficial, Ω	10 ¹⁵	10 ¹⁵
Resistividade volumétrica, Ω.m	1017 - 1018	1017 - 1018
Resistência dielétrica, kV/mm	45 - 55	45 - 55
Ponto de escoamento, MPa	28 - 40	25 - 35
Módulo de tração, MPa	900 - 1200	800 - 900
Resistência à tração, MPa	25 - 45	20 - 40
Alongamento, %		
No ponto de escoamento	5 - 8	10 - 12
No ponto de ruptura	50 - 900	50 - 1200
Dureza		
Brinell, MPa	60 - 70	50 - 60
Rockwell	R55, D60 - D70	
Resistência ao cisalhamento, MPa	20 - 38	20 - 36

Figura 18 – Propriedades térmicas, físicas, elétricas e mecânicas do PEAD (Coutinho et al, 2003)

3.2 Materiais viscoelásticos

Materiais viscoelásticos são aqueles que, ao serem deformados, experimentam simultaneamente deformações de naturezas elásticas e viscosas. O comportamento viscoelástico é usualmente representado por equações diferenciais constitutivas

oriundas de representações análogas a modelos mecânicos simples, como molas e amortecedores, que são combinados em série e paralelo no desenvolvimento teórico.

Quando a tensão aplicada ao material é diretamente proporcional à deformação, o material está na região que apresenta comportamento elástico obedecendo aproximadamente à lei de Hooke. Nesta região, os materiais podem ser estudados com analogia a uma mola linear.

Já o material que se deforma constantemente quando submetido à tensão é chamado de viscoso e sua taxa de deformação é, em geral, diretamente proporcional à tensão aplicada. Neste caso é usual utilizar, como analogia mecânica, um amortecedor linear.

Por outro lado, o comportamento plástico de um material submetido a um dado carregamento caracteriza-se por não apresentar retorno à condição inicial, quando da retirada do carregamento, resultando deformação permanente.

No que se referem a polímeros, autores como, por exemplo, Findley et al (1976) classificam o comportamento mecânico destes em elástico, plástico e viscoelástico.

O comportamento viscoelástico é bem definido por Findley et al (1976) na página 3 do capítulo 1 de sua obra. Segundo estes autores, os materiais são significativamente influenciados pela taxa de deformação ou de tensão a que são submetidos, ou seja, apresentam relação entre tensão e deformação dependente do tempo.

No caso em que o material viscoelástico é submetido a baixas tensões/deformações diz-se que o material apresenta comportamento linear ou próximo deste e a equação constitutiva é uma equação diferencial linear a coeficientes constantes. Por outro lado, se o material é submetido a grandes deformações/tensões o comportamento será não linear e um conjunto de equações diferenciais ou integrais ou integro diferenciais surge (Findley et al, 1976 – cap 12 pg 368).

Via de regra, estados complexos de tensão e deformação são considerados nos cálculos de projetos industriais e o uso de novos materiais exige que o equacionamento envolva diversas variáveis por meio de equações fundamentais.

Em geral, os cálculos envolvem equações de equilíbrio, equações de compatibilidade cinemática e equações constitutivas. E para solucioná-las, um conjunto de condições de contorno deve ser utilizado. Se o comportamento do material é linear e independente do tempo, a lei de Hooke pode ser aplicada. Caso contrário, se o material tem comportamento não linear e dependente do tempo o tratamento com equações constitutivas aplicadas a esse tipo de comportamento deverá ser utilizado (Findley et al, 1976).

No APÊNDICE D, faz-se uma breve apresentação dos clássicos modelos reológicos utilizados no estudo dos polímeros e dos comportamentos viscoelásticos, linear e não linear.

3.3 Caracterização experimental do PEAD

Com a finalidade de conhecer o polietileno de alta densidade (PEAD), material constituinte dos tubos experimentalmente ensaiados, no que diz respeito às suas propriedades mecânicas quando submetido à tração, compressão, fluência e relaxação, uma série de experimentos foram realizados utilizando máquinas de ensaios universais MTS Landmark 250kN, disponíveis no Laboratório de Mecânica Offshore (LMO) da Escola Politécnica da USP (Figura 19).

Para a confecção dos corpos de prova, a definição da matriz de ensaios e a realização dos testes, foram utilizados os seguintes artigos e normas: Elleuch e Taktak (2006), Dusunceli e Colak (2006), Gonzalez et al (2013), ISO 6259-1:2001, ISO 6259-3:2011, ASTM D638-10 (2010), ASTM D695-10 (2010), ASTM D2990-09 (2009), ASTM E328-02 (2008), ASTM D3350-10^a (2011) e ASTM D883-12 (2012).

Os corpos de provas foram usinados a partir de um tubo de PEAD do fabricante BRASTUBO com as seguintes características: PE 100, cor preta, diâmetro externo de 315mm, PN 10, SDR 17 e espessura de parede de $18,7\text{mm}^{+1,9\text{mm}}$, sendo PN a classe de pressão do tubo (10bar ou 1MPa) e SDR a relação entre diâmetro externo e espessura. O polímero GP100BK, utilizado pela BRASTUBO na produção dos tubos utilizados na confecção dos corpos de prova, foi fornecido pela BRASKEM com as seguintes propriedades: índice de fluidez de 0,23g/10', massa específica de 0,960g/cm³ e porcentagem de negro de fumo de 2,3%.

Figura 19 – MTS Landmark 250kN – Laboratório de Mecânica Offshore (LMO) - USP

As tiras para a confecção dos corpos de prova tipo “gravata” foram retiradas do tubo, segundo a norma ISO 6259-1 (2001) (Figura 20a) e usinados, conforme norma ISO 6259-3 (2011) tipo 1. As dimensões das regiões do corpo de prova que são fixadas à máquina de ensaios foram aumentadas de forma a permitir melhor operação (Figura 20b). Esse aumento é compatível ao tamanho das garras de fixação das máquinas de ensaios.

Os corpos de prova cilíndricos para os ensaios de compressão foram usinados de maneira que o eixo do cilindro seja paralelo ao eixo do tubo (direção da extrusão do tubo). As dimensões de usinagem desses corpos seguiram a sugestão do artigo de Elleuch e Taktak (2006), diâmetro de 17mm e altura de 25mm (Figura 21).

Os ensaios com corpos de prova tipo 1 foram realizados em garras tipo *flat* e para os ensaios com corpos de provas cilíndricos, um dispositivo específico para ensaios com polímeros foi adquirido, conforme ilustrado na Figura 22.

Seguindo o que preconizam as normas, foram ensaiados 5 (cinco) corpos de prova para cada teste de compressão e tração e 3 (três) corpos de prova para cada ensaio de fluência e relaxação.

(a)

(b)

(c)

Figura 20 – (a) Preparação dos corpos de prova: 1-Setor do tubo, 2-Tira para usinagem, 3-Corpo de prova; (b) Corpo de prova tipo 1 com as áreas de fixação na máquina de ensaios expandidas Comprimento total aumentado de A para A' (ISO 6259-3); (c) Foto do corpo de provas

Figura 21 – Corpo de provas para ensaios de compressão (altura = 25mm / diâmetro = 17mm)

Figura 22 – Tipos de garras/dispositivo utilizados nos ensaios de caracterização do material

Com a finalidade de verificar a influência da velocidade de carregamento nas características do PEAD, os ensaios de tração e compressão foram realizados a 1,5mm/min, 5mm/min e 60mm/min. A escolha dessas velocidades procurou atender ao que recomenda a norma ASTM D638-10 (2010) - (5mm/min) e as velocidades de deformação a que são submetidos os tubos flexíveis no mar, pelo movimento das plataformas, $20s < T < 200s$ e pela ação das ondas $3s < T < 20s$, sendo T o período típico.

Já a escolha da tensão empregada nos ensaios de fluência e da deformação aplicada nos ensaios de relaxação foi baseada nos artigos de Elleuch e Taktak (2006) e Dusunceli e Colak (2006).

A matriz de ensaios, contendo todas as amostras e respectivas características, pode ser consultada no APÊNDICE A.

A temperatura ambiente de todos os ensaios variou entre $24^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, sendo que as amostras foram mantidas em ambiente com temperatura controlada de 23°C . A umidade relativa foi controlada e variou, dependendo do dia, de 38 a 85%. No APÊNDICE B, pode ser consultada a variação de temperatura e umidade relativa para os ensaios de fluência e relaxação. Para os ensaios de compressão e tração a consulta deve ser feita no APÊNDICE A.

3.3.1 Ensaios de tração monotônicos

Os ensaios de tração foram efetuados com o auxílio do programa *Testworks4* da MTS, específico para a execução de ensaios de tração e compressão monotônicos, e que permite a consideração de dados de entrada relativos a diversas características geométricas das amostras fornecendo como saída diversos parâmetros, tais como, o módulo de elasticidade, os valores máximos de carregamento e tensão, bem como uma breve análise estatística dos resultados advindos das amostras testadas (média e desvio padrão).

Um extensômetro axial, com engate rápido modelo 632.26F-43, foi utilizado para a medição da deformação até 5%, conforme Figura 23. Durante a análise dos resultados, observou-se que o uso do extensômetro axial nos ensaios com PEAD não era necessário, já que os valores por ele medidos coincidem com os valores determinados com o uso do LVDT da própria máquina de ensaios na região até 5% de deformação. Isso ocorre porque a deformação até 5% em polímeros pode ser considerada pequena. O PEAD, dependendo do tipo em estudo, tem alongamento na ruptura superior a 500% podendo chegar a 1000/1200%. Para o material do tubo em análise, a BRASKEMN, em sua folha de dados do material (revisão 5/Ago 2012 – disponível no site <http://www.braskem.com.br/site.aspx/Consultar-Produtos?codProduto=56>), informa que o alongamento na ruptura para este material é de 780%.

Figura 23 – Extensômetro axial

Tabela 1 – Resumo dos ensaios de tração monotônicos

Amostra	Vel de ensaio [mm/min]	Taxa de deformação [s ⁻¹]	Temp. Amb. [°C]	Temp. Amostra [C°]	UR [%]	Duração aproximada [min]
1	1,5	5,00E-04	23,1	23,1	69	67
2	1,5	5,00E-04	23,5	23,5	68	67
3	1,5	5,00E-04	24,6 / 26,2	24,6 / 26,2	68	67
4	1,5	5,00E-04	26,2 / 26,7	26,2 / 26,7	64	67
5	1,5	5,00E-04	26,9 / 27,3	26,9 / 27,3	57	67
6	5	1,67E-03	23	23	70	21
7	5	1,67E-03	23,5	23,5	70	21
8	5	1,67E-03	23,3	23,3	70	21
9	5	1,67E-03	23,4	23,4	70	21
10	5	1,67E-03	23,3	23,3	71	21
11	60	2,00E-02	22,2	22,2	72	2
12	60	2,00E-02	22,5	22,5	71	2
13	60	2,00E-02	22,6	22,6	71	2
14	60	2,00E-02	22,7	22,7	71	2
15	60	2,00E-02	22,7	22,7	71	2

Os ensaios de tração, como já citados anteriormente, foram realizados com velocidades de 1,5mm/min, 5mm/min e 60mm/min, equivalente a uma taxa de

deformação de $5 \times 10^{-4} \text{ [s}^{-1}\text{]}$, $1,7 \times 10^{-3} \text{ [s}^{-1}\text{]}$, $2 \times 10^{-2} \text{ [s}^{-1}\text{]}$ respectivamente. Um resumo dos ensaios é apresentado na Tabela 1.

Segundo Danieleto (2007), o módulo de elasticidade do PEAD a 23°C e 1mm/min, para o PE 100, natural ou preto, varia de 1000 a 1200 MPa. Para a mesma faixa de temperatura e velocidade o módulo de elasticidade para o PE 80 varia de 800 a 1000 MPa. Ambos medidos segundo a norma ISO R 527.

A Tabela 2 apresenta os módulos de elasticidade médios fornecidos pelo programa *Testworks4* (TW4) da MTS para cada caso ensaiado.

Tabela 2 – Módulos de Elasticidade a tração obtidos nos ensaios – Média dos ensaios

Taxa de deformação [s^{-1}]	Vel. Ensaio [mm/min]	Módulo de elasticidade [MPa]	Desvio Padrão
$5,0 \times 10^{-4}$	1,5	620	0,04
$1,7 \times 10^{-3}$	5	820	0,03
$2,0 \times 10^{-2}$	60	940	0,04

É importante citar o modo como o programa TW4 calcula esses valores. Para cada ensaio realizado, o TW4 escolhe dois pontos na curva de subida e calcula o módulo de elasticidade como mostrado na Figura 24. No caso de materiais metálicos, esses pontos se alinham em uma reta. No caso de polímeros, esse alinhamento deixa de existir, e o sistema de medição não fornece dados precisos.

Se considerarmos as curvas médias dos ensaios e delas retirarmos o módulo de elasticidade no início da curva de testes obtemos os resultados apresentados na Tabela 3. Estes resultados estão condizentes com os encontrados na literatura.

Tabela 3 – Módulo de Elasticidade a tração obtido nas curvas médias dos ensaios – tangentes à curva no início

Taxa de deformação [s^{-1}]	Vel. Ensaio [mm/min]	Módulo de elasticidade [MPa]
$5,0 \times 10^{-4}$	1,5	1200
$1,7 \times 10^{-3}$	5	1500
$2,0 \times 10^{-2}$	60	2000

Figura 24 – Exemplo de escolha dos pontos pelo TW4. (Extraído do Manual da MTS “Using TestWorks4”)

Exemplo de obtenção do módulo de elasticidade tangente em curva média é apresentado na Figura 25.

Figura 25 – Curva média tração – 1,5mm/min – módulo de elasticidade tangente

O que ocorreu com as leituras da MTS com o uso do TW4 é que o cálculo é feito entre pontos que não consideram o “ponto zero” da curva e não leva em consideração a curvatura inicial; ver Figura 24.

A seguir, são apresentados exemplos ilustrativos de gráficos obtidos durante os ensaios (Figura 26).

Como esperado em materiais viscoelásticos, observa-se que o módulo de elasticidade aumenta com o aumento da velocidade. O pequeno alívio na tensão que aparece com 5% de deformação deve-se à retirada do extensômetro (Figura 26). O material flui levemente nesse curto intervalo de tempo.

A Figura 27 ilustra a variação do módulo de elasticidade com a deformação e apresenta um exemplo ilustrativo do gráfico que relaciona a tensão verdadeira com a deformação verdadeira, teoricamente determinadas.

Figura 26 – Exemplos de gráficos tensão-deformação, obtidos nos ensaios de caracterização – tração

Figura 27 – Exemplos – Corpo de provas 01: (a) variação do módulo de elasticidade com a deformação e (b) Curva tensão verdadeira x deformação verdadeira

3.3.1.1 Determinação da tensão de escoamento em materiais poliméricos

Em materiais metálicos, a tensão de escoamento é encontrada traçando-se uma reta paralela, em 0,2% de deformação, no diagrama tensão – deformação à tangente

inicial no diagrama. O ponto da curva interceptada pela reta é definido como o ponto de escoamento. Esse procedimento não é válido para polímeros, já que as deformações são muito maiores que as que ocorrem em metais.

Segundo Brinson e Brinson (2008), o método mais comum na determinação da tensão de escoamento é assumir que este é o valor do primeiro pico no diagrama tensão-deformação ou matematicamente $d\sigma/d\varepsilon = 0$. Este ponto é denominado de Ponto de Escoamento Intrínseco (Figura 28).

Figura 28 – Definição de ponto de escoamento intrínseco e extrínseco em polímeros (Brinson e Brinson, 2008)

Outros métodos para a determinação deste ponto são usados como citam Brinson e Brinson (2008). Um dos métodos citados foi criado por Considere e é mostrado na Figura 28. O ponto referente à tensão de escoamento é determinado traçando-se uma reta tangente à curva tensão-deformação a partir da abcissa -1% do eixo de deformação. Esse ponto é conhecido como Ponto de Escoamento Extrínseco.

Como exemplo da aplicação deste método, apresenta-se na Figura 29 a curva média dos ensaios de tração a 1,5mm/min indicando o Ponto de Escoamento Intrínseco e o extrínseco.

Figura 29 – Tensão x Deformação - Tração - Gráfico médio das 3 medições a 1,5mm/min – Indicação dos pontos intrínseco (15MPa) e extrínseco (8MPa) segundo o método de Considere.

3.3.2 Ensaio de compressão monotônicos

Os ensaios de compressão foram realizados utilizando o mesmo programa que comandou os ensaios de tração, o *Testworks4* da MTS.

Como nos ensaios de tração, foram utilizadas as velocidades de 1,5mm/min, 5mm/min e 60mm/min, equivalente a uma taxa de deformação de $1 \times 10^{-3} \text{ [s}^{-1}\text{]}$, $3,3 \times 10^{-3} \text{ [s}^{-1}\text{]}$, $4 \times 10^{-2} \text{ [s}^{-1}\text{]}$ respectivamente. A fim de minimizar os efeitos do atrito entre os corpos de prova e as bases do dispositivo de teste, as extremidades dos espécimes foram engraxadas. Um resumo dos ensaios é apresentado na Tabela 4.

O valor do módulo de elasticidade em compressão do PEAD não é facilmente encontrado na literatura. A norma ASTM 695 – 10 (*Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*) que rege os ensaios de compressão em plásticos rígidos também não apresenta, em suas tabelas, esse valor. Candian e Dias (2009) realizaram um estudo em PEAD reciclado e apresentam em sua tabela 5 que o módulo de elasticidade em compressão do PEAD branco é de $300 \pm 20 \text{ MPa}$.

e 245+/-34 para o PEAD verde. Essa diferença, segundo os autores, deve-se ao maior grau de cristalinidade do PEAD branco.

Elleuch e Taktak (2006), em seus ensaios de compressão, chegaram aos seguintes valores para o módulo de elasticidade à compressão: 1152MPa (à taxa de deformação de $4 \times 10^{-3} \text{s}^{-3}$), 1208MPa ($4 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$) e 1743MPa ($4 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$). Neste caso, foi usado o polímero B5429 produzido pela *Deutsche Sammlung von Mikroorganismen* (DSM) com densidade de $0,93 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 4 - Resumo dos ensaios de compressão monotônicos

Amostra	Vel de ensaio [mm/min]	Taxa de deformação [s^{-1}]	Temp. Amb. [°C]	Temp. Amostra [°C]	UR [%]	Duração aproximada [min]
16	1,5	1,00E-03	22,7	23	61	12
17	1,5	1,00E-03	22,9	23	60	12
18	1,5	1,00E-03	23,2	23	60	12
19	1,5	1,00E-03	23,6	23	60	12
20	1,5	1,00E-03	24,0	23	59	12
21	5	3,30E-03	23,2	23	45	3,5
22	5	3,30E-03	23,1	23	44	3,5
23	5	3,30E-03	23,2	23	43	3,5
24	5	3,30E-03	23,9	23	39	3,5
25	5	3,30E-03	23,9	23	39	3,5
26	60	4,00E-02	24	23	38	0,3
27	60	4,00E-02	25,4	23	45	0,3
28	60	4,00E-02	25,6	23	45	0,3
29	60	4,00E-02	25,6	23	45	0,3
30	60	4,00E-02	25,7	23	45	0,3

A Tabela 5 apresenta os módulos de elasticidade médios fornecidos pelo *Testworks4* (TW4) da MTS para cada caso ensaiado. O método de medição do TW4 neste caso é o mesmo utilizado no cálculo do módulo de elasticidade nos ensaios de tração. Algumas amostras que sofreram cisalhamento tiveram seus resultados desprezados para a análise estatística.

Tabela 5 - Módulos de Elasticidade em compressão obtidos nos ensaio (TW4) – Média dos ensaios

Taxa de deformação [s^{-1}]	Vel. Ensaio [mm/min]	Módulo de elasticidade [MPa]	Desvio Padrão
$1,0 \times 10^{-3}$	1,5	766,07	23,09
$3,3 \times 10^{-3}$	5	794,18	11,43
$4,0 \times 10^{-2}$	60	1008,26	19,09

Utilizando a curva média dos ensaios de compressão para a retirada do módulo de elasticidade, no início da curva de testes, obtemos os resultados apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Módulos de Elasticidade em compressão calculados a partir das curvas médias dos ensaios – tangentes à curva no início

Taxa de deformação [s^{-1}]	Vel. Ensaio [mm/min]	Módulo de elasticidade [MPa]
$1,0 \times 10^{-3}$	1,5	800
$3,3 \times 10^{-3}$	5	890
$4,0 \times 10^{-2}$	60	1200

Exemplos ilustrativos de gráficos obtidos durante os ensaios são apresentados na Figura 30.

Conforme citado anteriormente, as dimensões dos corpos de prova utilizados nestes ensaios seguiram a sugestão de Elleuch e Taktak (2006). Observa-se que, para a velocidade de 60mm/min, Elleuch e Taktak (2006) encontraram um módulo de elasticidade de 1208MPa. Já nos ensaios deste trabalho, encontrou-se 807MPa, em média. Provavelmente, a desigualdade observada ocorre devido à diferença entre os graus de cristalização dos materiais utilizados nos respectivos ensaios.

Nos presentes ensaios, algumas amostras sofreram um efeito de cisalhamento ao longo do tempo, o que provocou resultados deslocados da média e um desvio padrão elevado. Por esse motivo, esses resultados foram desprezados. A Figura 31 ilustra um ensaio cujo corpo de provas não sofreu desvio e um onde o processo de cisalhamento pode ser verificado.

Figura 30 - Exemplos de gráficos obtidos nos ensaios de caracterização - compressão

Figura 31 – Fotos exemplificando os ensaios de compressão (a) sem cisalhamento da amostra (b) com cisalhamento da amostra

3.3.3 Ensaios de fluência na tração

Os ensaios de fluência objetivam a observação do comportamento das deformações bem como, dos parâmetros básicos de um material quando submetido a uma tensão mantida constante (σ_0) ao longo do tempo. A tensão escolhida foi aplicada, conforme reza a norma, em um intervalo máximo de 5 segundos e então mantida constante. A Figura 32 ilustra um comportamento típico de material no ensaio de fluência.

Figura 32 – Figura ilustrativa de fluência em tração (Brinson e Brinson, 2008)

Como o PEAD é um material viscoelástico, escolheu-se aplicar três níveis de tensão, conforme sugerido pela norma ASTM D2990-09 (Tabela 7).

Tabela 7 - Resumo dos ensaios de fluência em tração

Amostra	Velocidade para T0 [kN/s]	Taxa de deformação [s-1]	Força aplicada [kN]	Tensão aplicada [MPa]	Deformação aplicada [%]	Temp. Amb. [°C]	Temp. Amostra [C°]	UR [%]
31	0,105	2,00E-01	0,52	3,00	0,25	24,30	23,000	63
32	0,105	2,00E-01	0,52	3,00	0,25	24,30	23,000	63
33	0,105	2,00E-01	0,52	3,00	0,25	22,50	23,000	69
34	0,280	2,00E-01	1,40	8,00	4,90	22,50	23,00	70
35	0,280	2,00E-01	1,40	8,00	4,90	24,90	23,00	63
36	0,280	2,00E-01	1,41	8,00	4,90	22,60	23,00	76
37	0,630	2,00E-01	3,15	18,00	9,50	22,40	23,000	76
38	0,630	2,00E-01	3,13	18,00	9,50	26,20	23,000	59
39	0,630	2,00E-01	3,16	18,00	9,50	25,40	23,000	64

Exemplos de gráficos obtidos ao longo dos ensaios são apresentados na Figura 33.

A função $J(t)$, chamada Função de Fluência e citada anteriormente, é definida, segundo Ward e Sweeney (2004), como a razão entre a deformação e a tensão aplicada, e é uma propriedade do material que pode ser medida com o ensaio de fluência.

$$J(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} \quad (3)$$

Sendo σ_0 a tensão constante aplicada.

Na Figura 33b, mostra-se um exemplo da função de fluência e na Figura 34, ilustra-se a variação do módulo de elasticidade aparente com o tempo que, segundo Shah (1984) é calculado dividindo a tensão inicial aplicada pela deformação ao longo do tempo (4).

$$E_f(t) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon(t)} \quad (4)$$

(a)

(b)

Figura 33 – Corpo de provas 32 - Exemplos de gráficos obtidos nos ensaios de caracterização – Fluência sob tração

Figura 34 – Gráficos ilustrativos da variação do módulo de elasticidade aparente com o tempo

Um estudo realizado por Liu et al (2008) com polietileno para aplicações estruturais, oferece um modelamento prático para o estudo do comportamento do polietileno com o tempo.

Os autores utilizaram o modelo de Kelvin generalizado (Figura 154) (uma mola e uma série de elementos de Kelvin – sem o amortecedor livre) e a equação da função de fluência (5) para a análise linear. Como esta função é independente da tensão e da deformação, o modelo definido pela equação (5) é linear.

$$J(t) = J_e + J_v(t) = \frac{1}{E_0} + \sum_{i=1}^N \frac{1}{E_i} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}\right) \quad (5)$$

O primeiro termo representa o componente elástico instantâneo e o segundo o efeito viscoso dependente do tempo. O módulo de elasticidade E_0 define a resposta instantânea do material e os módulos E_i , correspondentes aos tempos de relaxação τ_i , definem a resposta do material (E_i, τ_i), principalmente para tempos menores que o tempo de relaxação. O tempo de relaxação τ_i é definido como η_i/E_i , sendo η_i o coeficiente de viscosidade de cada amortecedor no modelo de Kelvin, no qual cada elemento do modelo tem seu tempo de relaxação.

Os autores nomeiam $W_i(t)$, o fator de multiplicação do termo viscoso da equação (5), como:

$$W_i(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad (6)$$

Analisando a variação desse termo para alguns tempos de relaxação τ_i escolhidos, percebe-se que para cada tempo, $W_i(t)$ tende à unidade, mostrando que o material tende a tornar-se elástico com o passar do tempo.

No caso dos experimentos realizados neste trabalho, foram escolhidos para análise os tempos de relaxação de 5, 1000, 2000, 4000 e 40000 segundos. A Figura 35 apresenta simulação utilizando a equação (6).

Observa-se que, quanto menor o tempo de relaxação mais rápido o material se aproxima do comportamento elástico.

Figura 35- Simulação do fator de multiplicação W para cinco tempos de relaxação – equação (6)

A equação constitutiva da deformação (3) pode então ser escrita, para o caso em que a tensão aplicada é constante como:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left\{ \frac{1}{E_0} + \sum_{i=1}^N \frac{1}{E_i} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \right\} \quad (7)$$

Assim, utilizando o método dos mínimos quadrados linear e assumindo alguns valores de tempo de relaxação para simular a deformação e comparar com as medições realizadas (Charbonneau, 2011), obteve-se o resultado apresentado na Figura 36.

A simulação utilizando a formulação analítica de Liu et al (2008) e Charbonneau (2011) mostra que o resultado obtido pela simulação está muito próximo dos dados experimentais, corroborando a validade do modelo no presente caso. As simulações apresentadas na Figura 35 e Figura 36 foram realizadas em Matlab® cujos programas podem ser consultados no APÊNDICE J.

Figura 36 – Comparação entre dados experimentais e formulação analítica - amostras 32 (3MPa) e 34 (8MPa)

3.3.4 Ensaios de fluência na compressão

Da mesma forma que na tração, os ensaios de fluência em compressão têm como motivação a observação do comportamento das deformações e parâmetros básicos de um material quando submetido a uma tensão compressiva constante (σ_0) ao longo do tempo. A tensão escolhida foi aplicada, conforme preconiza a norma, em um intervalo máximo de 5 segundos e então mantida constante. A Figura 37 ilustra o comportamento do material no ensaio de fluência em compressão e a Tabela 8 apresenta um resumo das condições dos ensaios.

Figura 37 - Gráfico ilustrativo de fluência em compressão (disponível em: <http://www.learneasy.info/MDME/MEMmods/MEM30007A/properties/Properties.html>, consultado em 05/12/2013)

Neste caso, também foram aplicadas três níveis de tensão conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Resumo das condições dos ensaios de fluência em tração

Amostra	Velocidade para T0 [kN/s]	Taxa de deformação [s-1]	Força aplicada [kN]	Tensão aplicada [MPa]	Deformação aplicada [%]	Temperatura [°C]	Temp. Amostra [C°]	UR [%]
40	-0,004	2,00E-01	-0,689	-3,00	0,25	22,9	23	74
41	-0,004	2,00E-01	-0,680	-3,00	0,25	23,9	23	73
42	-0,004	2,00E-01	-0,681	-3,00	0,25	22	23	79
43	-0,080	2,00E-01	-1,816	-8,00	4,90	23,5	23	75
44	-0,080	2,00E-01	-1,829	-8,00	4,90	23,5	23	77
45	-0,080	2,00E-01	-1,829	-8,00	4,90	22,1	23	84
46	-0,916	2,00E-01	-4,110	-18,00	9,50	22,2	23	85
47	-0,916	2,00E-01	-4,115	-18,00	9,50	22,9	23	82
48	-0,916	2,00E-01	-4,134	-18,00	9,50	22,7	23	85

A seguir, na Figura 38, são apresentados alguns exemplos de gráficos obtidos ao longo dos ensaios.

(a)

(b)

Figura 38 – Corpo de provas 43 - Exemplos de gráficos obtidos nos ensaios de caracterização – Fluência compressão

3.3.5 Ensaio de relaxação na tração

O ensaio de relaxação é, como o de fluência, um dos métodos fundamentais usados para caracterizar o comportamento viscoelástico de um polímero. Neste ensaio, uma deformação constante ε_0 é aplicada quase instantaneamente (5s). Mantendo então a deformação constante, a tensão decresce com o tempo.

A Figura 39 ilustra o comportamento do material no ensaio de relaxação.

Figura 39 - Figura ilustrativa de relaxação (Brinson e Brinson, 2008)

As deformações aplicadas e alguns parâmetros dos ensaios são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resumo das condições dos ensaios de relaxação em tração

Amostra	Velocidade para T0 [kN/s]	Taxa de deformação [s-1]	Força Aplicada [kN]	Tensão aplicada [MPa]	Deformação aplicada [%]	Temperatura [°C]	Temp. Amostra [C°]	UR [%]
49	0,105	2,00E-01	0,525	3,00	0,25	21,9	23	79
50	0,105	2,00E-01	0,525	3,00	0,25	23,1	23	77
51	0,105	2,00E-01	0,525	3,00	0,25	23,5	23	75
52	0,200	2,00E-01	1,000	8,00	4,90	23,8	23	77
53	0,200	2,00E-01	1,000	8,00	4,90	22,3	23	83
54	0,200	2,00E-01	1,000	8,00	4,90	22,2	23	84
55	0,400	2,00E-01	2,000	18,00	9,50	22,9	23	82
56	0,400	2,00E-01	2,000	18,00	9,50	22,8	23	84
57	0,400	2,00E-01	2,000	18,00	9,50	22,3	23	82

Exemplos de ensaios de relaxação em tração são mostrados na Figura 40.

(a)

(b)

Figura 40 – Corpo de provas 49 - Exemplos de gráficos obtidos nos ensaios de caracterização – Relaxação sob tração

A função $E(t)$ chamada Módulo de Relaxação é definida como a razão entre a tensão resultante no tempo e a deformação aplicada, e também é uma propriedade do material que pode ser medida com o ensaio de relaxação.

