



ESTUDO DE MATERIAL ALTERNATIVO PARA FABRICAÇÃO DE MANGUEIRAS HIDRÁULICAS DE UMBILICAL SUBMARINO

Geovana Pereira Drumond

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Petróleo da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores: Ilson Paranhos Pasqualino
Marysilvia Ferreira da Costa

**RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
ABRIL, 2013**

**ESTUDO DE MATERIAL ALTERNATIVO PARA FABRICAÇÃO DE
MANGUEIRAS HIDRÁULICAS DE UMBILICAL SUBMARINO**

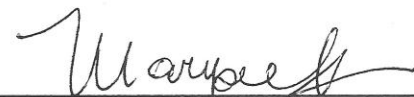
Geovana Pereira Drumond

**PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA DO PETRÓLEO DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO DO PETRÓLEO.**

Aprovado por:



Prof. Ilson Paranhos Pasqualino, D.Sc.



Prof. Marysilvia Ferreira da Costa, D.Sc.



Prof. Paulo Couto, D.Sc.

**RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
ABRIL, 2013**

Drumond, Geovana Pereira

Estudo de Material Alternativo para Fabricação de Mangueiras Hidráulicas de Umbilical Submarino/ Geovana Pereira Drumond – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

XV, 94p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Ison Paranhos Pasqualino, Marysilvia Ferreira da Costa.

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia do Petróleo, 2013.

Referências Bibliográficas: ps.93-94. 1. Umbilical submarino, 2. Mangueira hidráulica, 3. Carregamentos de pressão, 4. Modelagem numérica. I. Paranhos Pasqualino, Ison *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia do Petróleo. III. Título.

Dedicatória

Aos meus pais Sérgio Luis Drumond e Maria das Graças Soares Pereira Drumond e à minha avó Coracira Soares Pereira por todo amor, carinho e apoio incondicional. Foi graças a vocês que aprendi desde cedo a importância do estudo e foi com vocês que venci todos os meus desafios acadêmicos.

Em memória, ao meu avô Manoel Rocha Pereira, que durante toda a vida me amou incondicionalmente e apoiou sempre os meus estudos. Sei que de onde ele estiver, vai se orgulhar de ver sua neta se graduando engenheira.

Ao meu namorado, Jonathas Eric Santana dos Santos, pelos momentos felizes e difíceis em que esteve presente, pela paciência, compreensão e incentivo em todas as decisões que marcaram estes últimos anos.

Agradecimentos

À PETROBRAS por financiar os recursos humanos envolvidos neste trabalho através do PRH-35.

Aos meus orientadores Ison Paranhos Pasqualino e Marysilvia Ferreira da Costa, por todos os conhecimentos passados, por todo o incentivo, dedicação e confiança no meu trabalho.

Ao engenheiro Alexandre Soares Rabelo, por toda a ajuda e parceria para a realização deste trabalho.

A toda equipe do Laboratório de Tecnologia Submarina pelo suporte em todas as etapas que tornaram este trabalho possível.

Aos meus amigos da turma de Engenharia de Petróleo 2008, aos quais sou muito agradecida pelos ensinamentos de solidariedade e companheirismo que tive ao longo desses cinco anos.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro de Petróleo.

Estudo de Material Alternativo para Fabricação de Mangueiras Hidráulicas de Umbilical Submarino.

Geovana Pereira Drumond

Abril/2013

Orientadores: Prof. Ilson Paranhos Pasqualino
Prof.^a Marysilvia Ferreira da Costa

Curso: Engenharia de Petróleo

É de fundamental importância para a indústria do petróleo o controle dos equipamentos em subsuperfície, e para tal existem os umbilicais submarinos. Dentre suas funções, os cabos umbilicais são responsáveis pelo acionamento hidráulico das válvulas da ANM, o que é feito através das suas mangueiras hidráulicas. Tais mangueiras estão sujeitas ao colapso por pressão externa, o que causa concentração de deformações em determinados pontos da sua circunferência e acaba levando-a a falha quando pressurizada internamente pela passagem do fluido hidráulico. O objetivo do trabalho é estudar um material alternativo para a fabricação do *liner* dessas mangueiras hidráulicas e, por esse motivo, foram feitos modelos numéricos no software comercial ANSYS versão 13.0. Com os resultados das simulações, foi possível comparar as respostas apresentadas pela Poliamida 11 e pelo Viton® às cargas impostas. A Poliamida 11 é o atual polímero utilizado na fabricação do *liner* da mangueira, e o Viton® é um fluoroelastômero de alta flexibilidade estudado no presente trabalho para substituir a Poliamida 11. Por fim, foi possível concluir que o Viton® apresenta níveis de tensão inferiores à Poliamida 11 quando submetido ao mesmo carregamento de pressão externa. E quando submetidos à pressão interna devido ao transporte de fluido hidráulico, o Viton® recupera grande parte da deformação sofrida no colapso e carrega em sua estrutura níveis inferiores de tensões residuais, podendo então, ser o substituto para a Poliamida 11.

Palavras-chave: Umbilical submarino, mangueira hidráulica, carregamentos de pressão, modelagem numérica.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

Study of an alternative material for the manufacture of subsea umbilical's hydraulic hoses.

Geovana Pereira Drumond

April/2013

Advisors: Prof. Ilson Paranhos Pasqualino
Prof.^a Marysilvia Ferreira da Costa

Course: Petroleum Engineering

The control of the subsea equipments is very important for the petroleum industry, and to this end there are the subsea umbilicals. Among its functions, the umbilicals are responsible for hydraulic valves of the Christmas Tree, which is done through its hydraulic hoses. These hoses are subject to collapse by external pressure, and this collapse often cause the concentration of deformations at certain points on the circumference of the hose and ends up taking her to fail when pressurized internally by the conduction of hydraulic fluid. The objective of this work is to study an alternative material for the manufacture of hydraulic hoses and, therefore, numerical models were made in commercial software ANSYS version 13.0. With the results of these simulations was possible to compare the answers presented by Polyamide 11 and Viton®. Polyamide 11 is the current polymer used in the manufacture of hose inner layer, and Viton® is a high flexibility fluoroelastomer studied in this work to replace Polyamide 11. Finally, it was possible to conclude that the Viton® presents lower stress levels to Polyamide 11 when subjected to the same loading of external pressure. And when subjected to internal pressure due to the hydraulic fluid transport, the Viton® retrieves this deformation and at the end, Viton® has lower levels of residual stresses in his structure compared to Polyamide 11. Soon, the Viton® can be the substitute for Polyamide 11.

Keywords: Subsea umbilical, hydraulic hose, pressure loads, numerical modeling.

Sumário

Dedicatória	iv
Agradecimentos	v
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xvi
Nomenclatura	xvii
1. Introdução	1
1.1. Objetivo	2
2. Cabos Umbilicais	3
2.1. Tipos de Cabos Umbilicais	5
2.1.1. Umbilical Hidráulico Direto	5
2.1.2. Umbilical Hidráulico Pilotado	6
2.1.3. Umbilical Eletro-Hidráulico	6
2.1.4. Umbilical Eletro-Hidráulico Direto	7
2.1.5. Umbilical Eletro-Hidráulico Multiplexado	7
2.1.6. Umbilical Óptico de Potência	9
2.2. Falhas em Umbilicais	9
2.3. Qualificação	10
2.4. Fabricação	11
2.5. Instalação.....	12

3. Polímeros.....	13
3.1. Comportamento Tensão-Deformação	13
3.1.1. Deformação de Polímeros	16
3.1.2. Fatores que Influenciam as Propriedades Mecânicas dos Polímeros ..	18
3.2. Elastômeros	20
3.2.1. Viton® Fluoroelastômero	21
3.3. Fibras	25
3.3.1. Kevlar® Fibra de Aramida.....	29
4. Revisão Bibliográfica.....	31
4.1. Conceitos	31
4.1.1. Colapso	31
4.1.2. Tensão Verdadeira e Deformação Logarítmica.....	31
4.1.3. Método Modificado de Riks.....	32
4.1.2 Critérios de Resistência de Von Mises	34
4.1.3 Leis Constitutivas de Hiperelasticidade	35
4.2. Trabalhos Relacionados.....	37
4.2.1. Trabalho de R.R. Jakeman e P.H. Knight	37
4.2.2. Trabalho de L. Legallais, M. Stratfold e J. Hardy.....	38
4.2.3. Trabalho de J.D. Stables e I.R. Dodge.....	41

4.2.4.	Trabalho de A.S. Rabelo.....	43
5.	Método dos Elementos Finitos	45
6.	Modelos Numéricos	48
6.1.	Modelo Numérico em Três Dimensões.....	49
6.1.1.	Geometria do Modelo	50
6.1.2.	Malha e Superfície de Contato.....	52
6.1.3.	Condições de Contorno e Carregamento.....	57
6.2.	Modelo Numérico em Duas Dimensões.....	60
6.2.1.	Geometria do Modelo	60
6.2.2.	Malha e Superfície de Contato.....	63
6.2.3.	Condições de Contorno e Carregamentos	65
6.2.4.	Substituição da Poliamida 11 pelo Viton®	71
7.	Caracterização dos Materiais	75
7.1.	Teste de Tração Uniaxial para a Poliamida 11	76
7.2.	Teste de Tração Uniaxial para o Viton®	84
8.	Análise de Resultados	88
9.	Conclusão.....	90
9.1.	Trabalhos Futuros	91
10.	Referências Bibliográficas	93

Lista de Figuras

Figura 1: Arranjo Submarino Convencional.....	1
Figura 2: Cabo Umbilical Convencional.	4
Figura 3: Umbilical Eletro-Hidráulico.	7
Figura 4: Umbilical Eletro-Hidráulico Direto.....	7
Figura 5: Umbilical Óptico de Potência.	9
Figura 6: Mangueira Hidráulica de Umbilical Submarino.....	13
Figura 7: Máquina Utilizada em Ensaios de Tração (DE MIRANDA, 2010).....	14
Figura 8: Comportamento Tensão-Deformação para Polímeros Frágeis (Curva A), Plásticos (Curva B) e Elastoméricos (Curva C) (CALLISTER, 2002).....	15
Figura 9: Curva Tensão-Deformação Esquemática de um Polímero Dúctil Mostrando a Determinação Gráfica do Limite de escoamento (σ_y) e Limite de Resistência Mecânica (TS) (CALLISTER, 2002).	16
Figura 10: Estágios da Deformação Plástica em Polímeros Semicristalinos (DE MIRANDA, 2010)	17
Figura 11: Curva Tensão-Deformação Esquemática de um Polímero Semi-Cristalino Dúctil Apresentando os Vários Estágios de Deformação (DE MIRANDA, 2010). 18	
Figura 12: Curvas Tensão-Deformação para o Acetato de Celulose a Várias Temperaturas (CALLISTER, 2002)	19
Figura 13: Efeito da Taxa de Deformação nas Curvas de Tração do Epóxi (CALLISTER, 2002).	19
Figura 14: Cadeia de Moléculas de um Elastômero: (a) no Estado Não-Deformado; (b) Deformado Elasticamente em Resposta a uma Tensão (CALLISTER, 2002).	21
Figura 15: Resistência do Viton® ao Calor (DUPONT, Viton® Fluoroelastômero, 2010).	23

Figura 16: Resistência ao Calor e ao Óleo de Alguns Elastômeros Específicos ((DUPONT, Viton® Fluoroelastômero, 2010)	23
Figura 17: Estrutura Emparelhada do Nylon 6,6 (DE MIRANDA, 2010).	26
Figura 18: Esforços de Tração na Direção de Orientação e a 90° deste.	26
Figura 19: Fiação por fusão (DE MIRANDA, 2010).	27
Figura 20: Feira.....	28
Figura 21: Ovalização com a Diferença entre Valores de Diâmetros Máximos e Mínimos.	31
Figura 22: Método do Comprimento do Arco de Riks (STRAMONDINOLI, 2007).	33
Figura 23: Incrementos de Carga e o Deslocamento Associado a partir do Método do Comprimento de Arco (STRAMONDINOLI, 2007).	34
Figura 24: Curva de Tensão do Ducoflex® (LEGALLAIS, STRATFOLD, HARDY, 1993).	39
Figura 25: Penetração do Metanol versus Temperatura (LEGALLAIS, STRATFOLD, HARDY, 1993).	40
Figura 26: Falhas em umbilicais: (a) Trincas na Capa Externa dos Umbilicais; (b) Ondulações nos Umbilicais; (c) Torções em Umbilicais; (d) Deslocamento da Capa Externa em PEAD; (e) Ruptura de Arame da Armadura de Tração (RABELO, 2013).	44
Figura 27: Processo de análise por Elementos Finitos (BATHE, 1996).	46
Figura 28: Trançado da Camada de Aramida.	50
Figura 29: Geometria da Camada de Aramida.	51
Figura 30: Geometria das Três Camadas.	52
Figura 31: Malha das Camadas de Poliamida11 e Poliuretano.	53
Figura 32: Malha da Camada de Kevlar®.	53

Figura 33: Elementos de Contato Tipo TARGE170.....	56
Figura 34: Elementos de Contato Tipo CONTA175.	56
Figura 35: Condições de Contorno Impostas à Mangueira.....	57
Figura 36: (a)Tensões Resultantes na Carga Limite para a Camada de Poliuretano; (b) Deformações Resultantes na Carga Limite para a Camada de Poliuretano; (c)Tensões Resultantes na Carga Limite para a Camada de Poliamida 11; (d) Deformações Resultantes na Carga Limite para a Camada de Poliamida 11.....	58
Figura 37: Tensões Resultantes na Carga Limite para a Camada de Kevlar®.....	59
Figura 38: Pressão Interna versus Deslocamento Radial para um Elemento da camada de Poliamida 11.	59
Figura 39: Vista Superior do Trançado de Kevlar®.	61
Figura 40: Geometria do Modelo em Duas Dimensões.....	62
Figura 41: Ovalização Inicial da Seção da Mangueira.....	63
Figura 42: Malha de Elementos Finitos.....	64
Figura 43: Geometria do Contato entre os Elementos TARGE169 e CONTA175.	65
Figura 44: Condições de Contorno Impostas ao Modelo.....	66
Figura 45: (a) Tensões Resultantes na Carga Limite de Pressão Externa. (b) Deformações Plásticas na Carga Limite de Pressão Externa. (c) Deformações Totais na Carga Limite de Pressão Externa.	67
Figura 46: Configuração Indeformada sobre o Contorno Deformado após Aplicação de Pressão Externa.....	67
Figura 47: (a)Tensões Resultantes no Descarregamento de Pressão Externa. (b) Deformações Plásticas após o Descarregamento de Pressão Externa. (c) Deformações Totais após o Descarregamento de Pressão Externa.	68

Figura 48: (a)Tensões Resultantes na Carga Limite de Pressão Interna. (b) Deformações Plásticas na Carga Limite de Pressão Interna. (c) Deformações Totais na Carga Limite de Pressão Interna.	70
Figura 49: (a) Configuração Indeformada sobre o Contorno Deformado no Descarregamento de Pressão Externa; (b) Configuração Indeformada sobre o Contorno Deformado na Carga Limite de Pressão Interna.	70
Figura 50: Malha de Elementos Finitos para o Modelo com o Viton®.	71
Figura 51: (a) Tensões Resultantes na Carga Limite de Pressão Externa; (b) Deformações Totais na Carga Limite de Pressão Externa; (c) Configuração Indeformada sobre o Contorno Deformado na Carga Limite de Pressão Externa	72
Figura 52: (a)Tensões Resultantes no Descarregamento de Pressão Externa; (b) Deformações após o Descarregamento de Pressão Externa.	73
Figura 53: (a)Tensões Resultantes na Carga Limite de Pressão Interna; (b) Deformações Totais na Carga Limite de Pressão Interna.	74
Figura 54: (a) Configuração Indeformada sobre o Contorno Deformado no Descarregamento de Pressão Externa; (b) Configuração Indeformada sobre o Contorno Deformado na Carga Limite de Pressão Interna.	75
Figura 55: Curva Tensão Real versus Deformação Real do Poliuretano (YI, 2006).	76
Figura 56: Teste de Tração Uniaxial a uma Taxa de Deformação de 5mm/min.	77
Figura 57: Comparação entre as Geometrias dos Corpos de Prova antes e após o Teste de Tração Uniaxial a uma Taxa de Deformação de 5mm/min.	77
Figura 58: Curva Tensão versus Deformação de Engenharia dos Corpos de Prova da Poliamida11 a uma taxa de deformação de 5 mm/min.	78
Figura 59: Curvas Tensão Real versus Deformação Logarítmica dos Corpos de Prova da Poliamida 11 a uma taxa de deformação de 5 mm/min.	78
Figura 60: Curva Tensão Real versus Deformação Logarítmica Representativa da Poliamida11 a uma taxa de deformação de 5 mm/min.	79

Figura 61: Teste de Tração Uniaxial a uma Taxa de Deformação de 50 mm/min.	79
Figura 62: (a) Corpo de Prova Indeformado Antes do Teste e Tração; (b) Comparação entre as Geometrias dos Corpos de Prova após o Teste de Tração Uniaxial a uma Taxa de Deformação de 50 mm/min.	80
Figura 63: Curva Tensão versus Deformação de Engenharia dos Corpos de Prova da Poliamida 11 a uma taxa de deformação de 50 mm/min.	81
Figura 64: Curvas Tensão Real versus Deformação Logarítmica dos Corpos de Prova da Poliamida 11 a uma taxa de deformação de 50 mm/min.	81
Figura 65: Curva Tensão Real versus Deformação Logarítmica Representativa da Poliamida 11 a uma taxa de deformação de 50 mm/min.	82
Figura 66: Curva Tensão versus Deformação de Engenharia dos Corpos de Prova da Poliamida 11 à Taxas de Deformação de 5 mm/min e 50 mm/min.	83
Figura 67: Curva Tensão Real versus Deformação Logarítmica dos Corpos de Prova da Poliamida11 à Taxas de Deformação de 5 mm/min e 50 mm/min.	83
Figura 68: Cálculo do Módulo de Young.	84
Figura 69: Teste de Tração Uniaxial à Taxa de Deformação de 50 mm/min.	85
Figura 70: Comparação entre as Geometrias dos Corpos de Prova antes e após o Teste de Tração Uniaxial.	85
Figura 71: Curva Tensão versus Deformação de Engenharia dos Corpos de Prova do Viton®.	86
Figura 72: Curvas Tensão Real versus Deformação Logarítmica dos Corpos de Prova do Viton®.	86
Figura 73: Curva Tensão Real versus Deformação Logarítmica Representativa do Viton®.	87
Figura 74: Superposição das Curvas Tensão-Deformação com a Curva Ajustada pelo Método de Mooney-Rivlin.	87

Figura 75: (a) Deformações no colapso e expansão da Poliamida 11; (b) Deformações no colapso e expansão do Viton®.....	88
Figura 76: (a) Expansão da Poliamida 11 sobre o trançado de Kevlar®; (b) Expansão do Viton® sobre o Trançado de Kevlar®.....	89
Figura 77: (a) Níveis de Tensões e Deformações na Falha da Poliamida 11; (b) Níveis de Tensões e Deformações na Falha do Viton®.....	89

Lista de Tabelas

Tabela 1: Umbilical Hidráulico Direto.....	5
Tabela 2: Umbilical Hidráulico Pilotado.....	6
Tabela 3: Umbilical Eletro-Hidráulico Multiplexado.....	8
Tabela 4: Principais Não Conformidades Ocorridas em Umbilicais Identificadas em Diferentes Fornecedores (RABELO,2013).	10
Tabela 5: Comparações das Propriedades ¹ dos Elastômeros (DUPONT, Viton® Fluoroelastômero, 2010).....	22
Tabela 6: Taxas de Permeabilidade para os Elastômeros Seleccionados e Poliamida 11 (DUPONT, Viton® Fluoroelastômero, 2010).....	24
Tabela 7: Compatibilidade Química Relativa a Propriedades Mecânicas para os Fluoroelastômeros Viton® (DUPONT, Viton® Fluoroelastômero, 2010).....	24
Tabela 8: Propriedades do Kevlar® (DUPONT, Kevlar® Fibra de Aramida).	30
Tabela 9: Comparação entre as Propriedades Mecânicas de Polímeros (LEGALLAIS, STRATFOLD, HARDY, 1993).	39
Tabela 10: Tempo de Meia Vida para a Poliamida 11 e o Poliéster Termoplástico (STABLES, DODGE, 1993).....	42
Tabela 11: Propriedades dos Polímeros Estudados.....	90
Tabela 12: Resumo dos Resultados das Simulações Numéricas.....	91

Nomenclatura

A	Área atual da seção transversal.....	[mm ²]
A_0	Área original da seção transversal.....	[mm ²]
L, l	Comprimento atual	[mm]
L_0, l_0	Comprimento inicial	[mm]
E	Módulo de elasticidade ou Young	[MPa]
C_{i0}	Constantes do método de Mooney-Rivlin	[-]
I_1, I_2, I_3	Invariantes de deformação	[-]
V_0	Volume inicial	[mm ³]
d_k	Constantes do método de Mooney-Rivlin	[-]
d_y	Incremento no eixo y	[graus]
d_z	Incremento no eixo z	[mm]
k_0	Módulo de cisalhamento.....	[-]
w_b	Parcela volumétrica da energia potencial	[J]
w_d	Parcela diferencial da energia potencial	[J]
[K]	Matriz de rigidez	[N/mm]
{F}	Vetor de força	[MPa]
{u}	Vetor deslocamento.....	[mm]
F	Carga	[MPa]
J	Taxa volumétrica	[-]
K	Rigidez	[N/mm]

ncabos	Número de cabos em uma direção no modelo	[-]
npassos	Número de passos do modelo	[-]
numnos	Número de nós em um cabo.....	[-]
passo	Comprimento do passo da helicóide	[mm]
R	Raio externo da camada de Poliamida 11	[mm]
R1	Raio externo da camada de Kevlar®	[mm]
R2	Raio interno da camada de Kevlar®	[mm]
raio	Raio médio do Kevlar®.....	[mm]
raio_N11	Raio médio da Poliamida 11	[mm]
raio_POL	Raio médio do Poliuretano	[mm]
tkevar	Espessura da camada de Kevlar®	[mm]
tnylon	Espessura da camada de Poliamida 11.....	[mm]
tpoli	Espessura da camada de Poliuretano	[mm]
TS	Nível de tensão onde ocorre a fratura	[MPa]
V	Volume atual.....	[mm ³]
W	Energia potencial de deformação	[J]

Símbolos Gregos:

ν	Coeficiente de Poisson	[-]
ε	Deformação de engenharia	[-]
ε_{ln}	Deformação logarítmica.....	[-]
Δ_o	Ovalização inicial	[-]

σ	Tensão de engenharia.....[MPa]
σ_y	Tensão de escoamento[MPa]
σ_{eq-VM}	Tensão equivalente de Von Mises[MPa]
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Tensões principais.....[MPa]
Δ_u	Variação de comprimento [mm]
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	Alongamentos principais [mm]
μ_0	Módulo de bulk [-]
θ	Ângulo coordenada cilíndrica [graus]
λ	Alongamento [-]

Subscritos:

$()_{max}$	Máximo(a)
$()_{min}$	Mínimo(a)
$()_{ref}$	Referência(a)
$()_{verdadeira}$	Verdadeira(a)
$()_{real}$	Real(a)
$()_{fictícia}$	Fictícia(a)

Siglas e Abreviaturas:

®	Marca registrada
ANM	Árvore de Natal Molhada
API	American Petroleum Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials

BCS	Bomba Centrífuga Submersa
FPSO	Floating Production Storage and Offloading
HCR	High Collapse Resistance
HDPE	Hight Density Polyethylene
ISO	International Organization for Standardization
MEF	Método dos Elementos Finitos
PA11	Poliamida 11
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PLSV	Pipe Laying Support Vessel
PU	Poliuretano
SAE	Society of Automotive Engineers
SCM	Subsea Control Module
SEM	Subsea Electronics Modules
XLPE	Cross Linked Polyethylene

1. Introdução

O aumento da demanda mundial pelo petróleo e seus derivados faz com que as empresas exploradoras direcionem seus investimentos para reservatórios cada vez mais profundos. Esse cenário motiva estudos e desenvolvimento de novas tecnologias para os equipamentos de subsuperfície, que precisam ser cada vez mais eficientes conforme as empresas passam a explorar áreas cada vez mais profundas.