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} \quad (8)$$

Na Figura 40b, mostra-se um exemplo da variação do Módulo de Relaxação ao longo do tempo.

3.3.6 Ensaios de relaxação na compressão

Assim como na tração, os ensaios de relaxação em compressão fornecem dados para a caracterização do material em estudo. Neste caso, uma deformação constante ε_0 é aplicada quase instantaneamente (5s). Para manter a deformação constante, a tensão decresce com o tempo.

A Figura 39 ilustra o comportamento do material no ensaio de relaxação.

A Tabela 10 apresenta as deformações aplicadas e alguns parâmetros dos ensaios.

Tabela 10 - Resumo das condições dos ensaios de relaxação em compressão

Amostra	Velocidade para T0 [kN/s]	Taxa de deformação [s-1]	Força Aplicada [kN]	Tensão aplicada [MPa]	Deformação aplicada [%]	Temperatura [°C]	Temp. Amostra [C°]	UR [%]
58	-0,140	3,33E-03	-0,700	3,00	0,25	22,4	23	81
59	-0,140	3,33E-03	-0,700	3,00	0,25	22,5	23	79
60	-0,140	3,33E-03	-0,700	3,00	0,25	23	23	79
61	-0,360	3,33E-03	-1,800	8,00	4,90	24	23	74
62	-0,360	3,33E-03	-1,800	8,00	4,90	22,9	23	85
63	-0,360	3,33E-03	-1,800	8,00	4,90	23,6	23	80
64	-0,600	3,33E-03	-3,000	18,00	9,50	22,5	23	80
65	-0,600	3,33E-03	-3,000	18,00	9,50	23,1	23	77
66	-0,600	3,33E-03	-3,000	18,00	9,50	24,2	23	74

Exemplos de ensaios de relaxação em compressão são mostrados na Figura 41.

Na Figura 41b, mostra-se exemplo da variação do Módulo de Relaxação ao longo do tempo.

(a)

(b)

Figura 41 – Corpo de provas 64 - Exemplos de gráficos obtidos nos ensaios de caracterização – Relaxação compressão

Ao final deste capítulo é importante ressaltar que o estudo do material utilizado nesta produção, o polietileno de alta densidade, teve como objetivo retirar as constantes necessárias ao desenvolvimento do trabalho, como por exemplo, a tensão crítica e os módulos de elasticidade para cada velocidade testada.

Conhecer o comportamento viscoelástico do material durante os ensaios de tração, compressão, fluência e relaxação auxiliou na análise e compreensão dos resultados experimentais obtidos com tubos de PEAD e nas simulações com o método de elementos finitos com o uso das curvas do material.

As análises viscoelásticas realizadas nessa tese são importantes para o conhecimento do material e na compreensão de seu comportamento.

Porém, para a confirmação da conjectura formulada, foi adotado o modelo elastoplástico. E como será visto nos capítulos seguintes, este modelo mostrou-se suficiente para as análises e a confirmação da hipótese.

Os dados expostos neste capítulo têm o intuito de ser fonte de conhecimento sobre o PEAD utilizado na obtenção dos resultados alcançados e nutrir de informação trabalhos futuros.

4 ABORDAGEM TEÓRICA E SIMULAÇÕES

Este capítulo apresenta, por meio da teoria da elasticidade linear, o equacionamento de cilindros submetidos à pressurização interna e carregamento compressivo, bem como o equacionamento utilizado por Paquette e Kyriakides (2006) no estudo de tubos de aço inoxidável aplicado à indústria *offshore*.

A aplicação desse modelo adaptado a tubos de PEAD é discutida, bem com um critério limite aplicado ao fenômeno de *birdcaging*. A instabilidade de um tubo hipotético com as mesmas dimensões do tubo de PEAD é discutida.

Um breve estudo realizado com o método dos elementos finitos para o caso de um tubo de PEAD submetido à compressão axial e pressão interna é apresentado.

4.1 Modelo clássico da teoria da elasticidade linear

O problema de cascas cilíndricas e tubos submetidos a carregamentos com pressurização interna, pressurização externa e compressão axial vem sendo estudado arduamente ao longo dos anos por diversos pesquisadores que produziram importantes obras.

Entre eles cita-se, no campo de materiais metálicos, Timoshenko (1956), Chakrabarty (2010) e Kachanov (2004). Em materiais viscoelásticos, Findley et al (1976) e Brinson e Brinson (2008) são exemplos importantes. Na indústria, Danieleto (2007) produziu importante manual de tubulações de polietileno e polipropileno.

Em um tubo de paredes espessas de raio externo r_0 , raio interno r_i , submetido à pressão interna p_{int} e à pressão externa p_0 com extremidades abertas e sistema de coordenadas (r, θ, z) , a tensão radial e circunferencial são representadas pelas chamadas equações de Lamé.

$$\sigma_r = \frac{r_i^2 p_{int} - r_0^2 p_0}{r_0^2 - r_i^2} - \frac{(p_{int} - p_0) r_i^2 r_0^2}{(r_0^2 - r_i^2) r^2} \quad (9)$$

$$\sigma_\theta = \frac{r_i^2 p_{int} - r_0^2 p_0}{r_0^2 - r_i^2} + \frac{(p_{int} - p_0) r_i^2 r_0^2}{(r_0^2 - r_i^2) r^2} \quad (10)$$

As hipóteses utilizadas por Lamé em sua teoria são:

- Material homogêneo e isotrópico;
- Seções transversais planas permanecem planas sob a ação de pressão interna;
- Material tensionado dentro dos limites elásticos - Lei de Hooke;
- As fibras do material são tensionadas independentemente sem serem afetadas pelas adjacentes;

Em um cilindro com extremidades fechadas e submetido a pressões internas e externas, a tensão axial, que surge devido às novas condições de contorno, pode ser obtida utilizando considerações de equilíbrio de forças.

$$\sigma_z = \frac{r_i^2 p_{int} - r_o^2 p_o}{r_o^2 - r_i^2} \quad (11)$$

4.2 Solução do problema experimental de um tubo pressurizado internamente submetido a uma força de compressão

Nos itens seguintes, apresenta-se o equacionamento para tubos fechados e para tubos com extremidades livres, ainda no âmbito da teoria linear da elasticidade.

4.2.1 Tubo com extremidades fechadas

Considere um tubo (Figura 42) de raio interno r_i , raio externo r_o alojado entre duas tampas cilíndricas rígidas com as grandezas e coordenadas definidas a seguir.

p_{int} – pressão interna;

F_{med} – Força de compressão medida; $F > 0$;

ν – Coeficiente de Poisson;

r – Raio médio;

r_i - Raio interno;

r_o - Raio externo;

$A_i = \pi r_i^2$ – Área seccional interna;

$A_s = \pi(r_o^2 - r_i^2)$ – Área seccional resistente;

E – Módulo de elasticidade;

(r, θ, z) – Coordenadas cilíndricas.

Figura 42 – Croquis tubo com extremidades fechadas

O equilíbrio de forças na direção axial exige:

$$\sigma_z = p_{int} \frac{A_i}{A_s} - \frac{F_{med}}{A_s} \quad (12)$$

A teoria da elasticidade linear, pela Lei de Hooke generalizada e das relações cinemáticas de deslocamentos-deformações, com as condições de contorno de tensão no interior e exterior do tubo fornece:

$$\sigma_r(r_i) = -p_{int}$$

$$\sigma_r(r_o) = 0 \quad (13)$$

Após algum trabalho algébrico, a seguinte solução exata para os campos de tensão e de deformação ao longo das tampas surge:

$$\sigma_r(r, \theta, z) = \sigma_r(r) = p_{int} \frac{A_i}{A_s} \left(1 - \frac{r_o^2}{r^2} \right) \quad (14)$$

$$\sigma_\theta(r, \theta, z) = \sigma_\theta(r) = p_{int} \frac{A_i}{A_s} \left(1 + \frac{r_o^2}{r^2} \right) \quad (15)$$

$$\sigma_z(r, \theta, z) = \sigma_z = p_{int} \frac{A_i}{A_s} - \frac{F_{med}}{A_z} \quad (16)$$

e

$$\varepsilon_r(r, \theta, z) = \varepsilon_r(r) = \frac{p_{int}}{E} \frac{A_i}{A_s} \left((1 - 2\nu) - (1 + \nu) \frac{r_o}{r^2} \right) + \frac{\nu F_{med}}{EA_s} \quad (17)$$

$$\varepsilon_\theta(r, \theta, z) = \varepsilon_\theta(r) = \frac{p_{int}}{E} \frac{A_i}{A_s} \left((1 - 2\nu) + (1 + \nu) \frac{r_o}{r^2} \right) + \frac{\nu F_{med}}{EA_s} \quad (18)$$

$$\varepsilon_z(r, \theta, z) = \varepsilon_z = \frac{p_{int}}{E} \frac{A_i}{A_s} (1 - 2\nu) - \frac{F_{med}}{EA_s} \quad (19)$$

Note que, para $e/r \ll 1$ ou seja, tubo de pequena espessura, em primeira ordem, a tensão perimetral média ficará:

$$\overline{\sigma_\theta} = p_{int} \frac{r}{e} \left(1 - \frac{e}{r} \right) \quad (20)$$

Que recupera o valor clássico de membrana:

$$\widehat{\sigma_\theta} = p_{int} \frac{r}{e} \quad (21)$$

4.2.2 Tubo com extremidades abertas

Considere um tubo (Figura 43) de raio interno r_i , raio externo r_o com extremidades livres e submetido a compressão axial (F_s) e pressurização interna (p_{int}) com as grandezas e coordenadas definidas conforme item anterior

Figura 43 – Croquis tubo com extremidades livres

Da mesma forma que no item anterior, a teoria da elasticidade linear e o equilíbrio de forças fornecem:

$$\sigma_z(r, \theta, z) = -\frac{F_s}{A_s} \quad (22)$$

$$\sigma_\theta(r, \theta, z) = \sigma_\theta(r) = p_{int} \frac{A_i}{A_s} \left(1 + \frac{r_o^2}{r^2} \right) \quad (23)$$

$$\sigma_r(r, \theta, z) = \sigma_r(r) = p_{int} \frac{A_i}{A_s} \left(1 - \frac{r_o^2}{r^2} \right) \quad (24)$$

e

$$\varepsilon_r(r, \theta, z) = \varepsilon_r(r) = \frac{p_{int}}{E} \frac{A_i}{A_s} \left((1 - 2\nu) - (1 + \nu) \frac{r_0^2}{r^2} \right) + \frac{\nu F_s}{EA_s} \quad (25)$$

$$\varepsilon_\theta(r, \theta, z) = \varepsilon_\theta(r) = \frac{p_{int}}{E} \frac{A_i}{A_s} \left((1 - 2\nu) + (1 + \nu) \frac{r_0^2}{r^2} \right) + \frac{\nu F_s}{EA_s} \quad (26)$$

$$\varepsilon_z(r, \theta, z) = \varepsilon_z = -2\nu \frac{p_{int}}{E} \frac{A_i}{A_s} - \frac{F_s}{EA_s} \quad (27)$$

4.3 Modelo de Paquette e Kyriakides (2006) para tubos de aço inoxidável

Paquette e Kyriakides (2006), pesquisadores da Universidade do Texas em Austin, realizaram um estudo de flambagem plástica e colapso de cilindros longos de aço superduplex, aplicados na indústria *offshore*, combinando experimento e análise teórica. Investigaram cilindros com pressão interna mantida constante para diversos níveis e submetidos à compressão axial (Figura 14). Construíram dispositivo experimental específico (Figura 12) e observaram que a pressão interna tem dois efeitos preponderantes: (i) aumenta o meio comprimento de onda de instabilidade que surge ao longo do ensaio; (ii) diminui a tensão na direção axial.

Os autores determinaram as tensões críticas (equação (108)) e meio comprimento de onda crítico (equação (109)) para as situações escolhidas experimentalmente e compararam com simulações baseadas em estudo analítico, cujo resumo encontra-se reproduzido no APÊNDICE F.

O desenvolvimento completo pode ser consultado em Paquette e Kyriakides (2006) e Kyriakides e Corona (2007). A Figura 44 apresenta um exemplo de resultado experimental obtido pelos autores. Em (a), as duas pequenas setas no gráfico da resposta ($\downarrow$), indicam os pontos onde se iniciam as ondulações (1,20% – 1,40%). Em (b) são mostradas as medições de deslocamento radial, feitas com LVDT durante o ensaio. O ensaio era interrompido por um instante e a medição feita.

Figura 44 – Resultados típicos para compressão sob pressurização interna. (a) tensão x deformação (b) evolução das ondulações em uma seção de teste. $P = p_{int}$; $P_0 = p_y$; $t = e$; w/R – leitura axial da evolução das ondulações - Paquette e Kyriakides (2006)

4.4 Aplicação do modelo de Paquette e Kyriakides para tubos de PEAD e a proposição de um critério limite para o fenômeno de *birdcaging* em tubos flexíveis

O modelo desenvolvido por Paquette e Kyriakides (2006) foi programado em Matlab® utilizando as equações apresentadas no APÊNDICE F.

Sendo o modelo elastoplástico, a utilização das curvas viscoelásticas, como por exemplo, a apresentada na Figura 29, obtida durante os ensaios de caracterização

do material, causa instabilidade numérica, visto que o módulo de elasticidade tangente torna-se negativo a partir de certo instante de tempo.

Com a finalidade de prevenir a existência de inconsistências numéricas, a seguinte função hiperbólica original foi construída para o ajuste da curva experimental de tensão verdadeira em função da deformação verdadeira:

$$\sigma = \sigma^* * \tanh[K(\varepsilon) * \varepsilon] \quad (28)$$

e

$$K(\varepsilon) = a_1 * \{1 - [\tanh(\varepsilon)]^\alpha\} \quad (29)$$

sendo:

σ - Tensão verdadeira;

σ^* - Tensão crítica;

ε - deformação verdadeira;

a_1, α - constantes positivas.

Utilizando essa função e os gráficos obtidos com os ensaios de caracterização, um ajuste foi construído para cada velocidade testada.

Esse gráfico da função hiperbólica ajustada foi utilizado nas simulações com elementos finitos e nas análises com o programa utilizando o modelo de Paquette e Kyriakides (2006).

Tabela 11- Valores de ajuste da função hiperbólica

Valores dos parâmetros - Ajuste função hiperbólica								
1,5mm/min			5mm/min			60mm/min		
σ^*	16,65	MPa	σ^*	23,00	MPa	σ^*	25,00	MPa
a_1	95,00	-	a_1	95,00	-	a_1	85,00	-
α	0,13	-	α	0,13	-	α	0,13	-

A Figura 45 apresenta as curvas experimentais e as curvas hiperbólicas ajustadas para cada velocidade. Os valores das constantes utilizadas nesses ajustes são mostrados na Tabela 11.

Figura 45 – Curvas experimentais de tração (caracterização do material) e curvas hiperbólicas ajustadas.

O programa foi desenvolvido para calcular os módulos de elasticidade tangente e secante com o uso dos dados provenientes dos ensaios de caracterização do PEAD ajustados pela função hiperbólica acima citada.

Esses dados alimentam as equações provenientes do modelo de Paquette e Kyriakides (2006) que, por sua vez, calculam os parâmetros necessários para a análise da instabilidade. Parâmetros como, por exemplo, deformação circunferencial (ϵ_θ), tensão equivalente (σ_e), deformação axial (ϵ_x), dentre outros são calculados de forma a obter-se saídas como $\epsilon_\theta \times F$, $\sigma_x \times \epsilon_x$, $E_t \times \sigma_x$, dentre outras.

Um exemplo das saídas citadas é apresentado na Figura 46. Observa-se que para uma dada pressão interna, existe um valor crítico de força compressiva que define a instabilidade numérica do sistema. Neste exemplo, é possível observar como o efeito da pressurização interna diminui a força necessária para a instabilização do tubo. Os valores das constantes utilizadas nas simulações podem ser consultados no programa Matlab[®] no APÊNDICE G – Modelo P_K.

Executando o programa que implementa o modelo de Paquette e Kyriakides (2006) para várias pressões, foram obtidos os valores de força correspondente ao ponto da resposta circunferencial do tubo. Para cada pressão escolhida, o ponto referente à força crítica correspondente foi retirado do gráfico de deformação circunferencial versus força. Um círculo na Figura 46 sinaliza tal ponto crítico.

Adimensionalizando os valores de força e pressão como demonstrado a seguir, construiu-se um diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada apresentado na Figura 47.

$$F_{adm} = \frac{F^*}{\sigma^* A_s} \quad (30)$$

$$p_{adm} = \frac{p_{int}}{p^*} \quad (31)$$

Onde

F^* - força crítica calculada;

σ^* - tensão crítica;

A_s – área seccional resistente do tubo;

p_{int} – pressão interna aplicada;

p^* - pressão crítica ($p^* = \sigma^* \frac{e}{r}$).

(a)

(b)

Figura 46 – (a) pressão interna igual a 0MPa, (b) pressão interna igual a 2MPa – força crítica marcada com um ponto vermelho

Figura 47 – Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada – Modelo P_K (modelo Paquette e Kyriakides (2006)) e analítico. Apresenta-se também neste diagrama limite de instabilidade plástica o caminho percorrido na simulação (Figura 46) para dois níveis distintos de pressão interna.

As curvas designadas pelo termo analítico, constantes no diagrama, são fruto da igualdade da tensão equivalente σ_e , dada pela expressão de von Mises

$$\sigma_e = (\sigma_x^2 + \sigma_x \sigma_\theta + \sigma_\theta^2)^{1/2} \quad (32)$$

$$\sigma_e = \left(\left(\frac{F_s}{A_s} \right)^2 + \frac{F_s}{A_s} p_{int} \frac{r}{e} + p_{int}^2 \left(\frac{r}{e} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (33)$$

com a tensão crítica. De fato, multiplicando ambos os lados da equação (33) por σ^* e utilizando

$$p_{adm} = \frac{p_{int}}{p^*} \quad (34)$$

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma}{\sigma^*} \quad (35)$$

$$(\sigma_{adm})^2 = (F_{adm})^2 + F_{adm} p_{adm} + (p_{adm})^2 \quad (36)$$

No limite, quando $\sigma_{adm} = 1$ (instabilidade), tem-se

$$1 = F_{adm}^2 + F_{adm}p_{adm} + p_{adm}^2 \quad (37)$$

A linha designada por 100% é o lugar geométrico das raízes da equação (37). A região interna, limitada pelo arco designado por 100%, é a região de estabilidade.

Esse diagrama cria um critério para a análise da instabilidade de tubos poliméricos admitindo comportamento elastoplástico.

Observa-se que a linha do Modelo P_K (Paquette e Kyriakides (2006)) e a do modelo analítico a 100% coincidem. Aplicando uma margem de segurança de 90% e 80%, obtêm-se as outras duas linhas apresentadas no diagrama. Observa-se também que a simulação apresentada na Figura 46b é representada no diagrama da Figura 47 através de uma sequência de pontos, dispostos em linha reta, na abscissa $p_{adm} = 0,9$ (2MPa). Na abscissa $p_{adm} = 0,45$ representa-se os pontos referentes à pressão de 1MPa.

Veremos nos capítulos posteriores que a região entre 80% e 100% pode ser tomada como a região de ocorrência da instabilidade quando se leva em conta a existência de imperfeições geométricas nos tubos, a influência das condições de contorno, a não uniformidade na distribuição do carregamento, dentre outros possíveis efeitos.

Nos capítulos e itens seguintes, serão apresentados os estudos realizados em elementos finitos, resultados de ensaios em tubos de PEAD e análise de experimentos com tubos flexíveis. Cada ponto advindo desses estudos será locado no diagrama.

4.5 Estudo da instabilidade de tubo flexível hipotético

Sendo a conjectura dessa tese a verificação de que a instabilidade do tipo *birdcaging*, que ocorre em tubos flexíveis, é deflagrada pela capa plástica, simulações com um tubo hipotético, de mesmas dimensões dos tubos de PEAD utilizados nos ensaios experimentais, foram realizadas utilizando o programa PipeDesign (Pesce et al, 2009), programa este dedicado ao cálculo e estudo de tubos flexíveis.

Este programa foi desenvolvido baseado no modelo analítico criado por Ramos e Pesce (2003), onde o equacionamento e hipóteses assumidas podem ser consultados.

O modelo permite a análise estrutural de tubos flexíveis submetidos a carregamentos combinados de tração, compressão, torção e flexão quando o tubo é submetido a pressões externas e internas. Os esforços suportados pelas camadas são calculados pela formulação desenvolvida que leva em consideração as condições de equilíbrio do sistema, as relações geométricas e as equações constitutivas, sendo estas últimas lineares.

A Tabela 12 apresenta os dados principais do tubo hipotético, que será designado por TH.

Tabela 12 – Dados geométricos e das camadas do tubo hipotético utilizado nas simulações com o PipeDesign (Pesce et al, 2009).

Tubo hipotético		
Carcaça		Aço
Camada polimérica		PA11
Armadura de pressão		Aço Carbono
Armadura de tração interna		Aço Carbono
Armadura de tração externa		Aço Carbono
Capa externa		PEAD
Capa Externa		
DE	160	mm
e	10	mm
As	4712,39	mm ²
Ai	15393,80	mm ²
r	75	mm
r/e	7,5	-

Essas simulações permitiram verificar a relação entre a pressão interfacial aplicada à capa externa pela camada imediatamente anterior (pressão interna aplicada no tubo de PEAD) e a força compressiva resistida pela capa plástica (força aplicada no tubo de PEAD). Ilustrações do tubo hipotético produzidas pelo programa são mostradas na Figura 48.

Figura 48 – Ilustrações do tubo hipotético geradas com o programa PipeDesign

O gráfico obtido nesse estudo (Figura 49) fornece uma relação entre a pressão interfacial e a força resistida pela capa provendo uma constante de proporcionalidade $k = 0,1157 \frac{MPa}{kN}$ utilizada nas simulações com elementos finitos, na forma,

$$p_{int} = k F_s. \quad (38)$$

Figura 49 – Relação entre pressão interfacial e força resistida pela capa plástica calculada pelo PipeDesign

A linha referente a essa simulação foi traçada no diagrama de instabilidade, como pode ser observado na Figura 50.

Figura 50 - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada com o tubo hipotético calculado pelo PipeDesign incluso

4.6 Estudo da instabilidade de tubos de PEAD com o uso do Método de Elementos Finitos

Com o intuito de simular os ensaios a serem realizados em tubos de PEAD, conhecer as cargas envolvidas e os possíveis tipos de instabilidade decorrentes da aplicação de certos tipos de carregamento, utilizou-se o método de elementos finitos para balizar e direcionar os ensaios.

O modelamento e análise foram realizados no programa Abaqus®, código largamente utilizando em simulações complexas bi e tridimensionais. Tal modelo, uma vez verificado experimentalmente, servirá para estudos ulteriores, de caráter investigativo-preditivo, permitindo assim ampliar sua aplicação para além dos horizontes de validade estabelecidos pelos trabalhos de cunho experimental.

Os tubos de PEAD utilizados nesse trabalho foram adquiridos no mercado com diâmetro externo de 160mm e espessura de 10mm. Para modelar tal tubo, cortado em pedaços de 580mm de comprimento, empregaram-se elementos sólidos tridimensionais (C3D8I) de 8 nós com dois elementos na espessura do tubo e malha com 21294 elementos (Figura 51).

Figura 51 – Exemplo da malha gerada

Os elementos usados são com modos incompatíveis (graus de liberdade adicionais que melhoram o comportamento em flexão dos elementos) e evitam a necessidade de colocar muitos elementos na espessura. Como existem somente dois elementos na região de instabilidade, estes se deformam predominantemente em flexão.

Foi adotado, modelo elastoplástico e utilizadas nas simulações as curvas ajustadas com a função hiperbólica apresentadas na Figura 45.

Adicionalmente, com o objetivo de induzir a deflagração do processo de instabilidade sob pressurização na seção central, uma perturbação, em forma de sulco trapezoidal com profundidade máxima de 0,1mm ou 1% da espessura do tubo, foi também adotada, a meio comprimento da amostra e ao longo de todo o seu perímetro interno. Este pequeno sulco tem o comprimento de 3 elementos.

Dois conjuntos de condições de contorno foram estudados:

- I. extremidades livres;
- II. extremidades fixas (com liberdade de movimento axial).

A condição de contorno (ii) simulou as condições de contorno do experimento.

Foram empregadas três constantes k com valores de $0,0282 \frac{MPa}{kN}$, $0,0688 \frac{MPa}{kN}$ e $0,1157 \frac{MPa}{kN}$ e duas tensões críticas σ^* (23 e 25 MPa) perfazendo um total de 16

simulações, cujos resultados são apresentados no diagrama de instabilidade da Figura 52. As constantes de proporcionalidade k são referentes aos tubos flexíveis apresentados no item 6.3.1, TF3, TF1 e tubo hipotético respectivamente.

Figura 52 - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada com os pontos obtidos nas simulações com EF

4.6.1 Casos simulados

As seguintes situações foram delineadas para a realização das simulações:

A – pressão e força aplicadas concomitantemente;

B – Aplicação da força até o valor selecionado e em seguida aplicada a pressão;

C – Aplicação da pressão interna até o valor determinado e em seguida aplicada a força.

Para $k = 0,0688 \frac{\text{MPa}}{\text{kN}}$ e $k = 0,1157 \frac{\text{MPa}}{\text{kN}}$ as simulações foram feitas na condição A. Para $k = 0,0282 \frac{\text{MPa}}{\text{kN}}$ todas as situações foram simuladas.

Observa-se que todos os pontos calculados nas simulações, conforme as situações estipuladas aparecem na faixa 90 – 100%.

A Tabela 13 apresenta os dados dos pontos calculados para cada caso.

A nomenclatura de cada caso simulado é definida da seguinte forma:

A, B e C - situações simuladas;

f – extremidades livres e c – extremidades fixas;

k – constante de proporcionalidade.

Tabela 13 – casos simulados em Elementos Finitos

Nr	Caso simulado	p [MPa]	F [N]	p_adm	F_adm
1	A f 23MPa k=0.116	2,52	21762,70	0,82	0,20
2	A c 23MPa k=0.116	2,41	20840,80	0,79	0,19
3	A f 23MPa k=0.069	2,34	33989,20	0,76	0,31
4	A c 23MPa k=0,069	2,25	32699,00	0,73	0,30
5	A c 23MPa k=0.028	1,70	60191,40	0,56	0,56
6	B c 23MPa	1,14	75869,50	0,37	0,70
7	C c 23MPa	2,15	38514,40	0,70	0,36
8	A f 23MPa k=0.028	1,74	61425,80	0,57	0,57
9	B f 23MPa	1,38	75870,50	0,45	0,70
10	C f 23MPa	2,15	43030,90	0,70	0,40
11	A c 25MPa k=0.028	1,83	64737,30	0,55	0,55
12	B c 25MPa	1,45	75869,70	0,44	0,64
13	C c 25MPa	2,15	53608,00	0,64	0,46
14	A f 25MPa k=0.028	1,89	66819,20	0,57	0,57
15	B f 25MPa	1,69	75873,90	0,51	0,64
16	C f 25MPa	2,15	53534,40	0,64	0,45

Com relação aos casos simulados, nota-se, durante as simulações com extremidades fixas (Figura 53), o surgimento de duas protuberâncias axissimétricas, fortemente determinadas pelas condições de contorno impostas emergentes nas extremidades.

Tais configurações pós-críticas têm caráter elastoplástico e são decorrentes de acentuados esforços de flexão, ocasionados pelas restrições impostas. Por conseguinte, a instabilidade é antecipada, com relação aos casos com condição de contorno livres, conforme pode ser verificado na Figura 52.

Devido à forma, são por vezes denominadas na literatura como ‘patas de elefante’; ver, p.ex., da Silva (2011).

Figura 53 – Sequência de imagens da simulação mostrando a evolução das tensões de von Mises – $k = 0,0282$ – extremidades fixas – situação C

Silva (2011), em capítulo dedicado ao estudo do efeito da compressão axial e pressão interna sobre o comportamento de cascas, dedica um item especial à flambagem elastoplástica.

Neste capítulo, ele enfatiza que a pressão interna pode acelerar a flambagem da casca em certos casos e prossegue afirmando que para certo nível de pressão interna e de acordo com os parâmetros geométricos e de material, as regiões próximas às condições de contorno tornam-se propensas a altas tensões de flexão, dela podendo emergir uma rótula de natureza plástica e com isso acelerar-se o colapso da estrutura (Figura 54).

Como mencionado, a configuração pós-crítica decorrente neste caso é denominada na literatura de “pata de elefante”. A instabilidade é do tipo ponto limite.

Figura 54 – Deformação local nas proximidades das condições de contorno – Pata de Elefante – Silva (2011)

A Figura 55 mostra o campo de tensão circunferencial e a tensão axial no momento da instabilidade.

(a)

(b)

Figura 55 – (a) tensão circunferencial; (b) tensão axial no momento da instabilidade - $k = 0,0282$ – extremidades fixas – situação C

Nas simulações com extremidades livres, observa-se claramente o aparecimento da bolha de instabilidade na região onde existe a perturbação, similar a ocorrente no fenômeno de *birdcaging*.

A Figura 56 ilustra a tensão circunferencial e a axial no momento da instabilidade e a Figura 57 ilustra a simulação com extremidades livres.

(a)

(b)

Figura 56 - (a) tensão circunferencial; (b) tensão axial no momento da instabilidade - $k = 0,0282$ – extremidades livres – situação C

Figura 57 - Sequência de imagens da simulação mostrando a evolução das tensões de von Mises – $k = 0,0282$ – extremidades livres – situação C

5 ANÁLISE EXPERIMENTAL

O aparato, a metodologia experimental e os experimentos para o estudo de tubos de PEAD submetidos à compressão e pressurização interna são apresentados neste capítulo. O dispositivo de testes utilizado neste estudo é inspirado nos dispositivos utilizados por Lee (1961) e Paquette e Kyriakides (2006) e foi projetado após intensa fase de discussões e considerações, resultando a configuração aqui apresentada. O dispositivo foi projetado e construído em aço carbono.

As amostras foram retiradas de tubos de PEAD com 6m de comprimento. Suas extremidades foram usinadas com a finalidade de ajuste ao dispositivo, padronização do comprimento total e garantir as mesmas condições de contorno para cada espécime. Conforme já citado, esse tipo de experimento com polímeros, não foi encontrado durante a pesquisa bibliográfica.

Faz-se necessário comentar que o objetivo dos experimentos é estudar os modos de instabilidade de um tubo de PEAD quando submetido à compressão axial, a pressurização interna (com água) e simultaneamente à compressão e pressurização. Sendo a capa externa dos tubos flexíveis de PEAD, os resultados obtidos nos experimentos permitem uma análise dos possíveis mecanismos deflagradores do fenômeno do *birdcaging*.

5.1 Premissas fundamentais

Durante o desenvolvimento do dispositivo e do planejamento dos testes a serem realizados, algumas hipóteses foram discutidas. Cita-se, por exemplo, a discussão sobre as condições de contorno desejadas para o dispositivo, como promover a estanqueidade, qual o tamanho das amostras a serem ensaiadas, quais as possíveis cargas críticas de flambagem de Euler, a provável pressão de escoamento, dentre outras.

Para a concepção do dispositivo de testes e dos experimentos levou-se em consideração algumas premissas básicas a seguir enumeradas:

1. Serão ensaiados tubos de PEAD comprados no mercado, pois não é possível obter a capa externa de um tubo flexível sem cortá-la de um equipamento

- existente ou criar um processo produtivo especial para a obtenção das amostras na fábrica de tubos flexíveis;
2. Se possível, mais de um diâmetro será testado;
 3. As condições de contorno deverão ser semelhantes às utilizadas nos ensaios de Paquette e Kyriakides (2006);
 4. Os ensaios objetivam determinar os modos de instabilidade de um tubo de PEAD com características semelhantes à capa externa do tubo flexível;
 5. Serão monitoradas as seguintes grandezas: força, pressão interna, deslocamento, deformação na amostra e deslocamento radial. A força será medida com a célula de carga da MTS, a pressão interna com pressostatos, a deformação com *strain gages* específicos para polímeros e deslocamento radial com uma trena laser;
 6. A utilização de Correlação Digital de Imagens (DIC) complementar a parte de visualização dos ensaios e a análise de deformações.

5.2 Desenvolvimento do dispositivo de testes e preparação das amostras dos tubos

O dispositivo de testes foi desenvolvido baseado, como já citado, nos mesmos princípios usados por Lee (1961) e Paquette e Kyriakides (2006). Foi concebido e construído de forma a permitir testes com e sem pressurização interna (ANEXO C e ANEXO D).

Foram criados dois anéis de aço (anel 1 e anel 2 - Figura 59b) que envolvem a amostra pelo diâmetro externo e, entre eles e abraçando a amostra, é colocado um anel de borracha nitrílica cuja finalidade é garantir a estanqueidade pelo lado externo.

Na parte interna do dispositivo (Figura 59a), construiu-se um cilindro de polímero (polipropileno) com dois anéis de borracha nitrílica, montados paralelos e que garantem a estanqueidade pelo lado interno da amostra.

Por fim, outro anel de borracha nitrílica foi projetado para receber o diâmetro da amostra e o esforço de compressão transmitido pela parede do tubo. Este anel de plástico foi montado na base de aço onde todos os componentes do dispositivo estão fixados (Figura 58 e Figura 59).

As bases de aço, onde são apoiados todos os componentes do dispositivo, foram construídas com aço comercial SAE 1010/20 e fixadas por parafusos nos T de aço. Estes, por sua vez, são presos pelas garras da MTS (Figura 58).

Em cada base de aço foi construído um canal por onde a água é injetada na amostra e pressurizada. Esse canal está conectado a um orifício no cilindro de polímero. O sistema de pressurização foi projetado de tal forma que a água é injetada pela bomba de pressurização na parte inferior do dispositivo e sai pela parte superior garantindo a eliminação de ar.

Figura 58 – Vista do dispositivo montado e preparado para ensaio

O ANEXO D apresenta os desenhos do dispositivo e de seus componentes, bem como o canal construído para a pressurização da amostra com água. O dispositivo de teste foi tratado superficialmente com zinco branco para protegê-lo contra a oxidação das partes expostas à água.

A fim de minimizar o aparecimento de forças excêntricas, as bases do dispositivo de testes aparafusadas nos T de aço foram alinhadas frontal e lateralmente. O alinhamento lateral foi realizado geometricamente medindo os componentes envolvidos (Figura 60) e nivelando-os. O alinhamento frontal é garantido pela própria MTS. No ANEXO B podem ser consultados os valores especificados e medidos para a concentricidade e a angularidade da MTS.

(a)

(b)

Figura 59 – Componentes do dispositivo

As amostras foram cortadas a partir de tubo de PEAD do fabricante BRASTUBO com as seguintes características: PE 100, cor laranja, diâmetro externo de $160^{+1,0}_{-0}$ mm, PN 04, SDR 17,6 e espessura de parede $9,1^{+1,1}_{-0}$ mm, sendo PN a classe de pressão do tubo (4bar ou 0,4MPa) e SDR a relação entre diâmetro externo e

espessura. Apresenta as seguintes propriedades físicas: índice de fluidez de 0,22g/10' e densidade de 0,950g/cm³.

Após o corte de segmentos do tubo com aproximadamente 585mm, as peças foram usinadas nas extremidades com a finalidade de torná-las paralelas e ajustar a região que penetra no dispositivo. O comprimento total final das amostras é de 580mm, o comprimento aparente de 480⁺¹mm (3 vezes o diâmetro) e o comprimento que penetra no dispositivo de 44⁺¹mm em média. No ANEXO A pode-se consultar o controle dimensional das amostras. A Figura 61 mostra o posicionamento das seções controladas dimensionalmente.

Figura 60 – Alinhamento do dispositivo

Analisando-se o controle dimensional das amostras verifica-se que o diâmetro externo de 160mm e a espessura de 9,1mm oscilam no limite superior da respectiva tolerância. O paralelismo entre faces é satisfatório e varia entre 0,20 e 0,62mm. Com relação à ovalização (circularidade), com exceção das amostras 1 e 6 que apresentam algumas seções medidas fora da tolerância (máximo 3,20 mm), as demais amostras estão dentro do padrão da norma NBR 14462.

Figura 61 – Posição das seções medidas (ANEXO A)

5.2.1 Instrumentação das amostras

As amostras foram dimensionadas e em seguida instrumentadas com *strain gages* específicos para polímeros.

Cada tubo de PEAD foi dividido em quatro meridianos chamados de E1, E2, E3 e E4. Foram criadas três seções chamadas de SI, SIII e SV posicionadas na extremidade superior, centro e extremidade inferior respectivamente. Os extensômetros na direção axial foram chamados de A, os a 45° de B e os na direção circunferencial chamados de C. Um croqui ilustrativo é apresentado na Figura 62.

Figura 62 – Croquis mostrando a posição dos meridianos (E) e seções (S)

5.3 Equipamentos de medição e aquisição de dados

Após a análise do dispositivo, sua montagem, alinhamento e funcionamento, passou-se a verificação dos equipamentos e sensores previstos durante a fase de projeto.

O equipamento de aquisição e gravação de dados, o programa de aquisição por ele utilizado, o programa de análise de dados, sensores e demais acessórios empregados são a seguir listados:

1. Máquina de ensaios universal Landmark 250kN – MTS;
2. Sistema de aquisição de dados ADS 2000 com 64 canais - Lynx;
3. Computador portátil com programas de aquisição, AqDados, e análise AqAnalysis;
4. Extensômetros uniaxiais, biaxiais e triaxiais (rosetas) específicos para medições em polímeros - Kyowa;
5. Cabos manga – 4 x 24 AWG – BT – blindagem simples (IFE)

6. Transdutores de pressão absoluta – P8AP – 50bar (HBM);
7. Sensor ótico ODSL 8/V4-400-S12 (Leuze Eletronic)
8. Bomba de pressurização – 310bar (4500psi) - Flutrol/Haskel;
9. Compressor FIAC 10bar – reservatório 250l.
10. Mangueiras, niples, válvulas agulha e demais acessórios.
11. Sistema DIC – *Digital Image Correlation*

Todos os equipamentos, com exceção da bomba de pressurização e do sistema DIC, são conectados ao sistema de aquisição Lynx a fim de garantir todos os sinais na mesma base de tempo.

5.4 Metodologia experimental

Com o dispositivo de testes pronto, iniciou-se o processo de análise do funcionamento do conjunto montado na máquina de ensaios universal MTS. Essa primeira análise teve como objetivo compreender e determinar a melhor forma de montagem da amostra e analisar o posicionamento dos sensores descritos no item anterior, observando os possíveis problemas.

Em razão do ineditismo do uso de PEAD neste tipo de ensaio e com o uso de pressurização com água, uma amostra (amostra 10) feita de sobra do corte do tubo, com dimensões menores foi utilizada para os primeiros estudos e ajustes.

5.4.1 Análise inicial do funcionamento do dispositivo, bomba de pressurização e sensores

A análise inicial objetivou conhecer os componentes do dispositivo de testes, determinar o melhor modo de montagem das amostras, conhecer o funcionamento do dispositivo com a amostra, analisar a conexão da bomba de pressurização ao dispositivo de teste e seu funcionamento realizando algumas pressurizações, elaborar e ajustar o programa de ensaios na MTS utilizando o MPT – *MultiPurpose Testware*, construir a matriz de ensaios e elaborar a metodologia experimental.

A primeira montagem foi feita com a amostra de tubo menor (amostra 10 do relatório dimensional - Figura 63), sobra do corte das amostras, com comprimento total de 358mm, sendo o comprimento aparente de 270mm. Esta amostra, controlada dimensionalmente em 4 seções, possui diâmetro externo médio de 160,73mm, diâmetro interno médio de 140,52mm, espessura média de 10,11mm, circularidade

nos diâmetros interno e externo e paralelismo entre extremidades, todos dentro do que é preconizado pela norma NBR 14462

Após a análise dos possíveis modos de montagem da amostra no dispositivo, chegou-se a conclusão que, devido ao anel de borracha nitrílica que é montado na parte externa do tubo, cuja função é contribuir com a estanqueidade, o melhor procedimento é a desmontagem dos anéis número 1 do dispositivo e em seguida encaixa-los nas extremidades da amostra. Na sequência, engastam-se os anéis externos de borracha nitrílica ao redor do tubo até que encostem nos respectivos anéis número 1.

Figura 63 – Amostra 10 – Análise do dispositivo e sensores

O passo seguinte é a montagem da amostra na máquina de ensaios MTS. Primeiro, aparafusa-se o anel número 1 na parte superior do dispositivo. Em seguida, zera-se a célula de carga com a finalidade de eliminar o peso próprio da parte superior do dispositivo, da amostra e agregados montados. Por último, encaixa-se a parte inferior da amostra no dispositivo e aparafusa-se o anel número 1.

Montada a amostra teste na máquina, conectaram-se os equipamentos de medição ao sistema de aquisição de dados (sinais de força e deslocamento da MTS, trena laser e *strain gages*) e verificou-se a qualidade e o nível de cada sinal pelo sistema

AqDados. Inicialmente, foram analisados os sinais de força e deslocamento da MTS e os sinais dos *strain gages* montados na direção axiais e circunferencial (Figura 64).

Figura 64 – (a) Sistema de aquisição Lynx e (b) *strain gages*

Na sequência, foi montado o sistema de pressurização da amostra com água (Figura 65). Foram conectados à bomba hidropneumática com capacidade de 31,0MPa ou 310bar (4500psi) a alimentação de água e a alimentação de ar comprimido. A bomba foi conectada ao dispositivo com o uso da mangueira amarela para alta pressão na parte inferior deste. Ainda nesta mesma conexão foi preparado um sistema para escoar a água ao final do ensaio.

Na parte superior do dispositivo, foi conectada uma válvula agulha e uma mangueira para o escoamento da água e do ar durante o preenchimento da amostra com água. Uma pequena torneira foi instalada para permitir a entrada de ar no momento da descarga de água ao final do ensaio. A válvula agulha auxiliou no controle da pressão aplicada à amostra.

Dois transdutores de pressão foram instalados um em cada base do dispositivo com a finalidade de monitorar a pressão nas duas extremidades da amostra ensaiada.

Figura 65 – Sistema de pressurização – (a) mangueiras e sensores (b) bomba de pressurização

A bomba de pressurização hidropneumática recebe o ar comprimido pelo filtro regulador permitindo o controle da pressão de ar que será oferecida à bomba hidráulica e o consequente controle da pressão da água na amostra.

Com a regulação da pressurização da água na amostra sendo realizada pelo regulador de pressão de ar, a bomba de água cicla rapidamente no início do processo de elevação da pressão interna da amostra. À medida que a pressão desejada para o ensaio é alcançada a bomba de água vai diminuindo a ciclagem até parar ou manter-se ciclando e garantindo a pressão desejada. Uma alavanca manual foi instalada na bomba para ajuste fino da pressão, caso necessário.

Com a finalidade de proteger os operadores e equipamentos de eventuais problemas na pressurização das amostras, uma proteção feita com tela e folha de policarbonato foi construída e pode ser visualizada na Figura 65a e Figura 71.

Observou-se durante o processo de ajuste do dispositivo e nos primeiros testes que os anéis de vedação instalados em cada base trabalhavam como molas não lineares em série com o tubo, causando um efeito de ajuste no início dos ensaios. Devido a esse fato, eles foram eliminados e substituídos por anéis de PEAD conforme ilustrado na Figura 66. Outro ponto observado foi a importância do alinhamento do dispositivo.

Figura 66 – (a) Anel de vedação de borracha nitrílica, (b) anel de vedação de PEAD

Nesta fase de ajustes e testes com a amostra 10 foram realizados 36 ensaios preliminares durante 40 dias. Esse período de testes permitiu conhecer o dispositivo, os sensores escolhidos, o sistema de pressurização, o sistema de aquisição de dados Lynx e a máquina de ensaios universal MTS trabalhando em conjunto.

5.4.2 Detalhamento da metodologia experimental

Finda a análise inicial do dispositivo de testes, equipamentos e sensores, uma metodologia experimental foi elaborada de modo a garantir a repetibilidade dos ensaios e a obtenção de dados experimentais confiáveis.

Em todos os ensaios, a evolução da força aplicada e do deslocamento imposto foi monitorada e/ou gravada pelo sistema da MTS e os mesmos sinais foram lidos e gravados no sistema de aquisição de dados Lynx. Também por esse sistema, foram acompanhados e gravados os sinais dos pressostatos, dos *strain gages* e da trena laser.

O sistema DIC foi utilizado para acompanhar as deformações ao longo da amostra, com exceção da amostra 01, amostra 02 – ensaios a e b e amostra 03 – ensaio a. A

partir da amostra 03 – ensaio b esse sistema foi usado e mostrou-se extremamente útil e vital na medição das deformações. Uma explicação do procedimento seguido e do processamento da massa de dados por esse sistema é apresentada no APÊNDICE I.

A metodologia aplicada e os detalhes de cada medição serão explicados nos itens que se seguem.

5.4.3 Matriz de ensaios

A matriz de ensaios com os testes planejados foi elaborada de tal forma a cobrir o maior número de testes com o reduzido número de amostras conseguidas.

A Tabela 14 apresenta um resumo dos ensaios planejados.

Tabela 14 – Matriz de ensaios - Resumo¹

TUBOS DE PEAD - MATRIZ DE ENSAIOS						
	Ensaio	Pressão Interna [MPa]	Pressão Interna [bar]	Deslocamento aplicado [mm]	Comprimento total L [mm]	Velocidade do atuador MTS [mm/min]
Amostra 01 - Compressão pura	único	0,0	0	-90	580,36	1,5
Amostra 02 - Pressão Interna pura	a	2,5	25	0	579,94	0
	b	2,5	25	0	579,94	0
	bb	3,0	30	0	579,94	0
	cc	3,0	30	0	579,94	0
Amostra 03 - Pressão Cte - Varia Desloc.	a	2,0	20	-60	580,7	1,5
	b	2,0	20	-60	580,7	10
Amostra 04 - Pressão Cte - Varia Desloc	a	2,0	20	-60	579,91	10
	b	1,5	15	-60	579,91	10
Amostra 05 - Desloc Cte - Varia Pressão	a	1,5	15	-60	580,32	10
	b	2,0	20	-60	580,32	10
Amostra 06 - Desloc Cte - Varia Pressão	a	1,5	15	-60	580,69	10
	b	2,0	20	-60	580,69	10
Amostra 07 - pressão proporcional deslocam	a	variável	variável	variável	580,27	-
Amostra 08 - pressão proporcional deslocam	a	variável	variável	variável	579,98	-

¹O sinal da medida de força relativa aos ensaios da amostra 07 foi corrompido, motivo pelo qual estes ensaios foram desconsiderados.

5.5 Ensaaios experimentais

Com o dispositivo testado e com as correções necessárias realizadas, iniciou-se a etapa dos ensaios experimentais. Em algumas situações, foi possível ensaiar a amostra mais de uma vez com a finalidade de analisar a influência do histórico de carregamento no PEAD.

Em todos os ensaios uma pré-carga de aproximadamente 1kN foi aplicada de forma a garantir que as extremidades da amostra estivessem encostadas no dispositivo.

Cada item deste subcapítulo apresenta as principais características dos ensaios bem como fotos e curvas dos parâmetros medidos.

Para cada amostra montada na MTS, conectaram-se os cabos manga nos extensômetros e procedeu-se à leitura das resistências para alimentar o AdDados. Em seguida, os cabos dos sensores e do controlador da MTS foram conectados ao sistema de aquisição de dados e a calibração de todos os sensores e demais sinais pelo sistema de aquisição realizado.

Serão apresentados na sequência os seguintes ensaios:

- i. Compressão pura;
- ii. Pressurização interna pura;
- iii. Pressão constante e imposição de deslocamento;
- iv. Imposição de deslocamento e pressão concomitantemente.

Com o objetivo de antecipar o conjunto de resultados obtidos, o diagrama de instabilidade desenvolvido com os pontos obtidos de cada ensaio realizado é apresentado na Figura 67.

Os pontos e linhas que os unem serão explicados ao longo dos itens a seguir.

Figura 67 – Diagrama com os ensaios em tubos de PEAD

5.5.1 Amostra 01 - Compressão axial pura

No ensaio de compressão axial pura foi utilizada a amostra 01, cuja montagem seguiu o roteiro descrito anteriormente.

O passo seguinte foi programar a MTS para realizar o processo de compressão da amostra. Os seguintes valores foram inseridos no programa MPT:

- Velocidade de compressão da amostra: 1,5mm/min;
- Deslocamento máximo de compressão: -90mm (máximo permitido pela MTS);

Todas as torneiras e válvulas do sistema de pressurização foram mantidas abertas de forma a não ocorrer o surgimento de pressão interna devido à compressão do ar contido na amostra.

O ensaio foi realizado à temperatura média de 26,3°C e umidade relativa de 57%.

Com os procedimentos iniciais finalizados, realizou-se o ensaio cuja duração foi de uma hora. Observou-se que a partir de 1,75 minutos com 2,62mm de deslocamento

e 7,73kN de compressão, iniciou a formação, nas extremidades, de protuberâncias que levaria a amostra à instabilidade tipo pata de elefante.

Porém, a partir dos 28 minutos de ensaio, 42,3mm de deslocamento e 76,47kN, percebe-se claramente que a ovalização na parte superior da amostra impõem-se levando a amostra a instabilidade do tipo concertina (segundo modo). A Figura 68 mostra a amostra no final do ensaio de compressão pura.

Esses modos de instabilidade foram encontrados por Andrews et al (1983) e Bardi e Kyriakides (2006) em tubos de liga de alumínio e tubos de aço respectivamente.

Figura 68 – Amostra 01 após o ensaio de compressão pura

Como exemplo da capacidade de regeneração do material, apresenta-se na Figura 69 fotos da amostra 8 dias após o ensaio.

Com relação à evolução do carregamento, percebe-se que a amostra sofre um processo de acomodação (Figura 70b) até 1,76mm de deslocamento.

Figura 69 – Amostra 01 após 8 dias do ensaio

A Figura 70 ilustra a evolução do carregamento em função do deslocamento. Outro ponto a destacar nesta figura é a mudança brusca de inclinação que ocorre a 80mm de deslocamento. Esse fenômeno ocorreu no momento em que as paredes internas da amostra, próximas à seção I, encostaram.

O acompanhamento da evolução das deformações nos pontos de maior deformação desta amostra pelos *strain gages* ficou prejudicado devido ao posicionamento escolhido para os sensores. A análise dos gráficos obtidos não permitiu conclusão criteriosa.

Este ensaio mostrou a importância e a influência das imperfeições iniciais. Como pode ser observada nas medições realizadas (ANEXO A), a espessura e a ovalização são maiores na parte superior da amostra.

Em especial a ovalização que entre a seção A e a seção D possuem uma diferença de 1,49mm externamente. Essa foi a região onde ocorreu a instabilidade observada.

(a)

(b)

(c)

Figura 70 – Amostra 01 - Evolução do carregamento medido pela MTS – Ensaio de compressão pura;
 (a) carregamento x deslocamento; (b) acomodação inicial do material; (c) momento em que as
 paredes internas do tubo se tocam

5.5.2 Amostra 02 - Pressurização interna pura

A amostra 02 (Figura 71) foi dedicada ao estudo da instabilidade do tubo de PEAD quando submetido à pressurização pura. As montagens seguiram o roteiro já descrito.

A amostra foi preenchida com água e a calibração de todos os sensores efetuada. A calibração era realizada após cada nova montagem da amostra e enchimento com água.

Figura 71 – Amostra 02 – Pronta para ensaio e proteção de policarbonato com tela

A pressurização da amostra ocorreu utilizando a bomba hidropneumática descrita anteriormente e a medição da pressão realizada por pressostatos (50bar) colocados na parte superior e inferior do dispositivo como pode ser visto na Figura 72

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 72 – (a) Bomba de pressurização e acessórios, (b) vista geral da entrada e saída da água/pressão, (c) parte inferior, (d) parte superior

5.5.2.1 Amostra 02 – Ensaio a

O primeiro ensaio visou observar o comportamento do tubo de PEAD quando submetido à pressão seguida de despressurização e novamente pressurização / despressurização algumas vezes.

O ensaio foi realizado à temperatura média de 22°C e umidade relativa de 80%.

A Figura 73 ilustra o histórico de aplicação da pressão e despressurização bem como o comportamento da pressão versus deformação circunferencial na região central da amostra para esse ensaio.

Percebe-se claramente, pelos *loopings* característicos, o comportamento viscoelástico do tubo analisando a Figura 73b.

Os gráficos apresentados na Figura 74 mostram a variação das deformações axiais e circunferenciais na região central da amostra durante esse ensaio.

(a)

(b)

Figura 73 – Amostra 02 – ensaio a - (a) Variação da pressão, (b) Pressão interna versus deformação circunferencial na seção SIII

(a)

(b)

Figura 74 – Amostra 02 – ensaio a - (a) Deformação circunferencial x tempo, (b) Deformação axial x tempo – ambas na seção SIII

5.5.2.2 Amostra 02 – Ensaio b

O segundo ensaio deu-se logo em seguida, preservando a calibração feita nos *strain gages*, com a finalidade de verificar o nível de deformação residual que permaneceu.

A amostra foi pressurizada até chegar a 2,6MPa e mantida por aproximadamente 2 minutos nesse nível de pressão conforme ilustra a Figura 76a.

A variação do raio no centro (seção SIII) da amostra de 0,67mm foi obtida com o uso da trena laser (Figura 76b).

Percebe-se claramente que, apesar da retirada da pressão, o tubo não volta a seu estado inicial nos momentos seguintes ao ensaio. O mesmo pode ser visto no comportamento das deformações após a retirada da pressão.

Na Figura 75b observa-se, nos primeiros minutos do ensaio, que as deformações axiais nas extremidades acusam o aparecimento de tração na amostra durante o início da pressurização.

Essa reação deve-se ao fato de que o dispositivo permite que as extremidades da amostra movimentem-se axialmente tendendo a sair dos alojamentos.

Os dois anéis de borracha nitrílica montados no cilindro de polímero do dispositivo e que garantem a estanqueidade da parte interna do tubo de PEAD, atritam com a parede interna deste, causando o surgimento do atrito observado.

Como o tubo de PEAD é viscoelástico, observou-se que o material flui conforme a pressão é mantida constante. Percebe-se na Figura 76a que, apesar do compressor tentar manter a pressão de 2,6MPa a fluência do PEAD reduz a pressão continuamente.

Imediatamente após a retirada da pressão é visível o retorno da amostra a uma condição próxima da inicial.

Com o passar dos dias, a amostra retornou à condição geométrica inicial, a menos de alguma alteração não perceptível a olho nu.

(a)

(b)

Figura 75 - Amostra 02 – ensaio b - (a) Deformação axial seção SIII x tempo, (b) Deformação axial Seções SI e SV x tempo

Figura 76 – Amostra 02 – ensaio b - (a) Pressão aplicada, (b) Variação do raio na região central.
Ambos ao longo do tempo

5.5.2.3 Amostra 02 – Ensaio bb

Este ensaio foi feito 30 dias após os ensaios anteriores com a finalidade de obter informações com a utilização do sistema DIC. A Figura 77 mostra o estado da amostra no início do ensaio e com 13% de deformação circunferencial na região central.

(a)

(b)

Figura 77 – Amostra 02 – ensaio bb - (a) Início do ensaio, (b) deformação de aproximadamente 13%

A amostra foi pressurizada até chegar a 2,15MPa (Figura 78) e em seguida, com a finalidade de evitar que a extremidade do tubo saísse do alojamento e causasse a perda da estanqueidade, pequenos deslocamentos de 1mm foram aplicados sequencialmente conforme ilustra a Figura 79 enquanto a pressão continuava a ser elevada.

Figura 78 – Amostra 02 – ensaio bb – Pressão aplicada

A Figura 79 ilustra a evolução do carregamento medido pela MTS ao longo do tempo e em função do deslocamento aplicado.

Na Figura 80 observa-se, nos primeiros minutos do ensaio, que as deformações axiais nas extremidades acusam o aparecimento de tração na amostra durante o início da pressurização até o momento em que os passos de deslocamentos são aplicados.

Como citado anteriormente, essa reação deve-se ao fato de que o dispositivo permite que as extremidades da amostra movimentem-se axialmente tendendo a sair dos alojamentos. A partir do momento em que o deslocamento é aplicado, a força aplicada pela MTS começa a vencer a força de atrito e a amostra volta a penetrar o alojamento.

Figura 79 - Amostra 02 – ensaio bb - Carregamento compressivo medido pela MTS em função do tempo e do deslocamento

Figura 80 - Amostra 02 – ensaio bb - (a) Deformação axial seção SIII x tempo, (b) Deformação axial Seções SI e SV x tempo

Os gráficos fornecidos pelo sistema DIC mostram, pela análise das medidas feitas nos pontos centrais G, H e I, que a amostra não chegou à instabilidade axissimétrica mesmo atingindo aproximadamente 13% de deformação na direção circunferencial.

Figura 81 - Amostra 02 - ensaio bb - Evolução das deformações axiais e circunferenciais via DIC

5.5.2.4 Amostra 02 – Ensaio cc

O ensaio cc com a amostra 02 foi realizado após 4 dias de descanso da amostra. A Figura 82 exibe o estado da amostra no início do ensaio e a 33% de deformação na direção circunferencial.

A amostra foi pressurizada até chegar a 2,15MPa (Figura 83) e em seguida, com a finalidade de evitar que a extremidade do tubo saísse do alojamento e causasse a perda da estanqueidade, pequenos deslocamentos de 1mm foram aplicados sequencialmente conforme ilustra a Figura 84 enquanto a pressão continuava a ser elevada.

Figura 82 - Amostra 02 – ensaio cc - (a) Início do ensaio, (b) deformação de aproximadamente 33%

Figura 83 - Amostra 02 – ensaio cc – Pressão aplicada

A Figura 84 ilustra a evolução do carregamento medido pela MTS ao longo do tempo e em função do deslocamento aplicado.

Na Figura 85 observa-se, nos primeiros minutos do ensaio, que as deformações axiais nas extremidades acusam o aparecimento de tração na amostra durante o início da pressurização até o momento em que os passos de deslocamentos são aplicados.

Os gráficos fornecidos pelo sistema DIC (Figura 86) mostram, pela análise das medidas feitas nos pontos E, F, G e H, que o desenvolvimento pós-crítico da configuração deformada decorrente da pressurização combinada com deslocamento evidenciou-se na direção circunferencial com 245s de ensaio e na direção axial com 320s.

Figura 84 - Amostra 02 – ensaio cc - Carregamento compressivo medido pela MTS em função do tempo e do deslocamento

Figura 85 – Amostra 02 – ensaio cc - (a) Deformação axial seção SIII x tempo, (b) Deformação axial Seções SI e SV x tempo

Figura 86 - Amostra 02 - ensaio bb - Evolução das deformações axiais e circunferenciais via DIC

5.5.3 Pressurização mantida constante e deslocamento variável

As amostras 03, 04, 05 e 06 foram utilizadas em ensaios nos quais a pressão foi elevada a um nível pré-estabelecido e mantida constante. Em seguida, cada amostra foi submetida a deslocamento compressivo. Os dados geométricos de cada amostra, como por exemplo, o tamanho total e a espessura, podem ser consultados no ANEXO A.

Em todas elas, uma pré-carga média de 1,2kN foi aplicada para garantir que as extremidades do tubo estivessem encostadas no dispositivo.

Cada amostra foi submetida a dois ensaios com intervalo mínimo de 24 horas a fim de permitir a recuperação do material. O objetivo principal desse segundo ensaio foi observar o efeito do histórico de carregamento no tubo de PEAD e verificar se o modelo plástico proposto para previsão da instabilidade axissimétrica, em carregamento essencialmente monotônico, é adequado a despeito de o material apresentar características de comportamento viscoelástico.

Destaca-se a importância da influência das condições de contorno nos ensaios. Pode-se observar o efeito do momento fletor na formação das protuberâncias (Figura 87) que surgem nas extremidades e que, em alguns casos, formariam a pata de elefante (Figura 54) caso o ensaio prosseguisse além do planejado.

Essa região de instabilidade axissimétrica foi prevista pela simulação com o método de elementos finitos com condições de contorno de extremidades fixas (Figura 53).

A partir destes ensaios, o sistema DIC – *Digital Image Correlation* foi utilizado no registro das deformações. De modo geral, consiste em utilizar uma câmera de alta definição que fotografa a amostra a cada 5 segundos (intervalo de tempo escolhido). Em seguida, as imagens são processadas com um programa (*Xcitex Proanalyst*) que analisa o deslocamento de cada ponto, correlacionando-os. Constrói-se uma tabela com as coordenadas desses pontos e, a partir dela, determina-se a deformação na direção axial e direção circunferencial. Cada seção horizontal, nomeada de A a P, possui dois pontos “marcadores” designados 1 e 2. Explicação detalhada encontra-se no APÊNDICE I.

Figura 87 – Formação de protuberâncias durante o ensaio da amostra 04

A utilização do sistema DIC no acompanhamento dos deslocamentos permitiu observar que a resposta em deformação circunferencial é mais acentuada, antecipando-se à resposta em deformação axial. Ou seja, o crescimento da bolha de instabilidade é dominado pelas tensões circunferenciais associadas à pressurização, como esperado. Esse fato determina uma região de início da instabilidade que pode ser visualizada no diagrama de instabilidade da Figura 88 onde os pontos referentes aos ensaios com tubos de PEAD relativos a esse item são apresentados.

Cumprе enfatizar que existe uma incerteza inerente ao método de identificação da instabilidade, nos gráficos gerados através do sistema de correlação de imagens (DIC). Esta incerteza levou a delimitar as regiões de instabilidade na Figura 88 através de segmentos de reta.

Os resultados da instrumentação com os *strain gages*, apesar de oferecer bons resultados, mostraram-se menos esclarecedores que os resultados obtidos com o DIC devido a posicionamento previamente escolhido. Por esse motivo, são apenas apresentados os gráficos de deformação obtidos com o DIC, com exceção do ensaio da amostra 3.

Figura 88 - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada – regiões críticas para cada experimento

Para cada ensaio, o diagrama será apresentado individualmente com o objetivo de propiciar melhor acompanhamento da análise.

5.5.3.1 Amostra 03 – Ensaio a

Para o primeiro ensaio com a amostra 03 os seguintes parâmetros foram programados:

- Velocidade de compressão da amostra: 1,5mm/min;
- Deslocamento máximo de compressão: -60mm ;
- Pressão interna programada: 2MPa.