Para definir os equipamentos de produção em subsuperfície deve-se levar em consideração a natureza do reservatório, as condições ambientais, aspectos de produção, monitoração e manutenção e aspectos econômicos. E após tais análises, são escolhidos os equipamentos de subsuperfície ideais para cada campo. Abaixo é mostrado um arranjo submarino convencional que ilustra os principais equipamentos usados pela indústria.



Figura 1: Arranjo Submarino Convencional

Na Figura 1 percebemos a presença de linhas que interligam os equipamentos submersos aos de superfície (*risers*), coletores ou distribuidores de fluidos produzidos ou injetados (*manifolds*), linhas que fazem a ligação entre o poço e o *manifold* ou plataforma (*flowlines*), árvores de natal molhadas para controlar o fluxo dos fluidos produzidos ou injetados, instaladas em cima da cabeça de poço, e os cabos umbilicais.

Os umbilicais submarinos são produtos essenciais aos sistemas de produção contemporâneos devido ao avanço da fronteira exploratória do petróleo no mar. Tais cabos são adaptados a condições operacionais severas, variações de temperatura, fortes correntes marinhas, ondas, ventos e passeio da plataforma. Durante a produção, tais equipamentos atuam no controle das válvulas *master*, *wing* e *crossover* da ANM, da válvula de segurança e dos SCMs (*subsea control modules*) nos *manifolds*. De forma geral, o umbilical submarino é composto de mangueiras HCR para injeção de glicol, armaduras de tração, capa externa, cabos elétricos e mangueiras termoplásticas para controle hidráulico das principais válvulas de uma ANM.

1.1. Objetivo

O objetivo do presente trabalho é estudar um material alternativo para a fabricação de mangueiras hidráulicas que seja capaz de suportar a pressão interna (em combinação com a camada externa de aramida) e não apresente interação química com o fluido hidráulico conduzido. Objetiva-se realizar testes experimentais em amostras de mangueiras conseguidas na indústria, e testes numéricos com a Poliamida 11 e com o Viton®, material alternativo proposto para substituir a Poliamida 11. Neste modelo, será possível reproduzir as condições de trabalho e o modo de falha da mangueira, verificar sua resposta e buscar o ajuste das características do material proposto, de modo que seja obtido um produto não suscetível à falha “vazamento em mangueira” atualmente verificada após o seu colapso.

2. Cabos Umbilicais

Os umbilicais submarinos fazem parte do sistema de controle de poço e são um conjunto de mangueiras, cabos elétricos ou ópticos que ligam a unidade de produção (plataformas ou FPSO) ao *manifold* ou à ANM. De forma geral são responsáveis por transportar a potência hidráulica para acionamento das válvulas na ANM, a potência elétrica para a aquisição de dados e os produtos químicos para a otimização do escoamento. O cabo umbilical tem uma configuração diferente para cada aplicação. Os materiais listados a seguir são os usados em um umbilical submarino convencional.

- 1. Mangueiras** – A potência hidráulica é transportada da Unidade de Produção para o poço ou *manifold* através de mangueiras termoplásticas, sendo comum o uso de diâmetros que variam de 3/16" até 2". Segundo LABANCA, 2005, na Bacia de Campos é predominante o uso de mangueiras com diâmetros de 3/16" para os umbilicais de *workover*, 3/8" para acionamento das funções hidráulicas dos sistemas de produção, 1/2" para suprimento hidráulico dos sistemas multiplexados e 1/2" com carcaça metálica. Convencionalmente encontramos nove mangueiras termoplásticas de menor calibre, cada uma responsável por atuar uma função da ANM. As mangueiras de maior calibre com carcaça metálica são chamadas HCR (*High Collapse Resistance*), suportam o diferencial de pressão e evitam assim, o colapso (quando a mangueira estiver vazia durante as operações de injeção de produto químico). As mangueiras possuem também, capa externa de proteção e são reforçadas com Kevlar® para evitar expansão.
- 2. Cabos Elétricos** – Responsáveis pela aquisição de dados dos poços satélites, geralmente são encontrados em três pares de cabos de 2,5 mm². Para os sistemas multiplexados, o umbilical possui quatro pares de cabos de 4 mm² que fornece a potência elétrica e viabiliza os sinais de dados para os SCMs. Todos os cabos podem ser isolados de acordo com a necessidade.
- 3. Miolo** – Feito de material elastomérico, tem como funções promover o isolamento térmico e equalizar a pressão, uma vez que preenche os

espaços vazios dentro do umbilical. Além disso, o miolo evita o atrito entre as mangueiras e cabos elétricos.

4. **Capa interna** – Capa rígida feita de polímero que tem como função proteger o miolo.
5. **Armadura** – Feitas de material metálico, tem como função proteger as mangueiras e cabos elétricos dos esforços de tração e torção.
6. **Capa externa** – Capa rígida feita de polímero (geralmente polietileno), gera isolamento e dá estanqueidade ao umbilical. Além de proteger a armadura contra abrasão.

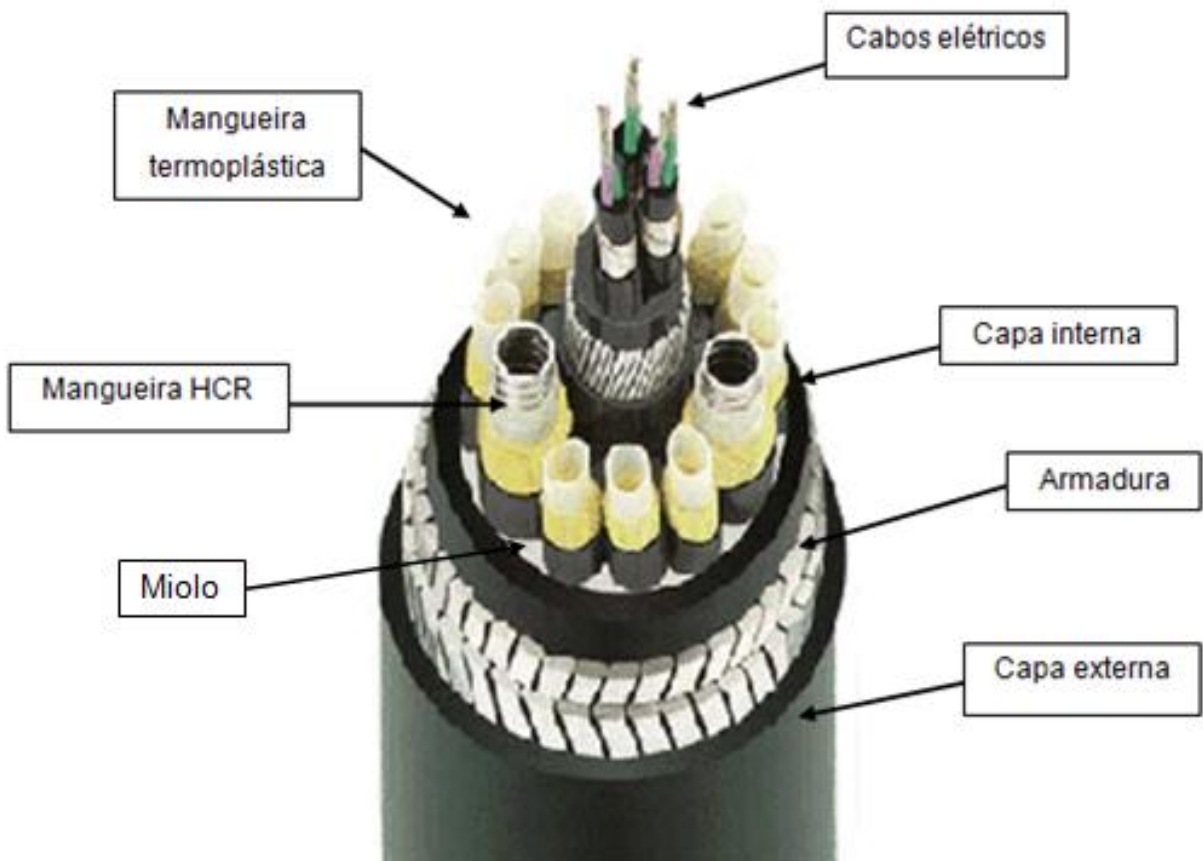


Figura 2: Cabo Umbilical Convencional.


2.1. Tipos de Cabos Umbilicais

Existem várias possibilidades de arranjos para cabos umbilicais, e elas variam de acordo com a aplicação dada ao umbilical. Abaixo são descritos os arranjos típicos usados pela indústria.

2.1.1. Umbilical Hidráulico Direto

Umbilical que apresenta simplicidade de arranjo e confiabilidade. Apresenta uma mangueira hidráulica dedicada para cada função da ANM. Tem aplicabilidade em sistemas de média distância (até 15 km), normalmente utilizado para poços piloto ou entre a ANM e o *manifold*. Opera na abertura do fluxo hidráulico para o *manifold* e na ventilação desse fluxo de volta para o reservatório.


Tabela 1: Umbilical Hidráulico Direto.

Estrutura do Umbilical	Vantagens	Desvantagens
 <p>Poliuretano Armadura Poliuretano Mangueira 3/8" Poliuretano</p>	<p>Baixo custo;</p> <p>Alta confiabilidade porque os componentes críticos estão na superfície;</p> <p>Facilidade de manutenção porque os componentes críticos estão na superfície.</p>	<p>Tempo de resposta aumenta com a distância;</p> <p>Número grande de mangueiras;</p> <p>Capacidade de monitoramento limitada;</p> <p>Flexibilidade operacional limitada.</p>

2.1.2. Umbilical Hidráulico Pilotado

Possui uma mangueira hidráulica pilotada para atuar cada função da ANM, além de fornecer suporte hidráulico para o *subsea control module* (SCM). A atuação da válvula é acelerada devido a um acumulador hidráulico no SCM e este umbilical tem aplicação em médias distâncias (entre 4 a 25 km). São utilizadas válvulas piloto para liberar a pressão de acionamento, que permite o fluxo hidráulico do acumulador de pressão até o atuador da válvula da ANM. Para fechar a válvula da ANM, o fluido hidráulico é ventilado de volta para o reservatório através também, da válvula piloto.

Tabela 2: Umbilical Hidráulico Pilotado.

Estrutura do Umbilical	Vantagens	Desvantagens
	<p>Baixo custo;</p> <p>Alta confiabilidade porque os componentes críticos estão na superfície;</p> <p>Facilidade de manutenção porque os componentes críticos estão na superfície.</p>	<p>Tempo longo de resposta;</p> <p>Número grande de mangueiras;</p> <p>Tem a distância como limitação, pois a resposta é lenta;</p> <p>Não faz monitoramento porque não possui cabos elétricos.</p>

2.1.3. Umbilical Eletro-Hidráulico

Este umbilical se caracteriza por ser um umbilical hidráulico direto com funções de aquisição de temperatura e pressão. Pode possuir mangueiras de injeção de produtos químicos e possui setes funções para o completo comando das válvulas gaveta da ANM, e mais duas de reserva.

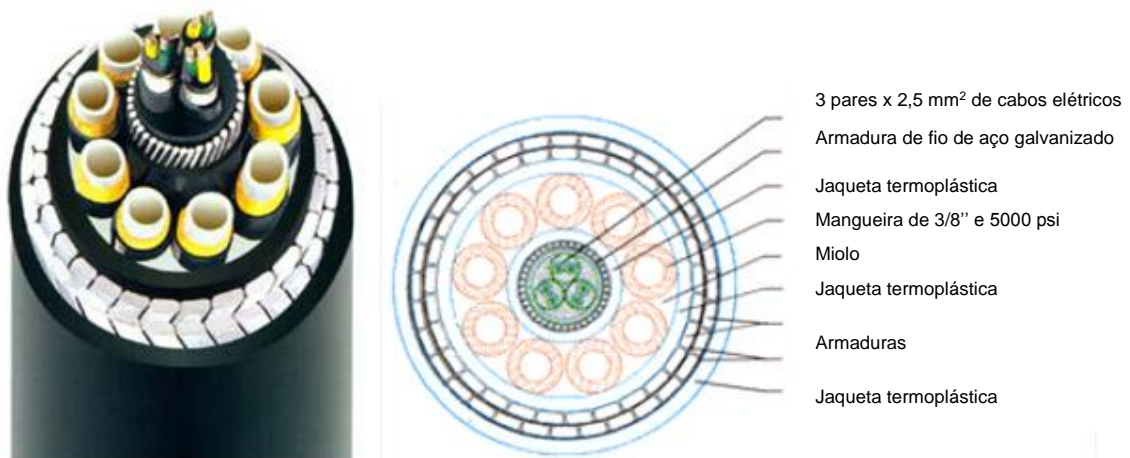


Figura 3: Umbilical Eletro-Hidráulico.

2.1.4. Umbilical Eletro-Hidráulico Direto

Possui uma mangueira única de alta pressão que atua as funções da ANM. São utilizadas válvulas solenóides elétricas para liberar a pressão de acionamento. Cada válvula solenóide possui um cabo elétrico dedicado, e o acionamento é quase imediato.

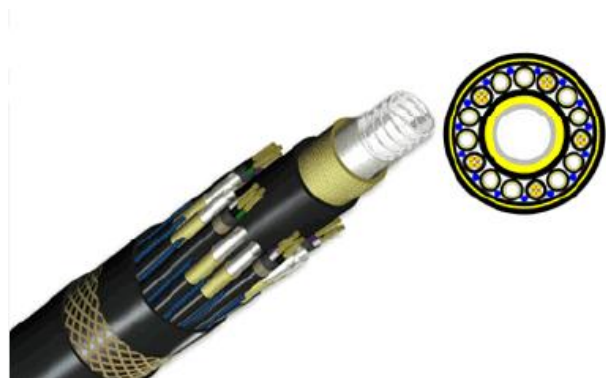


Figura 4: Umbilical Eletro-Hidráulico Direto

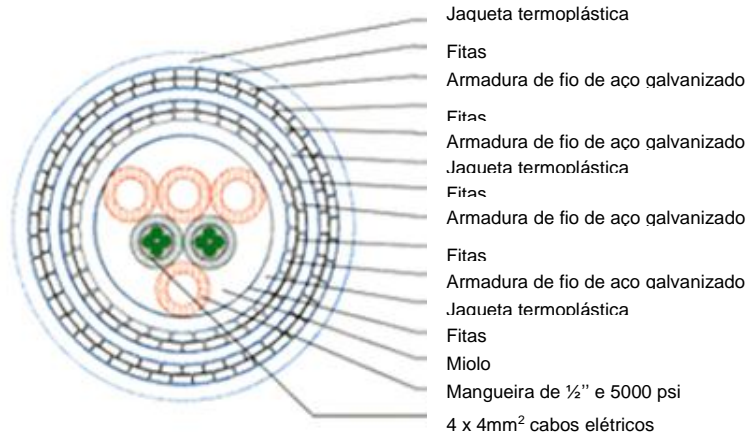
2.1.5. Umbilical Eletro-Hidráulico Multiplexado

Um umbilical multiplexado pode controlar vários poços e SCMs. Atua na abertura da válvula da ANM da seguinte maneira: o *master control station* (MCS) envia um comando ao *subsea electronics module* (SEM), que irá interpretar a mensagem e energizar a válvula piloto solenóide apropriada. Tal válvula permitirá que o fluido hidráulico flua no atuador da válvula da ANM. Para fechar a válvula da ANM, o

mecanismo é o mesmo, porém o fluido hidráulico será ventilado pela válvula piloto para o mar.

Tabela 3: Umbilical Eletro-Hidráulico Multiplexado

Estrutura do Umbilical



Vantagens	Desvantagens
Bom tempo de resposta em longas distâncias;	Alto nível de complexibilidade;
Permite o controle de muitas válvulas/poços via uma única linha de comunicação;	Necessita de conectores elétricos em subsuperfície;
Sistema redundante, logo seguro;	Elevado número de equipamentos em subsuperfície;
Ideal para plataformas não tripuladas ou reservatórios complexos;	Necessita de recarga na fonte hidráulica em longas distâncias;
Capaz de suportar um grande volume de dados de resposta;	Necessita de sistema de limpeza de fluido hidráulico;
Não possui limitações operacionais.	Custo elevado.

2.1.6. Umbilical Óptico de Potência

Composto por cabos elétricos de alta potência e cabo óptico de controle, possui como principais funções a distribuição de energia e comunicação entre unidades de produção. Controla uma ou duas BCS (Bomba Centrífuga Submersa) além de controlar o sistema de separação vertical anular. Monitora o sistema de bombeio multifásico. Este umbilical tem como vantagem a velocidade da resposta, pois o cabo óptico não perde qualidade de sinal com a distância, e é capaz de proporcionar a separação de água e óleo em subsuperfície.

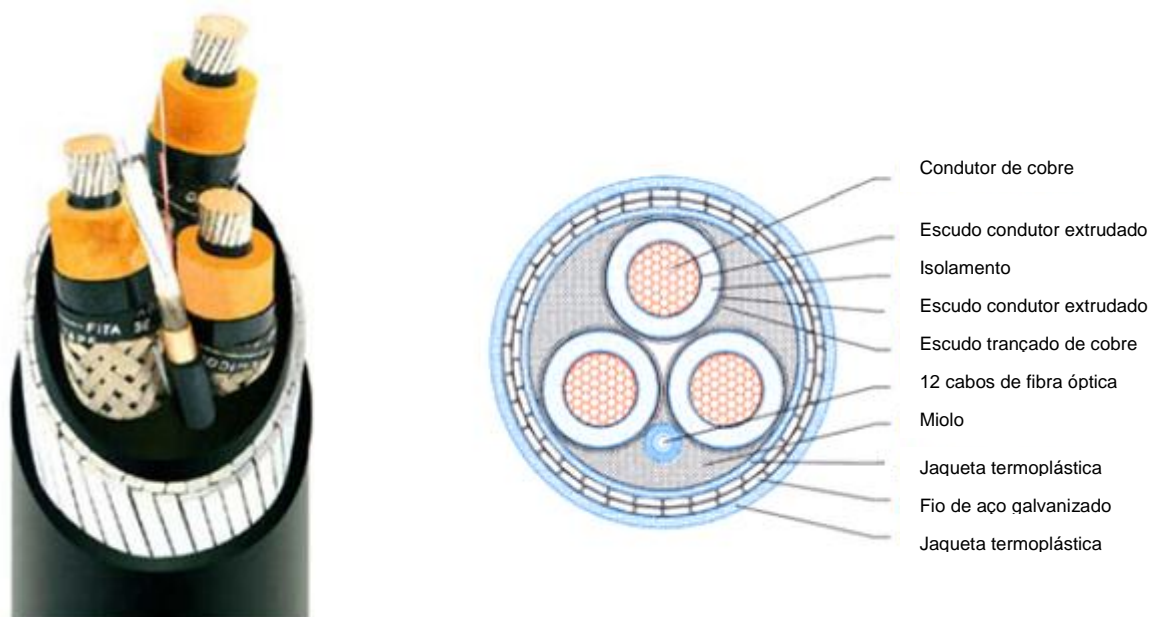


Figura 5: Umbilical Óptico de Potência.

2.2. Falhas em Umbilicais

As falhas em cabos umbilicais podem ocorrer devido a, principalmente, dois fatores: deficiências fabris e deficiências de manuseio. No que diz respeito às deficiências fabris, é responsabilidade do fornecedor o controle do processo e adequação do projeto às suas facilidades fabris. Em relação às deficiências de manuseio, a instalação e a operação dos cabos são de total responsabilidade da empresa operadora.

A Tabela 4 apresenta as principais não conformidades verificadas em umbilicais nos últimos quatro anos de operação da PETROBRAS. As falhas

catalogadas estão divididas entre os principais fornecedores de umbilicais desta empresa, que são chamados neste trabalho de fornecedor A, B e C.

Tabela 4: Principais Não Conformidades Ocorridas em Umbilicais Identificadas em Diferentes Fornecedores (RABELO,2013).

Fornecedor	Principais não conformidades (NC)
A	Trincas na capa externa Ondulações na capa externa Torção em umbilical Vazamento em mangueira
B	Vazamento em mangueira
C	Trincas na capa externa Vestígio de reparo na capa externa seguido e trincas Capa corroída Torção em umbilical Vazamento em mangueira Ruptura de arame na armadura de tração

2.3. Qualificação

Processo de realização de testes com o objetivo de avaliar o desempenho do umbilical frente ao conjunto de carregamentos e das condições de contorno, definidos a partir de sua especificação.

Na qualificação do cabo umbilical são verificadas a convergência entre os valores observados em testes e os valores teóricos calculados pela metodologia do projeto do fornecedor, a representatividade e dispersão dos resultados dos testes, onde diferenças entre amostras não idênticas oriundas das variações dos processos fabris podem apresentar resultados diversos, convergência entre o comportamento observado em teste e aquele presumido pela metodologia de projeto, convergência entre os valores observados no teste e valores históricos, caracterização do modo de falha em testes destrutivos e sequência de eventos até a falha (RABELO,2013).

Os testes de qualificação são padronizados pela API17E, que discrimina os testes de protótipos dos testes de aceitação de fábrica.

Casos antigos e recentes de falhas durante o processo de qualificação, que implicaram em alterações de projeto de umbilicais a serem fornecidos, demonstram que a metodologia de qualificação tem sido capaz de antecipar a maior parte de potenciais problemas relativos ao projeto e aos meios fabris. O projeto de umbilicais, devido à complexidade estrutural das diversas configurações, é feito baseado em regras de projeto estabelecidas a partir da experiência dos fabricantes e de ensaios, não sendo incomum a construção de diversos protótipos para teste (RABELO, 2013).

2.4. Fabricação

A fabricação de cabos umbilicais diz respeito à fabricação dos seus componentes, como mangueiras e cabos, e a montagem do umbilical em si. Sua fabricação segue normas internacionais e as principais etapas estão listadas a seguir.

1. Fabricação de Mangueiras:

- Extrusão do *liner* ou tubo interno em PA11 da mangueira;
- Trançamento da aramida sobre o *liner*;
- Extrusão da capa externa em PU da mangueira.

As mangueiras são testadas com 10000 psi e são encaminhadas para a fabricação de umbilicais.

2. Fabricação de Umbilicais:

- Cabeamento das mangueiras (cheias de água e pressurizadas com 500 psi);
- Extrusão da capa interna em Polietileno de Baixa Densidade;
- Uso da armadora ou armatriz para colocação dos arames das armaduras de tração;
- Extrusão da capa externa em Polietileno de Alta Densidade.

Após estas etapas as mangueiras são submetidas a teste hidrostático em uma determinada pressão de projeto por 6h (RABELO, 2013).

2.5. Instalação

Os cabos umbilicais são lançados ao mar de forma semelhante ao lançamento de *risers* flexíveis através de *Pipe Laying Support Vessels* (PLSVs), que são embarcações que recebem os cabos em carretel e fazem seu lançamento através de tensionadores.

Na instalação, o umbilical fica submetido à solicitações axissimétricas, variações de curvatura e a outras solicitações que são decorrentes do processo de instalação. As solicitações axissimétricas são semelhantes as dos *risers* durante a operação, tais como a tração dinâmica no topo e variações de curvatura no topo e no fundo. Os equipamentos dos PLSVs submetem os tramos à solicitações, que são chamadas genericamente de *crushing loads*.

A compressão radial mínima nos tensionadores é aquela necessária para manter o conjunto suspenso enquanto o mesmo é lançado. É preciso garantir que os tensionadores manterão esse aperto mínimo durante toda a operação de lançamento. E para isso, um valor nominal é ajustado (*required crushing load*) para que este requisito de valor mínimo não seja violado. O valor máximo de carga (*maximum crushing load*) é o dobro da diferença entre a compressão radial nominal e a compressão radial mínima.

De acordo com RABELO, 2013, a compressão radial mínima requerida nos tensionadores é função da tração a ser transferida para os tensionadores, do menor coeficiente de atrito dinâmico entre a capa externa da estrutura e a sapata do tensionador, do comprimento do tensionador e do número de tensionadores que serão efetivamente empregados. E a compressão radial máxima de projeto (*design crushing load*) é dependente da tração atuante, visto que esta tração pode acabar tracionando os arames das armaduras e induzindo o efeito de esmagamento (*squeeze*) nas camadas internas.

A compressão radial a que as seções ficam submetidas durante a passagem nos tensionadores e na roda de lançamento, provoca significativa flexão nos internos do umbilical. Além disso, as armaduras de tração submetem os elementos funcionais à pressão mecânica e os equipamentos induzem ovalizações nas mangueiras. Devido a tais carregamentos, é fundamental o lançamento do umbilical com as mangueiras totalmente cheias de fluido hidráulico para que não ocorram falhas nos cabos.

3. Polímeros

Neste capítulo serão apresentadas as características mecânicas e termomecânicas dos polímeros, conceitos básicos que precisam ser entendidos quando se trabalha com solicitação de cargas em materiais poliméricos, como é o caso das camadas de uma mangueira hidráulica de umbilical submarino.

A mangueira hidráulica possui de três a quatro camadas: a mais interna de Poliamida 11, a(s) intermediária(s) de fibra de aramida (Kevlar®) e a mais externa de Poliuretano. Estuda-se neste trabalho a substituição da Poliamida 11 pelo Viton®. Logo, trabalha-se com quatro polímeros distintos, sendo a Poliamida 11 um termoplástico, o Kevlar® uma fibra, o Viton® e o Poliuretano, elastômeros.

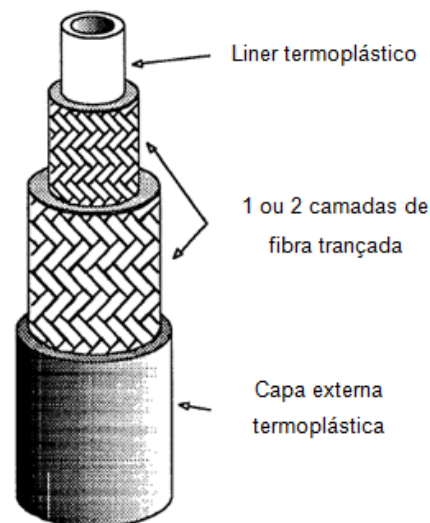


Figura 6: Mangueira Hidráulica de Umbilical Submarino.

3.1. Comportamento Tensão-Deformação

As propriedades mecânicas dos polímeros são caracterizadas pelo modo com que esses materiais respondem às solicitações mecânicas aplicadas, podendo estas últimas ser do tipo tensões ou deformações. A natureza dessa resposta depende da estrutura química, temperatura, tempo e do histórico de processamento do polímero.

Existem vários modos para solicitar um polímero de forma estática, dentre eles: tração, compressão, flexão, cisalhamento, etc. Os ensaios de tração são os mais populares entre todos. Os principais parâmetros que quantificam a resistência mecânica dos polímeros em ensaios tensão-deformação são: módulo de Young ou de

elasticidade, tensão e deformação no escoamento, e a tenacidade. Para ensaios de tração são utilizadas máquina que aplicam carga em um corpo de prova, geralmente retangular no caso de polímeros, e as deformações são quantificadas através de um extensômetro, como é ilustrado abaixo.

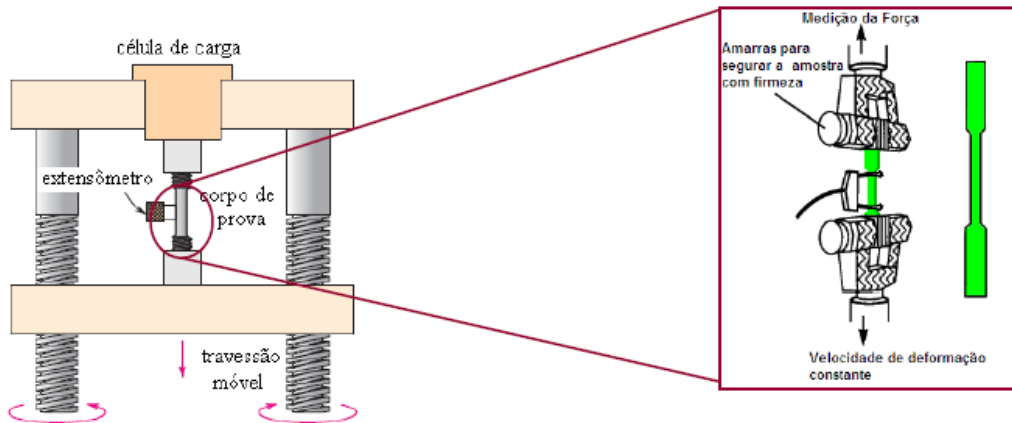


Figura 7: Máquina Utilizada em Ensaio de Tração (DE MIRANDA, 2010)

O comportamento mecânico dos polímeros pode ser facilmente visualizado observando-se a sua curva tensão-deformação. Tipicamente são encontrados três tipos de comportamento, como está representado na Figura 8. A curva *A* ilustra o comportamento tensão-deformação apresentado por um polímero frágil, mostrando que este sofre fratura enquanto se deforma elasticamente. Na curva *B*, material plástico, a deformação inicial é elástica, a qual é seguida por escoamento e por uma região de deformação plástica. Finalmente, a deformação apresentada pela curva *C* é totalmente elástica; essa elasticidade, típica da borracha, é apresentada por uma classe de polímeros conhecida como elastômeros.

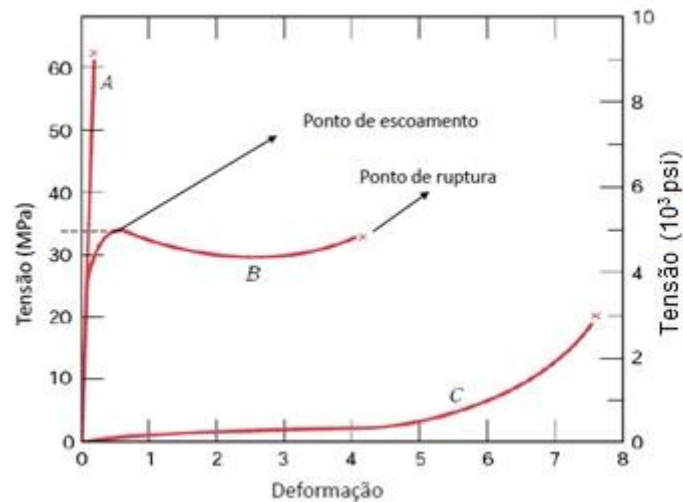


Figura 8: Comportamento Tensão-Deformação para Polímeros Frágeis (Curva A), Plásticos (Curva B) e Elastoméricos (Curva C) (CALLISTER, 2002).

As tensões em qualquer região da curva são calculadas através da razão entre carga ou força e a área da seção transversal do corpo de prova. A tensão é definida como nominal quando a área utilizada para o cálculo de tensão é a inicial (A_0). Por outro lado a tensão é definida como real se a área utilizada no cálculo for a área obtida no instante do registro da carga, ou seja, instantânea (A). Mais explicações sobre tensões nominais e reais serão dadas posteriormente nesse mesmo trabalho.

A deformação é calculada através da relação $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$, onde $\Delta l = l - l_0$, l é o comprimento da região útil do corpo de prova no instante a ser medida a deformação, e l_0 é o comprimento inicial da região útil. O valor de l pode ser obtido por meio do uso de extensômetros, que podem estar perto, mas não tocar a amostra (leitura óptica com infravermelho), ou fixado no próprio corpo de prova (*clip gage*). A tenacidade é obtida integrando a área sob a curva tensão-deformação até a ruptura.

O módulo de Young está diretamente relacionado à rigidez do polímero, ou seja, quanto maior for o valor do módulo, mais rígido será o polímero. Este é obtido, no caso de polímeros plásticos (como a Poliamida 11), como sendo um valor máximo na curva, o que ocorre imediatamente após o término da região elástica linear (Figura 9); a tensão nesse ponto máximo é o limite de escoamento (σ_y). Já o limite de resistência à tração (TS) corresponde ao nível de tensão no qual a fratura ocorre (Figura 9); o TS pode ser maior ou menor que σ_y . A resistência, no caso desses polímeros plásticos, é tomada normalmente como sendo o limite de resistência à tração.

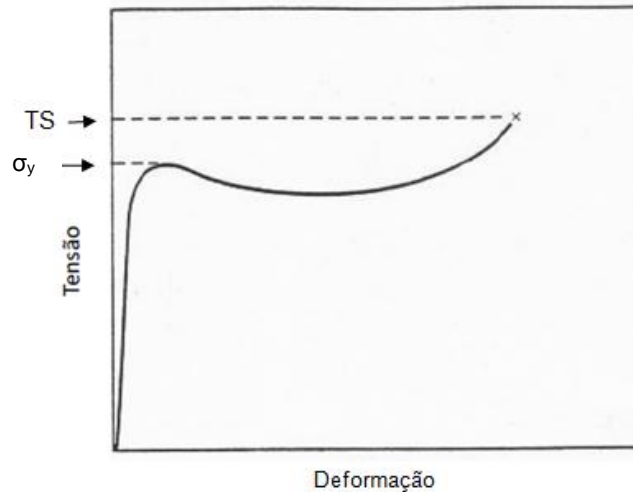


Figura 9: Curva Tensão-Deformação Esquemática de um Polímero Dúctil Mostrando a Determinação Gráfica do Limite de Escoamento (σ_y) e Limite de Resistência Mecânica (TS) (CALLISTER, 2002).

3.1.1. Deformação de Polímeros

Deformação Elástica

O mecanismo da deformação elástica nos polímeros em resposta a tensões de tração é o alongamento das moléculas da cadeia desde as suas conformações estáveis, na direção da tensão aplicada, pela dobra e o estiramento das fortes ligações covalentes presentes na cadeia.

Deformação Plástica

O mecanismo da deformação plástica é melhor descrito pelas interações que existem entre as regiões lamelares e as regiões amorfas intermediárias em resposta à aplicação de uma carga de tração. Esse processo ocorre em vários estágios, mostrados esquematicamente na Figura 10. Duas lamelas com cadeias dobradas adjacentes e o material amorfo interlamelar, antes da deformação, estão mostrados na Figura 10a. Em seguida, as cadeias nas regiões amorfas deslizam umas contra as outras e se alinham na direção do carregamento. Isso faz com que as fitas lamelares simplesmente deslizem umas contra as outras, à medida que as cadeias de ligação dentro das regiões amorfas se estendem. A continuação da deformação no segundo estágio ocorre pela inclinação das lamelas, de modo que as dobras da cadeia ficam alinhadas com o eixo de tração (Figura 10c). Em seguida, segmentos de blocos

cristalinos se separam das lamelas e permanecem presos uns aos outros através de cadeias de ligação (Figura 10e), os blocos e as cadeias de ligação ficam orientados na direção do eixo da força de tração.

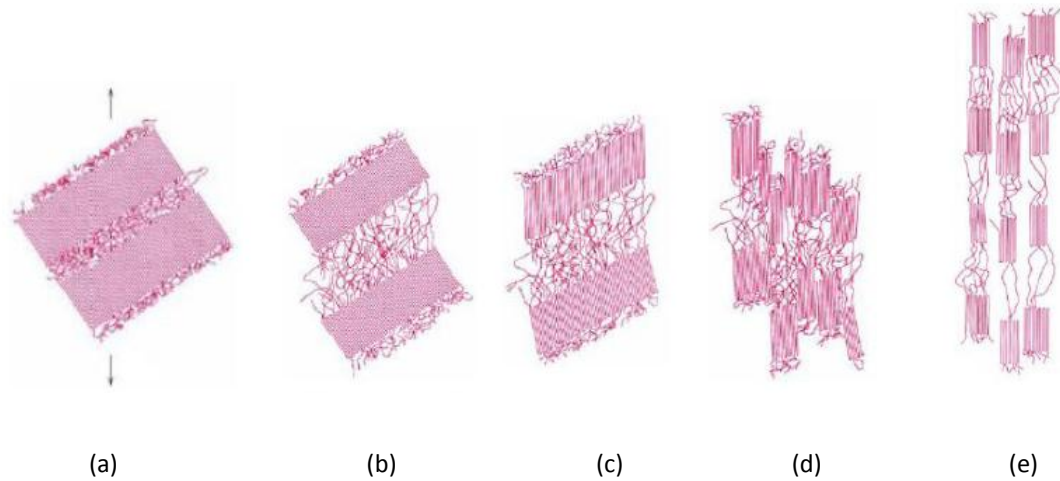


Figura 10: Estágios da Deformação Plástica em Polímeros Semicristalinos (DE MIRANDA, 2010)

Deformação Macroscópica

Estão ilustradas em uma curva tensão deformação de um polímero semicristalino as representações esquemáticas do perfil do corpo de prova durante vários estágios de deformação. Ficam evidentes a partir dessa curva os limites de escoamento superior e inferior, os quais são seguidos por uma região praticamente horizontal. No limite de escoamento superior (ponto 2 na Figura 11), um pescoço se forma na seção útil do corpo de prova. Dentro deste pescoço, as cadeias se tornam orientadas, o que leva a um aumento de resistência localizado. Conseqüentemente, a partir do ponto 3 na Figura 11, existe uma resistência à continuidade da deformação, e o alongamento do corpo de prova prossegue pela propagação desse pescoço ao longo da seção útil. O fenômeno da orientação das cadeias acompanha essa extensão do pescoço. Uma vez que o pescoço é formado, toda deformação subsequente fica confinada no interior dessa região empescoçada.

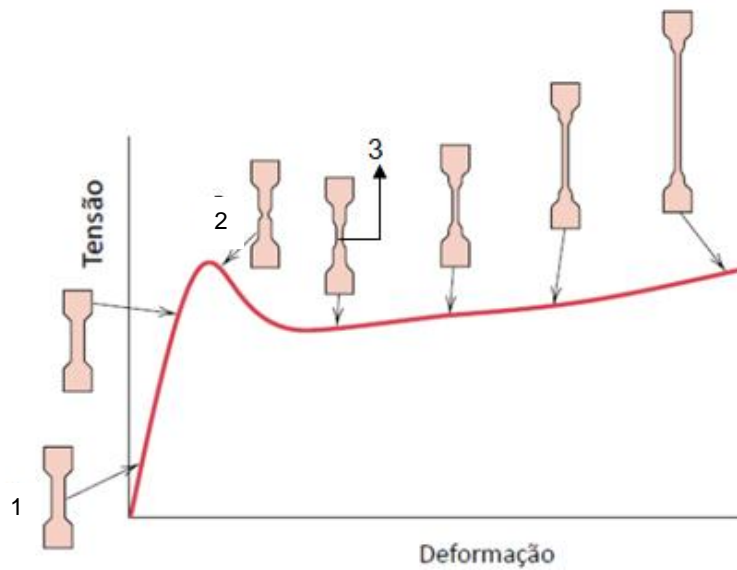


Figura 11: Curva Tensão-Deformação Esquemática de um Polímero Semi-Cristalino Dúctil Apresentando os Vários Estágios de Deformação (DE MIRANDA, 2010).

3.1.2. Fatores que Influenciam as Propriedades Mecânicas dos Polímeros

O comportamento viscoelástico dos polímeros faz com que parâmetros, tais como tempo, temperatura e ambiente, afetem diretamente suas propriedades. As figuras a seguir ilustram a influência de cada parâmetro sobre as curvas tensão-deformação. A Figura 12 evidencia a influência da temperatura num ensaio a tração do acetato de celulose. Pode-se observar que, dependendo da temperatura, o polímero passa de um comportamento totalmente frágil para um totalmente dúctil.