O ensaio foi realizado à temperatura média de 23,4°C e umidade relativa de 52%.

Como no ensaio de pressurização pura, o controle de pressão é feito diretamente na bomba pressurizadora.

Percebe-se pelo gráfico da pressão ao longo do tempo (Figura 89) que se chega a um pico de 2,67MPa e em seguida a pressão começa a cair até chegar ao valor de 2,05MPa.

Nesse instante, devido à baixa velocidade imprimida pelo atuador na compressão, a fluência do material se sobrepôs e a amostra movimentou-se a tal ponto que a estanqueidade foi prejudicada causando vazamento de água e queda brusca de pressão com 8,22mm (485s) de deslocamento.

Figura 89 – Amostra 03 – ensaio a - Perfil de pressão aplicada à amostra

A Figura 90 ilustra a variação da força medida ao longo do ensaio com o tempo e com o deslocamento imposto.

A pressão foi aplicada até o instante 136s. Em seguida foi iniciada a aplicação do deslocamento na velocidade programada. O registro da força sobe lentamente até aproximadamente 260s para em seguida cair até o instante do vazamento, que se dá aproximadamente à 465s.

É possível observar o início da aplicação do deslocamento em aproximadamente 136s, e o instante em que a amostra sofre a despressurização por vazamento de água. A Figura 91 mostra fotografias da estrutura deformada no instante imediatamente anterior e o instante do vazamento de água (465s). Observa-se na parte inferior como a extremidade da amostra desloca-se para fora do alojamento prejudicando a estanqueidade.

Figura 90 – Amostra 03 – ensaio a - Carregamento compressivo medido pela MTS em função do tempo e do deslocamento

(a)

(b)

Figura 91 – Amostra 03 - ensaio a - (a) instante anterior ao vazamento e (b) no instante do vazamento

As deformações axiais medidas por *strain gages* nas extremidades e na região central do tubo são apresentadas na Figura 92.

Nesses gráficos observa-se que, a 136s, o efeito da aplicação da compressão é detectada nos *strain gages*. A deformação na extremidade inferior (seção SV), devido ao efeito da condição de contorno e à espessura média menor desta região, aumenta mais rapidamente que na seção superior (SI).

A Figura 93 apresenta uma sequência de fotos do ensaio, com o momento do vazamento no destacado pela moldura vermelha.

O aparecimento de tração durante a pressurização é observada até o momento em que a compressão se inicia e a força devido a esse carregamento se sobrepõe a de atrito proporcionada pelos anéis de vedação.

Figura 92 – Amostra 03 – ensaio a - Evolução das deformações axiais nas extremidades e na região central da amostra

$t = 0s$

$t = 136s$

$t = 350s$

$t = 460s$

$t = 465s$

$t = 500s$

$t = 540s$

$t = 675s$

$t = 845s$

Figura 93 – Amostra 03 – ensaio a - Fotos ilustrando o ensaio e o momento em que a amostra perde a estanqueidade (vermelho)

5.5.3.2 Amostra 03 – Ensaio b

Com a experiência adquirida no primeiro ensaio da amostra 03, foi alterada a velocidade de aplicação do deslocamento:

- a. Velocidade de compressão da amostra: 10mm/min;
- b. Deslocamento máximo de compressão: -60mm ;
- c. Pressão interna programada: 2MPa.

O aumento da velocidade de compressão foi necessário para que a amostra, devido ao efeito da pressão e fluência, não escapasse do alojamento como ocorreu no primeiro ensaio.

Essa escolha de velocidade de aplicação do deslocamento mostrou-se adequada, permitindo assim a realização do ensaio conforme planejado.

O ensaio foi realizado à temperatura ambiente média de 19,8°C e umidade relativa de 67%.

A pressão aplicada ao longo do tempo é apresentada na Figura 94.

O objetivo de manter a pressão a 2MPa foi atingido a menos de pequena variação causada pela bomba/compressor e pela fluência do material.

Figura 94 – amostra 03 – ensaio b - Perfil de pressão aplicada à amostra

A Figura 95 ilustra a variação da força ao longo do ensaio com o tempo e com o deslocamento imposto.

Esse foi, cronologicamente, o primeiro ensaio em que o sistema DIC (*Digital Image Correlation*) foi utilizado para acompanhar e medir os deslocamentos dos pontos “marcadores” pintados na amostra (Figura 96).

A região de maior deformação ocorreu próxima ao ponto J (Figura 158) como pode ser visto na Figura 96b.

Gráficos mostrando a evolução das deformações nos pontos H, I e J são apresentados na Figura 97.

Figura 95 – Amostra 03 – ensaio b – Carregamento compressivo medido pela MTS em função do tempo e do deslocamento

Figura 96 – Amostra 03 – ensaio b - (a) pontos para utilização com o sistema DIC, (b) região deformada

A observação visual e a análise do gráfico de deformação axial (Figura 97) permite verificar que o desenvolvimento pós-crítico da configuração deformada decorrente da pressurização combinada com deslocamento evidenciou-se na direção circunferencial em torno de 165s de ensaio e na direção axial em torno de 250s.

É interessante observar a grande deformação pós-crítica, associada à grande complacência do material.

A Figura 98 ilustra diversas etapas do ensaio. A primeira e a última fotos referem-se ao início e término do experimento.

A foto em moldura vermelha mostra o momento em que a resposta axial à instabilidade axissimétrica inicia (250 segundos).

A foto em moldura azul mostra o momento (165 segundos) em que a resposta circunferencial a instabilidade axissimétrica inicia.

Figura 97 – Amostra 03 - ensaio b - Evolução das deformações axiais e circunferenciais via DIC

$t = 0s$

$t = 110s$

$t = 165s$

$t = 180s$

$t = 250s$

$t = 550s$

$t = 580s$

$t = 635s$

$t = 685s$

Figura 98 – Amostra 03 – ensaio b - Fotos ilustrando o ensaio e o momento do início da resposta axial (vermelho) e circunferencial (azul)

A Figura 99 apresenta uma sequência de fotos entre o instante 165s e 250s onde se observa a evolução do ensaio entre esses dois quadros particulares.

Figura 99 – Amostra 3 – ensaio b - Sequência de fotos entre os instantes 165s e 250s

Os pontos referentes à evidência de início da instabilidade axissimétrica decorrente da pressurização combinada com deslocamento axial e circunferencial são apresentados na forma de um segmento de reta no diagrama da Figura 100, delineando a região de ocorrência da instabilidade.

Figura 100 – Amostra 03 – ensaio b - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada com o segmento indicativo do processo de instabilidade obtido no experimento

5.5.3.3 Amostra 04 – Ensaio a

Como planejado, dois ensaios foram realizados na amostra 04. No primeiro ensaio, os parâmetros foram programados da seguinte forma:

- Velocidade de compressão da amostra: 10mm/min;
- Deslocamento máximo de compressão: -60mm ;
- Pressão interna programada: 2MPa.

Neste caso, a pressão programada de 2MPa foi ultrapassada chegando a um pico de 2,69MPa (Figura 101).

O ensaio foi realizado à temperatura ambiente média de 20°C e umidade relativa de 63%.

Figura 101 – Amostra 04 – ensaio a - Perfil de pressão aplicada à amostra

A Figura 102 ilustra a variação da força ao longo do tempo, sob deslocamento imposto.

As imagens da Figura 103 mostram o tubo no início do ensaio e com aproximadamente 16% de deformação na direção circunferencial na região dos pontos L e M (Figura 158).

Gráficos mostrando a evolução das deformações nos pontos J, L, M e N onde as maiores deformações ocorreram, são apresentados na Figura 104.

(a)

(b)

Figura 102 – Amostra 04 – ensaio a - Carregamento compressivo medido pela MTS em função do tempo (a) e do deslocamento (b)

(a)

(b)

Figura 103 - Amostra 04 – ensaio a – (a) Início do ensaio, (b) deformação de aproximadamente 16%

A observação visual e a análise do gráfico de deformação axial permite verificar que o desenvolvimento pós-crítico da configuração deformada decorrente da pressurização combinada com deslocamento evidenciou-se na direção circunferencial em torno de 415s de ensaio e na direção axial em torno de 430s.

A Figura 105 ilustra diversas etapas do ensaio. A primeira e a última fotos referem-se ao início e término do experimento. A foto em moldura vermelha é o momento em que a instabilidade axissimétrica na direção axial inicia (430 segundos). A foto em moldura azul mostra o momento (415 segundos) em que a instabilidade axissimétrica na direção circunferencial inicia. A penúltima foto mostra a amostra após o alívio da pressão interna.

A Figura 106 apresenta uma sequência de fotos entre o instante 415s e 440s onde se observa a evolução do ensaio entre esses dois tempos particulares.

Figura 104 – Amostra 04 – ensaio a - Evolução das deformações axiais e circunferenciais via DIC

$t = 0s$

$t = 205s$

$t = 415s$

$t = 425s$

$t = 430s$

$t = 480s$

$t = 600s$

$t = 1000s$

$t = 1420s$

Figura 105 – Amostra 04 – ensaio a - Fotos ilustrando o ensaio e o momento de início da resposta da instabilidade axial (vermelho) e circunferencial (azul)

Figura 106 – Amostra 04 – ensaio a - Sequência de fotos entre os instantes 415s e 430s

Os pontos referentes ao início do desenvolvimento pós-crítico da configuração deformada decorrente da pressurização combinada com deslocamento são apresentados no diagrama da Figura 107. Esse é a região de ocorrência da instabilidade.

Figura 107 – Amostra 04 – ensaio a - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada com o segmento indicativo do processo de instabilidade obtido no experimento

5.5.3.4 Amostra 04 – Ensaio b

Este ensaio foi desenvolvido, com a mesma amostra 04, 24 horas após o primeiro. Os parâmetros programados são:

- Velocidade de compressão da amostra: 10mm/min;
- Deslocamento máximo de compressão: -60mm ;
- Pressão interna programada: 1,5MPa.

O ensaio foi posto em prática à temperatura ambiente média de 19,5°C e umidade relativa de 67%². A Figura 109 apresenta a variação da força em função do deslocamento e tempo obtidos utilizando os dados gravados na MTS (tempo, deslocamento e força).

² Infelizmente os demais dados gravados com o sistema de aquisição para este ensaio tornaram-se indisponíveis.

No início da imposição do deslocamento, a amostra está pressurizada a 1,42MPa, o que corresponde à força de 21,99kN observado no início do acionamento (efeito de end cap).

Como já citado, a recuperação viscoelástica da geometria do material ocorre com o passar do tempo. Apesar da recuperação, pequena deformação plástica persiste e pode ser vista como uma imperfeição inicial que induz a repetição da configuração de instabilidade.

Na Figura 108 é mostrado o tubo no início do ensaio e com aproximadamente 30% de deformação na direção circunferencial.

As maiores deformações nesse ensaio ocorreram na parte inferior nos pontos J, L, M e N (Figura 158) como no primeiro ensaio (Figura 110).

A observação visual e a análise do gráfico de deformação axial permite verificar que o desenvolvimento pós-crítico da configuração deformada decorrente da pressurização combinada com deslocamento iniciou na direção circunferencial em torno de 200s de ensaio e na direção axial em torno de 255s.

Figura 108 - Amostra 04 – ensaio b – (a) Início do ensaio, (b) deformação de aproximadamente 30%

Figura 109 – Amostra 04 – ensaio b - Carregamento medido pela MTS em função do tempo e do deslocamento

Figura 110 – Amostra 04 – ensaio b - Evolução das deformações axiais e circunferenciais via DIC

Os pontos referentes ao início do desenvolvimento pós-crítico da configuração deformada decorrente da pressurização combinada com deslocamento nas direções axial e circunferencial são apresentados no diagrama da Figura 111. Esse é a região de ocorrência da instabilidade.

A Figura 112 ilustra diversas etapas do ensaio. A primeira e a última fotos referem-se ao início e término do experimento.

A foto em moldura vermelha é o momento em que a configuração deformada decorrente da pressurização combinada com deslocamento evidenciou-se na direção axial (255 segundos). A foto em moldura azul mostra o momento (200 segundos) em que a configuração deformada decorrente da pressurização combinada com deslocamento iniciou na direção circunferencial. A penúltima foto mostra a amostra após o alívio da pressão interna.

A Figura 113 apresenta uma sequência de fotos entre o instante 200s e 255s onde se observa a evolução do ensaio entre esses dois tempos particulares.

Figura 111 – Amostra 04 - ensaio b - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada com o segmento indicativo do processo de instabilidade obtido no experimento

$t = 0s$

$t = 95s$

$t = 200s$

$t = 225s$

$t = 255s$

$t = 390s$

$t = 530s$

$t = 680s$

$t = 930s$

Figura 112 – Amostra 04 – ensaio b - Fotos ilustrando o ensaio e o momento do início da resposta da instabilidade axial (vermelho) e circunferencial (azul)

$t = 200s$

$t = 215s$

$t = 225s$

$t = 235s$

$t = 245s$

$t = 255s$

Figura 113 – Amostra 04 – ensaio b - Sequência de fotos entre os instantes 200s e 255s

5.5.3.5 Amostra 05 – Ensaio a

Seguindo o procedimento adotado, a amostra 05 foi ensaiada duas vezes. Para o primeiro ensaio, os parâmetros foram programados com as seguintes características:

- a. Velocidade de compressão da amostra: 10mm/min;
- b. Deslocamento máximo de compressão: -60mm ;
- c. Pressão interna programada: 1,5MPa.

O ensaio foi realizado à temperatura ambiente média de 22,6°C e umidade relativa de 38%.

A pressão programada de 1,5MPa foi atingida na média, com um pico registrado de 1,65MPa como pode ser examinado na Figura 114.

Figura 114 – Amostra 05 – ensaio a - Perfil de pressão aplicada à amostra

A Figura 115 ilustra a variação da força ao longo do ensaio com o tempo e com o deslocamento imposto.

As imagens da Figura 116 mostram o tubo no início do ensaio e com aproximadamente 16% de deformação circunferencial a 495 segundos de ensaio.

(a)

(b)

Figura 115 – Amostra 05 – ensaio a – Carregamento compressivo medido pela MTS em função do tempo (a) e do deslocamento (b)

Figura 116 - Amostra 05 – ensaio a – (a) Início do ensaio, (b) deformação de aproximadamente 16%

As maiores deformações nesse ensaio ocorreram nos pontos L, M, N e O (Figura 158), como podem ser visualizados nos gráficos da Figura 116.

A observação visual e a análise do gráfico de deformação axial (Figura 117) permite verificar que o desenvolvimento pós-crítico da configuração deformada decorrente da pressurização combinada com deslocamento evidenciou-se na direção circunferencial em torno de 340s de ensaio e na direção axial em torno de 400s.

A Figura 118 ilustra diversas etapas do ensaio.

A primeira e a última fotos referem-se ao início e término do experimento. A foto em moldura vermelha é o momento em que o desenvolvimento pós-crítico da configuração deformada decorrente da pressurização combinada com deslocamento na direção axial inicia (400 segundos).

A foto em moldura azul mostra o momento (340 segundos) em que o desenvolvimento pós-crítico da configuração deformada decorrente da

pressurização combinada com deslocamento na direção circunferencial inicia. A penúltima foto mostra a amostra após o alívio da pressão interna.

Figura 117 – Amostra 05 – ensaio a - Evolução das deformações axiais e circunferenciais via DIC

$t = 0s$

$t = 180s$

$t = 340s$

$t = 380s$

$t = 400s$

$t = 490s$

$t = 620s$

$t = 750s$

$t = 935s$

Figura 118 – Amostra 05 – ensaio a - Fotos ilustrando o ensaio e o momento do início da resposta da instabilidade axial (vermelho) e circunferencial (azul)

A Figura 119 apresenta uma sequência de fotos entre o instante 200s e 255s onde se observa a evolução do ensaio entre esses dois tempos particulares.

Figura 119 – Amostra 05 – ensaio a - Sequência de fotos entre os instantes 340s e 400s

Os pontos referentes ao início do desenvolvimento pós-crítico da configuração deformada decorrente da pressurização combinada com deslocamento axial e circunferencial são apresentados no diagrama da Figura 120. Essa é a região de ocorrência da instabilidade.

Figura 120 – Amostra 05 - ensaio a - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada com o segmento indicativo do processo de instabilidade obtido no experimento

5.5.3.6 Amostra 05 – Ensaio b

O segundo ensaio utilizando a amostra 05 foi realizado 72 horas após o primeiro.

Os parâmetros foram programados com as seguintes características:

- Velocidade de compressão da amostra: 10mm/min;
- Deslocamento máximo de compressão: -60mm ;
- Pressão interna programada: 2,0MPa.

O ensaio foi realizado à temperatura ambiente média de 21°C e umidade relativa de 75%.

O registro de pressão, que fora programada em 2,0MPa, apresentou um pico de 2,24MPa e 2,15MPa na média como pode ser observado na Figura 121.

Figura 121 – Amostra 05 – ensaio b - Perfil de pressão aplicada à amostra

A Figura 122 ilustra a variação da força ao longo do ensaio com o tempo e com o deslocamento imposto.

As imagens da Figura 123 mostram o tubo no início do ensaio e com aproximadamente 20% de deformação circunferencial a 520 segundos de ensaio.

As maiores deformações nesse ensaio ocorreram na parte inferior nos pontos L,M,N e O (Figura 158) como pode ser visualizado na Figura 124. Gráficos mostrando a evolução das deformações nas seções são apresentados na mesma figura.

A observação visual e a análise do gráfico de deformação axial (Figura 124) permite verificar que o desenvolvimento pós-crítico da configuração deformada decorrente da pressurização combinada com deslocamento evidenciou-se na direção circunferencial em torno de 300s de ensaio e na direção axial em torno de 330s.

Figura 122 – Amostra 05 – ensaio b – Carregamento compressivo medido pela MTS em função do tempo e do deslocamento

Figura 123 - Amostra 05 - ensaio b –(a) Início do ensaio, (b) deformação de aproximadamente 20%

A Figura 125 ilustra diversas etapas do ensaio. A primeira e a última fotos referem-se ao início e término do experimento. A foto em moldura vermelha é o momento em que o desenvolvimento pós-crítico da configuração deformada decorrente da pressurização combinada com deslocamento na direção axial inicia (330 segundos). A foto em moldura azul mostra o momento (300 segundos) em que o desenvolvimento pós-crítico da configuração deformada decorrente da pressurização combinada com deslocamento na direção circunferencial inicia.

A antepenúltima foto mostra a amostra após o alívio da pressão interna.

Figura 124 – amostra 05 – ensaio b - Evolução das deformações axiais e circunferenciais via DIC

$t = 0s$

$t = 100s$

$t = 300$

$t = 320s$

$t = 330s$

$t = 520s$

$t = 605s$

$t = 745s$

$t = 980s$

Figura 125 – Amostra 05 – ensaio b - Fotos ilustrando o ensaio e o momento do início da resposta da instabilidade axial (vermelho) e circunferencial (azul)

A Figura 126 apresenta uma sequência de fotos entre o instante 300s e 330s onde se observa a evolução do ensaio entre esses dois tempos particulares.

Figura 126 – Amostra 05 – ensaio b - Sequência de fotos entre os instantes 300s e 330s

Os pontos referentes ao início do desenvolvimento pós-crítico da configuração deformada decorrente da pressurização combinada com deslocamento axial e circunferencial são apresentados no diagrama da Figura 127. Esse é a região de ocorrência da instabilidade.

Figura 127 – Amostra 05 – ensaio b - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada com o segmento indicativo do processo de instabilidade obtido no experimento

5.5.3.7 Amostra 06 – Ensaio a

A amostra 06 também foi ensaiada duas vezes. Os parâmetros para o primeiro ensaio foram programados com as seguintes características:

- Velocidade de compressão da amostra: 10mm/min;
- Deslocamento máximo de compressão: -60mm ;
- Pressão interna programada: 1,5MPa.

O ensaio foi realizado à temperatura ambiente média de 22,1°C e umidade relativa de 52%.

A pressão programada de 1,5MPa apresentou um pico de 1,69MPa e na média 1,6MPa como pode ser observado na Figura 128.

Figura 128 - Perfil de pressão aplicada à amostra

A Figura 129 ilustra a variação da força ao longo do ensaio com o tempo e com o deslocamento imposto.

As imagens da Figura 130 mostram o tubo no início do ensaio e com aproximadamente 30% de deformação circunferencial a 535 segundos de ensaio.

As maiores deformações nesse ensaio ocorreram na parte inferior nos pontos L,M, N e O, como pode ser visualizado na Figura 131. Gráficos mostrando a evolução das deformações nas seções são apresentados na mesma figura.

Neste caso é visível a instabilidade tipo pata de elefante na extremidade inferior (SV).

A observação visual e a análise do gráfico de deformação axial (Figura 131) permite verificar que o desenvolvimento pós-crítico da configuração deformada decorrente da pressurização combinada com deslocamento evidenciou-se na direção circunferencial em torno de 285s de ensaio e na direção axial em torno de 340s.

Figura 129 – Amostra 06 – ensaio a - Carregamento compressivo medido pela MTS em função do tempo e do deslocamento

Figura 130 - Amostra 06 – ensaio a – (a) Início do ensaio, (b) deformação circunferencial aproximadamente 30%

A Figura 132 ilustra diversas etapas do ensaio. A primeira e a última fotos referem-se ao início e término do experimento. A foto em moldura vermelha é o momento em que o desenvolvimento pós-crítico da configuração deformada decorrente da pressurização combinada com deslocamento na direção axial inicia (340 segundos). A foto em moldura azul mostra o momento (285 segundos) em que o desenvolvimento pós-crítico da configuração deformada decorrente da pressurização combinada com deslocamento na direção circunferencial inicia.

A antepenúltima foto mostra a amostra após o alívio da pressão interna.

A Figura 133 apresenta uma sequência de fotos entre o instante 285s e 340s onde se observa a evolução do ensaio entre esses dois tempos particulares.

Figura 131 – Amostra 06 – ensaio a - Evolução das deformações axiais e circunferenciais via DIC

$t = 0s$

$t = 155s$

$t = 285s$

$t = 325s$

$t = 340s$

$t = 485s$

$t = 535s$

$t = 700s$

$t = 775s$

Figura 132 – Amostra 06 – ensaio a - Fotos ilustrando o ensaio e o momento do início da resposta da instabilidade axial (vermelho) e circunferencial (azul)

Figura 133 – Amostra 06 – ensaio a - Sequência de fotos entre os instantes 285s e 340s

Os pontos referentes ao início do desenvolvimento pós-crítico da configuração deformada decorrente da pressurização combinada com deslocamento axial e circunferencial são apresentados no diagrama da Figura 134. Esse é a região de ocorrência da instabilidade.

Figura 134 – Amostra 06 – ensaio a - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada com o segmento indicativo do processo de instabilidade obtido no experimento

5.5.3.8 Amostra 06 – Ensaio b

O segundo ensaio utilizando a amostra 06 foi realizado 24 horas após o primeiro.

Os parâmetros foram programados com as seguintes características:

- Velocidade de compressão da amostra: 10mm/min;
- Deslocamento máximo de compressão: -60mm ;
- Pressão interna programada: 2,0MPa.

O ensaio foi realizado à temperatura ambiente média de 22°C e umidade relativa de 49%.

A pressão programada de 2,0MPa apresentou um pico de 2,24MPa e na média 2,15MPa como pode ser observado na Figura 135.

Figura 135 – Amostra 06 – ensaio b - Perfil de pressão aplicada à amostra

A Figura 136 ilustra a variação da força ao longo do ensaio com o tempo e com o deslocamento imposto.

As imagens da Figura 137 mostram o tubo no início do ensaio e com aproximadamente 25% de deformação circunferencial a 520 segundos de ensaio.

As maiores deformações nesse ensaio ocorreram na parte inferior nas seções M, N e O como pode ser visualizado na Figura 138. Gráficos mostrando a evolução das deformações nas seções são apresentados na mesma figura.

Neste ensaio, a instabilidade tipo pata de elefante é evidente na extremidade inferior (SV). Pode ser vista, na extremidade superior (SI), o aparecimento de protuberância causada pelo histórico do material previamente ensaiado.

A observação visual e a análise do gráfico de deformação axial (Figura 138) permite verificar que o desenvolvimento pós-crítico da configuração deformada decorrente da pressurização combinada com deslocamento evidenciou-se na direção circunferencial em torno de 245s de ensaio e na direção axial em torno de 340s.

Figura 136 – Amostra 06 – ensaio b - Carregamento compressivo medido pela MTS em função do tempo e do deslocamento

Figura 137 - Amostra 06 – ensaio b – (a) Início do ensaio, (b) deformação circunferencial aproximadamente 25%

A Figura 139 ilustra diversas etapas do ensaio. A primeira e a última fotos referem-se ao início e término do experimento. A foto em moldura vermelha é o momento em que o desenvolvimento pós-crítico da configuração deformada decorrente da pressurização combinada com deslocamento na direção axial inicia (340 segundos). A foto em moldura azul mostra o momento (245 segundos) em que o desenvolvimento pós-crítico da configuração deformada decorrente da pressurização combinada com deslocamento na direção circunferencial inicia.

A antepenúltima foto mostra a amostra após o alívio da pressão interna.

A Figura 140 apresenta uma sequência de fotos entre o instante 245s e 340s onde se observa a evolução do ensaio entre esses dois tempos particulares.

Figura 138 – Amostra 06 – ensaio b - Evolução das deformações axiais e circunferenciais via DIC

$t = 0s$

$t = 85s$

$t = 245s$

$t = 290s$

$t = 340s$

$t = 520s$

$t = 665s$

$t = 720s$

$t = 775s$

Figura 139 – Amostra 06 – ensaio b - Fotos ilustrando o ensaio e o momento do início da resposta da instabilidade axial (vermelho) e circunferencial (azul)

Figura 140 – Amostra 06 – ensaio b - Sequência de fotos entre os instantes 245s e 340s

Os pontos referentes ao início do desenvolvimento pós-crítico da configuração deformada decorrente da pressurização combinada com deslocamento axial e circunferencial são apresentados no diagrama da Figura 141. Esse é a região de ocorrência da instabilidade.

Figura 141 – Amostra 06 ensaio b - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada com o segmento indicativo do processo de instabilidade obtido no experimento

6 DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, discutem-se os resultados das análises teóricas, simulações e experimentos apresentados nos capítulos anteriores. O capítulo está dividido em três partes sendo que a primeira versa sobre os estudos analíticos conduzidos e a construção do diagrama de instabilidade, a segunda sobre os estudos numéricos e por último discutem-se os resultados experimentais obtidos.

6.1 Estudos analíticos

Feita a opção pelo estudo da capa plástica externa dos tubos flexíveis com a finalidade de analisar detalhadamente a hipótese de que ela é o gatilho do fenômeno de *birdcaging*, pesquisaram-se bibliografias que apresentassem estudos em tubos de paredes finas e paredes grossas. Encontraram-se diversas referências tratando do estudo de tubos metálicos, porém nada foi encontrado aplicado a tubos fabricados em polímeros.

Decidiu-se, utilizar a teoria elastoplástica em conjunto com os dados obtidos nos ensaios de caracterização do PEAD para desenvolver o equacionamento da abordagem teórica e verificar a aplicabilidade dessa teoria no estudo da hipótese gerada.

A primeira abordagem analítica, baseada no equilíbrio de forças, foi o desenvolvimento de uma solução para o problema experimental de um tubo pressurizado internamente submetido a uma força de compressão.

Em seguida, dentre os artigos pesquisados, o de Paquette e Kyriakides (2006) foi escolhido como base para a continuidade da análise. Os autores realizaram um profundo estudo em tubos de aço superduplex aplicados à indústria de petróleo e gás quando submetidos à pressurização interna e compressão.

Por meio do equacionamento analítico não linear do modelo elastoplástico desenvolvido por Paquette e Kyriakides (2006), programa foi elaborado em MATLAB®, devidamente adaptado para aplicação em tubos de PEAD. Com a aplicação de uma função hiperbólica original ajustada por intermédio de gráficos

obtidos nos ensaios experimentais de caracterização do PEAD, em tração, foram obtidos valores de força e pressão críticos para tubos de PEAD.

O conjunto de pontos gerados permitiu a construção de um diagrama de instabilidade plástica apresentado na Figura 47, denominado Modelo P_K (Figura 142). Esse modelo permite simular o processo de instabilidade plástica.

Figura 142 - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada – Modelo P_K

Este diagrama de instabilidade plástica é “universal”, isto é, independente da geometria do tubo (diâmetro e espessura) e da tensão limite, pois é construído de forma adimensional.

Por outro lado, uma análise limite-plástica baseada na equação de equilíbrio em que a tensão equivalente, dada pela expressão da tensão de von Mises, é igualada à tensão crítica, permitiu construir uma expressão de segundo grau simples (36) em função da pressão e força adimensionalizada chegando ao modelo chamado de Analítico no diagrama (Figura 143).

Figura 143 - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada – Modelo analítico

Como se poderia esperar, a locação dos pontos, tanto do Modelo P_K quanto do modelo Analítico 100% no diagrama, coincidiram. A área que surge entre as linhas de 80% e 100%, pode ser tomada como a região de ocorrência da instabilidade levando-se em consideração a existência de imperfeições geométricas, a influência das condições de contorno, a não uniformidade na distribuição do carregamento, dentre outros.

O diagrama de instabilidade plástica criado foi testado com pontos gerados pelo método de elementos finitos, por meio dos experimentos com tubos de PEAD e com dados de ensaios em tubos flexíveis que apresentaram ou não o *birdcaging*.

6.2 Estudos numéricos

Os estudos numéricos efetuados com o programa Abaqus® utilizaram modelo elastoplástico e elemento sólido 3D.

As simulações numéricas mostraram ser um instrumento bastante útil no estudo e análise dos casos possíveis de instabilidade do tubo de PEAD, na análise do modelo elastoplástico para a previsão da instabilidade e na verificação do diagrama de instabilidade plástica construído.

As situações A, B e C simuladas bem como os parâmetros utilizados foram apresentadas na seção 4.6. Os pontos referentes ao início da instabilidade nas simulações realizadas foram adimensionalizados e alocados no diagrama de instabilidade plástica (Figura 144).

Figura 144 - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada com os pontos derivados das simulações com MEF

Fica claro, no diagrama de instabilidade plástica que, a alocação dos pontos originados das simulações com elementos finitos situam-se na região 90 – 100%. Observa-se também que os pontos derivados das simulações com extremidades fixas sempre acontecem antes devido ao surgimento de momento fletor nas extremidades.

6.3 Estudos experimentais

Sendo esta tese de forte cunho experimental, a realização de experimentos bem planejados e executados demandou longo trabalho de análise e preparação.

Os ensaios de caracterização do PEAD foram realizados conforme as normas adotadas e permitiram conhecer o comportamento desse material em três velocidades distintas e a influência destas no módulo de elasticidade (Figura 145).

Figura 145 – Curvas médias de caracterização do PEAD em três velocidades distintas – Ensaio de tração

Proporcionaram conhecer a fluência e relaxação do PEAD quando submetidos a uma tensão e a uma deformação constante ao longo do tempo, respectivamente.

Os dados obtidos nos ensaios de caracterização alimentaram o modelo plástico de Paquette e Kyriakides (2006), programado em Matlab®, e forneceram os dados necessários para as simulações com o método de elementos finitos.

Por outro lado, os diversos ensaios com os tubos de PEAD permitiram observar a importância e a influência das imperfeições iniciais como, por exemplo, a influência da ovalização da parte superior do tubo da amostra 01, durante o ensaio de compressão pura, levando esta a instabilidade tipo concertina. Possibilitaram a observação de que a pressurização interna diminui o efeito das imperfeições geométricas das amostras.

Propiciaram uma melhor compreensão fenomenológica do comportamento visco-elastoplástico dos tubos de PEAD, a observação da influência da pressão interna no processo de fluência do material e do comportamento dos carregamentos impostos às amostras.

Um ponto importante analisado e que motivou a execução de pelo menos dois ensaios com cada amostra foi o efeito causado pelo histórico de carregamento nas amostras.

A influência deste histórico pode ser verificada no diagrama de instabilidade plástica da Figura 146. Os ensaios realizados com a amostra virgem necessitaram de menor pressão e maior carregamento que os ensaios com as amostras já testadas para chegar a instabilidade. Explica-se esse comportamento pelo efeito de *hardening* da amostra ocasionado pelo histórico de carregamento. Exceção para a amostra 04 que apresenta as melhores condições geométricas entre as amostras testadas. Neste caso, a força necessária ao começo da instabilidade aumentou enquanto a pressão manteve-se no mesmo nível.

Em alguns casos, após o primeiro ensaio foi possível verificar leve deformação plástica. Em outros, a amostra se recuperou de tal forma que a olho nu aparentava ter retornado a sua condição inicial.

A análise dos experimentos permitiu detectar que a resposta em deformação circunferencial é mais acentuada, antecipando-se à resposta em deformação axial. Ou seja, o crescimento da bolha de instabilidade é dominado pelas tensões circunferenciais associadas à pressurização. Esse fato gerou uma linha de ocorrência de instabilidade entre o ponto de evidência do início da resposta circunferencial e o ponto de evidência do início da resposta axial (Figura 146).

Um efeito muito interessante observado durante os ensaios com tubos de PEAD foi a capacidade de recuperação do material. Apesar das grandes deformações sofridas, o PEAD, por ter comportamento viscoelástico, recupera-se de maneira notável.

Figura 146 - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada com as linhas de instabilidade para cada experimento

6.3.1 Análise de experimentos com tubos flexíveis

Com a finalidade de validar o uso do diagrama de instabilidade plástica para experimentos realizados em tubos flexíveis em que a capa plástica estava presente, dados de ensaios foram pesquisados na literatura disponível.

Por ser um estudo mais recente, inicia-se a discussão pelo TF3 que inclui uma análise não linear por elementos finitos. Três casos experimentais foram escolhidos baseados na oferta de dados. Dois tubos flexíveis nomeados de TF1 e TF2 têm suas propriedades apresentadas na Tabela 20. O tubo flexível TF3 tem seus dados exibidos nas tabelas de 14 a 17.

TF1 e TF3 falharam por *birdcaging* sujeitos a carregamento compressivo monotônico e sem pressão interna. A carga de falha do TF1 foi de 550kN (Braga – 2003) e do TF3 de 256kN (valor médio), ver Sousa et al (2012). TF2, também carregado monotonicamente e com pressão interna nula, falhou pelo rearranjo dos arames da armadura de tração a aproximadamente 500kN. Detalhes experimentais podem ser consultados em Braga (2003) e Custódio (2005).

Um recente artigo publicado por Sousa et al (2012) apresenta resultados de ensaios experimentais conduzidos na COPPE/UFRJ bem como resultados de simulações por meio do método de elementos finitos.

A tabela 3 do artigo em questão apresenta os carregamentos de falha dos experimentos e simulações de elementos finitos (Tabela 15).

Na Tabela 16, retirada do referido artigo, mostra se os dados do tubo flexível utilizado nos experimentos e simulações.

Tabela 15 – Dados dos carregamentos críticos experimentais e de elementos finitos
(Sousa et al, 2012)

Table 3 Experimental and FE failure loads			
Sample	(1) Experimental (kN)	(2) FE (kN)	$\frac{(1)-(2)}{(2)} \cdot 100\%$
1	263	290	-9.3%
2	270	290	-6.9%
3	235	290	-19.0%
Average	256	290	-11.7%
Standard deviation	19	—	—

Utilizou-se a carga média experimental e a de elementos finitos nos cálculos dos pontos apresentados no diagrama da Figura 149, sendo identificados por TF3 Experimental e TF3 Elementos Finitos.

Um resumo dos dados geométricos do tubo utilizados nos cálculos é apresentado na Tabela 17.

A Tabela 18 a seguir apresenta os valores calculados por Sousa (2014) com o uso do método de elementos finitos e a partir da qual foi determinado o nascimento da instabilidade e acrescentada no diagrama de instabilidade.

Tabela 16 – Dados do tubo flexível; Sousa et al (2012)

Layer (material)	Properties
Inner carcass (stainless steel)	thickness = 4.0 mm; number of wires = 1; lay angle = +87.6 deg; interlocked profile; area = 32.0 mm ² ; moment of inertia = 52.1 mm ⁴ ; Young modulus = 193 GPa; Poisson coefficient = 0.3; Yield/Rupture stress = 320 MPa/640 MPa; $c_1 = 3/7$, $c_2 = 10$.
Internal plastic (polyamide 11)	thickness = 5.0 mm; Young modulus = 345 MPa; Poisson coefficient = 0.3.
Pressure armor (carbon steel)	thickness = 6.2 mm; number of wires = 2; lay angle = +87.0 deg; Z profile; area = 54.1 mm ² , moment of inertia = 173.4 mm ⁴ ; Young modulus = 205 GPa; Poisson coefficient = 0.3; Yield/Rupture stress = 900 MPa/1000 MPa; $c_1 = 3/7$, $c_2 = 14$.
Inner tensile armor (carbon steel)	thickness = 2.0 mm; number of wires = 47; lay angle = +35.0 deg; rectangular profile; width = 7.0 mm; Young modulus = 205 GPa; Poisson coefficient = 0.3; Yield/Rupture stress = 1260 MPa/1400 MPa; $c_1 = 3/7$, $c_2 = 4$.
Outer tensile armor (carbon steel)	thickness = 2.0 mm; number of wires = 48; lay angle = -35.0 deg; rectangular profile; width = 7.0 mm; Young modulus = 205 GPa; Poisson coefficient = 0.3; Yield/Rupture stress = 1260 MPa/1400 MPa; $c_1 = 3/7$, $c_2 = 4$.
High strength tape (aramid fiber)	thickness = 1.2 mm; lay angle = -84.0 deg. thickness = 5.0 mm; Young modulus = 750 MPa; Poisson coefficient = 0.3;
Outer plastic (polyethylene)	Yield/Rupture stress = 20 MPa/20 MPa; Tangent modulus = 0.1 MPa.

Tabela 17 – resumo dos dados do tubo flexível artigo Sousa et al (2012)

Capa plástica		
DE	152,40	mm
DI	142,40	mm
r	73,70	mm
t	5,00	mm
Ai	15926,12	mm ²
As	2315,35	mm ²
s*	20,00	Mpa
p*	1,36	MPa
F*	46,31	kN

Tabela 18 – Cálculos obtidos por Sousa (2014) a partir do qual foi determinado o ponto de instabilidade (Elementos Finitos) – Sousa (2014)

Carga Normal			pressão de contato na interface							
Tubo Flexível	Capa Externa		Int 1	Int 2	Int 3	Int 4	Int 5	Int 6	Fad	pad
[kN]	[N]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]		
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	281,2224	0,2812	0,0000	0,0017	0,0000	0,0322	0,0584	0,0142	0,0061	0,0105
8	562,5491	0,5625	0,0000	0,0034	0,0000	0,0645	0,1169	0,0285	0,0121	0,0210
14	984,5720	0,9846	0,0000	0,0060	0,0000	0,1128	0,2046	0,0498	0,0213	0,0367
22	1547,3285	1,5473	0,0000	0,0094	0,0000	0,1772	0,3215	0,0783	0,0334	0,0577
30	2110,2478	2,1102	0,0000	0,0128	0,0000	0,2417	0,4384	0,1068	0,0456	0,0787
38	2673,3041	2,6733	0,0000	0,0162	0,0000	0,3061	0,5552	0,1353	0,0577	0,0997
46	3236,4826	3,2365	0,0000	0,0197	0,0000	0,3705	0,6721	0,1637	0,0699	0,1207
54	3799,7500	3,7997	0,0000	0,0231	0,0000	0,4350	0,7890	0,1922	0,0821	0,1417
62	4363,1283	4,3631	0,0000	0,0265	0,0000	0,4994	0,9059	0,2207	0,0942	0,1626
70	4926,6178	4,9266	0,0000	0,0299	0,0000	0,5638	1,0228	0,2491	0,1064	0,1836
78	5490,1443	5,4901	0,0000	0,0334	0,0000	0,6282	1,1397	0,2776	0,1186	0,2046
86	6053,7448	6,0537	0,0000	0,0368	0,0000	0,6926	1,2565	0,3061	0,1307	0,2256
94	6617,4193	6,6174	0,0000	0,0402	0,0000	0,7570	1,3734	0,3345	0,1429	0,2466
102	7181,1679	7,1812	0,0000	0,0437	0,0000	0,8214	1,4903	0,3630	0,1551	0,2675
110	7744,9536	7,7450	0,0000	0,0471	0,0000	0,8858	1,6072	0,3915	0,1673	0,2885
118	8308,7762	8,3088	0,0000	0,0505	0,0000	0,9502	1,7240	0,4199	0,1794	0,3095
126	8872,6359	8,8726	0,0000	0,0539	0,0000	1,0146	1,8409	0,4484	0,1916	0,3305
134	9436,5696	9,4366	0,0000	0,0574	0,0000	1,0790	1,9578	0,4768	0,2038	0,3514
142	10000,5403	10,0005	0,0000	0,0608	0,0000	1,1434	2,0746	0,5053	0,2160	0,3724
150	10564,5110	10,5645	0,0000	0,0642	0,0000	1,2078	2,1915	0,5338	0,2281	0,3934
158	11128,5558	11,1286	0,0000	0,0677	0,0000	1,2722	2,3084	0,5622	0,2403	0,4144
166	11692,6005	11,6926	0,0000	0,0711	0,0000	1,3366	2,4253	0,5907	0,2525	0,4353
174	12256,6823	12,2567	0,0000	0,0745	0,0000	1,4010	2,5421	0,6191	0,2647	0,4563
182	12820,8011	12,8208	0,0000	0,0780	0,0000	1,4654	2,6590	0,6476	0,2769	0,4773
190	13384,9569	13,3850	0,0000	0,0814	0,0000	1,5298	2,7759	0,6761	0,2890	0,4983
198	13949,1128	13,9491	0,0000	0,0848	0,0000	1,5941	2,8927	0,7045	0,3012	0,5192
206	14513,3056	14,5133	0,0000	0,0883	0,0000	1,6585	3,0096	0,7330	0,3134	0,5402
214	15077,4985	15,0775	0,0000	0,0917	0,0000	1,7229	3,1265	0,7614	0,3256	0,5612
222	15641,7283	15,6417	0,0000	0,0951	0,0000	1,7873	3,2433	0,7899	0,3378	0,5821
230	16205,9952	16,2060	0,0000	0,0986	0,0000	1,8517	3,3602	0,8183	0,3500	0,6031
238	16770,2621	16,7703	0,0000	0,1020	0,0000	1,9161	3,4771	0,8468	0,3622	0,6241
246	17334,5660	17,3346	0,0000	0,1054	0,0000	1,9805	3,5939	0,8752	0,3743	0,6451
254	17898,8699	17,8989	0,0000	0,1089	0,0000	2,0448	3,7108	0,9037	0,3865	0,6660
262	18463,1738	18,4632	0,0000	0,1123	0,0000	2,1092	3,8277	0,9322	0,3987	0,6870
270	19444,7361	19,4447	0,0000	0,1189	0,0000	2,1678	3,9364	0,9967	0,4199	0,7345
278	20792,2833	20,7923	0,0000	0,1290	0,0000	2,2207	4,0374	1,0959	0,4490	0,8077
286	18244,7527	18,2448	0,0000	0,1692	0,0000	2,2767	4,1407	1,1975	0,3940	0,8825
290	14818,0586	14,8181	0,0000	0,2136	0,0000	2,3016	4,1852	1,2412	0,3200	0,9148

Para auxiliar na determinação do ponto de evidência de início de instabilidade axissimétrica para o caso em análise, o gráfico da Figura 147 foi construído com os dados da Tabela 18.

O ponto de evidência de início da instabilidade escolhido para plotar o TF3 Elementos Finitos é o último ponto da região linear do gráfico contido na reta traçada. Esse é o ponto correspondente à carga de 262kN aplicada ao tubo flexível simulado. A partir deste ponto a amostra instabiliza até a falha por *birdcaging*.

Já o ponto experimental foi calculado por uma relação linear entre os valores fornecidos na Tabela 15.

Figura 147 – Figura gerada a partir dos dados da Tabela 18

Inserindo os pontos desse gráfico no diagrama construído (Figura 148), observa-se que o início da instabilidade ocorre próximo da linha limite (entre as linhas 90% e 100%).

Figura 148 – Dados da Figura 147 inseridos no diagrama de instabilidade

Outra fonte de dados experimentais encontrada durante a pesquisa foi a tese de doutorado de Braga (2003) que apresenta 15 ensaios destrutivos com tubos flexíveis sendo dois dedicados a compressão monotônica. Em um dos ensaios, a amostra acusou o surgimento de *birdcaging* e em outro a amostra apresentou um rearranjo das camadas internas sem apresentar o fenômeno do *birdcaging*. A Tabela 20 apresenta os dados gerais dos tubos flexíveis.

Análise de distribuição de esforços conduzida utilizando o modelo de Ramos e Pesce (2004), na condição de carregamento em que a falha foi identificada, para os tubos TF1 e TF2, é apresentada na Tabela 19.

O uso dos parâmetros geométricos dos tubos e a adoção do valor de 23MPa para TF1 e 25MPa para TF2 como tensão de escoamento, permitiram plotar os pontos respectivos no diagrama de instabilidade.

Observa-se que o ensaio que apresentou o fenômeno do *birdcaging* (TF1) tem seu ponto dentro da zona de instabilidade do diagrama. Já o ponto (TF2), do outro tubo flexível que não apresentou a falha tipo gaiola de passarinho, surge fora da área de instabilidade do diagrama (Figura 149). O conjunto de resultados obtidos com os três

tubos estudados, TF1, TF2 e TF3, constituem uma forte tendência da realidade do critério e confirmação da conjectura.

Tabela 19 – Cálculos utilizando o modelo de Ramos e Pesce (2004)

TF - 1		
Camada	Carga axial	Pressão de Contato
	[kN]	[MPa]
Carcaça interna	-0,546	NA
Camada polimérica	-43,583	10,084
Armadura de pressão	0,276	10,497
Armadura de tração interna	-311,511	0,000
Armadura de tração externa	-204,516	5,267
Bandagem	19,411	8,538
Capa plástica externa	-9,530	1,232

TF - 2		
Camada	Carga axial	Pressão de Contato
	[kN]	[MPa]
Carcaça interna	-0,212	NA
Bandagem	-18,615	4,310
Armadura de pressão	0,116	4,500
Barreira de pressão	-4,446	0,000
Armadura de tração interna	-294,194	0,000
Bandagem	0,022	3,350
Armadura de tração externa	-194,623	3,060
Bandagem	11,782	5,000
Capa plástica externa	0,170	0,770

Complementarmente, é interessante observar no diagrama de instabilidade, a história do carregamento pela pressurização e aplicação do deslocamento nas amostras ao longo dos ensaios.

A Figura 150 ilustra esta história, traduzida em trajetórias, para as amostras 3, 4, 5, 6 e 8.

Interessante observar que, durante a fase inicial de pressurização para as amostras de 3 a 6, o corpo de provas é submetido à tração, já que tende a sair dos alojamentos pelo efeito da pressão. Essa é a parte inicial do gráfico com valores negativos partindo do zero.

A tração ocorre pelo aumento progressivo das forças de atrito entre a parede interna do tubo e os dois anéis de vedação em cada extremidade.

Em seguida, a pressão é mantida constante e o deslocamento aplicado. Vencida a força de atrito, a amostra começa a ser comprimida. A partir de certo instante, a pressão sofre pequena variação até o momento em que ocorre a instabilidade axissimétrica.

Tabela 20 – Características gerais dos tubos flexíveis nomeados por TF1 e TF2

Características gerais - TF1 experimental						Características gerais - TF2 experimental					
	DI	4	polegadas				DI	4	polegadas		
Carcaça interna						Carcaça interna					
	espessura	6	mm	DI	101,6 mm		espessura	5	mm	DI	101,6 mm
	α	87,6	graus	DE	113,6 mm		α	-87,8	graus	DE	111,6 mm
	E	197	GPa				E	197	GPa		
Camada plástica interna						Camada plástica interna					
	espessura	5	mm	DI	113,6 mm		espessura	5	mm	DI	111,6 mm
	E	350	GPa	DE	123,6 mm		E	350	GPa	DE	121,6 mm
	G	120,7	MPa	v	0,45		G	120,7	MPa	v	0,45
Armadura de pressão						Armadura de pressão					
	espessura	6,2	mm	DI	123,6 mm		espessura	6,2	mm	DI	121,6 mm
	Área	51,3	mm ²	DE	136,0 mm		Área	51,3	mm ²	DE	134,0 mm
	α	87,2	graus	E	207 GPa		α	-87,2	graus	E	207 GPa
Armadura de tração interna						Camada plástica					
	espessura	2,5	mm	DI	136,0 mm		espessura	2	mm	DI	134,0 mm
	Fios	49		DE	141,0 mm		E	350	GPa	DE	138 mm
	α	35	graus	E	207 GPa		G	120,7	MPa	v	0,45
	G	80,2	MPa	v	0,29						
Armadura de tração externa						Armadura de tração interna					
	espessura	2,5	mm	DI	141,0 mm		espessura	3	mm	DI	138,0 mm
	Fios	50		DE	146,0 mm		Fios	40		DE	144,0 mm
	α	-35	graus	E	207 GPa		α	30	graus	E	207 GPa
	G	80,2	MPa	v	0,29		G	80,2	MPa	v	0,29
Bandagem						Fita					
	espessura	1,3	mm	DI	146,0 mm		espessura	1,5	mm	DI	144,0 mm
	α	74,7	graus	DE	148,6 mm		E	350	GPa	DE	147,0 mm
	E	65,3	GPa				G	120,7	MPa	v	0,45
Capa Externa						Armadura de tração externa					
	espessura	5	mm	DI	148,6 mm		espessura	3	mm	DI	147,0 mm
	E	350	GPa	DE	158,6 mm		Fios	43		DE	153,0 mm
	G	120,7	MPa	v	0,45		α	-30	graus	E	207 GPa
							G	80,2	MPa	v	0,29
Bandagem						Bandagem					
	espessura	1,65	mm	DI	153,0 mm		espessura	1,65	mm	DI	153,0 mm
	α	74,7	graus	DE	156,3 mm		α	74,7	graus	DE	156,3 mm
	E	65,3	GPa				E	65,3	GPa		
Capa Externa						Capa Externa					
	espessura	5	mm	DI	156,3 mm		espessura	5	mm	DI	156,3 mm
	E	350	GPa	DE	166,3 mm		E	350	GPa	DE	166,3 mm
	G	120,7	MPa	v	0,45		G	120,7	MPa	v	0,45

Ao final do ensaio a pressão é retirada e em seguida a amostra descarregada.

Os pontos indicativos da evidência da instabilidade axissimétrica quando a amostra é submetida à pressurização seguida de deslocamento são alocados para visualização no diagrama de instabilidade.

Figura 149 - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada com os pontos dos tubos flexíveis testados e simulação em EF

Figura 150 - Diagrama força adimensionalizada versus pressão adimensionalizada com as trajetórias percorridas em cada amostra e os pontos assinalados

Com relação ao ensaio 8b apresentado no gráfico da Figura 150, a aplicação do carregamento e da pressurização concomitantes foi realizada manualmente e não através de um sistema de controle realimentado. A realimentação visual, no procedimento de controle manual, não é suficiente para garantir que a curva de força vs pressão planejada seja seguida com precisão, razão pela qual o gráfico correspondente exibe grandes oscilações. Não obstante o registro oscilatório de carregamento, a instabilidade ocorre na região teoricamente prevista.

Observa-se ainda que o trecho em tração associada ao atrito, também verificado nos outros ensaios, e que surge devido à tendência da amostra a deixar o alojamento sob pressurização, segue a mesma tendência inicial. Neste caso, o trecho em tração logo deixa de existir, devido à aplicação concomitante do carregamento axial compressivo.

Em suma, ao menos nos ensaios realizados, qualquer que tenha sido a história de carregamento, desde que haja pressurização interna seguida de compressão axial, a instabilidade ocorre quando o limite intrínseco de escoamento do material é atingido.

Em outras palavras, a pressurização interna torna a estrutura suscetível à instabilidade axissimétrica, na forma de “bolha”, quando carregada axialmente em compressão.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A descoberta de novas reservas de petróleo e gás em águas profundas e ultra profundas demandam meios de exploração condizentes com as profundidades alcançadas. Na exploração em tais profundidades são empregados tubos flexíveis e cabos umbilicais, estruturas complexas. A falha destes sistemas, e em especial dos tubos flexíveis, pode gerar danos ambientais e econômicos de monta e muitas vezes irreversíveis. Dentre as possíveis falhas, uma em especial é a motivadora desta tese, o *birdcaging*.

Apesar de intensa atividade de investigação no tema encontrada na literatura técnica, com a finalidade de compreender o fenômeno, o *birdcaging* em tubos flexíveis continua sendo uma ocorrência intrigante. Usualmente, o foco principal dos estudos, na busca do mecanismo deflagrador, tem sido o comportamento estrutural dos arames helicoidais da armadura de tração.

Uma nova abordagem foi desenvolvida nesta tese com a finalidade de verificar a seguinte conjectura: seria a instabilidade estrutural da capa plástica externa o possível mecanismo deflagrador do *birdcaging*?

Essa hipótese surgiu de observações experimentais prévias nas quais foi possível verificar que a falha por *birdcaging* está sempre associada à formação de um lóbulo (bolha) na camada plástica externa, cujo comprimento é da ordem do diâmetro do tubo. A instabilidade axissimétrica local, causada pela elevada carga radial aplicada internamente, quando os arames da camada de tração tendem a se expandir quando o tubo é sujeito à compressão, suscitou tal conjectura.

Motivado por tais observações, um critério simples de evidência da instabilidade foi proposto e avaliado analítica, numérica e experimentalmente com o uso de tubos de PEAD simulando a capa plástica externa. Modelo analítico elastoplástico foi adaptado, bem como simulações numéricas, utilizando o método de elementos finitos, conduzidas. Estudos experimentais, com projeto e construção de dispositivo e adoção de metodologia ambos originais, foram conduzidos com tubos de PEAD submetidos à compressão axial e pressurização interna. A utilização da técnica de

Correlação Digital de Imagens (DIC) mostrou-se, então, vital para o estudo experimental de tubos poliméricos.

Criteriosa caracterização do PEAD foi realizada e forneceu os parâmetros utilizados no desenvolvimento analítico e numérico. Uma função hiperbólica original foi proposta com o intuito de ajustar as curvas tensão – deformação, dado necessário ao modelo analítico elastoplástico adaptado.

Este modelo analítico forneceu subsídios para a construção de um diagrama limite de instabilidade onde os resultados numéricos e experimentais foram inseridos.

Tal diagrama pode ser utilizado pela indústria, em geral, quando do emprego de tubos de polietileno de alta densidade em situações de pressurização, seguidos por carregamentos compressivos. Exemplo importante é a utilização de tais tubos como gasodutos.

Por fim, com o intuito de verificar a aplicabilidade do diagrama de instabilidade de tubos poliméricos na composição de um critério limite que permita prever a deflagração do fenômeno de *birdcaging*, experimentos com tubos flexíveis disponíveis na literatura, em que tal fenômeno foi identificado, foram analisados. Fortes evidências de comprovação da conjectura aventada foram então obtidas.

Apesar dessas fortes evidências, muito ainda deve ser investigado. Outros casos, onde falhas por *birdcaging* tenham sido experimentalmente observadas devem ser avaliados com o objetivo ulterior de comprovação do critério de instabilidade proposto.

Algumas sugestões de trabalhos futuros que podem contribuir com a continuidade da pesquisa no tema são a seguir listadas.

- a. Com relação a trabalhos analíticos, sugere-se o desenvolvimento de modelo viscoelástico aplicável a tubos poliméricos e à camada plástica externa de tubos flexíveis. Carregamentos cíclicos devem ser abordados.
- b. No que concerne a estudos numéricos, propõem-se a realização de simulações utilizando o método de elementos finitos com o uso de modelamento viscoelástico comparando os resultados com os obtidos pelo

modelo elastoplástico. Eventualmente será necessário o desenvolvimento de formulação própria no que diz respeito à representação do comportamento viscoelástico.

- c. Em relação a trabalhos experimentais, alguns pontos podem ser melhorados e outros desenvolvidos, tais como:
 - i. Melhorar o dispositivo experimental construído, de forma a suprir as deficiências ora encontradas como, por exemplo, a perda da estanqueidade durante alguns ensaios com pressurização pura.
 - ii. Ensaiar tubos com outros materiais poliméricos que possam constituir a capa plástica de tubos flexíveis.
 - iii. Desenvolver experimentos, dispositivos e sistemas de controle específicos para estudo experimental aplicando carregamentos cíclicos.
 - iv. Ensaiar tubos flexíveis completos de forma a obter mais dados experimentais do fenômeno de *birdcaging*.
 - v. Projetar e realizar experimentos para medir a pressão interfacial entre a fita ou armadura de tração e a capa plástica de tubos flexíveis.
 - vi. Utilizar o sistema DIC na caracterização do PEAD comparando com os dados obtidos por ensaios padrão.
 - vii. Realizar ensaios monotônicos e cíclicos com diferentes velocidades e temperaturas com vistas à aplicação no estudo com modelo viscoelástico.
- d. No que concerne ao projeto de tubos flexíveis, propriamente ditos, incorporar à metodologia atualmente em voga os conhecimentos adquiridos.

REFERÊNCIAS

- ANDREWS, K.R.F., ENGLAND, G.L., GHANI, E., "Classification of the axial collapse of cylindrical tubes under quasi-static loading". Int. J. Mech. Sci. – vol. 25, nr 9-10, p 687-696 - 1983
- ANTMAN, S.S., "Nonlinear Problems of Elasticity" – 2nd Edition - SPRINGER – 2005.
- AO, R., ZHANG, Y., LIU, N., "Buckling analysis of thin walled tubes composed of plastoelastic/viscoelastic materials under inflation", Trans. Tianjin University, vol 17, p 01-05, 2011.
- ARBOCZ, J., "The effect of general imperfections on the cylindrical shells" – PhD Thesis – California Institute of Technology, 1968.
- ASTM E328-02, "Standard test methods for stress relaxation for materials and structures", 2008.
- ASTM D638-10, "Standard test method for tensile properties of plastics", 2010.
- ASTM D695-10, "Standard test method for compressive properties for rigid plastics", 2010.
- ASTM D883-12, "Standard terminology relating to plastics", 2012.
- ASTM D2990-09, "Standard test methods for tensile, compressive, and flexural creep and creep-rupture of plastics", 2009.
- ASTM D3350-10a, "Standard specification for polyethylene plastics pipe and fittings materials", 2011.
- BARDI, F.C., KYRIAKIDES, S., "Plastic buckling of circular tubes under axial compression - Part I: Experiments". International Journal of Mechanical Sciences 48 p 830 - 841 – 2006.
- BARDI, F.C., KYRIAKIDES, S., YUN, H.D. "Plastic buckling of circular tubes under axial compression - Part II: Analysis". International Journal of Mechanical Sciences 48 p 842 - 854 – 2006.

BECTARTE,F., COUTAREL,A., “Instability of tensile armour layers of flexible pipes under external pressure”, Proceedings of OMAE2004 conference, Vancouver, Jun.n.51352, 2004.

BŁACHUT, J., “Experimental perspective on the buckling of pressure vessel components”, Applied Mechanics Reviews, vol 66, p011003-1 – 011003-24, 2014.

BRAGA, M.J.P.,”Instabilidade de armaduras de tração de linhas flexíveis”, Tese de Doutorado – COPPE – UFRJ – 2003.

BRINSON, H.F., BRINSON, L.C., "Polymer Engineering Science and Viscoelasticity. An Introduction". Springer – 2008.

CAIRE, M. "Modelo de comportamento Viscoelástico de enrijecedores à Flexão” – Tese de Doutorado – COPPE - UFRJ, 2011.

CANDIAN,L.M., DIAS,A.A. – “Estudo do PEAD reciclado para uso em elementos estruturais”, Cadernos de Engenharia de Estruturas, vol. 11, n 51,, p. 1-16, EESC – USP, São Carlos, 2009.

CUSTÓDIO, A.B., “Modelo analítico para estimativa de falha por instabilidade em armaduras de dutos flexíveis”, Tese de doutorado – COPPE/UFRJ, 2005

CHAKRABARTY, J., “Applied Plasticity”, 2nd Edition, Springer, 2010.

CHARBONNEAU,L. – Time-Dependent Tensile Properties of ETFE Foils” – Master of Applied Science Thesis – University of Waterloo, 2011.

COUTINHO, F.M.B., MELLO, I.L., SANTA MARIA, C. de, “Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações”, Instituto de Química, UERJ, Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 13, nº 1, p.1-13, 2003.

DANIELETTO, J.R.B., "Manual de Tubulações de Polietileno e Polipropileno: Característica, Dimensionamento e Instalação", Editora Linha Aberta – 528p, 2007.

DONNELL,L.H.,”Beams, Plates, and Shells”, Mc-Graw-Hill, 1976

DROZDOV, A.D., GUPTA, R.K., “Constitutive equations in finite vicoplasticity of semicrystalline polymers”, International Journal of Solids and Structures 40 p. 6217 – 6243, 2003.

DUSUNCELI, N., COLAK, O.,U. "High Density Polyethylene (HDPE): Experiments and modeling", Mech. Time-Depend Mater, 10, p 331 – 345 - 2006.

ELLEUCH, R., TAKTAK, W. "Viscoelastic behavior of HDPE polymer using tensile and compressive loading", Journal of Materials Engineering and Performance vol. 15 (1) p. 111 – 116. Feb.2006.

EN ISO 6259-1, "Thermoplastics pipes – Determination of tensile properties - Part 1: General test method", 2001.

EN ISO 6259-1, "Thermoplastics pipes – Determination of tensile properties - Part 3: Polyolefin pipes", 2011.

FALUHELYI, P., "Análise de tensões em tubulações com e sem reparo compósito, submetidas a pressões hidrostáticas internas", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, 2006.

FINDLEY, W.N., LAI, J.S., ONARAN, K. "Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials" - Dover Publications, Inc, 1976.

FLÜGGE, W. "Viscoelasticity" - Blaisdell Publishing Company, 1967.

GAY NETO, A., MARTINS, C.P., " Structural stability of flexible lines in catenary configuration under torsion", Marine Structures, 34, p. 16-40, 2013.