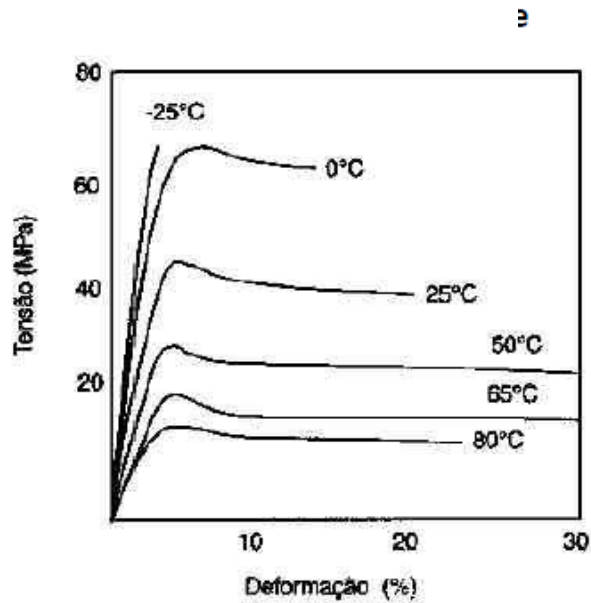


Figura 12: Curvas Tensão-Deformação para o Acetato de Celulose a Várias Temperaturas (CALLISTER, 2002)

A influência do tempo, ou seja, da taxa de deformação sobre as curvas tensão-deformação, pode ser observada na Figura 13, onde o epóxi é submetido a um ensaio de tração a várias taxas de deformação. A tensão de escoamento aumenta linearmente com o aumento do logaritmo da taxa de deformação. Quanto mais rápido é o movimento de deformação, maior é o módulo.

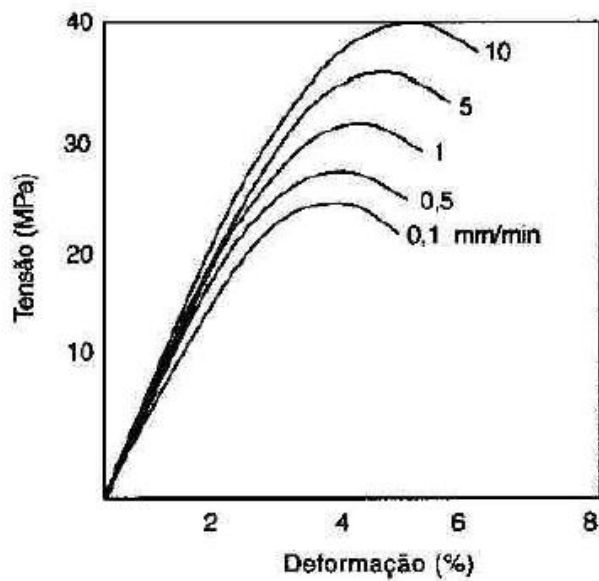


Figura 13: Efeito da Taxa de Deformação nas Curvas de Tração do Epóxi (CALLISTER, 2002).

3.2. Elastômeros

Uma das propriedades mais interessantes dos materiais elastoméricos é a sua elasticidade, que se assemelha a borracha. Isto é, eles possuem a habilidade de se deformarem segundo níveis de deformação muito grandes e em seguida retornam elasticamente, tais como molas, às suas formas originais. As características típicas de tensão-deformação dos materiais elastoméricos são mostradas na Figura 8, curva C. Seus módulos de elasticidade são muito pequenos e, além disso, variam em função da deformação, uma vez que a curva tensão-deformação para esses materiais não é linear.

Em um estado sem tensões, um elastômero será amorfo e composto por cadeias moleculares altamente torcidas, dobradas e espiraladas. A deformação elástica, mediante a aplicação de uma carga de tração, consiste em desenrolar as cadeias apenas parcialmente e, como resultado, alongá-las na direção da tensão, um fenômeno que está representado na Figura 14. Com a liberação da tensão, as cadeias se enrolam novamente de acordo com as suas conformações antes da aplicação da tensão, e a peça macroscópica volta para sua forma original.

A força motriz para a deformação elástica é um parâmetro termodinâmico chamado entropia, que é uma medida do grau de desordem no interior de um sistema; a entropia aumenta quando há um aumento na desordem. À medida que um elastômero é estirado e as cadeias ficam mais retilíneas e se tornam mais alinhadas, o sistema se torna mais ordenado, diminuindo a entropia. Quando a tensão é removida, a entropia irá aumentar, e as cadeias retornarão aos seus estados iniciais, com dobras e em espiral. Dois fenômenos intrigantes resultam desse fenômeno de entropia. Em primeiro lugar, quando esticado, um elastômero experimenta um aumento na sua temperatura; em segundo lugar, o módulo de elasticidade aumenta com o aumento da temperatura, o que é o comportamento contrário ao encontrado nos outros materiais.

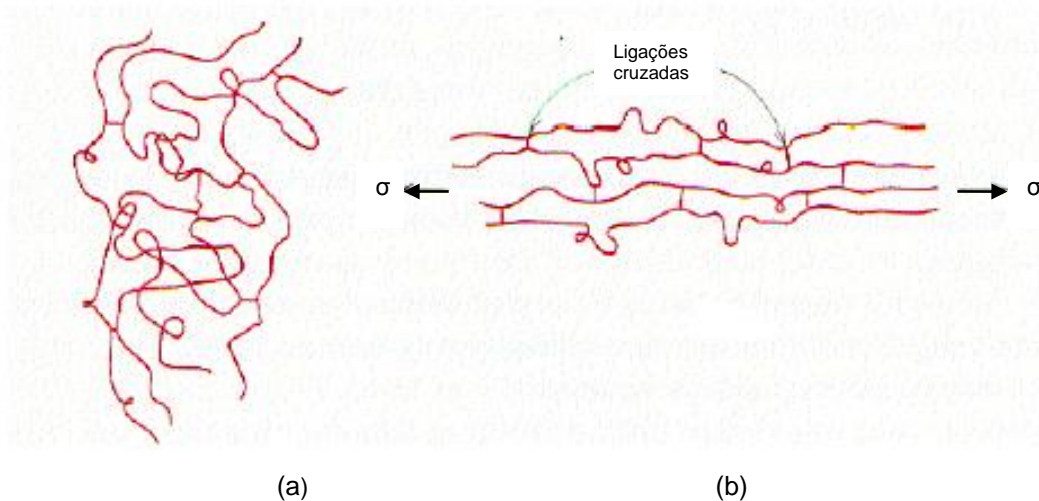


Figura 14: Cadeia de Moléculas de um Elastômero: (a) no Estado Não-Deformado; (b) Deformado Elasticamente em Resposta a uma Tensão (CALLISTER, 2002).

3.2.1. Viton® Fluoroelastômero

Elastômeros sintéticos fluorados são polímeros fabricados para aplicações em temperaturas elevadas e ambientes quimicamente agressivos. Sua composição e peso molecular são cuidadosamente controlados para combinar fácil processamento com propriedades mecânicas, resistência a combustíveis, solventes e estabilidade térmica.

Os fluoroelastômeros são compatíveis com vários meios químicos, como mostrado na Tabela 5. Os dados referentes às propriedades mecânicas básicas, também indicadas na Tabela 5, mostram que Viton®, fabricado pela Du Pont, tem melhor desempenho quando comparado a outros elastômeros em termos de resistência à tração, intervalo de dureza e deformação residual na compressão.

Tabela 5: Comparações das Propriedades¹ dos Elastômeros (DUPONT, Viton® Fluoroelastômero, 2010)

Nome Comum	Nitrílica	Silicone	Fluor-Silicone	Viton®	Kalrez®
Compatibilidade química²					
Óleos lubrificantes e combustível	1	4	1	1	1
Óleos hidráulicos	1	2,3	1	1	1
Fluidos hidráulicos ignífugos	3	3	4	4	1
Óleos vegetais	1	1,3	1	1	1
Gasolina (alto índice de octano)	1,2	4	1	1	1
Querosene	1	4	1	1	1
Hidrocarbonetos Aromáticos	2,4	4	2,3	1	1
Hidrocarbonetos Alifáticos	1	4	2	1	1
Alcoóis	1	2	1,2	1	1
Acetonas	4	4	4	4	1
Solventes halogenados	4	4	1,2	2	2
Água (>80 °C)	1	1	1	1	1
Ácidos concentrados	4	4	3	1,2 ³	1
Ácidos diluídos	3,4	4	3	1	1
Álcalis	2	1,2	2	4	1
Propriedades					
Temperatura máxima de serviço contínuo (°C)	121	204	175	204	327
Temperatura inferior (Tg), em °C.	-25 a -30	-85 a -125	-65	-10	-8
Resistência à tração, MPa	27	10	10	15	15
Dureza	30-90	40-80	55-95	65-95	65-95

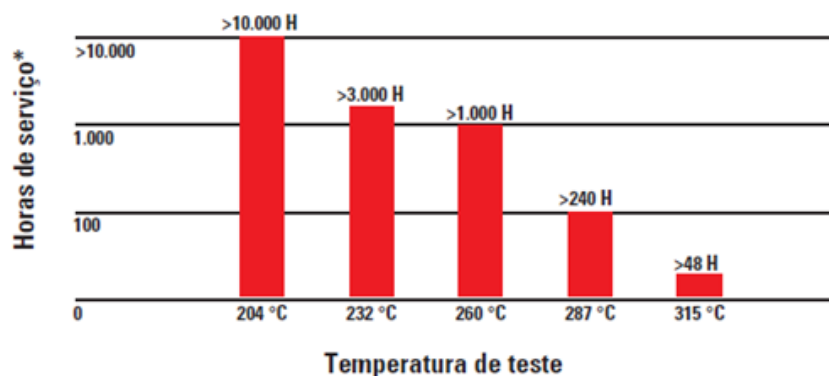
¹Dados obtidos em testes realizados nas instalações da DuPont e outras fontes industriais.

²Interpretação: 1 = Excelente 2= Bom 3= Regular 4= Não Recomendado

³A avaliação depende do tipo.

Os fluoroelastômeros Viton® resistem ao enrijecimento e à fragilização no meio ambiente durante mais de 10.000 horas sob temperaturas de até 204 °C e suportam até 315 °C (Figura 15). O Viton® pode também ser usado em baixas temperaturas. As

aplicações dinâmicas do Viton® funcionaram bem a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ e, em alguns casos, peças de Viton® especificamente projetadas para resistir até $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.



*Número aproximado de horas que uma formulação típica de Viton® manterá 50% de seu alongamento original à ruptura.

Figura 15: Resistência do Viton® ao Calor (DUPONT, Viton® Fluoroelastômero, 2010).

Além disso, o Viton® demonstrou uma boa resistência a fluidos sob temperaturas elevadas. A Figura 16 compara o desempenho de Viton® com outros elastômeros por um teste ASTM D2000/SAE J200 padrão que mede o volume de inchamento em óleo quente. Um inchamento de mais de 30% é geralmente inaceitável.

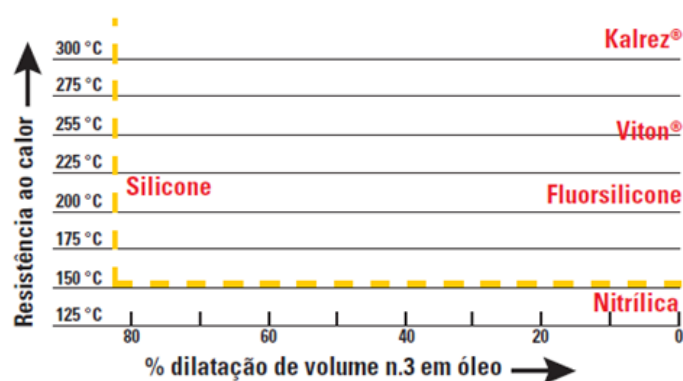


Figura 16: Resistência ao Calor e ao Óleo de Alguns Elastômeros Específicos ((DUPONT, Viton® Fluoroelastômero, 2010)

Além da sua característica de resistir aos fluidos agressivos e às temperaturas elevadas, o Viton® é também recomendado pela sua excelente resistência a permeação, como mostrado na Tabela 6.

Tabela 6: Taxas de Permeabilidade para os Elastômeros Seleccionados e Poliamida 11
(DUPONT, Viton® Fluoroelastômero, 2010)

Material	Combustível a 23 °C	90% Combustível, 10% Etanol	85% Combustível, 15% Metanol	Tolueno a 40 °C
Fluorsilicone	455	584	635	–
Poliamida 11	5,5	24	83	–
Viton® GLT-S	2,6	14	60	–
Viton® AL	0,8	6,7	32	–
Viton® A	0,8	7,5	36	49
Viton® GFLT-S	1,8	6,5	14	–
Viton® B	0,7	4,1	12	–
Viton® GF-S	0,7	1,1	3,0	7

Por fim, a Tabela 7 mostra a comparação entre Viton® e outros tipos de produtos em termos de resistência química e propriedades mecânicas.

Tabela 7: Compatibilidade Química Relativa a Propriedades Mecânicas para os Fluoroelastômeros Viton® (DUPONT, Viton® Fluoroelastômero, 2010)

Ambiente químico	Tipos genéricos de Viton®			Tipos específicos de Viton®				
	A	B	F	GBL-S	GF-S	GLT-S	GFLT-S	ETP-S
Combustíveis para automóveis e aviões	1	1	1	1	1	1	1	1
Combustíveis para automóveis oxigenados com MEOH, ETOH, MTBE, etc	4	2	1	2	1	4	1	1
Óleos de lubrificação de motor	2	1	1	1	1	1	1	1
Fluidos de processo com hidrocarbonetos aromáticos, produtos químicos	2	2	1	1	1	2	1	1
Fluidos de processo com hidrocarbonetos alifáticos, produtos químicos	1	1	1	1	1	1	1	1

Ambiente químico	A	B	F	GBL-S	GF-S	GLT-S	GFLT-S	ETP-S
Fluidos aquosos, vapor	3	2	2	1	1	1	1	1
Base forte, pH elevado, aminas	4	4	4	2	2	2	2	1
Carbonilas de baixo peso molecular a 100% de concentração	4	4	4	4	4	4	4	1
Desempenho na compressão residual e sob baixas temperaturas								
Resistência na compressão residual	1	2	2	2	2	2	2	2
Flexibilidade sob baixa temperatura	2	2	3	2	3	1	1	2

Interpretação: 1 = Excelente 2= Bom 3= Regular 4= Não Recomendado

Os tipos genéricos diferem dos tipos específicos basicamente em termos de resistência química e de flexibilidade em baixa temperatura. O Viton® utilizado nesta pesquisa é o GLT-S.

3.3. Fibras

Uma fibra é um polímero cujas cadeias são estendidas em linha reta (ou quase reta) uma ao lado da outra ao longo de um mesmo eixo. Alguns dos polímeros que podem ser usados como fibras são o Polietileno, Polipropileno, Nylon, Kevlar®, Poliéster etc. As fibras são constituídas por polímeros sempre dispostos em cristais. Eles devem ser capazes de ser empacotados em uma ordem regular, para fins de alinhamento em forma de fibra. Isto se demonstra observando a forma com que, por exemplo, o Nylon 6,6 se empacota formando fibras cristalinas.

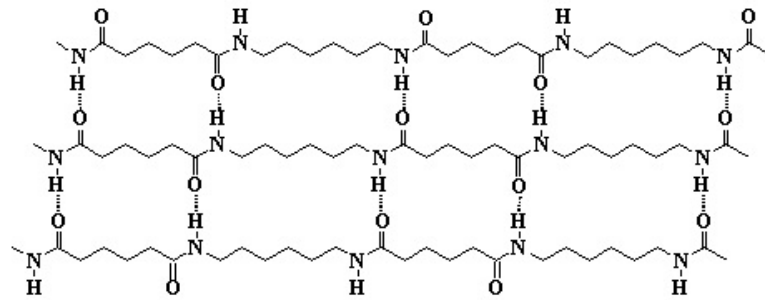


Figura 17: Estrutura Emparelhada do Nylon 6,6 (DE MIRANDA, 2010).

As ligações de hidrogênio e outras interações secundárias mantêm as cadeias ligadas fortemente. Tão forte, que impede que deslizem uma sobre as outras. Isto significa que ao esticar uma fibra de nylon 6,6, ela não se estenderá muito, o que explica por que as fibras são ideais para uso em fios e cordas.

Embora possuam boa resistência à tração, as fibras têm geralmente baixa resistência à compressão. Além disso, as fibras tendem a ser resistentes apenas na direção na qual são orientadas. Se puxarmos em ângulo reto com a direção de sua orientação, por exemplo, tendem a enfraquecer.

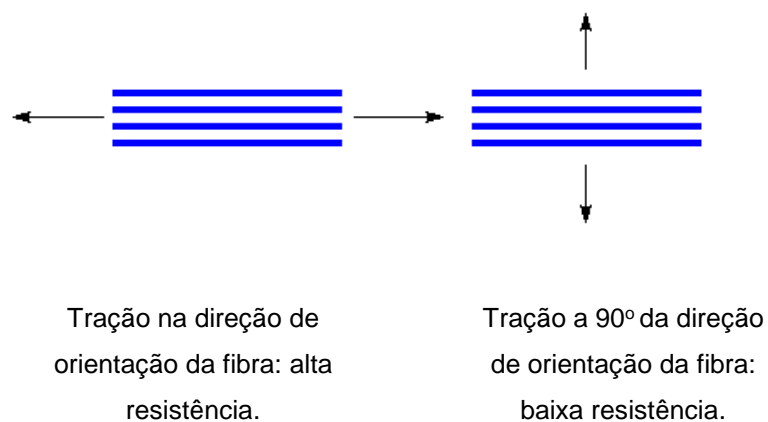


Figura 18: Esforços de Tração na Direção de Orientação e a 90° deste.

Por apresentarem tais características, é comum misturar as fibras na matriz de outros materiais poliméricos. Esse efeito é conhecido como “reforçamento por adição de fibras”, e é muito utilizado comercialmente para melhorar o desempenho mecânico de polímeros. Considerando-se que a distribuição de esforços ou tensões em uma matriz polimérica é uniforme em todos os seus pontos, a presença de uma segunda fase dispersa nessa matriz também sentirá a solicitação aplicada ao conjunto. Se o módulo de elasticidade dessa segunda fase for mais alto que o da matriz, o resultado

final será um aumento nas propriedades mecânicas do composto, principalmente o módulo de elasticidade e a resistência ao escoamento ou ruptura.

Fabricação de Fibras

A maioria das fibras manufaturadas são criadas por extrusão, que resume-se em obrigar um fluido espesso e viscoso a passar através de pequenos orifícios de um dispositivo chamado fiação, para formar filamentos contínuos de polímeros. Inicialmente o polímero está no estado sólido, logo, deve ser convertido ao estado líquido para sofrer a extrusão. Isto se consegue normalmente pela fusão do polímero através do fornecimento de calor ao material, ou por dissolução de solvente adequado. Se não puderem ser fundidos ou dissolvidos diretamente, devem ser tratados quimicamente para formar derivados solúveis ou termoplásticos. Tecnologias recentes vêm sendo desenvolvidas e hoje é possível fabricar fibras de polímeros especiais que não se fundem, não se dissolvem ou não formam derivados adequados.

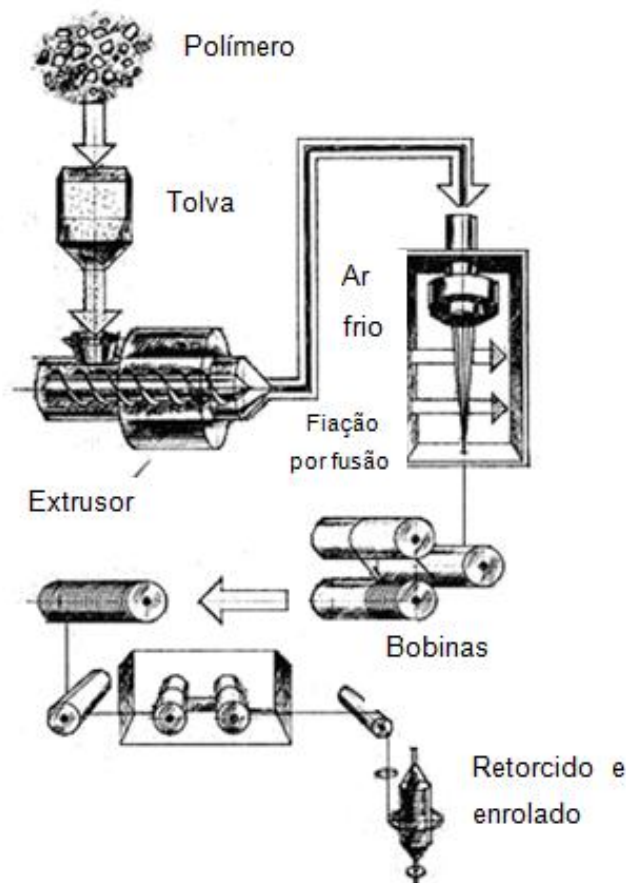


Figura 19: Fiação por fusão (DE MIRANDA, 2010).

A Fieira

As fieiras são utilizadas na produção da maioria das fibras manufaturadas e, em princípio, são semelhantes a uma cabeça de chuveiro. Uma fieira pode ter de um a centenas de orifícios. As pequenas aberturas da fieira são muito sensíveis a impurezas e corrosão. O fluido que passa por elas deve ser cuidadosamente filtrado e, em alguns casos, a linha deve ser feita de metais com alta resistência à corrosão. A manutenção também é um fator crítico, e as fieiras devem ser removidas e limpas regularmente para evitar o entupimento.

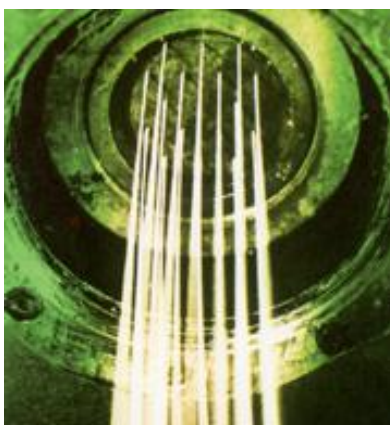


Figura 20: Fieira.

À medida que os fios saem dos orifícios da fieira, o polímero líquido se converte em uma espécie de goma e então se solidifica. Este processo de extrusão e solidificação de filamentos contínuos é chamado de fiação.

Medição de Fibra

- **Denier**

O Denier é a unidade de medida do Sistema Inglês da densidade linear de massa de fibras. Define-se como a massa em gramas por cada 9000 metros de fibra. Divide-se em dinier de filamento e dinier total. Ambos se definem como o dito acima, porém o primeiro (conhecido como Denier Por Filamento, ou DPF), se refere unicamente a um filamento, enquanto o outro se refere à aglomeração de filamentos. Uma fibra geralmente é considerada como microfibras se é de 1 denier ou menos.

- **Tex**

O Tex é outra unidade de medida utilizada para medir a densidade ou a massa linear de uma fibra. Define-se como a massa expressa em gramas por 1000 metros de fibra. O Tex se emprega habitualmente no Canadá e na Europa, enquanto nos Estados Unidos é mais comum o emprego do Denier.

3.3.1. **Kevlar® Fibra de Aramida**

O Kevlar® da Du Pont é uma fibra orgânica da família das poliamidas aromáticas. As propriedades singulares e a composição química diferenciada dessa família distinguem as poliamidas aromáticas (aramidas) – e, de maneira especial, o Kevlar® – das outras fibras comerciais fabricadas pelo homem. De maneira única, o Kevlar® combina alta resistência, elevado módulo, tenacidade e estabilidade térmica. Atualmente, vários tipos de Kevlar® são produzidos para satisfazer uma ampla gama de utilizações finais. Dentre essas utilizações se destaca a trança de Kevlar® responsável por promover a resistência à tração e torção da mangueira hidráulica de umbilical submarino.

Na metade dos anos 60, o nylon e o poliéster representavam os maiores avanços em termos de fibras sintéticas. Contudo, para que se pudesse obter maior tenacidade (resistência à tração) e módulo inicial, as moléculas de polímero tinham que estar em uma configuração de cadeia estendida e em embalagens cristalinas quase perfeitas. No caso dos polímeros de cadeia flexível - como o nylon e o poliéster - isso só era possível estirando-se a fibra depois da fiação em fusão. Esse método, por sua vez, exigia o desembaraçamento e a orientação da cadeia na fase sólida, o que fazia com que os níveis de tenacidade e módulo ficassem muito aquém dos valores teoricamente possíveis. Em 1965, os cientistas da Du Pont criaram um novo método para produzir uma extensão de cadeia polimérica quase perfeita. Descobriu-se que o polímero poli-p-benzamida formava soluções líquidas cristalinas devido à simples repetição de sua base molecular. A principal condição estrutural da base molecular é a orientação paralela no anel benzênico, que permite a formação de estruturas moleculares parecidas com bastões. Estes avanços abriram caminho para formulação atual do Kevlar®.

Desenvolvem-se então, com orientação aleatória, cadeias de polímero altamente orientadas internamente. As soluções poliméricas cristalinas líquidas apresentam um comportamento único no cisalhamento. E à medida que a solução

passa por um orifício, os domínios orientados de maneira aleatória ficam inteiramente orientados na direção do cisalhamento e emergem com uma orientação molecular quase perfeita. A estrutura supramolecular é quase inteiramente preservada na estrutura do filamento fiado devido ao relaxamento lento da orientação induzida pelo cisalhamento. Este processo é uma maneira inovadora, de baixa energia, de orientar moléculas poliméricas e obter fibras muito fortes. A Du Pont utilizou esta tecnologia para desenvolver uma fibra poli-para-fenileno tereftalamida, lançada como Kevlar® fibra de aramida de alta resistência, em 1971.

Abaixo são mostradas algumas das propriedades do Kevlar®, cedidas pela Du Pont. A fibra utilizada neste trabalho é a Kevlar®29.

Tabela 8: Propriedades do Kevlar® (DUPONT, Kevlar® Fibra de Aramida).

Propriedade	Unidade	KEVLAR®29	KEVLAR®49
Fio			
Tipo	Denier - (Tex)	1.500 - (1.670)	1.140 - (1.270)
	Nº de filamentos*	1.000	768
Densidade	lb/in ³ - (g/cm ³)	0,052 - (1,44)	0,052 - (1,44)
Propriedades de Tração Testes em fios condicionados**			
Resistência à ruptura	Lb - (N)	76,0 - (338)	59,3 - (264)
Tenacidade à ruptura	g/d - (cN/tex)	23,0 - (203)	23,6 - (208)
	psi - (MPa)	424.000 - (2.920)	435.000 - (3.000)
Módulo de tração	g/d - (cN/tex)	555 - (4.900)	885 - (7.810)
	psi - (MPa)	10,2 x 10 ⁶ - (70.500)	16,3x10 - (112.400)
Elongação na ruptura	%	3,6	2,4
Taxa de Poisson	_____	0,36	0,31

* O diâmetro do filamento é 0,00047 polegadas (12 microns).

** ASTM D885-58, testado em multiplicador de torção 1.1.

4. Revisão Bibliográfica

Este capítulo está dividido em duas partes. Na primeira serão apresentados conceitos básicos relevantes ao presente estudo, que serão utilizados no entendimento dos métodos experimental e numérico apresentados posteriormente. Na segunda parte, serão apresentados trabalhos com temas semelhantes ao do presente estudo que serviram como motivação para a realização deste.

4.1. Conceitos

4.1.1. Colapso

O fenômeno conhecido como colapso ocorre devido ao gradual aumento de um carregamento compressivo, que gera o encurtamento da estrutura até que se alcance um limite em que ocorre uma redução brusca da rigidez à compressão, e a instabilidade manifesta-se com a flambagem da estrutura. No caso de “casca cilíndricas” (mangueiras), a aplicação de pressão externa gera instabilidade (ou colapso), manifestada pelo aumento gradual de ovalização induzida pelas imperfeições residuais da casca cilíndrica (como um vinco).

A resistência estrutural é formada pela combinação de tensões de membrana e de flexão que, a partir de determinado carregamento crítico induzem queda de rigidez da mangueira, que se ovaliza e tende ao colapso, conforme Figura 21.

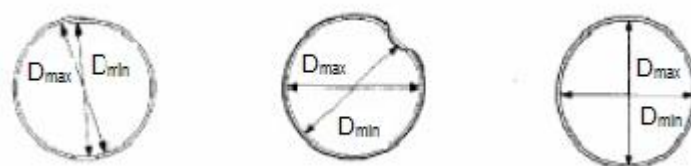


Figura 21: Ovalização com a Diferença entre Valores de Diâmetros Máximos e Mínimos.

4.1.2. Tensão Verdadeira e Deformação Logarítmica

Quando as curvas tensão-deformação são definidas pela divisão do carregamento longitudinal aplicado ao corpo de prova pela área da seção transversal inicial, são ditas curvas tensão-deformação nominais (ou de engenharia). Para maiores informações do comportamento tensão-deformação, divide-se o carregamento

aplicado longitudinalmente pela área transversal a cada instante de tempo ao longo do teste de tração uniaxial. Esta constitui a definição de tensão verdadeira.

De acordo com FRANÇA, 2010, para pequenas deformações, a deformação de engenharia e a deformação logarítmica são essencialmente idênticas. Já para grandes deformações, os valores diferem significativamente e devem ser expressos quanto à deformação verdadeira e tensão verdadeira. No programa de elementos finitos que será utilizado na parte da análise numérica do presente trabalho, são utilizados valores verdadeiros, e não de engenharia. Normalmente, as curvas de material são fornecidas a partir de valores de engenharia da tensão e deformação. Então, para o ensaio de tração uniaxial deste estudo, os valores de deformação de engenharia foram convertidos em deformação logarítmica a partir da equação (1), e os valores de tensão de engenharia em verdadeira, a partir da equação (2).

$$\varepsilon_{ln} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (1)$$

$$\sigma_{verdadeira} = \sigma(1 + \varepsilon_{ln}) \quad (2)$$

4.1.3. Método Modificado de Riks

A análise estrutural de mangueiras hidráulicas trata-se de um problema não linear. A partir de um programa de elementos finitos, foi utilizado o Método Modificado de Riks, também conhecido por método do comprimento do arco (*arc-length*). O método consiste em fixar um plano ortogonal ao plano tangente à curva carga-deslocamento para resultar em uma equação adicional na determinação do incremento de carga e de deslocamento.

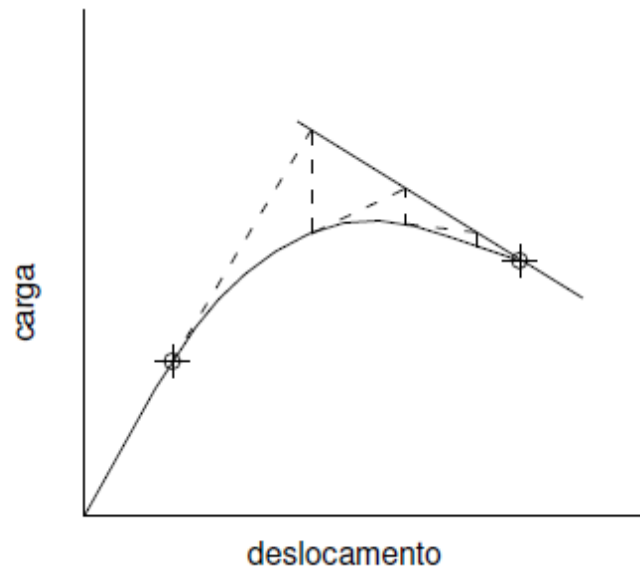


Figura 22: Método do Comprimento do Arco de Riks (STRAMONDINOLI, 2007).

Na Figura 22 observa-se as etapas iterativas, onde se varia a pressão, neste caso, e o deslocamento para se alcançar um novo ponto de equilíbrio em cada etapa incremental. Até o início do escoamento o material apresenta um comportamento linear, logo, nesta etapa o incremento pode ser grande ou mesmo único, até que o primeiro elemento escoe. No decorrer da análise elasto-plástica, o incremento de carga ótimo tende a diminuir, porque a cada incremento mais elementos se plastificam, ocorrendo assim grande aumento das deformações na não-linearidade geométrica. Ocorre então o colapso plástico quando a análise não converge mais, mesmo para aumento da carga em incrementos pequenos.

Segundo FRANÇA, 2010, na implementação desse método a carga aplicada é representada por uma carga de referência, pré definida no programa, e por um fator de multiplicação desta carga. Assim, o vetor de cargas utilizado é dado por:

$$\{F\} = \Delta\lambda \{F_{ref}\} \quad (3)$$

A partir da Figura 23 é possível visualizar os incrementos de carga e os deslocamentos associados de acordo com a equação (3) dada.

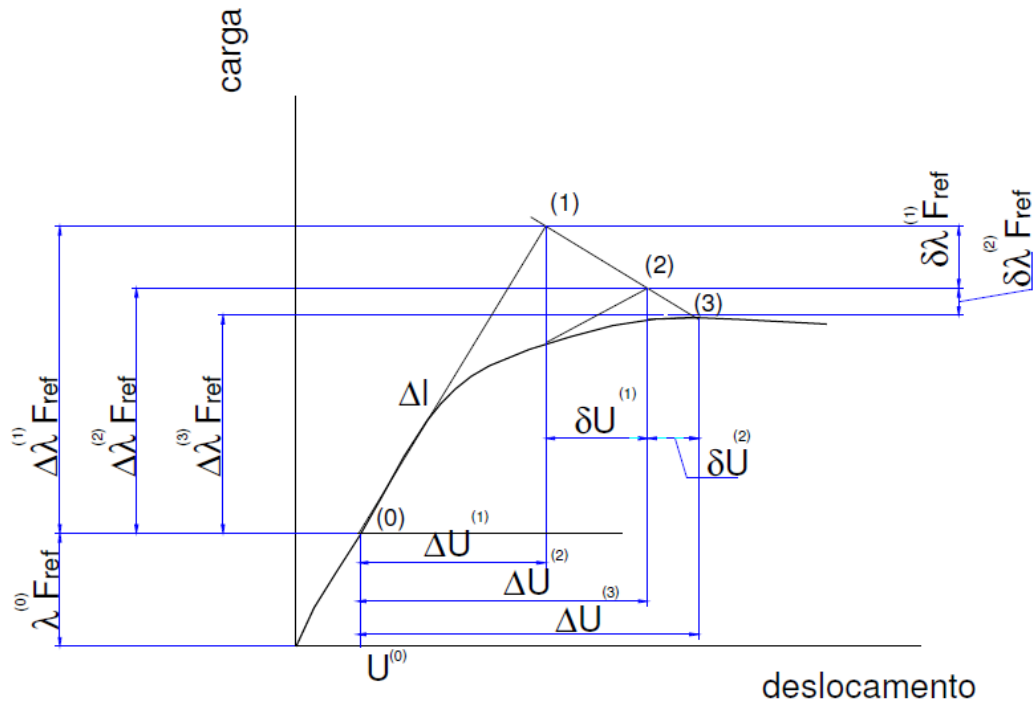


Figura 23: Incrementos de Carga e o Deslocamento Associado a partir do Método do Comprimento de Arco (STRAMONDINOLI, 2007).

4.1.2 Critérios de Resistência de Von Mises

Na prática de engenharia os critérios de resistência são usados no cálculo das tensões equivalentes (σ_{eq}). Dois dos critérios mais usados são: Von Mises e Tresca. O critério de resistência utilizado neste trabalho é o da máxima energia de distorção de Von Mises, dada pela equação (4). Este critério considera que o escoamento do material ocorre quando a energia de deformação de distorção atinge o valor máximo medido no teste uniaxial de tração. Logo, segundo o critério de Von Mises, a análise de resistência da mangueira está baseada na comparação do limite de escoamento do material com a máxima tensão de Mises obtida na superfície da mangueira (FRANÇA, 2010).

$$\sigma_{eq-VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (4)$$

4.1.3 Leis Constitutivas de Hiperelasticidade

Hiperelasticidade refere-se a uma resposta derivável da energia potencial elástica livre das moléculas que é tipicamente utilizada para materiais que sofrem uma deformação elástica grande. Aplicações de elastômeros como borracha vulcanizada e polímeros sintéticos, juntamente com alguns materiais biológicos, muitas vezes se enquadram nesta categoria.

Uma lei constitutiva de material é dita hiperelástica se é definida como função da energia de deformação. Os modelos constitutivos hiperelásticos são definidos em função da densidade de energia de deformação, visto que não atingem a plasticidade e assim, não podem ser definidos através da relação linear $\sigma = E\varepsilon$. Antes de detalhar as diferentes formas de energia potencial de deformação, alguns termos devem ser definidos:

O alongamento é definido como: $\lambda = \frac{L}{L_0} = \frac{L+\Delta u}{L_0} = 1 + \varepsilon$

O exemplo acima é de um alongamento definido para a tensão uniaxial de uma borracha, onde ε é a deformação de engenharia.

Os três alongamentos principais são λ_1, λ_2 e λ_3

Os três invariantes de deformação comumente utilizados para definir a densidade de energia de deformação são:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2$$

Onde λ_i s são os alongamentos principais (deformações). Note que I_3 é uma constante volumétrica e, no contexto de incompressibilidade, é sempre igual a unidade, ou seja:

$$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$$

A taxa volumétrica J é definida como: $J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = \frac{V}{V_0}$

A energia potencial de deformação é usualmente denotada por W , e pode ser função direta das deformações ou dos invariantes de deformação.

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \quad \text{ou} \quad W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$$

Devido à incompressibilidade do material, divide-se os termos da função energia de deformação em diferenciais e volumétricos. Entende-se por deformação diferencial (do inglês, *deviatoric strain*) como uma condição onde os componentes de deformação operando em um ponto do corpo não são os mesmos em todas as direções. Como o corpo é incompressível, o termo volumétrico é função apenas da taxa volumétrica J .

$$W = W_d(\bar{I}_1, \bar{I}_2) + W_b(J)$$

$$W = W_d(\bar{\lambda}_1, \bar{\lambda}_2, \bar{\lambda}_3) + W_b(J)$$

Onde os alongamentos principais diferenciais e invariantes diferenciais são definidos para $p=1,2,3$ como:

$$\bar{\lambda}_p = J^{-1/3} \lambda_p \quad \text{e} \quad \bar{I}_p = J^{-2/3} I_p$$

Ressalta-se que $I_3 = J^2$, logo I_3 não é usado na definição de W .

Formas particulares para a energia potencial de deformação (W):

RIVLIN, 1948, obteve um modelo genérico de energia de deformação para materiais hiperelásticos incompressíveis, comumente chamado como o Modelo Polinomial, que toma a seguinte forma:

$$W = \sum_{i+j=1}^N c_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{k=1}^N \frac{1}{d_k} (J - 1)^{2k}$$

O trabalho mais recente de MOONEY, 1940, também pode ser expresso em termos da equação acima, resultando no que é geralmente aceito hoje como o modelo de Mooney-Rivlin. Tal modelo, com 5 parâmetros, é similar ao Modelo Polinomial quando $N=2$ e foi utilizado no presente trabalho para a caracterização do elastômero Viton®.

$$W = \sum_{i+j=1}^2 C_{ij}(\bar{I}_1 - 3)^i(\bar{I}_2 - 3)^j + \frac{1}{d}(J - 1)^2$$

O módulo de *bulk* e o módulo de cisalhamento, tanto para o Modelo Polinomial quanto para o modelo de Mooney Rivlin, são calculados da seguinte maneira:

$$\mu_0 = 2(C_{10} + C_{01})$$

$$k_0 = \frac{2}{d}$$

4.2. Trabalhos Relacionados

4.2.1. Trabalho de R.R. Jakeman e P.H. Knight

Em projeto de mangueiras termoplásticas, JAKEMAN, KNIGHT, 1995, desenvolveram um modelo analítico de mangueira de fibra reforçada que foi usado no desenvolvimento do projeto de mangueiras de 15.000 psi (1035 bar) de pressão de trabalho. O modelo reuniu algumas das vertentes de pesquisas e um trabalho paralelo no campo de materiais compósitos. O estudo focou as teorias por trás da camada de reforço, da estruturação dos fios, tipo de deposição dos fios quando trançados ou espiralados e outras considerações.

Para modelar o comportamento da mangueira proposta foi adotada a teoria de BRIEG, 1988, válida para mangueiras com múltiplas camadas de reforço trançadas ou em espiral. A principal simplificação deste modelo se refere à exclusão dos efeitos da ondulação da fibra no trançado e das forças de atrito geradas nestes pontos. O modelo analítico calcula tensões e deformações na camada de reforço e no tubo principal, mas não leva em conta os *end fittings* ou a região de transição entre estes e a mangueira. É criado um modelo básico da mangueira que descreve tanto as mangueiras trançadas quanto as espiraladas através das equações de equilíbrio axial, lateral e torsional. Assume-se também que o material do tubo principal é incompressível, com volume constante e mesmo deslocamento axial.

4.2.2. Trabalho de L. Legallais, M. Stratfold e J. Hardy

De acordo com LEGALLAIS, STRATFOLD, HARDY, 1993, um problema comum em mangueiras termoplásticas de umbilicais submarinos, é a capacidade que alguns fluidos e gases tem de atravessar as camadas da mangueira. Apesar da taxa de permeação ser pequena, em grandes distâncias, um volume significativo de fluido acaba sendo perdido. Os pesquisadores basearam sua pesquisa em um fluido comumente injetado nos poços, o metanol. Um novo material, baseado em polietileno reticulado, foi desenvolvido com objetivo de substituir o material usado atualmente pela indústria para a camada mais interna da mangueira.

Sabendo que a camada interna da mangueira, o *liner*, é feito de Poliamida 11 ou Poliéster Termoplástico, e que para esses materiais o metanol apresentava taxas de permeação variando com a temperatura de 150 a 5 g.m²/(mm.dia) para o Poliéster, e 190 a 13 g.m²/(mm.dia) para a Poliamida 11, LEGALLAIS, STRATFOLD, HARDY,1993, desenvolveram um grau específico de HDPE (*High Density Polyethylene*) que, quando reticulado, recebeu o nome de Ducoflex®, um tipo de XLPE (*Cross Linked Polyethylene*). Tal material é aplicável para o transporte de metanol e pode ser o substituto da Poliamida11 ou do Poliéster Termoplástico também para vários outros fluidos que operem em uma temperatura de até 90°C.

Ao ser reticulado, o HDPE aumenta ligeiramente suas características mecânicas mas, além disso, aumenta drasticamente sua resistência ao colapso e sua resistência química aos hidrocarbonetos fluidos ou gasosos. A Figura 24 ilustra a curva de tensão do HDPE reticulado. Podemos observar suas características mecânicas em comparação com as de outros polímeros na Tabela 9.