GONÇALEZ,V., PASQUALINO,I., COSTA, M. F., "Estudo do comportamento viscoplástico de polímero utilizado na indústria do petróleo", IBP, 2013. Disponível em:

http://www.ibp.org.br/events/2013/papercontest/pdfs/PaperContest_0654_2013042909480654_paper_brasil.pdf.

GUAN, Z.W., BOOT,J.C., "Creep Analysis of Polymeric Pipes under Internal Pressure", Polymer Engineering and Science, Vol. 41 – p955 – 961, 2001

HAMMERAND, D.C., "Geometrically-linear and nonlinear analysis of linear viscoelastic composites using the finite element analysis method", PhD thesis – Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999.

HARRIS, L.A., SUER, H.S., SKENE, W.T., BENJAMIN, R.J., "The stability of thin walled unstiffened circular cylinders under axial compression including the effects of internal pressure", Journal of the aeronautical sciences. 1957.

HART-SMITH, L.J., "Buckling of thin cylindrical shells under uniform axial compression", International Journal of Mechanical Science – vol. 12, p 299-318 - 1970.

HOFF, N.J., "On the transition from axisymmetric to multilobed creep buckling", Technical report nr 23, Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University, 1971.

HUTCHINSON, J., "Axial buckling of pressurized imperfect cylindrical shells", AIAA Journal, vol. 3, Nr 8, 1965.

HUTCHINSON, J.W., TENNYSON, R.C., MUGGERIDGE, D.B., "Effect of a local axisymmetric imperfection on the buckling behavior of a circular cylindrical shell under axial compression", AIAA Journal, vol. 9, Nr 1, p. 48-52, 1971.

KACHANOV, L.M., "Fundamentals of the theory of plasticity", Dover Publications, Inc. – 2004.

KALEFF, P., BRAGA, M.P., "Flexible pipe sensitivity to *birdcaging* and armour wire lateral buckling", Proceedings of OMAE2004, 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2004.

KYRIAKIDES, S., CORONA, E., "Mechanics of Offshore Pipelines – Vol. 1: Buckling and Collapse" 1st Edition – Elsevier - 2007.

KYRIAKIDES, S., CHANG, Y.C., "On the inflation of a long elastic tube in the presence of axial load", Journal of Solids Structures, v26 Nr 9/10. p. 975-991, 1990.

KYRIAKIDES, S., CHANG, Y.C., "The initiation and propagation of a localized instability in an inflated elastic tube", Journal of Solids Structures, Nr 9, pp 1085 – 1111, 1991.

LE GROGNEC, P., LE VAN, A., "Elastoplastic bifurcation and collapse of axially loaded cylindrical shells", International Journal of Solids and Structures", vol. 45, p. 64 – 86, 2008.

LEE, L.H.N., "Inelastic buckling of cylindrical shells under axial compression and internal pressure", Developments in Mechanics – vol. 1 - Proceedings of the Seventh Midwestern Mechanics Conference. New York: Plenum Press; p.190 - 202, 1961.

LEGGETT, D.M.A., "The buckling of thin shells under axial compression", 6th International Congress of Applied Mechanics - 1946 - parcialmente publicado por A.R.C.R&M. nr 2190.

LEROY, J.M., ESTRIER, P., "Calculations of stresses and slips in helical layers of dynamically bend flexible pipes", Oil and Gas Science and Technology, vol. 56, nr 6, p. 545 – 554, 2001

LIU, H., POLAK, M.A., PENLIDIS, A. "A Practical Approach to Modeling Time-Dependent Nonlinear Creep Behavior of Polyethylene for Structural Applications", Polymer Engineering and Science, p.159 - 167, 2008.

LOVE, A.E.H., "A treatise on the mathematical theory of elasticity", Dover Publications, 4th edition, 1927.

MALTA, E.R., MARTINS,C.A., "Finite element analysis of flexible pipes under compression", Proceedings of OMAE2014-23192, 33th Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2014.

MAZZILLI, C.E.N., "Sobre a instabilidade de estruturas elásticas sensíveis a imperfeições", Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1979

MIYAZAKI, N., "Creep buckling analysis of circular cylindrical shell under both axial compression and internal or external pressure", Computer & Structures, vol. 28, nr 4, p. 437 – 441, 1988.

NOVITSKY,A., SERTÃ,S., "Flexible pipes in Brazilian ultra-deepwater fields – a proven solution.", Proceedings of the 14th deep offshore technology, Riser Technology Symposium, New Orleans, 2002.

PAQUETTE, J.A., KYRIAKIDES, S., "Plastic buckling of tubes under axial compression and internal pressure". International Journal of Mechanical Sciences 48 p 855 - 867 – 2006.

PESCE, C.P., FUJARRA,A.L.C., TAKAFUGI, F.C., FRANZINI, G.R., RT SM_07 – Modelos Analíticos em Mecânica-Estrutural de Tubos Flexíveis: Rotinas do PipeDesign 1.0 . EPUSP/LIFE&MO; Acesso restrito; 2009.

PESCE, C.P., MARTINS, C.A., RAMOS JR, R., ARANHA, J.A.P., PROVASI, R.C., GAY NETO, A., DT12 – Documento Técnico no. 12 - Análise Analítico-Numérica do Fenômeno de Instabilidade do tipo *Birdcaging* – Estudos de Caso. EPUSP/LIFE&MO; Acesso restrito; 2009.

RABELO, M.A., “Estudo do comportamento estrutural de barras curvas”, Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.

RAMOS JR, R., PESCE, C.P., “A consistent analytical model to predict the structural behavior of flexible risers subjected to combined loads”, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 126 (2), 141-146, 2004.

RAMOS JR, R., PESCE, C.P., “A stability analysis of risers subjected to dynamic compression coupled with twisting”, vol. 125 – pp 183 - 189, JOMAE – 2003.

RAMOS JR, R, PESCE, C.P., DT10 – Documento técnico no. 10 – Distribuição de Esforços Solicitantes na Seção de Tubos Flexíveis Típicos submetidos a Carregamentos de Compressão Combinados – Estudo de Caso. EPUSP/LIFE&MO; 2009.

RAMOS JR, R., PESCE, C.P., MARTINS,C.A. “A new analytical expression to estimate the bending stiffness of flexible risers”, *Proceedings of 22nd OMAE* – 2003.

RIZZO, N.A.S., “Análise da instabilidade das armaduras de dutos flexíveis pelo método de elementos finitos”, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 2010.

ROYLANCE, D., “Engineering Viscoelasticity” - Department of Materials Science and Engineering - Massachusetts Institute of Technology, 2001.

SAEVIK,S., GUOMIN,J. ”Differential equation for evaluating transverse buckling behavior of tensile armour wires”, *Proceeding of OMAE2014-24158*, 33th Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2014.

SAEVIK, S., THORSEN, M.J., “Techniques for predicting tensile armour buckling and fatigue in deep water flexible pipes”, Proceedings 31st Int. Conference on Ocean, Offshore, and Arctic Engineering, OMAE2012-86563, 2012

SATO, M., PATEL, M.H., “Exact and simplified estimations for elastic buckling pressures of structural pipe-in-pipe cross sections under external hydrostatic pressure”, J. Mar. Sci. Technol, vol. 12, p. 251 – 262, 2007.

SERTÃO, O., FUMIS, R., CONNAIRE, A., SMYTH, J., TANAKA, R., BARBOSA, T., GODINHO, C., “Predictions of armour wire buckling for a flexible pipe under compression, bending and external pressure loading”, Proceedings of OMAE2012 31th Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2012.

SHAH, V.H., “Handbook of plastics testing technology”, John Wiley & Sons, 1984.

SILVA, A., “Flambage de coques cylindriques minces sous chargements combines: pression interne, compression, flexion et cisaillement”, L’Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA de Lyon), 2011

SINGER, J., ARBOCZ, J., WELLER, T., “Buckling Experiments. Experimental methods in buckling of thin walled structures”, Volume 1, John Wiley & Sons, 1998.

SINGER, J., ARBOCZ, J., WELLER, T., “Buckling Experiments. Experimental methods in buckling of thin walled structures”, Volume 2, John Wiley & Sons, 2002.

SOUSA, J.R.M., VIERO, P.F., MAGLUTA, C., ROITMAN, N. “An experimental and numerical study on the axial compression response of flexible pipes” – Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering (JOMAE), vol. 134, p. 031703-1 – 031703-12, 2012

SOUSA, J.R.M. – Assunto: Seu paper JOMAE 2012 [mensagem pessoal], mensagem recebida por marcos.rabelo@usp.br em 03/06/2014.

SPARKS, C.P., “The influence of tension, pressure and weight on pipe and riser deformations and stresses”, Transactions of the ASME, vol. 10, p. 46 – 54, 1984.

SPERLING, L.H., “Introduction to Physical Polymer Science” – 4th Edition – John Wiley & Sons, 2006.

STUMP,D.M., van der HEIJDEN,G.H.M., “Birdcaging and the collapse of rods and cables in fixed-grip compression”, International journal of solids and structures, vol. 38, p. 4265 – 4278, 2001.

TAYLOR,N., TRAN,V., “Experimental and theoretical studies in subsea pipeline buckling”, Marine Structures, vol. 9, p. 211 – 257, 1996

TIMOSHENKO, S., “Strength of materials” Part 1, 3rd edition, 1976 e Part 2, 3rd edition, 1956.

TIMOSHENKO, S., GERE, M., “Theory of elastic stability” 2nd Edition, 1961.

TIMOSHENKO, S., WOINOWSKY-KRIEGER, S., “Theory of plates and shells”, 2nd Edition, 1959.

VAZ, M.A., RIZZO, N.A.S., “A finite element model for flexible pipe armor wire stability”, Marine Structures, vol. 24, issue 3, p. 275 – 291, 2011

WARD, I.M., SWEENEY, J., “The Mechanical Properties of Solid Polymers” – 2nd Edition – John Wiley & Sons, 2004.

WASILKOSKI, C.M., “Caracterização do PEBD através da técnica de análise dinâmico-mecânica e comparação com a análise por impedância dielétrica” Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Paraná, 2002.

WITZ, J.A. “A case study in the cross-section analysis of flexible pipes” – Marine Structures – vol. 9 – p. 885 – 904, 1996

WITZ, J.A., TAN, Z., “On the axial-torsional structural behaviour of flexible pipes, umbilicals and marine cables”, Marine Structures, Barking, vol. 5, p. 205 – 227, 1992.

ZHANG, Y., CHEN,B., QIU, L., HILL, T., CASE, M., “State of the art analytical tools improve optimization of unbounded flexible pipes for deepwater environments”, Offshore Technology Conference (OTC), OTC 15169, 2003.

ZHAO, W., SESHADRI, R., DUBEY, R.N., “On thick walled cylinder under internal pressure”, Journal of Pressure Vessel Technology, vol. 125, p. 267 –273, 2003.

APÊNDICE A – Matriz ensaios - Caracterização PEAD

Ensaio de tração monotônicos

Anostra	Dist. Garas [mm]	L total [mm]	Leeste [mm]	Epessura [mm]	Largura [mm]	Área [mm²]	F. máx [kN] / T. máx [MPa] (medido)	Vel de ensaio [mm/min]	Taxa de deformação [s ⁻¹]	Taxa de aquisição [Hz]	Temp. Amb. [°C]	Temp. Anostra [°C]	UR [%]
1	115,00	273,17	50,00	17,25	10,00	172,50	2,75 / 15,94	1,5	5,00E-04	10	23,1	23,1	69
2	115,00	271,11	50,00	17,50	10,00	175,00	2,76 / 15,78	1,5	5,00E-04	10	23,5	23,5	68
3	130,00	274,78	50,00	17,83	10,00	178,30	2,94 / 16,77	1,5	5,00E-04	10	24,6 / 26,2	24,6 / 26,2	68
4	126,00	272,84	50,00	17,43	10,00	174,30	3,16 / 18,11	1,5	5,00E-04	10	26,2 / 26,7	26,2 / 26,7	64
5	119,00	271,30	50,00	17,51	10,00	175,10	3,19 / 18,22	1,5	5,00E-04	10	26,9 / 27,3	26,9 / 27,3	57
6	120,00	269,34	50,00	17,25	10,00	172,50	3,67 / 21,29	5	1,67E-03	10	23	23	70
7	111,00	272,68	50,00	17,65	10,00	176,50	3,88 / 20,85	5	1,67E-03	10	23,5	23,5	70
8	116,00	272,67	50,00	17,57	10,00	175,70	3,87 / 22	5	1,67E-03	10	23,3	23,3	70
9	112,00	271,72	50,00	17,96	10,00	173,60	3,49 / 20,09	5	1,67E-03	10	23,4	23,4	70
10	108,00	273,27	50,00	17,50	10,00	175,00	3,53 / 20,20	5	1,67E-03	10	23,3	23,3	71
11	107,00	269,96	50,00	17,08	10,00	170,80		60	2,00E-02	10	22,2	22,2	72
12	112,00	269,11	50,00	17,34	10,00	173,40		60	2,00E-02	10	22,5	22,5	71
13	115,00	272,24	50,00	17,56	10,00	175,60		60	2,00E-02	10	22,6	22,6	71
14	113,00	269,32	50,00	17,40	10,00	174,00		60	2,00E-02	10	22,7	22,7	71
15	113,00	272,01	50,00	17,22	10,00	172,20		60	2,00E-02	10	22,7	22,7	71

Ensaio de compressão monotônicos

Anostra	Dist. Placas [mm]	Ltotal [mm]	Lteste [mm]	Diametro [mm]	Altura [mm]	Área [mm²]	F. máx.[kN] / T. máx [MPa] (medido)	Vel de ensaio [mm/min]	Taxa de deformação [s ⁻¹]	Taxa de aquisição [Hz]	Temp. Amb. [°C]	Temp. Anostra [°C]	UR [%]
16	24.85	25.00	25.00	17.03	25.00	227.78	23.95 / 105.126	1.5	1.00E-03	10	22.7	23	61
17	24.96	25.02	25.02	17.02	25.02	227.51	24.43 / 107.39	1.5	9.98E-04	10	22.9	23	60
18	24.96	25.00	25.00	17.10	25.00	229.66	22.19 / 96.63	1.5	1.00E-03	10	23.2	23	60
19	25.30	25.08	25.08	17.05	25.08	228.32	26.50 / 116.06	1.5	9.97E-04	10	23.6	23	60
20	24.82	25.00	25.00	17.10	25.00	229.66	23.15 / 100.79	1.5	1.00E-03	10	24.0	23	59
21	25.26	25.20	25.20	16.95	25.20	225.65	25.80 / 114.35	5	3.31E-03	10	23.2	23	45
22	24.90	25.12	25.12	17.13	25.12	230.46	23.97 / 104.01	5	3.32E-03	10	23.1	23	44
23	24.96	25.11	25.11	17.11	25.11	229.93	22.01 / 95.74	5	3.32E-03	10	23.2	23	43
24	24.87	24.96	24.96	17.00	24.96	226.98	25.45 / 112.11	5	3.34E-03	10	23.9	23	39
25	24.71	25.02	25.02	17.01	25.02	227.25	24.17 / 106.35	5	3.33E-03	10	23.9	23	39
26	25.54	25.05	25.05	17.00	25.05	226.98	27.59 / 121.55	60	3.98E-02	10	24	23	38
27	24.85	25.21	25.21	16.95	25.21	225.65	23.31 / 103.31	60	3.97E-02	10	25.4	23	45
28	24.68	25.00	25.00	17.04	25.00	228.05	24.36 / 106.81	60	4.00E-02	10	25.6	23	45
29	24.67	25.05	25.05	17.08	25.05	229.12	23.27 / 101.57	60	3.98E-02	10	25.6	23	45
30	25.25	25.10	25.10	17.08	25.10	229.12	22.92 / 100.03	60	3.98E-02	10	25.7	23	45

Ensaio de fluência em tração

Anostra	Dist. Garra (mm)	Compr. (mm)	Esp. (mm)	Área (mm²)	Força aplicada (kN)	Tensão aplicada (MPa)	Deformação aplicada (%)	Velocidade para T0 (kN/s)	Taxa de deformação (s⁻¹)	Taxa de aquisição (Hz)	Temp. Ambiente (°C)	UR (%)
31	133	270,48	50,00	17,45	0,524	3	0,25	0,105	2,00E-01	10,039	24,3	63
32	147	271,91	50,00	17,45	0,524	3	0,25	0,105	2,00E-01	10,039	24,3	63
33	128	269,04	50,00	17,20	0,516	3	0,25	0,103	2,00E-01	10,039	22,5	69
34	119	272,01	50,00	17,48	1,398	8	4,9	0,280	2,00E-01	10,039	22,5	70
35	118	270,27	50,00	17,50	1,400	8	4,9	0,280	2,00E-01	10,039	24,9	63
36	142	269,25	50,00	17,60	1,408	8	4,9	0,282	2,00E-01	10,039	22,6	76
37	120	270,23	50,00	17,50	3,150	18	9,5	0,630	2,00E-01	10,039	22,4	76
38	120	272,36	50,00	17,38	3,128	18	9,5	0,626	2,00E-01	10,039	26,2	59
39	120	269,75	50,00	17,54	3,157	18	9,5	0,631	2,00E-01	10,039	25,4	64

Ensaio de fluência em compressão

Anostra	Dia. Garra (mm)	Loat (mm)	Luase (mm)	Diametro (mm)	Altura (mm)	Area (mm²)	Força aplicada (kN)	Tensão aplicada (MPa)	Deformação aplicada (%)	Velocidade para T0 (kN/s)	Taxa de deformação (s⁻¹)	Taxa de aquisição (Hz)	Temperatura [°C]	Temp. Anostra [°C]	UR (%)
40	24,95	25,15	25,15	17,10	25,15	229,66	-0,689	-3	0,25	-0,136	2,00E-01	10,039	22,9	23	74
41	25,26	25,24	25,24	16,99	25,24	226,71	-0,690	-3	0,25	-0,136	2,00E-01	10,039	23,9	23	73
42	25,42	25,28	25,28	17,00	25,28	226,98	-0,691	-3	0,25	-0,136	2,00E-01	10,039	22	23	79
43	24,69	25,00	25,00	17,00	25,00	226,98	-1,816	-8	4,9	-0,363	2,00E-01	10,039	23,5	23	76
44	24,94	24,95	24,95	17,06	24,95	228,59	-1,829	-8	4,9	-0,366	2,00E-01	10,039	23,5	23	77
45	25,21	25,13	25,13	17,06	25,13	228,59	-1,829	-8	4,9	-0,366	2,00E-01	10,039	22,1	23	84
46	25,60	25,02	25,02	17,05	25,02	228,32	-4,110	-18	9,5	-0,822	2,00E-01	10,039	22,2	23	86
47	25,15	25,01	25,01	17,06	25,01	228,59	-4,115	-18	9,5	-0,823	2,00E-01	10,039	22,9	23	82
48	25,12	25,05	25,05	17,10	25,05	229,66	-4,134	-18	9,5	-0,827	2,00E-01	10,039	22,7	23	85

Ensaio de relaxação em tração

Anoista	Diã. Garra (mm)	Loai (mm)	Leite (mm)	Egessura (mm)	Longura (mm)	Área (mm²)	Força Aplicada (kN)	Tensão aplicada (MPa)	Deformação aplicada (%)	Velocidade para T0 (kPa)	Taxa de deformação (s ⁻¹)	Taxa de aquisição (Hz)	Temperatura (°C)	Temp. Amostra (°C)	UR (%)
49	123	272,42	50,00	17,32	10,00	173,20	0,525	3	0,25	0,105	2,00E-01	10,039	21,9	23	70
50	124	269,29	50,00	17,39	10,00	175,80	0,525	3	0,25	0,105	2,00E-01	10,039	23,1	23	77
51	123	275,02	50,00	16,85	10,00	168,50	0,525	3	0,25	0,105	2,00E-01	10,039	23,5	23	76
52	124	274,84	50,00	16,80	10,00	168,00	1,000	8	4,9	0,200	2,00E-01	10,039	23,8	23	77
53	125	274,99	50,00	16,54	10,00	165,40	1,000	8	4,9	0,200	2,00E-01	10,039	22,3	23	83
54	125	275,09	50,00	16,45	10,00	164,50	1,000	8	4,9	0,200	2,00E-01	10,039	22,2	23	84
55	125	274,80	50,00	16,30	10,00	163,00	2,000	18	9,5	0,400	2,00E-01	10,039	22,9	23	82
56	126	274,88	50,00	16,60	10,00	166,00	2,000	18	9,5	0,400	2,00E-01	10,039	22,8	23	84
57	121	275,01	50,00	16,85	10,00	168,50	2,000	18	9,5	0,400	2,00E-01	10,039	22,3	23	82

Ensaio de relaxação em compressão

Amostra	Diã. Garra (mm)	Compr (mm)	Base (mm)	Diãmetro (mm)	Altura (mm)	Área (mm²)	Força Aplicada (kN)	Tensão aplicada (MPa)	Deformação aplicada (%)	Velocidade para 70 (mm/min)	Taxa de deformação (s⁻¹)	Taxa de aquisição (Hz)	Temperatura (°C)	Temp. Amostra (°C)	UR (%)
58	25,00	25,00	25,00	17,09	25,00	229,39	-0,700	3	0,25	-0,14	-9,33E-05	10,039	22,4	23	81
59	25,09	25,10	25,10	17,02	25,10	227,51	-0,700	3	0,25	-0,14	-9,30E-05	10,039	22,5	23	79
60	25,15	25,17	25,17	17,13	25,17	230,46	-0,700	3	0,25	-0,14	-9,27E-05	10,039	23	23	79
61	25,27	25,29	25,29	16,99	25,29	226,71	-1,800	8	4,9	-0,36	-2,37E-04	10,039	24	23	74
62	25,05	25,20	25,20	17,05	25,20	228,32	-1,800	8	4,9	-0,36	-2,38E-04	10,039	22,9	23	85
63	25,03	25,13	25,13	17,09	25,13	229,39	-1,800	8	4,9	-0,36	-2,38E-04	10,039	23,6	23	80
64	24,91	24,95	24,95	16,99	24,95	226,71	-3,000	18	9,5	-0,6	-4,01E-04	10,039	22,5	23	80
65	24,98	25,40	25,40	17,13	25,40	230,46	-3,000	18	9,5	-0,6	-3,94E-04	10,039	23,1	23	77
66	25,10	25,11	25,11	17,10	25,11	229,66	-3,000	18	9,5	-0,6	-3,98E-04	10,039	24,2	23	74

APÊNDICE B – Controle temperatura e umidade relativa

Controle de temperatura e umidade relativa nos ensaios de fluência e relaxação

		0	60	120	180	240	300	360	420	480
		Horas ensaiadas								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
		Temperatura [°C] e Umidade Relativa [%]								
31	T.Amb.	24,3	25,5	26,2	26,9	27,6	27,3	27,3	27,4	27,8
LMO	T. Amos.	23	27,2	27,8	28,8	29,5	29,4	29,4	29,5	30,3
	UR [%]	63	59	56	57	55	56	54	55	49
32	Ambiente	24,3	25,5	26,3	27	27,6	27,3	27,3	27,4	27,8
NAMEF	amostra	23	27	27,7	28,3	29,1	29,1	29,1	29,3	30
	UR [%]	63	59	56	56	55	53	54	55	49
34	Ambiente	22,5	22,8	23,5	23,4	23,8	24,5			
LMO	amostra	23	23	24,5	24,5	25,3	26,1			
	UR [%]	69	69	68	67	66	65			
33	Ambiente	22,5	22,8	23,5	23,4	23,8	24,4			
NAMEF	amostra	23	23,7	24,9	24,8	25,5	26,5			
	UR [%]	70	70	68	67	66	65			
35	Ambiente	24,9	25,1	25,5	25,6	26	25,8			
LMO	amostra	23	27,3	27,4	27,7	28	27,6			
	UR [%]	63	62	61	61	63	64			
36	Ambiente	22,6	26,1	25,4	28,8					
NAMEF	amostra	23	24,9	26	27,5					
	UR [%]	76	60	64	53					
37	Ambiente	22,4	Tracionou							
LMO	amostra	23								
	UR [%]	76								
38	Ambiente	26,2	Tracionou							
LMO	amostra	23								
	UR [%]	59								
39	Ambiente	25,4	Tracionou							
LMO	amostra	23								
	UR [%]	64								
40	Ambiente	22,9	23,1	24	23,3	23,6	23,8			
LMO	amostra	23	25,2	25,9	25,2	26	26,6			
	UR [%]	74	71	70	76	76	71			
41	Ambiente	23,9	23,8	23,8	24					
LMO	amostra	23	26,4	26	26,3					
	UR [%]	73	76	78	75					

		0	60	120	180	240	300	360	420	480
		Horas ensaiadas								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
		Temperatura [°C] e Umidade Relativa [%]								
42	Ambiente	22	22,4	22,9	23,3					
LMO	amostra	23	25	24,8	24,4					
	UR [%]	79	79	77	76					
43	Ambiente	23,5	23,6	23,6						
LMO	amostra	23	26,1	26,2						
	UR [%]	75	76	77						
44	Ambiente	23,5	23,8	23,7						
LMO	amostra	23	26,2	25,8						
	UR [%]	77	78	78						
45	Ambiente	22,1	22,2	22,1						
LMO	amostra	23	24,9	24,1						
	UR [%]	84	84	84						
46	Ambiente	22,2	22,7	22,9						
LMO	amostra	23	24,7	24,7						
	UR [%]	85	84	82						
47	Ambiente	22,9	23,2	22,8						
LMO	amostra	23	26	25						
	UR [%]	82	80	84						
48	Ambiente	22,7	22,5	22,5						
LMO	amostra	23	25	24,5						
	UR [%]	85	85	86						
49	Ambiente	21,9	22,5	23						
NAMEF	amostra	23	24,1	24,6						
	UR [%]	79	78	77						
50	Ambiente	23,1	23,4	23,5						
NAMEF	amostra	23	25	25,5						
	UR [%]	77	76	76						
51	Ambiente	23,5	23,7	23,6						
NAMEF	amostra	23	25,7	25,6						
	UR [%]	75	76	78						
52	Ambiente	23,8	23,8	23,8						
NAMEF	amostra	23	25,7	25,8						
	UR [%]	77	78	78						
53	Ambiente	22,3	22,2	22,1						
NAMEF	amostra	23	23,7	23,5						
	UR [%]	83	84	85						
54	Ambiente	22,2	22,6	22,9	217					
NAMEF	amostra	23	24,4	24,6						
	UR [%]	85	84	82						

		0	60	120	180	240	300	360	420	480
		Horas ensaiadas								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
		Temperatura [°C] e Umidade Relativa [%]								
55	Ambiente	22,9	23,3	22,9						
NAMEF	amostra	23	24,8	24,5						
	UR [%]	82	80	84						
56	Ambiente	22,8	22,5	22,5						
NAMEF	amostra	23	24,3	24,1						
	UR [%]	84	85	85						
57	Ambiente	22,3	22,1	22,5						
NAMEF	amostra	23	24	24,1						
	UR [%]	82	80	79						
58	Ambiente	22,4	22,1	22,5						
LMO	amostra	23	24,4	24,1						
	UR [%]	81	80	79						
59	Ambiente	22,5	22,9	23						
LMO	amostra	23	24,4	24,9						
	UR [%]	79	78	79						
60	Ambiente	23	23,5	24,3						
LMO	amostra	23	25,3	26,2						
	UR [%]	79	78	74						
61	Ambiente	24	23,2	22,9						
LMO	amostra	23	25	24,9						
	UR [%]	74	82	85						
62	Ambiente	22,9	23,1	23,7						
LMO	amostra	23	25,4	24,8						
	UR [%]	85	84	81						
63	Ambiente	23,6	23,6	23,5						
LMO	amostra	23	25,9	26						
	UR [%]	80	79	78						
64	Ambiente	22,5	22,7	23						
LMO	amostra	23	23,9	24,6						
	UR [%]	80	79	78						
65	Ambiente	23,1	23,4	24,1						
LMO	amostra	23	25,4	25,3						
	UR [%]	77	76	74						
66	Ambiente	24,2	24,4	25						
LMO	amostra	23	26,9	27,5						
	UR [%]	74	74	71						

APÊNDICE C – Gráficos MTS - caracterização material

Gráficos dos ensaios de tração e compressão utilizando o *TestWork4* da MTS

[mm/min]

Tração

Compressão

1,5

5

60

APÊNDICE D – Modelos reológicos - viscoelasticidade

Este apêndice apresenta os modelos reológicos mais utilizados nos estudos de polímeros, bem como breve discussão sobre o comportamento linear e não linear.

D1 Modelos reológicos básicos – tensão uniaxial

Com o objetivo de prover uma breve introdução à viscoelasticidade linear, são introduzidos nos próximos itens, conceitos básicos. Um aprofundamento do tema pode ser obtido diretamente das obras de Findley et al (1976) e Flügge (1967). A discussão que se segue sobre viscoelasticidade linear é baseada nas obras de Flügge (1967), Findley et al (1976), Caire (2011) e Hammerand (1999).

Molas e amortecedores são usados para descrever o comportamento elástico e viscoso de materiais viscoelásticos, respectivamente, pela combinação desses elementos em séries e/ou paralelo. Uma grande variedade de materiais viscoelásticos lineares pode ser modelada por essa técnica.

D 1.1 Sólido elástico

O material cuja tensão é diretamente proporcional à deformação é, pela lei de Hooke, definido como um sólido elástico linear e obedece a seguinte equação:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (39)$$

Sendo σ a tensão, ε a deformação e E o módulo de elasticidade ou módulo de Young. Muitos materiais em engenharia são representados por essa lei linear e o análogo mecânico usado para representar tal tipo de sólido é a mola elástica.

D 1.2 Fluido viscoso

Neste caso, a tensão a que o fluido viscoso linear é submetido é diretamente proporcional à taxa de deformação conforme a seguinte equação:

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (40)$$

Sendo σ a tensão, ε a deformação e η a viscosidade. O análogo mecânico usado para representar um modelo fluido viscoso é um amortecedor.

D 2 Viscoelasticidade linear com o uso de modelos matemáticos simples

No estudo de materiais viscoelásticos como polímeros, modelos clássicos têm sido utilizados na obtenção das equações diferenciais constitutivas relacionando a tensão e a deformação nos sistemas em estudo. Como já citado, um grande número de materiais viscoelásticos são modelados pelo uso de elementos primários elementares como a mola, representando o componente elástico ou energético da resposta, ou ainda o trabalho mecânico armazenado e o amortecedor, representando o componente que sofre conformação ou entrópico do modelo descrevendo a energia dissipada em forma de calor. Na sequência, faz-se uma breve descrição dos modelos mais conhecidos.

D 2.1 Modelo de Maxwell ou Modelo Fluido de Maxwell

Dentre as diversas combinações possíveis dos elementos mola e amortecedor, uma das primeiras a serem empregadas para a compreensão do comportamento viscoelástico de materiais é o conhecido modelo de Maxwell. Neste modelo, uma mola é conectada a um amortecedor em série, conforme Figura 151 e representa bem o comportamento de um fluido.

Figura 151 – Análogo mecânico para o modelo de Maxwell (Hammerand, 1999)

Quando uma tensão constante σ_0 é aplicada às extremidades do modelo no instante t_0 , o modelo deforma-se subitamente até o valor de σ_0/E devido à mola e em seguida, com a atuação do amortecedor, deforma-se de forma constante.