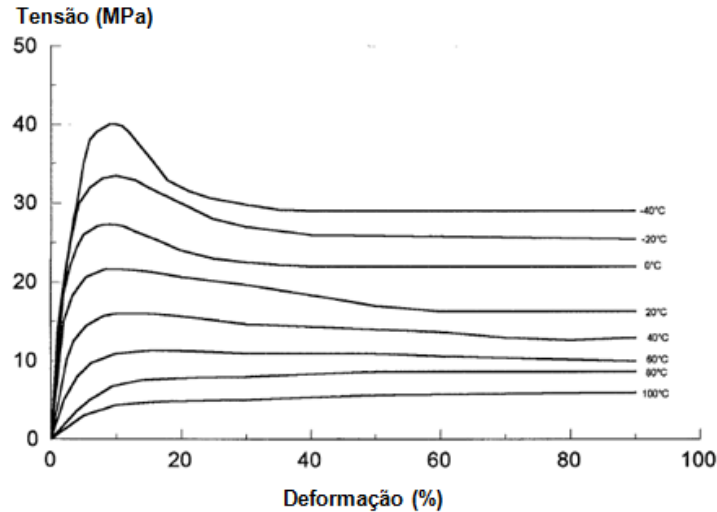


Figura 24: Curva de Tensão do Ducoflex® (LEGALLAIS, STRATFOLD, HARDY, 1993).

Tabela 9: Comparação entre as Propriedades Mecânicas de Polímeros (LEGALLAIS, STRATFOLD, HARDY, 1993).

Propriedades	Unidade	ASTM	HDPe	XLPe	PA 11	Poliéster
Densidade específica	Kg/dm ³	D 792	0,946	0,95	1,05	1,22
Tensão na ruptura	MPa	D 638	30	30	50	41
Alongamento na ruptura	%	D 638	>350	250	350	420
Módulo de elasticidade	MPa	D 790	700	800	300	300
Resistência à luz solar			Boa	Boa	Boa	Boa
Resistência a ácidos fracos		D 543	Muito boa	Muito boa	Muito boa	Muito boa
Resistência a ácidos fortes		D 543	Depende do ácido	Depende do ácido	Fraca	Fraca
Resistência a bases fortes		D 543	Muito boa	Muito boa	Boa	Fraca
Resistência a óleo cru sem água			Até 60°C	Até 90°C	Até 100°C	Boa
Resistência à água			Até 60°C	Até 90°C	Até 70°C	Fraca
Resistência ao metanol			Até 60°C	Muito boa	Até 50°C	Fraca

O Ducoflex® foi extrudado para formar um tubo, que foi reforçado com aramida e coberto com polímero para reproduzir uma mangueira de um umbilical convencional. O Ducoflex® teve sucesso em testes hidrostáticos padrões em mangueiras, de acordo com a norma SAE J343d para mangueiras com pressão de trabalho de até 10000 psi. São eles: testes de impulso (200000 ciclos até 133% da pressão de trabalho a uma temperatura de 93 °C); vazamento (70% da pressão mínima de colapso por 5 min); colapso (mínimo de quatro vezes na pressão de trabalho) e alongamento ($\pm 2\%$ na pressão de trabalho).

Para avaliar a performance do Ducoflex® no que diz respeito à permeação de metanol, LEGALLAIS, STRATFOLD, HARDY, 1993, fizeram testes com amostras de mangueiras submergidas em uma banheira de água conectada a um reservatório de metanol em pressão constante e com monitoramento de temperatura. A banheira foi preenchida com água destilada, que era analisada em intervalos para avaliar o nível de metanol na água. Este nível está diretamente relacionado a penetração do metanol na mangueira. A partir dos resultados obtidos foi possível comparar a taxa de penetração do metanol no Ducoflex® e em outros materiais usados comumente pela indústria. E observando a Figura 25, percebemos que o Ducoflex® tem uma taxa de penetração bastante reduzida se comparado à Poliamida11 ou ao Poliéster Termoplástico.

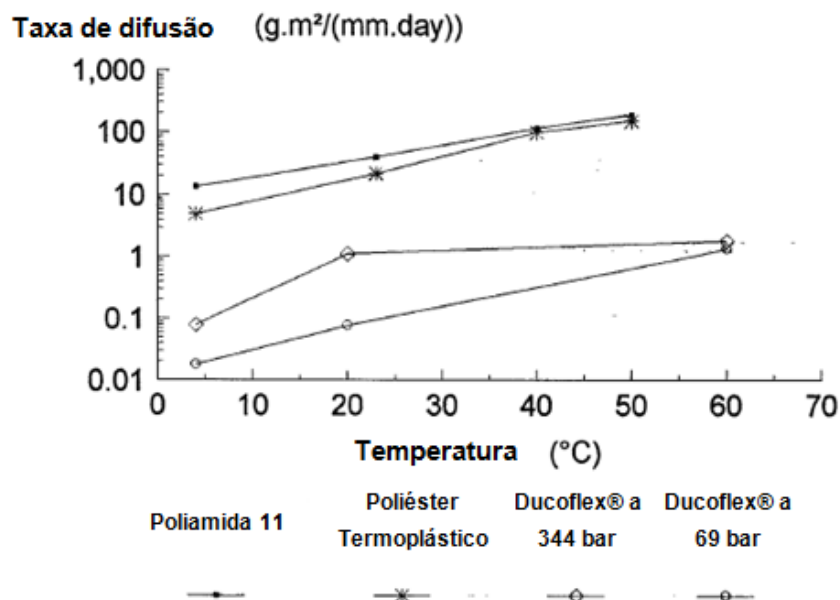


Figura 25: Penetração do Metanol versus Temperatura (LEGALLAIS, STRATFOLD, HARDY, 1993).

4.2.3. Trabalho de J.D. Stables e I.R. Dodge

Historicamente, para prever a vida útil de materiais termoplásticos de mangueiras de umbilicais submarinos, são feitos testes de imersão de amostras em um fluido de serviço em elevadas temperaturas. Porém, esse método de teste não leva em consideração a natureza anisotrópica e o histórico de processamento do *liner* termoplástico, além da possibilidade de instabilidade do fluido de serviço ao decorrer dos anos. STABLES, DODGE, 1993, fizeram um trabalho sobre os aspectos históricos de testes de compatibilidade e discutiram as razões para a mudança nesse método de teste.

A compatibilidade pode ser definida como a capacidade de dois ou mais líquidos ou gases coexistirem em contato um com o outro sem nenhum impacto na performance do umbilical durante sua vida útil. É fundamental que exista um alto nível de compatibilidade entre o material do *liner* e o fluido de trabalho, de modo que seja alcançada a vida útil estimada no projeto do umbilical, tipicamente 20 anos. STABLES, DODGE, 1993, focaram sua pesquisa em materiais alternativos para composição do *liner* da mangueira evidenciando que a pesquisa deve avançar além das propriedades mecânicas do material.

O fenômeno de compatibilidade é dependente de tempo e temperatura. Quanto maior a temperatura, invariavelmente menor o tempo antes da incompatibilidade torna-se evidente. Isto é particularmente importante para as linhas hidráulicas instaladas em climas mais quentes ou armazenadas sob luz solar direta. Frequentemente, cabos umbilicais são revestidos com polímeros termoplásticos pretos tais como o polietileno ou poliuretano, que quando exposto à luz solar, podem atingir temperaturas internas superiores a 600°C (1400°F). Em tais circunstâncias, qualquer incompatibilidade será evidenciada mais cedo do que em uma linha hidráulica instalada no fundo do mar.

Outro fator que influencia diretamente na vida útil do *liner* termoplástico, é o processo de fabricação desse *liner*, que é comumente extrudado. No processo de extrusão, o material do *liner* é forçado contra uma matriz com um auxílio de um pino para a redução do diâmetro, o que pode levar o *liner* a exibir propriedades anisotrópicas. Além disso, durante sua vida útil, o *liner* fica em contato com a camada de aramida, e acaba sendo forçado contra esse trançado, resultando em algum fluxo de material por entre o trançado. O que pode acarretar em variações nos níveis de tensão ao redor da circunferência da mangueira e ao longo do comprimento do *liner*.

STABLES, DODGE, 1993, defendem que devido ao comportamento anisotrópico apresentado por alguns materiais, o método de teste com as amostras convencionais imersas em um fluido de serviço em pressão atmosférica não é o mais ideal e realístico para os *liners* termoplásticos. Em seu trabalho, imergiram amostras de *liners* extrudados e, ao invés de medir o alongamento até a ruptura como uma função do tempo, a pressão de colapso do *liner* foi monitorada com o tempo. O alongamento até a ruptura foi usado para determinar o tempo de meia vida do *liner* (tempo necessário para as propriedades de tensão caírem a 50% dos seus valores iniciais).

O tempo de meia vida dos materiais usuais para fabricação do *liner*, incorporados e testados como parte de uma mangueira hidráulica com fluido de controle a base água, são mostrados na tabela a seguir. E para possibilitar a comparação entre esses testes e os testes usuais, o tempo de meia vida para os mesmos materiais, com o mesmo fluido de controle a base água porém testados com as amostras convencionais, são mostrados na mesma tabela.

Tabela 10: Tempo de Meia Vida para a Poliamida 11 e o Poliéster Termoplástico (STABLES, DODGE, 1993).

Fluido de controle	Poliamida 11				Poliéster Termoplástico			
	Temperatura do teste				Temperatura do teste			
	40	70	95	110	40	70	95	110
A	Não reagente. Mais de 2 anos e três meses.	Não reagente. Mais de 1 ano.	106 dias	19 dias	Não reagente. Mais de 2 anos e três meses.	26 dias	18 dias	5 dias
B	Não reagente. Mais de 2 anos e três meses.	120 dias	-	127 dias	Não reagente. Mais de 2 anos e três meses.	22 dias	28 dias	6 dias
C	Não reagente. Mais de 2 anos e três meses.	Não reagente. Mais de 1 ano.	-	84 dias	300 dias	12 dias	9 dias	3 dias

Como resultado dos testes, é esperado para a Poliamida11, que ela preserve a compatibilidade química e resista aos níveis de tensão impostos ao *liner*. E foi mostrado por STABLES, DODGE, 1993, que a vida útil da Poliamida11 ultrapassa 20 anos para temperaturas até 40°C.

4.2.4. Trabalho de A.S. Rabelo

Segundo RABELO, 2013, objetivando diagnosticar as principais causas de falhas em umbilicais instalados em poços produtores, a PETROBAS realizou um trabalho que incluía relatórios de instalação e inspeção da empresa, publicações de outras operadoras e consulta aos fabricantes dos umbilicais de modo a catalogar as principais não conformidades ocorridas nesse produto.

Dentre as falhas catalogadas destacam-se:

- (a) Trincas na Capa Externa dos Umbilicais
Nucleação e propagação de trincas no Polietileno de alta densidade (PEAD).
- (b) Ondulações nos Umbilicais – sinuosidades
Perda da funcionalidade dos componentes internos devido a distribuição de tensões não uniforme durante a passagem pelos tensionadores dos PLSVs.
- (c) Torções em Umbilicais
Torção do umbilical gerando perda de balanceamento do mesmo.
- (d) Deslocamento da capa externa em PEAD – capa corrida
Deslocamento da capa externa propiciando exposição das armaduras de tração.
- (e) Ruptura de arame da armadura de tração
Ruptura de arame na região de solda de emenda de fabricação.

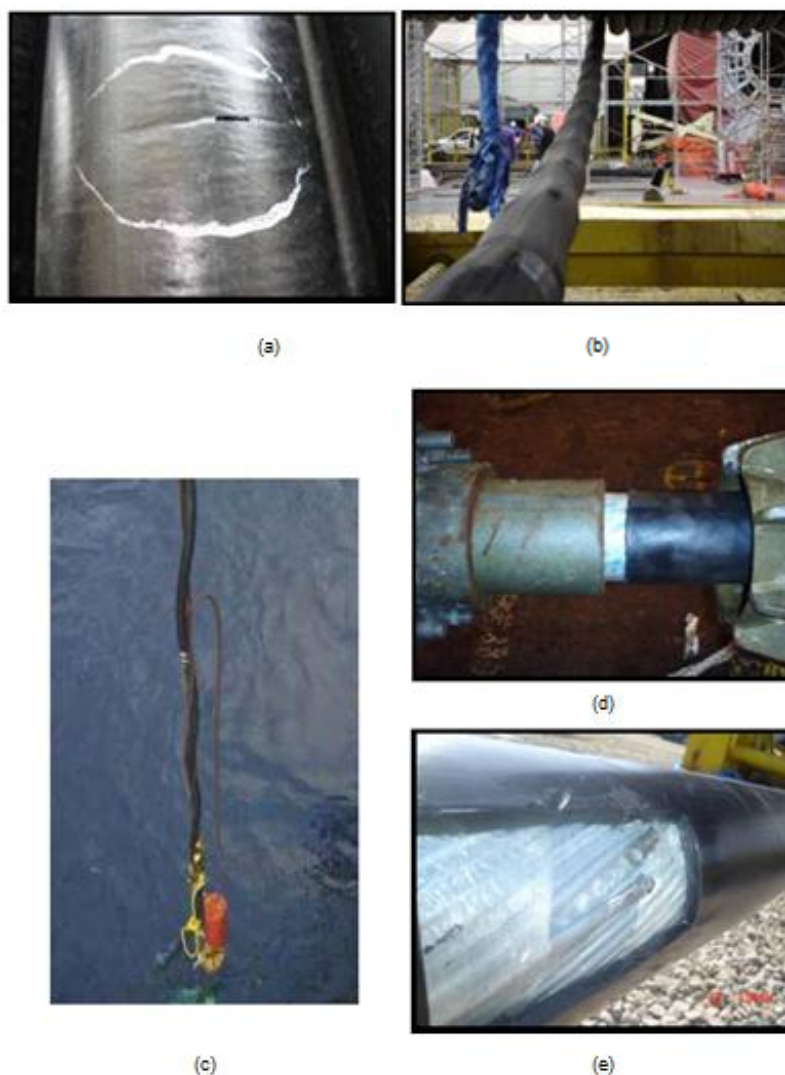


Figura 26: Falhas em umbilicais: (a) Trincas na Capa Externa dos Umbilicais; (b) Ondulações nos Umbilicais; (c) Torções em Umbilicais; (d) Deslocamento da Capa Externa em PEAD; (e) Ruptura de Arame da Armadura de Tração (RABELO, 2013).

Todas as falhas descritas acima têm como causas para a ocorrência deficiências fabris, de manuseio, de controle de processo e de adequação do projeto às facilidades fabris do fornecedor.

Já os problemas originados por deficiências de manuseio, instalação e operação a cargo da PETROBRAS, estão intimamente ligados às falhas das mangueiras dos umbilicais. As mangueiras podem ser de controle hidráulico ou de injeção de produtos químicos, são feitas de material termoplástico e apresentam problemas inerentes a sua concepção. Dentre as características intrínsecas dos umbilicais constituídos por mangueiras termoplásticas, a resistência limitada ao colapso aparece como a possível principal causa para as falhas ora vivenciadas.

Como explicado no Capítulo 4, Item 4.1.1, o colapso manifesta-se pelo aumento gradual de ovalização induzida pelas imperfeições residuais na casca cilíndrica (um vinco). Tal vinco acaba levando a mangueira ao colapso e à falha do umbilical.

Em função da limitação da resistência ao colapso das mangueiras termoplásticas, que é da ordem de 150 a 200 psi, estabeleceu-se como condição determinante e premissa de projeto que a instalação em quaisquer profundidades seja feita com as mangueiras totalmente preenchidas com fluido hidráulico, ou seja, não pode haver presença de ar. A presença de ar (ou outro fluido compressível), possibilita o aparecimento de vincos e as deformações (ovalização) que resultam nas falhas das mangueiras.

Segundo RABELO, 2013, baseada nas investigações realizadas, a PETROBRAS elaborou duas hipóteses para o problema de colapso em mangueiras:

1. Suposição de que a causa da formação da imperfeição no corpo da mangueira (vinco) seja unicamente a aplicação de uma pressão externa excessiva;
2. Suposição de que a formação desta imperfeição seja uma conjugação da pressão externa e a ausência de fluido de trabalho na mangueira.

Estas duas hipóteses serviram como base para a empresa realizar testes que procuraram reproduzir as falhas ocorridas em campo.

5. Método dos Elementos Finitos

Este capítulo é dedicado à explicação do método matemático utilizado pelo software ANSYS para simular o modelo proposto. O método de elementos finitos (MEF) foi escolhido por ser uma ferramenta largamente utilizada na indústria, sem grandes limitações ou dificuldades de aplicação, além de apresentar um histórico de ótimos resultados.

O método dos elementos finitos trata-se de um método matemático para a solução de equações diferenciais parciais, como as equações de Poisson e Laplace. O método é baseado na seguinte premissa: toda função contínua, seja ela de temperatura, pressão ou deslocamento, pode ser aproximada por um modelo composto de um conjunto de funções contínuas (dentro de um intervalo) definidas

sobre um número finito de subdomínios, denominados por elementos finitos (SEGERLIND, 1976). O método de elementos finitos possibilita que o projetista tenha bastante flexibilidade na aplicação de cargas e condições de contorno, o que torna este método o mais amplamente utilizado para análises estruturais.

O processo de análise por Elementos Finitos é esquematizado na Figura 27.

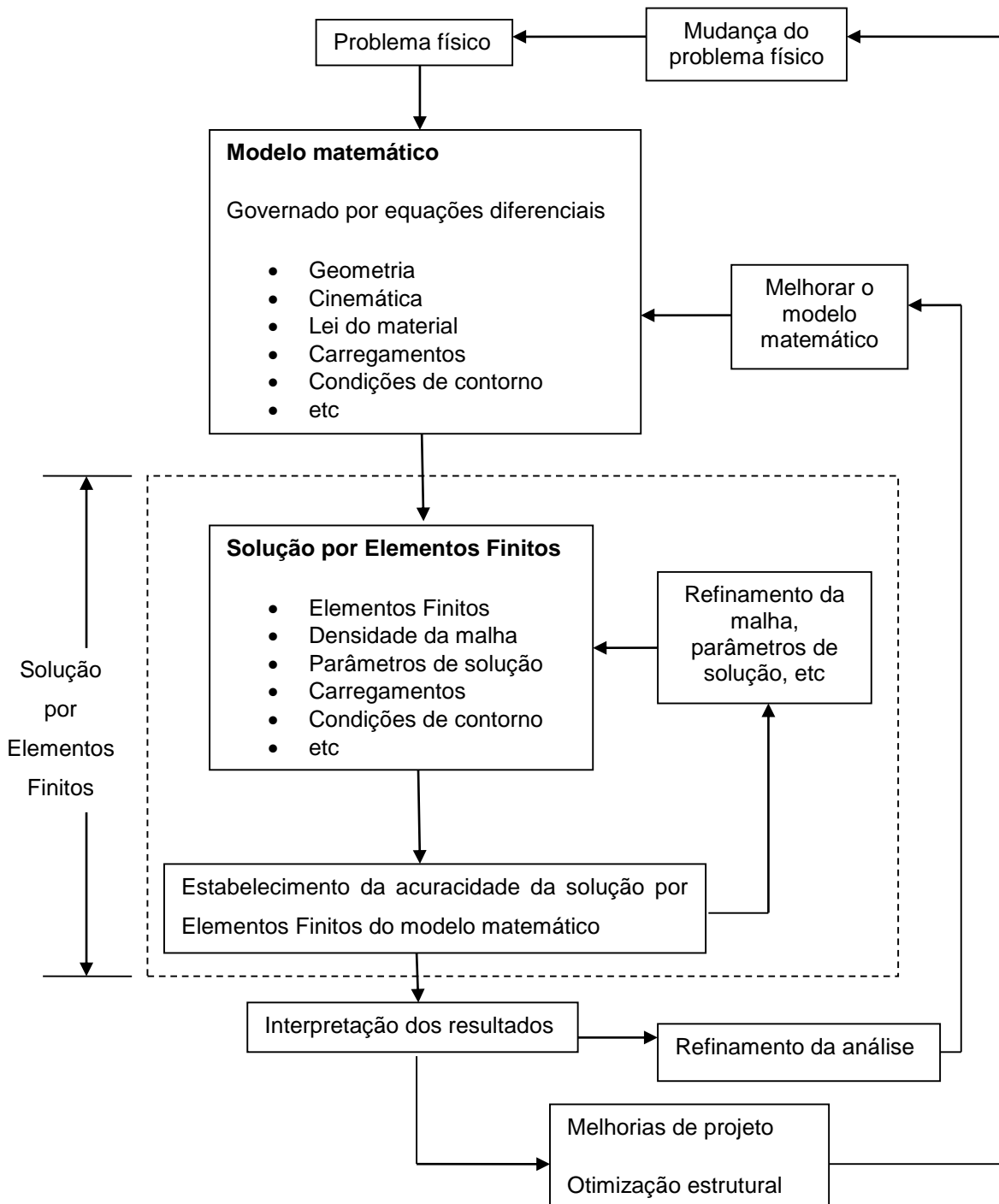


Figura 27: Processo de análise por Elementos Finitos (BATHE, 1996).

O MEF pode ser resumido em três etapas: pré-processamento, solução e pós-processamento.