Se, por outro lado, for aplicada uma deformação constante ε_0 no instante t_0 , a tensão resultante chega imediatamente ao valor $E\varepsilon_0$, relaxando em seguida, com o passar do tempo, até anular-se.

Em uma conexão em série, a tensão imposta ao modelo é a mesma em cada elemento enquanto a deformação total imposta ao sistema é a soma da deformação de cada elemento $\varepsilon = \varepsilon_m + \varepsilon_a$, onde ε_m é a deformação que a mola é submetida e ε_a a deformação do amortecedor.

Este modelo pode ser representado pela seguinte equação, obtida após a manipulação da equação da deformação total do sistema.

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\dot{\sigma}}{k} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (41)$$

Sendo k a constante elástica da mola.

D 2.2 Modelo de Kelvin-Voight ou Modelo Sólido de Kelvin

Outro modelo bastante citado na literatura é o de Kelvin-Voight ou como cita Flügge (1976), modelo sólido de Kelvin. Neste modelo, uma mola e um amortecedor são montados em paralelo e desta forma a tensão total é a soma da tensão em cada elemento enquanto a deformação é a mesma para cada elemento.

Figura 152 - Análogo mecânico para o modelo de Kelvin (Hammerand, 1999)

Para esse tipo de formação, a equação constitutiva governante é descrita como:

$$\sigma = k\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (42)$$

Este modelo, idealizado por Kelvin, representa bem um material sólido. Porém, a resposta de fluência e relaxação deste modelo não proporciona uma aproximação conveniente do comportamento observado em materiais viscoelásticos.

Hammerand (1999) menciona no apêndice A de sua tese que a resposta de fluidos e sólidos viscoelásticos lineares reais não é descrita com acurácia nem pelo modelo fluido de Maxwell nem pelo modelo sólido de Kelvin. Cita como exemplo que o modelo fluido de Maxwell não exibe uma taxa de deformação decrescente sob tensão constante e não exibe recuperação dependente do tempo após o descarregamento. São usados para examinar as características básicas da

viscoelasticidade linear e na construção de modelos mais complexos e precisos dos materiais em estudo.

D 2.3 Sólido Linear Padrão

Este modelo pode ser formado usando o modelo de Maxwell e uma mola em paralelo ou o modelo de Kelvin e uma mola em série. Em ambas as situações, as equações constitutivas são idênticas e as funções de fluência e relaxação são exponenciais. A Figura 153 mostra um modelo sólido linear padrão de forma esquemática. Esse modelo simples é capaz de representar o comportamento viscoelástico e suas características principais.

Figura 153 – Análogo mecânico para o modelo sólido linear padrão (Hammerand, 1999)

A mola em paralelo E_1 proporciona uma rigidez semelhante à borracha que permanece após o relaxamento da tensão do braço de Maxwell (Roylance, 2001). No arranjo em paralelo, os braços são submetidos à mesma deformação quando uma tensão é aplicada. Já a tensão total $\sigma(t)$ no modelo é a soma da tensão em cada braço.

A solução do problema faz uso da equação do equilíbrio de forças

$$\sigma(t) = \sigma_1(t) + \sigma_2(t) \quad (43)$$

sendo o índice 1 relativo à mola em paralelo com o braço referente ao modelo de Maxwell indicado pelo índice 2 na equação e pela equação de compatibilidade geométrica

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_1(t) = \varepsilon_2(t) \quad (44)$$

Aplicando-se a condição inicial $\sigma_2(0) = E_2 \varepsilon_2(0)$, às relações entre tensão e deformação para o problema em questão são descritas como:

$$\sigma(t) = E_1 \varepsilon \quad (45)$$

$$\frac{\dot{\sigma}_2}{E_2} + \frac{\sigma_2}{\eta} = \dot{\varepsilon}_2 \quad (46)$$

Obtém-se a solução σ_2 do modelo de Maxwell.

$$\sigma_2(t) = E_2 \varepsilon(t) - E_2 \int_0^t \exp\left[-\frac{E_2}{\eta}(t - \tau)\right] \varepsilon(\tau) d\tau \quad (47)$$

Ou usando (43), (45) e (46),

$$\sigma(t) = (E_1 + E_2) \varepsilon(t) - E_2 \int_0^t \exp\left[-\frac{E_2}{\eta}(t - \tau)\right] \varepsilon(\tau) d\tau \quad (48)$$

Caire (2011) mostra que, definindo algumas constantes e as funções de relaxação $G(t)$ e fluência $J(t)$ obtêm-se a tensão e deformação do sistema conforme mostrado a seguir.

Definindo-se as constantes G_0 , G_∞ e τ_R e a função de relaxação $G(t)$ como,

$$G_0 = E_1 + E_2 \quad (49)$$

$$G_\infty = E_1 \quad (50)$$

$$\tau_R = \frac{\eta}{E_2} \quad (51)$$

$$G(t) = G_\infty + (G_0 - G_\infty) \exp(-t/\tau_R) \quad (52)$$

Pode-se escrever a equação (48) utilizando as constantes definidas

$$\sigma(t) = G(0) \varepsilon(t) - \int_0^t \varepsilon(\tau) \frac{\partial G(t - \tau)}{\partial \tau} d\tau = G(0) \varepsilon(t) + \int_0^t \varepsilon(\tau) \frac{\partial G(t - \tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (53)$$

A deformação é obtida aplicando a transformada de Laplace na equação (53) e considerando um salto de tensão de $\sigma(t) = \sigma_0$, $t \geq 0$,

$$J(t) = J_\infty + (J_0 - J_\infty) \exp(-t/\tau_c) \quad (54)$$

$$\varepsilon(t) = J(0)\sigma(t) - \int_0^t \sigma(\tau) \frac{\partial J(t-\tau)}{\partial \tau} d\tau = J(0)\sigma(t) + \int_0^t \sigma(\tau) \frac{\partial J(t-\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (55)$$

Onde $J(t)$ é a função de fluência e seus coeficientes são definidos

$$J_0 = 1/G_0 \quad (56)$$

$$J_\infty = 1/G_\infty \quad (57)$$

$$\tau_c = (G_0/G_\infty)\tau_R \quad (58)$$

As equações (53) e (55) são conhecidas como equações hereditárias. Essas equações são uma alternativa para solucionar as equações diferenciais das leis constitutivas quando um histórico complicado de tensões ou deformações é estabelecido. São também responsáveis por representar um conceito importante em viscoelasticidade conhecido como memória, que surge devido à relação que um carregamento aplicado tem com aqueles aplicados anteriormente (Caire, 2011).

Os modelos de Maxwell, Kelvin-Voigth, sólido linear, dentre outros que ajudam na compreensão dos fenômenos da viscoelasticidade, são bastante simples e não permitem desenvolver uma teoria mais robusta para a viscoelasticidade. A fim de representar materiais reais, generalizações dos modelos anteriormente citados são utilizadas.

Na Figura 154, apresenta-se a generalização do modelo de Kelvin-Voigth com o uso de N elementos em série para representar a fluência (*creep*) de maneira mais efetiva e a generalização do modelo de Maxwell com N elementos em paralelo, para representar a relaxação (*relaxation*) da tensão.

Figura 154 – Generalização dos modelos de Maxwell (a) e Kelvin (b) (Hammerand, 1999)

D 3 Viscoelasticidade linear utilizando modelos matemáticos generalizados

Existem duas maneiras de construir modelos mais complexos com a finalidade de representar melhor os materiais reais: o modelo generalizado de Maxwell e o modelo generalizado de Kelvin.

Genericamente, segundo Flügge (1976), a lei que expressa o comportamento viscoelástico linear de um material pode ser escrita da seguinte forma:

$$\sigma + p_1 \dot{\sigma} + p_2 \ddot{\sigma} + \dots + p_m \sigma^m = q_0 \varepsilon + q_1 \dot{\varepsilon} + q_2 \ddot{\varepsilon} + \dots + q_n \varepsilon^n \quad (59)$$

ou

$$\sum_0^m p_k \frac{d^k \sigma}{dt^k} = \sum_0^n q_k \frac{d^k \varepsilon}{dt^k} \quad (60)$$

Observa-se que p_0 foi escolhido com valor unitário. Dessa forma a equação pode ser dividida por uma constante sem alterar seu significado.

Segundo Hammerand (1999), para que a equação (59) represente um material viscoelástico linear, os coeficientes p e q devem obedecer algumas relações matemáticas. Além disso, se a equação em questão é determinada por analogias mecânicas, é somente necessário assegurar que as constantes das molas e amortecedores utilizados sejam reais e positivas.

Para o caso em que $q_0 = 0$, a equação (59) representa um fluido desde que um carregamento constante forneça um taxa de deformação não nula durante todo o tempo. Não é o caso do estudo realizado nesta tese.

Se $q_0 \neq 0$, a lei em questão representa um sólido, pois um carregamento constante aplicado por longo tempo resultará em uma deformação constante e igual a σ/q_0 . Neste caso, o módulo de elasticidade de longo prazo será igual a q_0 para um sólido viscoelástico linear.

Hammerand (1999) continua sua análise abordando a combinação de molas e amortecedores e cita que para que a equação constitutiva (59) em estudo resulte da combinação de molas e amortecedores conectados em série e/ou paralelo, ou $n = m$ ou $n = m + 1$. Quando submetido a uma súbita aplicação de tensão ou deformação, a resposta inicial do material é governada pelas derivadas de ordem superior da equação constitutiva. O material terá uma resposta instantânea quando $n = m$ e módulo inicial de q_m/p_m . No outro caso, quando $n = m + 1$, o material não terá resposta instantânea devido ao fato de que, para impor uma deformação instantânea, seria necessária a aplicação de uma tensão infinita.

D 3.1 Modelo generalizado de Kelvin-Voight

Este modelo generalizado é construído com N elementos de Kelvin-Voight, conforme mostrados anteriormente na Figura 154b. Uma mola isolada é inserida no modelo para representar a resposta instantânea, enquanto a presença ou ausência de amortecedor isolado resultará em comportamento fluido ou sólido respectivamente.

Para este caso, é mais fácil derivar a função de fluência (*creep compliance function*) do que o módulo de relaxação. Cada elemento unitário de Kelvin possui tensão σ e a

deformação total do modelo ε é a soma das deformações de cada elemento unitário que por sua vez é governado por:

$$\sigma_i = E_i \varepsilon_i + \eta_i \dot{\varepsilon}_i, \text{ com } i = 1, \dots, N \quad (61)$$

A função de fluência para o modelo em questão é:

$$J(t) = \frac{1}{E_0} + \sum_{i=1}^N \frac{1}{E_i} \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda_i}} \right) + \frac{t}{\eta_\infty} \quad (62)$$

sendo $\lambda_i = \eta_i / E_i$.

D 3.2 Modelo generalizado de Maxwell

O modelo generalizado de Maxwell é construído com N elementos de Maxwell conectados em paralelo conforme mostrado na Figura 154a. Se necessário uma mola ou um amortecedor isolado pode ser introduzido no sistema, sendo que a ausência do amortecedor isolado demonstra a elasticidade instantânea. O modelo responde como um sólido na presença da mola isolada e na ausência dessa o sistema se comporta como um fluido.

Neste modelo, a deformação é a mesma em cada ramo do modelo ($\varepsilon(t) = \varepsilon_i(t)$ para $i = 1, \dots, N$) e a tensão total no modelo é a soma das tensões em cada ramo ($\sigma(t) = \sum_{i=1}^N \sigma_i(t)$).

A equação que representa a relação tensão versus deformação para o modelo generalizado é semelhante à usada para um elemento e é escrita como:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \dot{\sigma}(t) \sum_{i=1}^N \frac{1}{E_i} + \sigma(t) \sum_{i=1}^N \frac{1}{\eta_i} \quad (63)$$

ou

$$\sigma_i(t) + \dot{\sigma}_i \sum_{i=1}^N \frac{\eta_i}{E_i} = \dot{\varepsilon}_i(t) \sum_{i=1}^N \eta_i \quad (64)$$

O módulo de relaxação (Hammerand, 1999) para esse modelo é escrito:

$$E(t) = E_{\infty} + \sum_{i=1}^N E_i e^{-\frac{t}{\lambda_i}} + \eta_0 \delta(t) \quad (65)$$

sendo $\lambda_i = \eta_i/E_i$ e $\delta(t)$ a função delta de Dirac generalizada.

Caire (2011) apresenta em seu trabalho, as funções de relaxação e fluência abaixo reproduzidas.

$$G(t) = G_0 + G_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{R,1}}\right) + \dots + G_M \exp\left(-\frac{t}{\tau_{R,M}}\right) \quad (66)$$

$$J(t) = J_0 + J_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{C,1}}\right) + \dots + J_M \exp\left(-\frac{t}{\tau_{C,M}}\right) \quad (67)$$

onde $\tau_{R,i} = \eta_i/E_i = \lambda_i$ e $\tau_{C,i}$ ($i = 1, \dots, M$) são os tempos de relaxação e fluência respectivamente.

As funções apresentadas pelas equações (66) e (67) são conhecidas como série de Prony.

D 4 Comportamento viscoelástico linear

O comportamento viscoelástico linear ou não de um material é caracterizado pelos efeitos causados pela taxa de deformação em resposta a tensões aplicadas. Aplicando-se uma tensão constante tem-se o fenômeno da fluência e quando aplicada uma deformação constante, o fenômeno da relaxação.

Boltzmann, em 1894, propôs uma teoria geral conhecida como princípio de Boltzmann. Segundo esse princípio, cada carregamento a que o material é submetido contribui de forma individual para a história do carregamento total. Isto é, a superposição das respostas de cada carregamento determina a deformação total no momento da análise.

Em muitos casos da engenharia, sistemas linearizados são utilizados com a finalidade de obter a resposta do problema apresentado. Em materiais viscoelásticos, como os poliméricos, não poderia ser diferente devido à simplicidade envolvida nos modelos lineares. Segundo Flügge (1976), um material é dito viscoelástico linear se a tensão é proporcional à deformação em qualquer momento

e o princípio da superposição é válido. Matematicamente, essas hipóteses podem ser descritas como,

$$\varepsilon[c\sigma(t)] = c\varepsilon[\sigma(t)] \quad (68)$$

$$\varepsilon[\sigma_1(t) + \sigma_2(t - t_1)] = \varepsilon[\sigma_1(t)] + \varepsilon[\sigma_2(t - t_1)] \quad (69)$$

com c uma constante, σ a tensão aplicada e ε a deformação gerada.

Ainda segundo Flügge (1976), a teoria linear pode ser aplicada dentro de certas condições das variáveis, pois estas são influenciadas pelos efeitos da taxa de deformação, temperatura, dentre outros. A fronteira entre o comportamento linear e não linear é arbitrária e dependerá das condições utilizadas nos ensaios.

D 4.1 Equações constitutivas – Forma integral

Utilizando o conceito de integrais hereditárias, Flügge (1976) e Caire (2011) desenvolvem as equações constitutivas utilizando o princípio da superposição de Boltzmann para fluência e relaxação e a relação entre ambas. Neste resumo, serão apresentadas a seguir as equações desenvolvidas por Caire (2011).

A equação da resposta de tensão é obtida com a utilização do princípio da superposição de Boltzmann e tem a seguinte forma:

$$\sigma(t) \approx \varepsilon(0)G(t) + \sum_{i=1}^N G(t - t_i)\Delta\varepsilon_i \quad (70)$$

Essa expressão pode ser escrita de outra forma considerando-se que $\Delta\varepsilon \rightarrow \infty$

$$\sigma(t) = \varepsilon(0)G(t) + \int_0^t G(t - \tau)d\varepsilon(\tau) \quad (71)$$

Na forma reduzida, essa equação se torna

$$\sigma(t) = \int_{0-}^t G(t - \tau)d\varepsilon(\tau) \quad (72)$$

A equação constitutiva para a relaxação pode ser escrita a partir da equação (72) da seguinte maneira

$$\sigma(t) = \varepsilon(0)G(t) + \int_0^t G(\tau) \frac{\partial \varepsilon(t-\tau)}{\partial(t-\tau)} d\tau = \varepsilon(0)G(t) + \int_0^t G(t-\tau) \frac{\partial \varepsilon(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (73)$$

Ou, utilizando mudança de variáveis,

$$\sigma(t) = \int_{0-}^t \varepsilon(t-\tau) dG(\tau) \quad (74)$$

$$\sigma(t) = G(0)\varepsilon(t) + \int_0^t \varepsilon(\tau) \frac{\partial G(t-\tau)}{\partial(t-\tau)} d\tau = G(0)\varepsilon(t) + \int_0^t \varepsilon(t-\tau) \frac{\partial G(\tau)}{\partial(\tau)} d\tau \quad (75)$$

Para a fluência, a equação constitutiva é escrita da seguinte forma,

$$\varepsilon(t) = \int_{0-}^t J(t-\tau) d\sigma(\tau) \quad (76)$$

$$\varepsilon(t) = \sigma(0)J(t) + \int_0^t J(\tau) \frac{\partial \sigma(t-\tau)}{\partial(t-\tau)} d\tau = \sigma(0)J(t) + \int_0^t J(t-\tau) \frac{\partial \sigma(\tau)}{\partial(\tau)} d\tau \quad (77)$$

Ou, utilizando integração por partes,

$$\varepsilon(t) = \int_{0-}^t \sigma(t-\tau) dJ(\tau) \quad (78)$$

$$\varepsilon(t) = J(0)\sigma(t) + \int_0^t \sigma(\tau) \frac{\partial J(t-\tau)}{\partial(t-\tau)} d\tau = J(0)\sigma(t) + \int_0^t \sigma(t-\tau) \frac{\partial J(\tau)}{\partial(\tau)} d\tau \quad (79)$$

Fluência e relaxação, no comportamento viscoelástico de materiais, são fenômenos correlacionados. Se o valor de um é conhecido, o do outro poderá ser previsto. A partir da equação (73) chega-se a

$$1 = J(0)G(t) + \int_0^t G(t-\tau) \frac{\partial J(\tau)}{\partial(\tau)} d\tau \quad (80)$$

A generalização das equações apresentadas neste item, que se referem ao caso unidimensional, conduz à resposta em três dimensões.

$$\sigma_{ij} = \left[\lambda_R(0) \varepsilon_{kk}(t) + \int_0^t \varepsilon_{kk}(t - \tau) \frac{\partial \lambda_R(\tau)}{\partial \tau} d\tau \right] \delta_{ij} + 2\mu_R(0) \varepsilon_{ij}(t) + 2 \int_0^t \varepsilon_{ij}(t - \tau) \frac{\partial \mu_R(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (81)$$

Sendo

$$\mu_R(t) = \frac{E_R(t)}{2[1 + \nu(t)]} \quad (82)$$

$$\lambda_R(t) = \frac{E_R(t)\nu(t)}{(1 + \nu(t))(1 - 2\nu(t))} \quad (83)$$

$$\delta_{ij}(t) = \begin{cases} 1, i = j \\ 0, i \neq j \end{cases} \quad (84)$$

As funções $\lambda_R(t)$ e $\mu_R(t)$, dependentes do tempo, caracterizam o comportamento viscoelástico.

D 5 Comportamento viscoelástico não linear

A equação constitutiva para a fase linear foi apresentada usando o princípio da superposição de Boltzmann. Porém no caso não linear, este princípio não se aplica. O resumo que se segue é baseado em Caire (2011). Este autor utiliza as teorias desenvolvidas por Leaderman e Green-Rivlin para discorrer sobre sistemas não lineares.

Leaderman separou a resposta viscoelástica em duas funções sendo uma dependente do tempo e outra, não linear, dependente da tensão ou deformação.

$$\varepsilon(t) = \int_{0-}^t J(t - \tau) df_{\sigma}[\sigma(\tau)] \quad (85)$$

$$\sigma(t) = \int_{0-}^t G(t - \tau) df_{\varepsilon}[\varepsilon(\tau)] \quad (86)$$

Sendo f_{σ} uma função não linear da tensão, f_{ε} uma função não linear da deformação, $J(t)$ a função de fluência e $G(t)$ a função de relaxação. Estas expressões não lineares não são aplicáveis a um grande número de materiais, cobrindo apenas alguns polímeros específicos.

Expandindo a teoria de Leaderman com o uso do teorema da superposição modificado, Pipkin e Rogers apresentaram expressões mais gerais.

$$\varepsilon(t) = \int_{0-}^t d_{\sigma} C[\sigma(t), t - \tau] \quad (87)$$

$$\sigma(t) = \int_{0-}^t d_{\varepsilon} R[\varepsilon(t), t - \tau] \quad (88)$$

A função $C(\sigma, t)$ chama-se função de fluência não linear dependente da tensão e do tempo e $R(\varepsilon, t)$ função de relaxação não linear dependente da deformação e do tempo. Se no intervalo de integração as funções $\varepsilon(t)$ e $\sigma(t)$ são contínuas, as equações (87) e (88) podem ser escritas como a seguir.

$$\varepsilon(t) = \int_{0-}^t \frac{\partial C[\sigma(t), t - \tau]}{\partial \sigma(\tau)} \frac{\partial \sigma(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (89)$$

$$\sigma(t) = \int_{0-}^t \frac{\partial R[\varepsilon(t), t - \tau]}{\partial \varepsilon(\tau)} \frac{\partial \varepsilon(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (90)$$

Caire (2011) apresenta na sequência do seu trabalho as equações constitutivas para fluência e relaxação segundo o modelo de Leaderman, o modelo de Green-Rivlin e o modelo baseado no princípio da superposição modificado. No final do item 2.2.2 da sua tese, Caire (2011) comenta que a obtenção das funções que caracterizam o comportamento viscoelástico não linear utilizando funções de múltiplas integrais exige um elevado número de experimentos e estes apresentam alta sensibilidade a erros experimentais.

APÊNDICE E – Modelo Lee

Resumo do modelo analítico de I.H.N.Lee (1961)

Lee (1961) em seu artigo estuda a flambagem de tubos de liga de alumínio 3003-0 quando submetidos à pressurização e compressão axial.

Comenta que a pressão interna aplicada a tubos, na região elástica, pode produzir dois efeitos no cilindro:

1. Estender a parede do cilindro, diminuindo as irregularidades das imperfeições geométricas iniciais;
2. Atuar como um agente limitador nos modos de flambagem do cilindro, tal que permita o aparecimento de modos particulares.

Na região plástica, Lee (1961) comenta que a tensão circunferencial causada pela pressão interna em conjunto com a tensão axial, afeta a rigidez do material.

Cita também que a tensão crítica de flambagem axial reduz-se com o aumento da pressão interna.

Em termos de equacionamento do problema, Lee (1961) desmembra o estado de deformação ε_{ij} de um ponto do corpo em duas partes: (a) deformação elástica reversível ε_{ij}^e e (b) deformação plástica irreversível ε_{ij}^p e apresenta uma relação entre tensão e deformação baseada na teoria da deformação:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p \quad (91)$$

$$\varepsilon_{ij} = \left(\frac{1 + \nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \sigma_{kk} \delta_{ij} \right) + f(\sigma_e) S_{ij} \quad (92)$$

Onde

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} \quad (93)$$

e

$$\sigma_e = \left(\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij} \right)^{1/2} \quad (94)$$

Sendo ν o coeficiente de Poisson, E o módulo de elasticidade, δ_{ij} o delta de Kronecker e σ_e a tensão efetiva ou equivalente.

Segue desenvolvendo o equacionamento para uma casca cilíndrica de raio médio r , comprimento L , e espessura e sujeita a um carregamento axial F e a uma pressão interna p_{int} que fornece o seguinte estado de tensões:

$$\sigma_x = -\frac{F - p_{int}\pi(r - e/2)^2}{2\pi r e} \quad (95)$$

$$\sigma_\theta = p_{int} \left(\frac{r}{e} - \frac{1}{2} \right) \quad (96)$$

Considerando um desvio a partir desse estado de tensões, Lee(1961) chega as seguintes expressões:

$$d\varepsilon_x = \left[\frac{1}{E_s} + \frac{(2-a)^2}{4(1-a+a^2)} \left(\frac{1}{E_t} - \frac{1}{E_s} \right) \right] d\sigma_x - \left[\frac{1}{2E_s} - \frac{1-2\nu}{2E} - \frac{(2-a)(2a-1)}{4(1-a+a^2)} \left(\frac{1}{E_t} - \frac{1}{E_s} \right) \right] d\sigma_\theta \quad (97)$$

$$d\varepsilon_\theta = - \left[\frac{1}{2E_s} - \frac{1-2\nu}{2E} - \frac{(2-a)(2a-1)}{4(1-a+a^2)} \left(\frac{1}{E_t} - \frac{1}{E_s} \right) \right] d\sigma_x + \left[\frac{1}{E_s} + \frac{(2a-1)^2}{4(1-a+a^2)} \left(\frac{1}{E_t} - \frac{1}{E_s} \right) \right] d\sigma_\theta \quad (98)$$

Sendo $a = \frac{\sigma_\theta}{\sigma_x}$, E_t o módulo tangente e E_s o módulo secante.

Escrevendo de forma sucinta:

$$d\varepsilon_x = [C_{11}]d\sigma_x - [C_{12}]d\sigma_\theta \quad (99)$$

$$d\varepsilon_\theta = -[C_{21}]d\sigma_x + [C_{22}]d\sigma_\theta \quad (100)$$

Trabalhando com os conceitos de tensão de membrana e trabalho virtual, Lee (1961) deduz a expressão da tensão crítica de flambagem em função dos coeficientes C_{ij} .

$$\sigma_{cr} = \sqrt{\frac{1}{3(C_{22}/C_{11}) - C_{21}C_{12}/C_{11}^2}} \frac{1}{C_{11}} \frac{e}{r} \quad (101)$$

E a expressão para meio comprimento da onda correspondente,

$$n = \frac{1}{\pi} \left[12 \left(\frac{C_{11}}{C_{22}} - \frac{C_{12}C_{21}}{C_{22}^2} \right) \left(\frac{L^2}{re} \right)^2 \right]^{1/4} \quad (102)$$

APÊNDICE F – Modelo Analítico Paquette e Kyriakides

Resumo do modelo analítico de Paquette e Kyriakides (2006)

A apresentação a seguir do modelo de Paquette e Kyriakides baseia-se em Paquette e Kyriakides (2006) e Corona e Kyriakides (2007)

A flambagem plástica e o colapso de tubos longos de aço inoxidável, submetidos simultaneamente à pressão interna e compressão axial, foram estudados pelos autores acima com a combinação de experimentos e análise teórica.

Conjuntos de tubos, com relação diâmetro / espessura (D/e) de 28,3 e 39,8, foram comprimidos axialmente para determinados valores fixos de pressão interna até que a instabilidade estrutural ocorresse.

Segundo os autores, a presença de pressão interna trouxe dois efeitos (que podem mesmo ser considerados intuitivos) à resposta do sistema:

1. O material escoou a uma tensão axial menor e
2. Ocorre um aumento no comprimento de onda das ondulações que se formam.

As pressões envolvidas nos experimentos foram normalizadas para análise por meio da pressão de escoamento P_0 definida pela seguinte expressão:

$$P_0 = S_\theta \sigma_0 \left(\frac{e}{r} \right) \quad (103)$$

sendo

$$S_\theta = \frac{\sigma_{0\theta}}{\sigma_0} \quad (104)$$

$$S_r = \frac{\sigma_{0r}}{\sigma_0} \quad (105)$$

com, S_θ e S_r , respectivamente, as razões entre os valores de tensão de escoamento nas direções circunferencial e radial com respeito à tensão de escoamento na direção axial (para um material isótropo $S_r = S_\theta = 1$).

$\sigma_{0\theta}$ - tensão de escoamento na direção circunferencial

σ_{0r} - tensão de escoamento na direção radial

σ_0 - tensão de escoamento na direção Axial

e - espessura da parede do tubo

r - raio médio da superfície do tubo

Seis ensaios foram realizados para a relação D/e igual a 28,3 (D é o diâmetro médio do tubo). O gráfico apresentado na Figura 155 mostra a resposta de tensão vs deformação, medida nos ensaios, para seis valores de pressão interna. Pode-se verificar que o aumento da pressão interna diminui os valores da tensão axial.

Figura 155– Respostas tensão x deformação medidas para valores diferentes de pressão interna para tubos com relação $D/e = 28,3$. A marca ^ no gráfico indica a carga limite de instabilidade (Paquette e Kyriakides – 2006).

Os autores mostram esse fenômeno com o uso de gráficos contendo os valores dos experimentos e as curvas traçadas pela análise teórica para material isotrópico e anisótropo. A Figura 156 exemplifica.

Figura 156 - Tensão Crítica (a), Deformação crítica (b) e comprimento de onda axial crítico (c) como função da pressão interna para $D/e = 28,3$. Experimentos e previsões (Paquette e Kyriakides – 2006).

A tensão crítica, a deformação crítica e o comprimento de onda crítico foram obtidos por meio da análise teórica a seguir resumida.

Figura 157 - Modo de flambagem axissimétrico de uma casca cilíndrica sob compressão axial

O surgimento de ondulações axissimétricas em cilindros circulares submetidos à compressão axial, conforme mostrado na Figura 157, é uma bifurcação plástica, cujo problema de autovalor é representado da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \frac{C_{12}}{r} \frac{\pi}{\lambda} & C_{11} \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 \\ -\frac{e^2 C_{11}}{12} \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^4 - \frac{C_{22}}{r^2} + \sigma \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 & -\frac{C_{12}}{r} \frac{\pi}{\lambda} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a \\ b \end{Bmatrix} = 0 \quad (106)$$

Sendo

$[C_{\alpha\beta}]$ – coeficientes calculados pela inversa da matriz constitutiva **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

λ - meio comprimento de onda associado.

a e b – constantes.

σ – tensão na direção axial.

Soluções não triviais são fornecidas por

$$\sigma = \frac{1}{\pi^2} \left(\frac{C_{11}C_{22} - C_{12}^2}{C_{11}} \right) \left(\frac{\lambda}{r} \right)^2 + \frac{\pi^2}{12} C_{11} \left(\frac{e}{r} \right)^2 \left(\frac{r}{\lambda} \right)^2 \quad (107)$$

A tensão crítica, o meio comprimento de onda crítico e a deformação crítica são calculados pelas seguintes expressões:

$$\sigma_c = \left[\frac{C_{11}C_{22} - C_{12}^2}{3} \right]^{1/2} \left(\frac{e}{r} \right) \quad (108)$$

$$\lambda_c = \left[\frac{C_{11}^2}{12(C_{11}C_{22} - C_{12}^2)} \right]^{1/4} (re)^{1/2} \quad (109)$$

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E} \quad (110)$$

A deformação crítica ε_c associada à bifurcação é o valor que corresponde à tensão crítica σ_c .

Paquette e Kyriakides (2006) comentam que para o caso de compressão associada à pressurização interna, as bifurcações referentes às ondulações axialmente uniformes seguem os mesmos passos utilizados para a compressão axial pura valendo assim as equações (108) e (109) acima.

Os autores citam que a anisotropia plástica pode significativamente afetar o estado crítico.

A relação tensão – deformação incremental (matriz constitutiva) que fornece os coeficientes $[C_{\alpha\beta}]$ é expressa para a condição anisotrópica conforme equação Erro!