De acordo com HUEBNER, 1982, temos:

Pré-processamento

Etapa onde se prepara o problema que será solucionado. Modela-se o fenômeno, introduzem-se condições iniciais e de contorno, carregamentos, escolhe-se os elementos e propriedades dos materiais. Esta etapa se subdivide em:

1. **Discretização do modelo:** O modelo é dividido em um número equivalente de elementos finitos, os quais podem ser triângulos ou quadriláteros para problemas em duas dimensões ou tetraedros e hexaedros para problemas em três dimensões. Os elementos possuem nós, os quais podem ser internos ou externos ao elemento. Assume-se que os elementos são interligados entre si por nós localizados no contorno dos mesmos (os deslocamentos desses nós são as incógnitas básicas do problema).
2. **Seleção das funções de interpolação:** De acordo com o tipo de elemento escolhido, existem funções de interpolação ou deslocamento associadas classicamente aceitas. As funções assumidas representam a distribuição dos deslocamentos. Geralmente, a forma adotada para as funções de interpolação é a polinomial.

Solução (Solver):

Esta etapa depende da configuração do modelo na etapa anterior. A solução baseia-se num algoritmo numérico que objetiva solucionar eficientemente uma equação diferencial com todas as restrições impostas ao modelo na primeira etapa. Esta etapa se subdivide em:

1. **Obtenção da matriz de rigidez elementar:** A matriz de rigidez é constituída pelos coeficientes das equações de equilíbrio derivadas das propriedades geométricas e do material de um elemento e pode ser obtida pelo princípio da mínima energia potencial. A rigidez relaciona os deslocamentos nodais as forças aplicadas nos nós. A relação de equilíbrio entre a matriz de rigidez $[K]$, o vetor força nodal $\{F\}$ e o vetor deslocamento nodal $\{u\}$ é expressa como um conjunto de operações algébricas lineares simultâneas, $\{F\}=[k]\{u\}$. A matriz de

rigidez para um elemento depende da função de interpolação, da geometria do elemento e das propriedades locais do material selecionadas na etapa anterior.

2. **Montagem das equações algébricas para todo o domínio:** Inclui a montagem da matriz rigidez global para todo o modelo a partir das matrizes de rigidez dos elementos e do vetor força global a partir dos vetores de força dos elementos. A base para um método de montagem é a existência das interconexões nodais. Os deslocamentos em um nó devem ser os mesmos para todos os elementos adjacentes.
3. **Soluções para os deslocamentos desconhecidos:** As equações algébricas montadas no passo anterior são resolvidas para os deslocamentos desconhecidos. Em problemas lineares, esta é uma aplicação relativamente direta das técnicas de álgebra linear. Porém, em problemas não lineares, as soluções desejadas são obtidas por uma sequência de passos, cada qual envolvendo a modificação da matriz rigidez e/ou do vetor força.
4. **Cálculo das deformações e tensões nos elementos a partir dos deslocamentos nodais:** em alguns casos, os deslocamentos nodais são as variáveis em estudo. Porém, muitas vezes, outras quantidades derivadas das variáveis desconhecidas, tais como tensões e deformações devem ser calculadas.

Pós-Processamento

Esta última etapa do Método dos Elementos Finitos depende da necessidade do engenheiro que está modelando o problema. Pode fornecer dados como deslocamentos nodais, deformações na geometria, gradientes de tensão, gradientes de temperatura, frequências naturais e modos de vibração da estrutura.

6. Modelos Numéricos

Foram desenvolvidos modelos numéricos utilizando o software comercial ANSYS versão 13.0, que utiliza o método dos elementos finitos explicado no Capítulo 5. Tais modelos visam estudar o comportamento de uma mangueira termoplástica convencional sob condição de carregamento de pressão interna e pressão externa. Em um primeiro momento a mangueira se encontra vazia no leito marinho, sofrendo carregamento apenas por pressão externa devido à coluna d'água. Em um segundo

momento, a mangueira se encontra preenchida com fluido hidráulico, sofrendo assim um carregamento combinado de pressão externa e interna.

Neste capítulo são mostrados os dois modelos numéricos desenvolvidos. O primeiro em três dimensões e o segundo, em duas dimensões. Os dois modelos foram usados, um como complemento do outro, para a caracterização da mangueira. Os arquivos de geração desses modelos foram totalmente parametrizados para permitir a realização de estudos de avaliação de resistência estrutural em função de variações na geometria da mangueira.

6.1. Modelo Numérico em Três Dimensões

O modelo recomendado para a realização das simulações para uma mangueira de três camadas seria o modelo tridimensional (3D) representando o comprimento total da mangueira. Porém, a quantidade de memória necessária para a realização das simulações de um modelo tridimensional de uma mangueira hidráulica com quilômetros de comprimento é completamente inviável, uma vez que a quantidade de memória necessária para o processamento computacional seria elevadíssima.

Por esse motivo, optou-se pela realização de análises de trechos curtos da mangueira de apenas alguns centímetros de comprimento, as quais foram submetidas a diferentes carregamentos e análises. Uma possibilidade é realizar as simulações para uma parcela da mangueira que possa representar o comprimento total da mangueira de interesse. Essa parcela é determinada pelo trecho da mangueira que se repetirá ao longo do seu comprimento. Como os materiais das camadas interna e externa (Poliamida 11 e Poliuretano, respectivamente) se comportam da mesma maneira em todas as direções e por todo o comprimento da mangueira, o parâmetro determinante para escolher o trecho a ser analisado foi o passo de giro do trançado de Kevlar®. O comprimento horizontal de um passo do trançado da fibra de Kevlar® representa um trecho da mangueira que se repetirá ao longo do seu comprimento. Assim, as simulações podem ser realizadas nesse trecho e propagadas para o comprimento total da mangueira.

6.1.1. Geometria do Modelo

A mangueira termoplástica possui três camadas com geometrias distintas. A camada mais interna, de Poliamida 11, e a mais externa, de Poliuretano, foram modeladas como cilindros concêntricos respeitando o valor do raio e da espessura de cada camada. Já a camada intermediária, de aramida, foi modelada a partir de um trançado de cabos visando respeitar a característica fibrosa do material.

Observando uma amostra da mangueira percebeu-se que para o trançado de Kevlar®, tínhamos doze cabos fazendo um movimento de sobe e desce formando um trançado firme e totalmente fechado. Cada cabo é formado por milhares de filamentos de espessura microscópica (12 microns). A mangueira dissecada com a camada de Kevlar® exposta é mostrada na Figura 28.



Figura 28: Trançado da Camada de Aramida.

Para modelar a camada de aramida optou-se por gerar cabos paralelos que fizessem uma helicoidal em uma direção e o mesmo número de cabos que fizessem esse movimento na outra direção. E ao se cruzarem, teríamos dois nós sobrepostos, um pertencente a cada cabo. Fundiu-se então esses nós sobrepostos de modo a simular um trançado capaz de responder aos carregamentos impostos de forma similar ao trançado real.

Além de dimensões básicas de diâmetro e espessura das camadas, o arquivo parametrizado permite, para a camada de Kevlar®, definir o número de passos, valor de cada passo, o número de cabos em cada direção, número de nós em um cabo e os espaçamentos horizontal e vertical entre os cabos. Portanto, todas as dimensões das camadas podem ser trabalhadas.

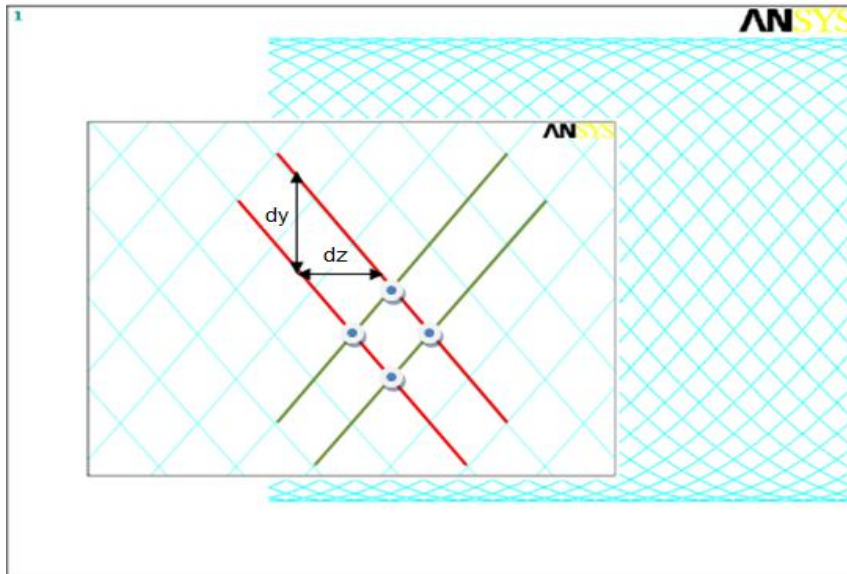


Figura 29: Geometria da Camada de Aramida.

Na Figura 29 os cabos em vermelho representam os cabos que fazem um movimento helicoidal no sentido anti-horário. E os cabos em verde representam todos os cabos que fazem a helicóide no sentido horário. Os pontos em azul representam os nós que foram fundidos, representando todos os nós que se encontravam sobrepostos quando os cabos em sentidos contrários se cruzavam. Os incrementos dy e dz mostrados na figura são parametrizados da seguinte forma:

$$dy = \frac{360 * npassos}{numnos - 1} \quad e \quad dz = \frac{passo * npassos}{numnos - 1}$$

Onde:

$npassos$ = número de passos a ser simulado;

$numnos$ = número de nós em um cabo;

$passo$ = valor do passo

Para a atual análise foram utilizados dois passos ($npassos=2$), com 30 mm cada um ($passo = 30$) e 18 cabos em cada direção ($ncabos=18$), totalizando 36 cabos.

Valores de raio, espessuras e passo foram tirados da amostra da mangueira a partir de medições em laboratório. Como dito anteriormente, o número de fios nesta amostra era de 6 em cada direção. Porém, para uma melhor simulação, cada grupo de três cabos no modelo representará um fio na mangueira real, assumindo que um fio é formado por milhares de filamentos de espessura microscópica.

A Figura 30 mostra a geometria das três camadas.

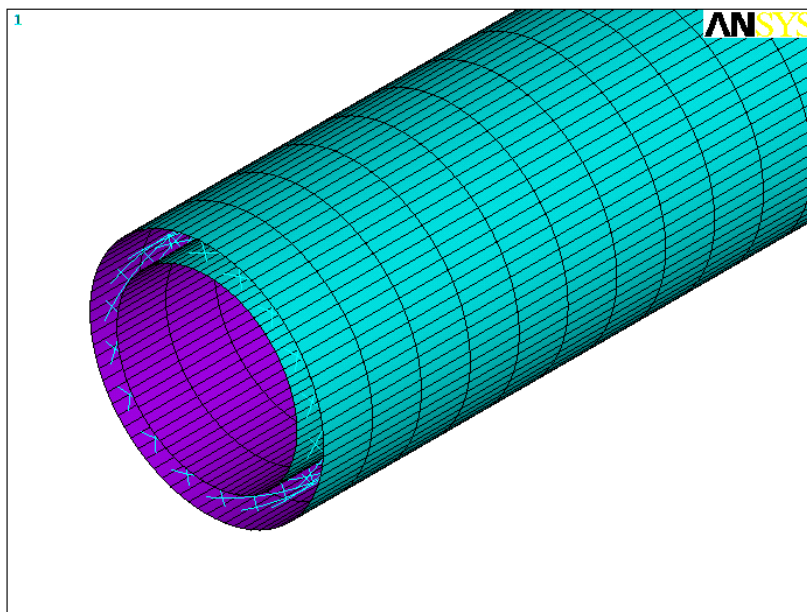


Figura 30: Geometria das Três Camadas.

6.1.2. Malha e Superfície de Contato

As malhas de elementos finitos foram desenvolvidas a partir de elementos de casca tridimensionais para as camadas de Poliamida 11 e Poliuretano, SHELL63, e elementos de cabo para a camada de aramida, LINK180. O elemento de casca SHELL63 é um elemento de quatro nós e seis graus de liberdade em cada nó: translação nas direções x, y e z e rotação através dos eixos x, y e z. Optou-se por tal elemento por ser adequado para a análise de estruturas de espessura de casca moderadamente fina e, além disso, é ideal para aplicações de grandes deformações.

As Figuras 31 e 32 apresentam as malhas das três camadas da mangueira, onde estão representadas apenas os elementos sólidos. Os elementos de contato, que são necessários à aplicação de carregamento, serão mostrados adiante.

Os modelos foram gerados segundo um sistema de referência global cartesiano onde o eixo z corresponde à direção longitudinal, e os eixos x e y, às direções transversais à geratriz do cilindro. O refinamento da malha também é parametrizado, podendo ser alterado a qualquer momento pelo programador.

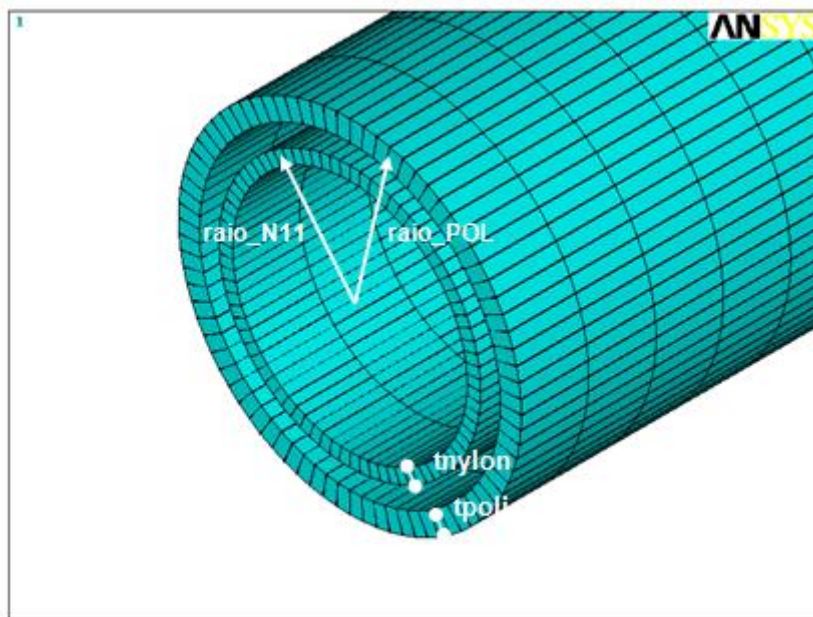


Figura 31: Malha das Camadas de Poliamida11 e Poliuretano.

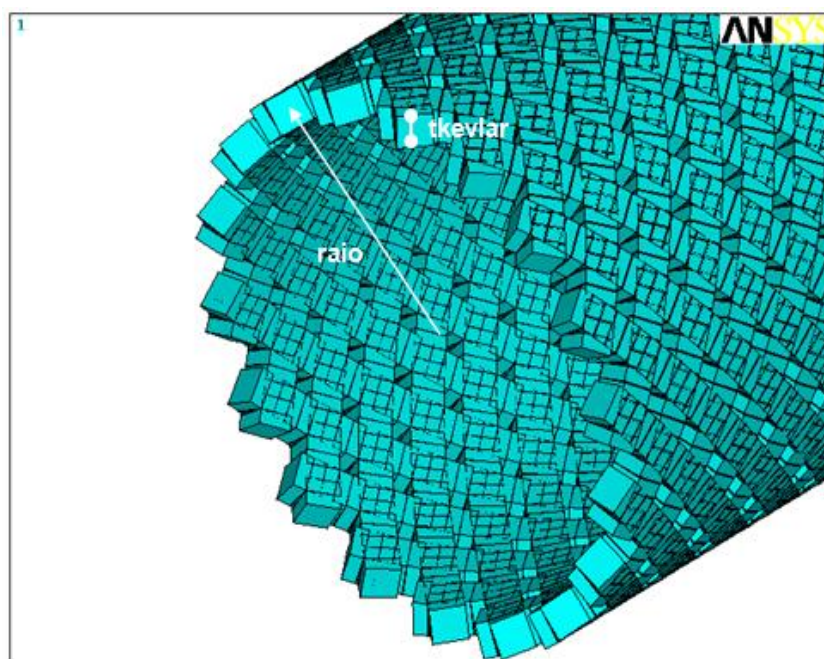
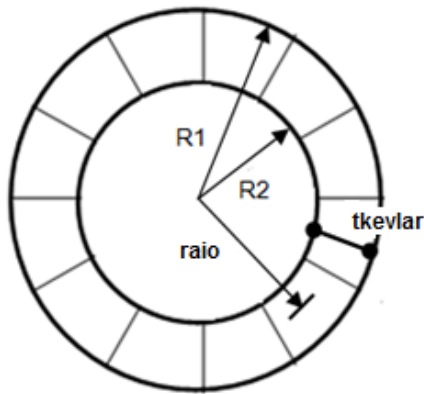


Figura 32: Malha da Camada de Kevlar®.

A camada mais externa, de Poliuretano, tem raio médio igual a 7,17 mm (raio_POL) e espessura de 0,93 mm (tpoli). A mais interna, de Poliamida 11, possui raio médio de 5,525 mm (raio_N11) e espessura de 0,6 mm (tnylon). A camada de Kevlar® possui raio médio de 6,265 mm e espessura de 0,88 mm (tkevlar).

Os elementos de cabo tipo LINK180 necessitam de uma área transversal para simular a espessura de cada cabo. Tal área, como visto na Figura 32, é quadrangular. Porém na mangueira real a área tem a seguinte geometria:



Tem-se que:

$$R1 = raio + \frac{tkevlar}{2} \quad \text{e} \quad R2 = raio - \frac{tkevlar}{2}$$

Onde:

raio = raio médio do Kevlar®

tkevlar = espessura do Kevlar®

R1= raio externo

R2 = raio interno

Para a área de cada uma das doze sessões da figura temos:

$$\text{Área}_{real} = \frac{\pi * ((raio + \frac{tkevlar}{2})^2 - (raio - \frac{tkevlar}{2})^2)}{2 * ncabos}$$

Onde *ncabos* é o número de cabos em uma direção. Como dito anteriormente, o trançado possui 6 cabos em cada direção (*ncabos* = 6). Porém, no modelo a área dada como parâmetro foi:

$$\text{Área}_{fictícia} = tkevlar^2$$

Usou-se essa área fictícia porque, como dito anteriormente, o elemento LINK180 suporta apenas áreas quadráticas. Foi feita então uma compatibilidade, mostrada a seguir.

Sabe-se que $\sigma = \frac{Força}{Área}$; e como $\sigma = \varepsilon E$; temos:

$$\varepsilon E = \frac{Força}{Área} \quad \therefore \quad \varepsilon = \frac{Força}{E * Área}$$

Logo, basta mantermos o produto $E \cdot \text{Área}$ constante para que os cabos, mesmo com áreas fictícias, respondam aos carregamentos da mesma maneira que a mangueira real. Assim:

$$E_{fictício} * \text{Área}_{fictícia} = E_{real} * \text{Área}_{real}$$

$$E_{fictício} = \frac{E_{real} * \text{Área}_{real}}{\text{Área}_{fictícia}}$$

Portanto, quando solicitado o módulo de elasticidade do Kevlar®, o valor de entrada será o $E_{fictício}$.

Malhas de contato

Para simular o contato entre as camadas da mangueira, utilizou-se os elementos de contato TARGE170 e CONTA175. Os elementos do tipo TARGE170, com quatro nós e três graus de liberdade de translação por nó, são usados para representar uma superfície alvo, em terceira dimensão, para as superfícies dos elementos de contato associadas que, no presente trabalho, é a CONTA175. Os elementos alvo e de contato possuem raios de curvatura coincidentes com os raios de curvatura inicial das superfícies carregadas. Os modelos foram preparados para gerar essas superfícies ao longo de todo o comprimento da mangueira.

Os elementos do tipo CONTA175 representam o contato entre duas superfícies, entre um nó e uma superfície ou entre uma linha e uma superfície. Usou-se o tipo de contato nó-superfície pois os elementos de contato foram gerados na camada de aramida, e o objetivo é unir os nós formados devido ao trançado dos cabos às superfícies das camadas de Poliamida 11 e Poliuretano. Assim, os elementos de contato são definidos por apenas um nó que possui três graus de liberdade de translação. Tais elementos estão potencialmente em contato com a superfície alvo, definida pelo TARGE170. Esta superfície alvo é discretizada por um conjunto de elementos tipo alvo (TARGE170) e está emparelhada com a sua superfície de contato associada através de um conjunto comum de constantes reais.

Cada superfície alvo pode ser associada à apenas uma superfície de contato e vice-versa. Porém para o presente estudo, precisa-se que a camada intermediária de Kevlar® (superfície de contato CONTA175) faça contato com duas superfícies alvo simultaneamente, a camada de Poliamida 11 e a camada de Poliuretano. Para

resolver esta questão definiu-se duas superfícies de contato para a camada de Kevlar®, ambas com a mesma geometria porém relacionadas a diferentes superfícies alvo, ou seja, com constantes reais diferentes.

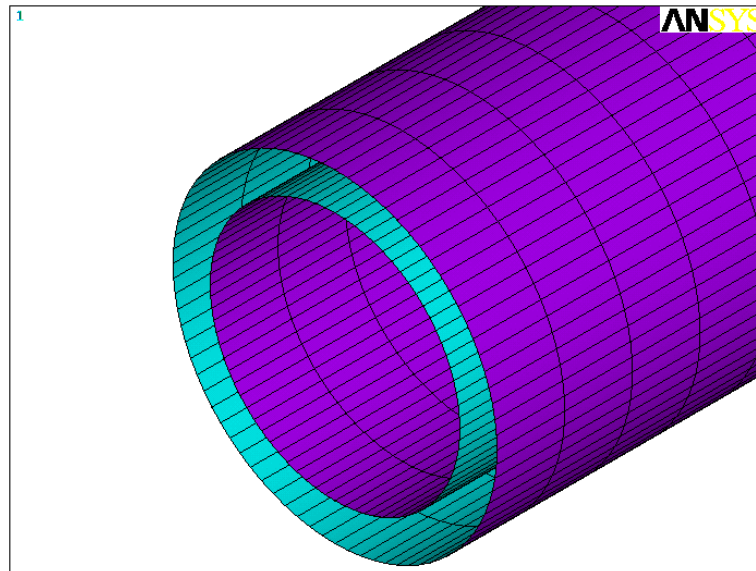


Figura 33: Elementos de Contato Tipo TARGE170.