Fonte de referência não encontrada..

$$\begin{aligned} & \begin{Bmatrix} d\varepsilon_x \\ d\varepsilon_\theta \end{Bmatrix} \\ &= \frac{1}{E_s} \begin{bmatrix} 1 + q(2\sigma_x - \beta\sigma_\theta)^2 & -\hat{v}_s + q(2\sigma_x - \beta\sigma_\theta)(2\alpha\sigma_\theta - \beta\sigma_x) \\ -\hat{v}_s + q(2\sigma_x - \beta\sigma_\theta)(2\alpha\sigma_\theta - \beta\sigma_x) & \alpha + \frac{E_s}{E}(1 - \alpha) + (2\alpha\sigma_\theta - \beta\sigma_x)^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\sigma_x \\ d\sigma_\theta \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (111)$$

Sendo

$$\alpha = \frac{1}{S_{\theta}^2} \quad (112)$$

$$\beta = 1 + \frac{1}{S_{\theta}^2} - \frac{1}{S_r^2} \frac{1}{S_{\theta}^2} \quad (113)$$

$$\hat{v}_s = \frac{\beta}{2} + \frac{E_s}{E} \left(v - \frac{\beta}{2} \right) \quad (114)$$

$$q = \frac{1}{4\sigma_e^2} \left(\frac{E_s(\sigma_e)}{E_t(\sigma_e)} - 1 \right) \quad (115)$$

e,

Módulo Secante

$$E_s = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x} \quad (116)$$

Módulo Tangente

$$E_t = \frac{d\sigma_x}{d\varepsilon_x} \quad (117)$$

Módulo Secante Equivalente

$$E_s(\sigma_e) = \frac{\sigma_e}{\varepsilon_e} \quad (118)$$

Módulo Tangente Equivalente

$$E_t(\sigma_e) = \frac{d\sigma_e}{d\varepsilon_e} \quad (119)$$

A anisotropia foi modelada utilizando a Função de Escoamento de Hill f , que para o problema envolvendo as duas tensões principais $(\sigma_x, \sigma_{\theta})$, mostram o efeito do estado biaxial de tensões na solução do problema (utilizando o conceito de tensão equivalente σ_e).

$$f = \sigma_e = \left[\sigma_x^2 - \left(1 + \frac{1}{S_{\theta}^2} - \frac{1}{S_r^2} \right) \sigma_x \sigma_{\theta} + \frac{1}{S_{\theta}^2} \sigma_{\theta}^2 \right]^{1/2} \quad (120)$$

A tensão axial σ_x é calculada por meio da expressão

$$\sigma_x = - \frac{F - P\pi \left(r - \frac{e}{2}\right)^2}{2\pi Re} \quad (121)$$

F- força compressiva axial

P - pressão interna

r - raio médio do tubo

e - espessura do tubo

Ou em função da relação $\frac{P}{P_0}$

$$\sigma_x = - \frac{F - P_0\pi \left(r - \frac{e}{2}\right)^2 \left(\frac{P}{P_0}\right)}{2\pi re} \quad (122)$$

Já a tensão circunferencial σ_θ é calculada por

$$\sigma_\theta = P \left(\frac{r}{e} - \frac{1}{2}\right) \quad (123)$$

Ou em função da relação $\frac{P}{P_0}$

$$\sigma_\theta = P_0 \left(\frac{r}{e} - \frac{1}{2}\right) \left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (124)$$

Com relação à pressão hidrostática, se durante os experimentos a máquina de ensaios for mantida de tal forma que a força axial seja nula, o incremento da deformação plástica equivalente (nesta equação são usadas as deformações axiais e circunferenciais medidas nos experimentos para encontrar a deformação equivalente) quando o tubo é submetido apenas à pressão interna, é calculado por

$$d\varepsilon_e^p = \sqrt{2} \left[\frac{\frac{1}{s_\theta^2} (d\varepsilon_x^p)^2 + (d\varepsilon_\theta^p)^2 + \left(1 + \frac{1}{s_\theta^2} - \frac{1}{s_r^2}\right) d\varepsilon_x^p d\varepsilon_\theta^p}{\frac{1}{s_\theta^2} + \frac{1}{s_r^2} - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{s_\theta^2} - \frac{1}{s_r^2}\right)^2} \right]^{1/2} \quad (125)$$

APÊNDICE G – Modelo P_K

```

% Adequação do modelo do artigo "Plastic buckling of tubes under axial
% compression and internal pressure" de Paquette e Kyriakides - 2006
% - Elsevier, para tubos de PEAD.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% HIPERBÓLICA - KYRIAKIDES - EXTREMIDADES LIVRES
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc
clear all
close all

%% Propriedades geométricas e de material do tubo de PEAD usado nos ensaios
experimentais
% Material: Tubo de PEAD - Fabricante: BRASTUBO

E = 1.2e9; % Módulo de Elasticidade [Pa]

ni = 0.45; % Coeficiente de Poisson - Literatura

t = 10e-3; % Espessura da parede do tubo [m]

%t = 12e-3; % Espessura da parede do tubo [m]

%t = 5e-3; % Espessura da parede do tubo [m]

% DE = 158.6e-3; % Diâmetro externo [m] - Petrobras

DE = 160e-3; % Diâmetro externo [m]

%DE = 250e-3; % Diâmetro externo [m]

% DI = 148.6e-3; % Diâmetro interno [m]

DI = 140e-3; % Diâmetro interno [m]

%DI = 226e-3; % Diâmetro interno [m]

%DI = 150e-3; % Diâmetro interno [m]

D = (DE + DI)/2; % Diâmetro médio [m]

R = D/2; % Raio médio do tubo [m]

A = 2*pi*R*t; % Área da seção transversal do tubo [m^2]

A_s = pi*((DE/2)^2-(DI/2)^2); % Área resistente da seção

A_i = pi*(DI/2)^2; % Área interna onde a pressão atua

sigma_zero = 16.65; % Tensão de escoamento direção axial [Pa] -
HDPE (teste - 1,5mm/min)

%sigma_zero = 23; % Tensão de escoamento direção axial [Pa] -
HDPE (teste - 5mm/min)

```

```

Sigma_p = sigma_zero;

%Parâmetros ajustados para 1,5mm/min

a1 = 95;                % Parâmetro a1
a2 = 1;                % Parâmetro a2
A = 0.13;              % parâmetro alfa
B = 1;                % parâmetro beta

%Parâmetros ajustados para 5mm/min

% a1 = 85;            % Parâmetro a1
%
% a2 = 1;            % Parâmetro a2
%
% A = 0.13;          % parâmetro alfa
%
% B = 1;            % parâmetro beta

s_teta = 1;           % Constante anisotrópa direção
circunferencial (isótropo)

s_r = 1;              % Constante anisotrópa direção radial
(isótropo)

Entrada.E = E;

Entrada.ni = ni;

Entrada.t = t;

Entrada.D = D;

Entrada.R = R;

Entrada.A = A;

Entrada.sigma_zero = sigma_zero;

Entrada.s_teta = s_teta;

Entrada.s_r=s_r;

%% Carregamento

Pin=0;                % Pressão interna [MPa]

%% Cálculos preliminares

Palfa = alfa (Entrada); % Parametro alfa

```

```

Pbeta = beta (Entrada); % Parametro Beta
Pescoamento = pressao_escoamento (Entrada); % Pressão escoamento
Sigma_theta = sigma_teta (Pin, Entrada); % sigma_teta

%% Leitura dos dados obtidos usando a função HIPERBÓLICA

[NUMERIC,TXT,RAW]=xlsread('Ajuste Plástico
testes.xlsx','Hiperbólico','O17:R1001');% 1,5mm/min
[NUMERIC,TXT,RAW]=xlsread('Ajuste Plástico
testes.xlsx','Hiperbólico','C17:F592');% 60mm/min
[NUMERIC,TXT,RAW]=xlsread('Ajuste Plástico
testes.xlsx','Hiperbólico','I17:L1001');% 5mm/min

clear TXT RAW

DefCarac=NUMERIC(:,1); % Deformação verdadeira
- ensaio
SigmaCarac=NUMERIC(:,4); % Tensão Hiperbólica
[MPa] - calculada

DefVerd=NUMERIC(:,1); % Deformação verdadeira
- ensaio
SigmaVerd=NUMERIC(:,2); % Tensão verdadeira
[MPa] - ensaio

cortecarac=find(DefCarac<0.5); % Truncando em 40% de
deformação

DefCarac=DefCarac(cortecarac); % Deformação axial após
retrabalho
SigmaCarac=SigmaCarac(cortecarac); % Tensão hiperbólica
após retrabalho [MPa]

% Gráfico Tensão x Deformação

figure('units','normalized','position',[.1 .1 .8 .8],'color','w')
plot(DefCarac,SigmaCarac,'k',DefVerd,SigmaVerd,'r-.')
xlabel('$\epsilon_x$ Verdadeira','$', 'fontsize',18,'interpreter','latex')
ylabel('$\sigma_x$ [MPa]','$', 'fontsize',18,'interpreter','latex')
title('Tensão Hiperbólica / Verdadeira x Deformação
Verdadeira','fontsize',18)
grid

%Cálculo dos Módulos de Elasticidade Secante e Tangente utilizando a Função
%Hiperbólica

K_epsilon = a1.*(1-(tanh(a2.*DefCarac.^B)).^A);

Sigma_H = Sigma_p*tanh(K_epsilon.*DefCarac);

Deriv_K_epsilon = -a1*a2*A*B*(DefCarac.^(B-
1)).*((tanh(a2*(DefCarac.^B))).^(A-1)).*(sech(a2*(DefCarac.^B))).^2;

vetorEt=Sigma_p.*(((sech(K_epsilon.*DefCarac)).^2).*(Deriv_K_epsilon.*DefCa
rac+K_epsilon)); % Módulo de Elasticidade Tangente
vetorEt(1)=a1*Sigma_p;

```

```

vetorEs=Sigma_H./DefCarac;
% Módulo de Elasticidade Secante
vetorEs(1)=a1*Sigma_p;

% Gráfico Módulo de Elasticidade Secante x Deformação

figure('units','normalized','position',[.1 .1 .8 .8],'color','w')
subplot(2,1,1)
plot(DefCarac,vetorEs,'k')
xlabel('$\epsilon_x$ verdadeira $','fontsize',18,'interpreter','latex')
ylabel('$E_s$ [MPa]','$','fontsize',18,'interpreter','latex')
title('Módulos Tangente e Secante (Função Hiperbólica) x Deformação Verdadeira','fontsize',18)
grid

% Gráfico Módulo de Elasticidade tangente x Deformação

subplot(2,1,2)
plot(DefCarac,vetorEt,'k')
xlabel('$\epsilon_x$ verdadeira $','fontsize',18,'interpreter','latex')
ylabel('$E_t$ [MPa]','$','fontsize',18,'interpreter','latex')
grid

% Gráfico Módulo de Elasticidade Secante x Tensão

figure('units','normalized','position',[.1 .1 .8 .8],'color','w')
subplot(2,1,1)
plot(Sigma_H,vetorEs,'k')
xlabel('$\sigma_x$ Hiper [MPa]','$','fontsize',18,'interpreter','latex')
ylabel('$E_s$ [MPa]','$','fontsize',18,'interpreter','latex')
title('Módulos Tangente e Secante (Função Hiperbólica) x Tensão Hiperbólica','fontsize',18)
grid

% Gráfico Módulo de Elasticidade tangente x Tensão

subplot(2,1,2)
plot(Sigma_H,vetorEt,'k')
xlabel('$\sigma_x$ Hiper [MPa]','$','fontsize',18,'interpreter','latex')
ylabel('$E_t$ [MPa]','$','fontsize',18,'interpreter','latex')
grid

%% Cálculo dos Módulos de Elasticidade Secante e Tangente equivalente por
integração

% Integracao

Sigmatheta_INT=Pin*R/t;
F_zero = -0.1;    %[kN]

Forca_Aplicada=[F_zero:-0.2:-80]*10^3; %SI - [N] - DE 160mm - t 10mm -
1,5mm/min
%Forca_Aplicada=[F_zero:-0.2:-160]*10^3; %SI - [N] - DE 250mm - t 12mm -
1,5mm/min
%Forca_Aplicada=[F_zero:-0.2:-45]*10^3; %SI - [N] - DE 160 - t 5mm -
1,5mm/min
%Forca_Aplicada=[F_zero:-0.2:-60]*10^3; %SI - [N] - DE 160 - t 5mm -
5mm/min

```

```

Sigmax_INT=(Forca_Aplicada/A_s)/1e+6;           % Intervalo de integração Sigmax
[MPa]

SigmaEquivalente_INT = sigma_equivalente (Sigmax_INT,Sigmatheta_INT,
Palfa,Pbeta);

EtSigmae_INT=interp1(SigmaCarac,vetorEt,SigmaEquivalente_INT);
EsSigmae_INT=interp1(SigmaCarac,vetorEs,SigmaEquivalente_INT);
EsSigmax_INT=interp1(SigmaCarac,vetorEs,Sigmax_INT);

nichapeu_INT=Pbeta/2+(EsSigmae_INT/(E/1000))*(ni-Pbeta/2);
q_INT=1./(4*SigmaEquivalente_INT.^2).*(EsSigmae_INT./EtSigmae_INT-1);

% Integrando

% Condições Iniciais

Epsonx_INT(1)=Sigmatheta_INT/(E/1000)*(-ni)+(F_zero*1000/(E*A_s));
Epsontheta_INT(1)=Sigmatheta_INT/(E/1000)-(ni*(F_zero*1000/(E*A_s)));

for cont=2:length(Sigmax_INT)

Epsonx_INT(cont)=trapz(Sigmax_INT(1:cont),1./(EsSigmae_INT(1:cont)).*(1+q_I
NT(1:cont).*(2*Sigmax_INT(1:cont)-Pbeta*Sigmatheta_INT).^2));

Epsontheta_INT(cont)=trapz(Sigmax_INT(1:cont),1./(EsSigmae_INT(1:cont)).*(-
nichapeu_INT(1:cont)+q_INT(1:cont).*(2*Sigmax_INT(1:cont)-
Pbeta*Sigmatheta_INT).*(2*Palfa*Sigmatheta_INT-Pbeta*Sigmax_INT(1:cont))));
end

figure('units','normalized','position',[.1 .1 .8 .8],'color','w')
plot(Epsonx_INT,Sigmax_INT,'k')
xlabel('$\epsilon_x$', 'fontsize',18,'interpreter','latex')
ylabel('$\sigma_x$ [MPa]', 'fontsize',18,'interpreter','latex')
title('Tensão axial x Deformação axial','fontsize',18)
grid

figure('units','normalized','position',[.1 .1 .8 .8],'color','w')
plot(Forca_Aplicada/1000,Epsonx_INT,'k')
xlabel('$F[kN]$', 'fontsize',18,'interpreter','latex')
ylabel('$\epsilon_x$', 'fontsize',18,'interpreter','latex')
title('Deformação axial x Força aplicada','fontsize',18)
grid

figure('units','normalized','position',[.1 .1 .8 .8],'color','w')
plot(Epsontheta_INT,Sigmax_INT,'k')
xlabel('$\epsilon_\theta$', 'fontsize',18,'interpreter','latex')
ylabel('$\sigma_x$ [MPa]', 'fontsize',18,'interpreter','latex')
title('Tensão axial x Deformação circunferencial','fontsize',18)
grid

figure('units','normalized','position',[.1 .1 .8 .8],'color','w')

```

```

plot(Forca_Aplicada/1000,Epsontheta_INT,'k')
xlabel('$F[kN]$', 'fontsize',30,'interpreter','latex')
ylabel('$\epsilon_{\theta}$', 'fontsize',30,'interpreter','latex')
title('Deformação circunferencial x Força aplicada','fontsize',30)
grid

% Cálculo de alfa

function Parametroalfa = alfa (Entrada)
    s_teta = Entrada.s_teta;
    Parametroalfa = 1/(s_teta^2);
end

% Cálculo de Beta

function Parametrobeta = beta (Entrada)
    s_teta = Entrada.s_teta;
    s_r = Entrada.s_r;
    Parametrobeta = 1 + (1/(s_teta^2)) - (1/(s_r^2));
end

% Cálculo de sigma_equivalente

function SigmaEquivalente = sigma_equivalente (sigma_x,sigma_teta,
Palfa,Pbeta)
    SigmaEquivalente = (sigma_x.^2 - Pbeta * sigma_x .* sigma_teta + Palfa
* sigma_teta.^2).^0.5;
end

% Cálculo da Pressão de Escoamento

function Pescoamento = pressao_escoamento (Entrada)
    s_teta = Entrada.s_teta;
    t = Entrada.t;
    R = Entrada.R;
    sigma_zero = Entrada.sigma_zero;
    Pescoamento = s_teta * sigma_zero * (t/R);
    % K = p_interna/Pescoamento;
    % razão pressão interna / pressão escoamento
end

% Cálculo da tensão circunferencial

function Sigma_teta = sigma_teta (p_interna, Entrada)
R=Entrada.R;
t=Entrada.t;
Sigma_teta = p_interna * (R/t);
end

```

APÊNDICE H – Componentes dispositivo

Apresentação dos componentes do dispositivo construído para os ensaios.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

(g)

(h)

APÊNDICE I – DIC – Correlação Digital de Imagens

Este apêndice apresenta o sistema DIC e o método utilizado no cálculo das deformações axial e circunferencial.

Correlação Digital de Imagens ou do Inglês *Digital Image Correlation* (DIC) é uma técnica de medição ótica que utiliza uma sequência de imagens, obtidas com o uso de câmeras, e com o uso de marcadores na área a ser estudada. É uma técnica inovadora que permite a medições sem contato de grandes deformações, minimizando a influência no corpo de provas.

Para esta tese, as amostras foram marcadas com pontos (1 e 2) equidistantes 10mm de um eixo e cada linha nomeada com uma letra de A a P. A Figura 158 apresenta um croqui com o posicionamento dos pontos.

Figura 158 – Posicionamento dos pontos para as medições com o DIC

A Figura 159 ilustra as marcações no tubo de PEAD.

Após o registro das imagens, que para esse trabalho foi determinado um tempo de 5 segundos entre fotos, processaram-se as imagens no programa comercial *Xcitem Proanalyst*. O processamento com esse programa fornece o histórico de deformações dos marcadores.

Um exemplo de saída desse programa é apresentado na Figura 160.

Figura 159 – Pontos marcados nas amostras para o acompanhamento via DIC

Conhecido o deslocamento dos pontos, as deformações axiais e circunferenciais foram calculadas da seguinte forma:

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{(Frame\ i(pontoX2) - Frame\ i(pontoX1)) - (Frame\ zero(ponto\ X2 - Frame\ zero(pontoX1))}{Frame\ zero(ponto\ X2 - Frame\ zero(pontoX1))}$$

$$\varepsilon_x = \frac{Frame\ i(ponto(X)1 - Frame\ i(ponto(X+1)1) - Frame\ zero(ponto(X)1 - Frame\ zero(ponto(X+1)1))}{Frame\ zero(ponto(X)1 - Frame\ zero(ponto(X+1)1))}$$

Sendo X = A, B,...P

$i = 0, 1, 2, \dots$

Figura 160 – Ilustração do processamento da amostra 3 – ensaio b com o programa de análise

APÊNDICE J – Modelo de Liu, Polak e Penlidis

1. Fator de multiplicação W:

```
close all
clear all
clc

% Recuperação dos resultados obtidos por LIU_POLAK_PENLIDIS_A practical
% approach to modeling time-dependent nonlinear creep behavior of
% Polyethylene for structural applications - 2008

% Dados de Entrada - Figura 4

t = 0:10:100000;

%tau1 = 500;

tau1 = 5;

f1 = 1 - exp(-t/tau1);

%tau2 = 10000;

tau2 = 100;

f2 = 1 - exp(-t/tau2);

tau3 = 2000;

f3 = 1 - exp(-t/tau3);

%tau3 = 200000;

tau4 = 4000;

f4 = 1 - exp(-t/tau4);

tau5 = 40000;

f5 = 1 - exp(-t/tau5);

Fig=figure('units','normalized','position',[.1 .1 .8 .8],'color','w');

plot(t,f1,t,f2,t,f3,t,f4,t,f5)

grid

ylabel('Fator de multiplicação W','fontsize',14)
xlabel('Tempo[s]','fontsize',14)
title('Fator de multiplicação W x Tempo[s]','fontsize',14)
set(gca,'fontsize',14)

axis([0 10000 0 1.4])
```

2. Formulação analítica de Liu et al (2008) e Charbonneau (2011)

```
close all
clear all
clc

% -----
% AMOSTRA 32
% -----

Sigma_c = 3;      %[MPa]

tau(1) = 5;
tau(2) = 100;
tau(3) = 2000;
tau(4) = 40000;

E_0 = 7.5324E+02;  % [MPa]

x_0 = 1/E_0;

epsilon_p = xlsread('deformacao','Plan1','b2:b65280');

t_p = xlsread('deformacao','Plan1','a2:a65280');

for i = 1:4

    for j = 1:4

        for L = 1:65279

            A_aux(L) = Sigma_c*((1 - exp(-(t_p(L))/tau(j)))*(1 - exp(-(t_p(L))/tau(i))));
            End

            A(i,j) = sum(A_aux);

        End

    end

end

for i = 1:4

    for l = 1:65279

        F_aux(l) = (epsilon_p(l) - (Sigma_c/E_0))*(1 - exp(-(t_p(l))/tau(i)));

        End

        F(i) = sum(F_aux);

    end

end

F = F';
x = inv(A)*F;
```

```

for l = 1:65279

    for i = 1:4

        aux(l,i) = x(i)*(1 - exp(-(t_p(l))/tau(i)));

    end

    soma=sum(aux,2);
    epsilon(l) = Sigma_c * (x_0 + soma(l));

end

% -----
% AMOSTRA 34
% -----

Sigma_c_34 = 8;      % [MPa]

tau(1) = 5;
tau(2) = 100;
tau(3) = 2000;
tau(4) = 40000;

E_0_34 = 1586.5E+03;  % [MPa] 1.5865E+09

x_0_34 = 1/E_0_34;

epsilon_p_34 = xlsread('deformacao','Plan1','e2:e65280');

t_p_34 = xlsread('deformacao','Plan1','d2:d65280');

for i = 1:4

    for j = 1:4

        for L = 1:65279

            A_aux_34(L) = Sigma_c_34*((1 - exp(-(t_p_34(L))/tau(j)))*(1 - exp(-(t_p_34(L))/tau(i))));

        End

        A_34(i,j) = sum(A_aux_34);

    End

end

for i = 1:4

    for l = 1:65279

        F_aux_34(l) =(epsilon_p_34(l) - (Sigma_c_34/E_0_34))*(1 - exp(-(t_p_34(l))/tau(i)));

```

```

End

F_34(i) = sum(F_aux_34);

end

F_34 = F_34';

x_34 = inv(A_34)*F_34;

for l = 1:65279

    for i = 1:4

        aux_34(l,i) = x_34(i)*(1 - exp(-(t_p_34(l))/tau(i))));

    end

    soma=sum(aux_34,2);

    epsilon_34(l) = Sigma_c_34 * (x_0_34 + soma(l));

end

plot(t_p,epsilon,'m',t_p,epsilon_p,'k',t_p_34,epsilon_34,'r',t_p,epsilon_p_34,'c')

grid
ylabel('Deformação [mm/mm]')
xlabel('Tempo [s]')
title('Deformação x Tempo - Simulação x Dados Experimentais')
set(gca,'fontsize',20)

```

ANEXO A – Dimensional das amostras

Relatório dimensional das amostras ensaiadas

ESPECIALIZADA
Mitutoyo

RELATÓRIO DE MEDIÇÃO TRIDIMENSIONAL

RMT 342 2013

Número : **RMT 342 2013**

Revisão relatório: **0**

Data medição : **13/12/13**

Data da revisão:

1. Prestador do serviço

Laboratório : **Tridimensional Calibração e Ass. Técnica LTDA.**

Endereço : **Rua Engenheiro Francisco Pitta Brito, 531, São Paulo, S.P.**

2. Equipe técnica

Metrologista : **Carlos Alberto Guedes**

3. Rastreabilidade

Equipamento	Identificação	Nº Série	Certificado	Emitido em	Lab. emitente	INMETRO Nº:	Próx. calibração
MMC	TRID-037	BG000048	128/2013	22/05/13	Tridimensional	210	22/05/14
Esfera padrão	TRID-032	C0330	0061/12	01/02/12	Mitutoyo	31	31/01/14
Termohigrômetro	TRID-039	N/Apres.	LV2686/12	01/02/12	Visomes	127	31/01/14

4. Equipamento utilizado

Máquina de Medição Tridimensional (MMC)	
Fabricante	Mitutoyo
Modelo	BND-CC 7106
Nº de Série	BG000048
Identif.	TRID-037
Exatidão	$U3 = (2,5 + 4L/1000) * 0,001\text{mm}$ L = Valor medido (mm)

Software de Medição	
GEOPAK WIN V. 3.0 R6 Edit. 18	

Capacidade	X = 700
	Y = 1000
	Z = 600

5. Condições ambientais da medição

Temperatura (°C)					
Início:	20,6°C	Meio:	20,8°C	Final:	20,8°C

6. Cliente:

Requisitante : **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**

Endereço : **Av Prof Mello Moraes, 2231 – Cidade Universitária – 05508-030 – São Paulo – SP**

Contato : **Marcos Alves Rabelo**

Depto : **Laboratório de Mecânica Offshore / Departamento de Engenharia Mecânica**

e-mail : marcos.rabelo@usp.br

Fone : **11 - 3091-0707**

7. Identificação da peça medida

Nome da peça : **TUBOS DE PEAD**

Código da peça : **N/A**

Nível desenho : **N/A**

Peça controlada conforme orientações de alinhamento fornecidas pelo Cliente

*A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.
O documento original é mantido pela TRIDIMENSIONAL por 2 anos após sua emissão.
Página 1/2*

RELATÓRIO DE MEDIÇÃO TRIDIMENSIONAL

RMT 342 2013

Data da medição : **13/12/13**

Revisão : **0**

8. Resultados:

Medidas lineares em mm.

Medidas angulares em grau.

ITEM	PEÇA 1	PEÇA 2	PEÇA 3	PEÇA 4	PEÇA 5	PEÇA 6	PEÇA 7	PEÇA 8	PEÇA 9	PEÇA 10
Comprimento total	580,36	579,94	580,70	579,91	580,32	580,69	580,27	579,98	539,32	358,56
Paralelismo faces	0,56	0,48	0,35	0,24	0,32	0,53	0,62	0,20	0,26	0,42
Ø Interno "A" 40mm	141,20	141,20	140,96	140,55	140,75	141,08	141,04	140,98	140,74	140,91
Circularidade "A"	3,28	0,34	1,29	0,45	1,33	3,32	1,22	0,24	1,04	0,92
Ø Interno "B" 150mm	141,00	141,02	140,84	140,41	140,73	140,71	140,79	140,64	140,71	140,31
Circularidade "B"	3,05	1,04	1,43	0,48	1,48	3,58	0,80	0,27	1,05	1,12
Ø Interno "C" 150mm	141,28	141,37	141,55	140,59	141,16	141,00	140,48	140,60	141,65	140,25
Circularidade "C"	2,26	2,10	1,18	0,37	1,54	2,57	0,38	0,27	1,08	1,19
Ø Interno "D" 40mm	141,57	141,48	141,34	140,80	141,25	141,23	140,46	140,91	141,95	140,59
Circularidade "D"	1,79	2,05	1,12	0,30	1,48	2,14	0,35	0,29	1,08	1,29
Ø Externo "A" 40mm	161,50	161,33	160,92	160,98	160,89	161,48	160,93	161,23	160,73	160,92
Circularidade "A"	3,30	0,30	1,30	0,49	1,36	3,34	1,25	0,19	1,11	0,98
Ø Externo "B" 150mm	161,36	161,28	160,78	160,83	160,75	161,26	160,78	161,04	160,56	160,66
Circularidade "B"	3,07	0,97	1,40	0,52	1,47	3,65	0,79	0,24	1,17	1,16
Ø Externo "C" 150mm	161,44	161,45	160,87	160,96	160,87	161,23	160,80	160,99	160,59	160,58
Circularidade "C"	2,26	2,05	1,21	0,32	1,55	2,57	0,37	0,28	1,20	1,28
Ø Externo "D" 40mm	161,65	161,62	160,99	161,13	161,01	161,45	160,92	161,13	160,69	160,76
Circularidade "D"	1,78	2,03	1,15	0,28	1,46	2,14	0,36	0,32	1,09	1,33
Espessura média "A"	10,15	10,06	9,98	10,22	10,07	10,20	9,94	10,13	9,99	10,01
Espessura média "B"	10,18	10,13	9,97	10,21	10,01	10,27	10,00	10,20	9,92	10,17
Espessura média "C"	10,08	10,04	9,66	10,18	9,85	10,11	10,16	10,20	9,47	10,16
Espessura média "D"	10,04	10,07	9,83	10,17	9,88	10,11	10,23	10,11	9,37	10,08

ANEXO B – Certificado MTS

Certificado de alinhamento da unidade MTS utilizada nos ensaios

Certificate of Load Unit Alignment

Model Number 370.25
Assembly Number TF-370-001
Project Number 5000397

MTS Load Unit Alignment Specification for Concentricity

MTS specifications require that the Load unit crosshead must be aligned concentric to the actuator rod axis to within 0.0030 inches (.076 mm) or less. This is defined as the *Initial Concentricity Offset* and is measured with the crosshead positioned near the base of the column travel.

The *Initial Concentricity Offset* calculated for this load unit is: 0.0006 inches (0.016 mm).

The *Concentricity Shift* measurement reflects the changes in the concentricity readings due to changes in crosshead elevation. The MTS specification for the maximum allowable *Concentricity Shift* is 0.0030 inches for each 12 inches (0.25 mm per meter) of crosshead travel.

The *Concentricity Shift* calculated for this load unit is: 0.0010 inches/foot (0.084 mm/meter).

MTS Load Unit Alignment Specification for Angularity

The MTS angularity specification states that the Load Unit crosshead must be aligned perpendicular to the actuator rod axis to within 0.0003 radians. This equates to an angular deviation of 0.0036 inches per foot (0.30 mm per meter) or less. An exception to this specification is granted for measurements taken with the crosshead positioned in the last one foot (305 mm) of column travel. In this condition, the angularity of the crosshead must be 0.0048 inches per foot (0.40 mm per meter) or less.

The *Initial Angularity* calculated for this load unit with the crosshead positioned near the base of the column travel is: 0.0017 inches/foot (0.146 mm/meter).

The *Final Angularity* calculated for this load unit with the crosshead positioned near the top of the top of the column travel is: 0.0034 inches/foot (0.285 mm/meter).

With the Crosshead position in the last one foot of column travel.

The concentricity and angularity measurements for this load unit, **Serial Number** 10289478 meets or exceeds MTS Load Unit Alignment specifications.

Test Performed By:

Date: February 11, 2009

MTS measurement standards are traceable to the National Institute of Standards and Technology. The test equipment uncertainty for concentricity and angularity are $\leq \pm 0.0009$ inches (0.023 mm). The Laser Alignment equipment is calibrated per MTS Calibration Procedure 1348. Alignment is performed per QMS 0308.

ANEXO C - Dispositivo

Dispositivo – Vista superior

ANEXO D - Dispositivo

Dispositivo – Vista lateral

COMPRESSÃO TUBOS PEAD – MARCOS RABELO