As superfícies alvo com elementos tipo TARGE170 são as superfícies em azul mostradas na Figura 33. Percebe-se que temos duas superfícies alvo, uma interna à camada de Poliuretano e outra externa à camada de Poliamida 11, ambas para fazerem contato com os elementos CONTA175 da camada de Kevlar®, mostrados na Figura 34.

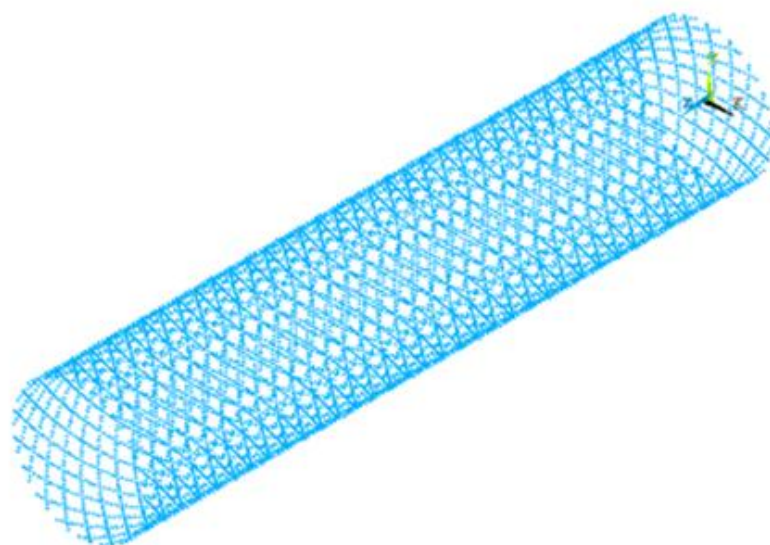


Figura 34: Elementos de Contato Tipo CONTA175.

A Figura 34 mostra os nós que formam os elementos de contato CONTA175. Tais elementos foram criados em duplicada, interna e externamente à camada de aramida de modo a fazer contato com as duas superfícies alvo ao mesmo tempo, como explicado anteriormente.

6.1.3. Condições de Contorno e Carregamento

Como já dito, os modelos foram gerados segundo o sistema de coordenada global cartesiano. No entanto, para efeito de aplicação de carregamento, condições de contorno e análise de resultados, trabalha-se com um sistema de coordenadas cilíndricas nos nós. Portanto, os deslocamentos e rotações nas direções x , y e z correspondem às direções radial, circunferencial e axial, respectivamente. Nas análises de carregamento radial, tem-se como condição de contorno a restrição dos deslocamentos e rotações na direção axial. A restrição axial simula uma mangueira longa sob carregamento radial constante, e para isso são zerados todos os deslocamentos nodais em z de ambos os bordos.

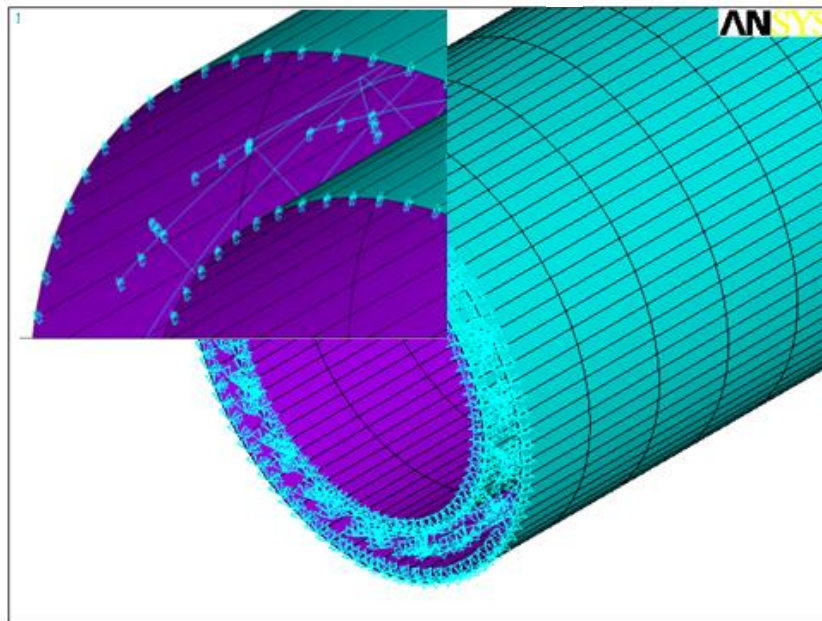


Figura 35: Condições de Contorno Impostas à Mangueira.

Foi aplicada uma pressão interna à camada de Poliamida 11 constante em toda a circunferência da mangueira no valor de 35 MPa (aproximadamente 5000 psi), visto que a pressão de trabalho de mangueiras hidráulicas varia na faixa de 3000 a 5000 psi. Durante o processo de carregamento os bordos da mangueira são engastados, impedindo qualquer tipo de movimento próprio de translação ou rotação.

Para as camadas de Poliuretano e Poliamida 11 a Figura 36 mostra os níveis de tensão equivalente de Von Mises assim como as deformações totais (elástica + plástica), onde são verificados níveis de deformação de até 0,94% e 5,92% e tensões de 2,98 MPa e 40,82 MPa para o Poliuretano e Poliamida 11 respectivamente.

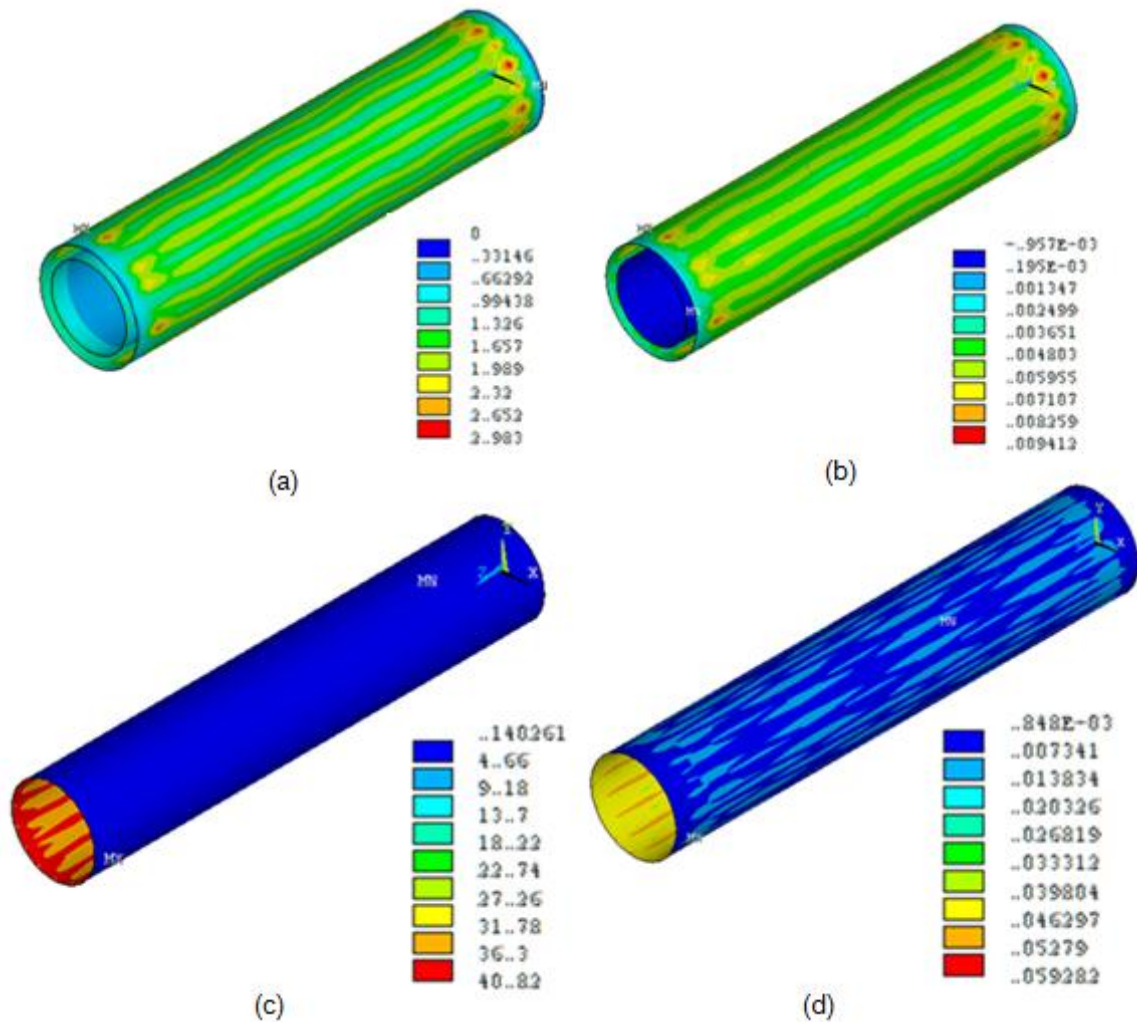


Figura 36: (a)Tensões Resultantes na Carga Limite para a Camada de Poliuretano; (b) Deformações Resultantes na Carga Limite para a Camada de Poliuretano; (c)Tensões Resultantes na Carga Limite para a Camada de Poliamida 11; (d) Deformações Resultantes na Carga Limite para a Camada de Poliamida 11.

Para a camada de Kevlar® são mostrados os níveis de deformação elástica (canto superior direito da Figura 37) e tensão axial (canto inferior direito da Figura 37), que atingem valores de 0,29% e 259 MPa respectivamente.

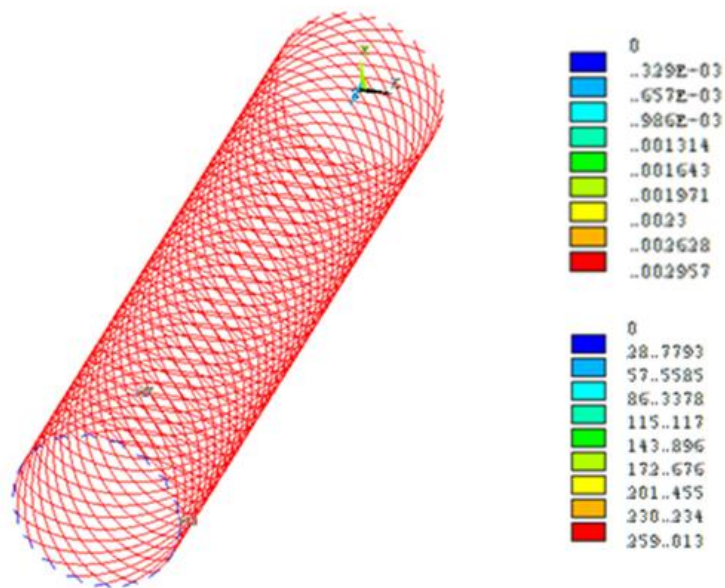


Figura 37: Tensões Resultantes na Carga Limite para a Camada de Kevlar®.

O objetivo da modelagem em três dimensões é conhecermos a rigidez imposta pelo Kevlar® à expansão da Poliamida 11, para posteriormente aplicarmos essa rigidez em um modelo de geometria simplificada em duas dimensões. E para tal, foram exportados do modelo resultados de deslocamento radial para um elemento no centro da camada de Poliamida 11. Com os dados de pressão interna versus deslocamento radial para o elemento, foi possível plotar o gráfico a seguir.

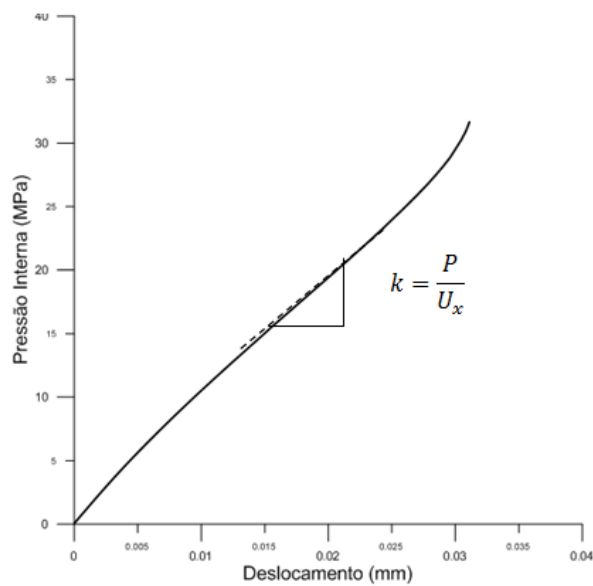


Figura 38: Pressão Interna versus Deslocamento Radial para um Elemento da camada de Poliamida 11.

Na Figura 38, a rigidez é calculada através da inclinação da reta. Tendo um valor de:

$$k = \frac{P}{U_x} \quad \therefore \quad k = \frac{29}{0,03} \quad \therefore \quad k = 966,67 \frac{MPa}{mm}$$

6.2. Modelo Numérico em Duas Dimensões

A necessidade de utilização de uma metodologia bidimensional (2D) originou-se a partir das dificuldades enfrentadas na resolução das simulações tridimensionais (3D). O objetivo maior na utilização de simulações bidimensionais é a constante busca pela otimização entre o máximo detalhamento possível da geometria sob análise com a menor quantidade de memória exigida de processamento computacional. Utilizar diretamente o modelo bidimensional para simulações de uma estrutura complexa como a de um trançado de Kevlar® também não é possível devido à característica ortotrópica do material. Devido a este inconveniente, faz-se necessária a utilização dos dois modelos, 2D e 3D, um como complemento do outro.

Como o objetivo é simular os carregamentos de pressão sofridos pela mangueira e caracterizar o comportamento da Poliamida 11 para uma possível substituição deste por outro material, fez-se um modelo em duas dimensões apenas com Poliamida 11. Porém, sabendo da restrição imposta pelo Kevlar® à expansão da Poliamida 11, utilizou-se o modelo 3D para determinar o valor dessa rigidez e aplicá-la pontualmente na superfície externa da camada de Poliamida 11 no modelo 2D. Visto que a camada de Kevlar® não atua de maneira uniforme e sim de maneira pontual, pois os cabos que formam o trançado tocam a camada de Poliamida 11 apenas em alguns pontos.

Não foi preciso incluir a camada de Poliuretano pois sua função é dar estanqueidade e proteger o trançado de possíveis danos, não tendo qualquer influência com o tipo de falha estudada.

6.2.1. Geometria do Modelo

Respeitando valores de raio e espessura obtidos em amostras da mangueira, a camada de Poliamida 11 foi modelada no plano x-y considerando simetria em ambos os eixos. E devido a essa característica de simetria, foi modelada apenas um quarto da seção da mangueira, como é mostrado na Figura 40.

Com o objetivo de restringir o deslocamento da camada de Poliamida 11 foi modelado um fio rígido. Na prática, durante o carregamento de pressão externa, a mangueira sofre deslocamentos progressivos até o esmagamento (ou colapso, caso este ocorra antes). O fio rígido é posto propositalmente ao longo do eixo x para que quando a seção da mangueira modelada encostar nele, faça contato e represente a situação de esmagamento. Como estamos modelando apenas um quarto da mangueira, é necessário gerar artificialmente essa restrição. A não criação desse fio ocasionaria um deslocamento irreal da seção da mangueira, e na prática tal deslocamento representaria uma penetração de espessuras, o que não ocorre.

Foram modeladas molas para representar a rigidez imposta à Poliamida 11 pelo Kevlar®. O número de molas foi determinado a partir do número de cabos no modelo 3D que, como dito anteriormente, totaliza 36 cabos, sendo 18 no sentido horário e 18 no sentido anti-horário. Usando o sistema de coordenadas cilíndricas dos nós, basta dividir 360° por 36, obtendo 10° para a distância angular entre os cabos. Foi representado na Figura 39 a vista superior do trançado de Kevlar®, onde os pontos em vermelho representam os cabos no comprimento da circunferência.

Considerando que estamos modelando apenas $\frac{1}{4}$ desta circunferência, como mostra a ampliação na Figura 39, foram criadas nove molas, a primeira na posição y igual a 5° e x igual ao raio da Poliamida 11. As seguintes na mesma posição em x porém com incremento de 10° em y.

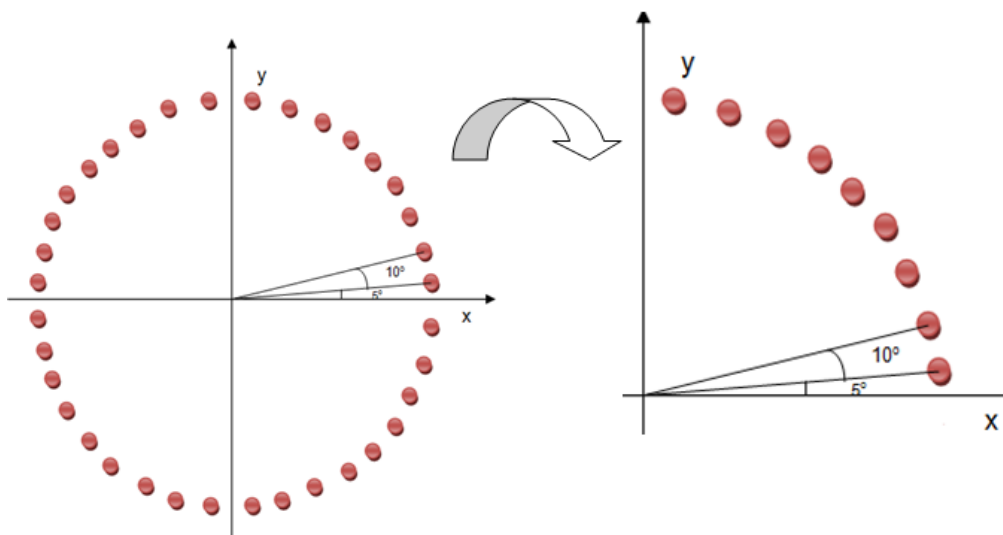


Figura 39: Vista Superior do Trançado de Kevlar®.

A geometria da camada de Poliamida 11, do fio e das molas são mostradas na Figura 40.

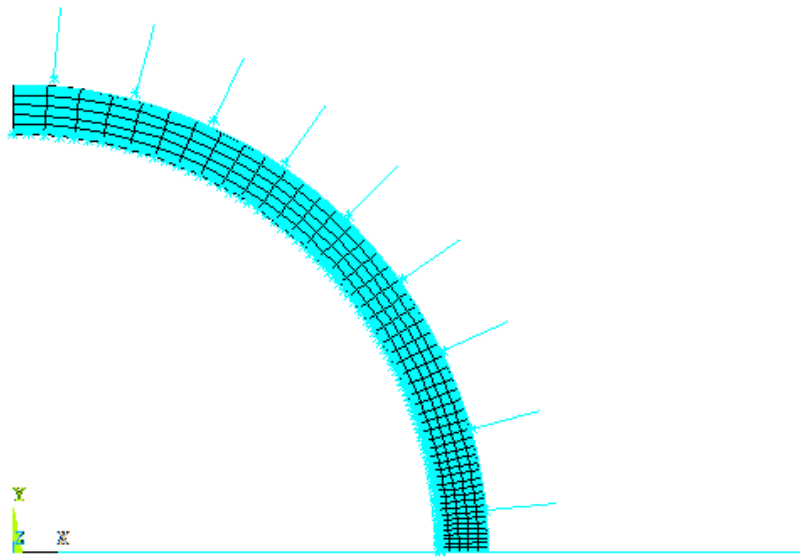


Figura 40: Geometria do Modelo em Duas Dimensões

Segundo FRANÇA, 2010, um tubo perfeito sob pressão externa sofre instabilidade e bifurca, colapsando a uma menor pressão em comparação a um tubo ovalizado. Além disso, a pressão de colapso depende de forma expressiva da ovalização inicial. Enquanto a estrutura permanece elástica não sofre influência da ovalização, porém quando passa a ser inelástica torna-se sensível à ovalização do tubo.

As mangueiras na realidade possuem geometria imperfeita, ou seja, possuem ovalização inicial diferente de zero. Isto ocorre devido a irregularidades durante a fabricação, manuseio e instalação. E para simular tal imperfeição foi imposta uma ovalização inicial de 1% a geometria da mangueira.

Sabe-se da literatura que a ovalização inicial em tubos cilíndricos (Δ_0) é dada por:

$$\Delta_0 = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}}$$

Tal parâmetro é calculado a partir de valores máximos e mínimos para diâmetro.

Sabe-se também que o deslocamento radial máximo (w_{max}) é dado por:

$$w_{max} = R * \Delta_0$$

Assim, a ovalização inicial (Δ_0) é idealizada a partir da equação:

$$w_0 = w_{max} * \cos 2\theta \quad \therefore \quad w_0 = R * \Delta_0 * \cos 2\theta$$

Como dito anteriormente, no caso do presente modelo numérico foi imposta uma ovalização inicial (Δ_0) de 1%. R é dito raio externo da camada de Poliamida 11 e θ varia de $y=0^\circ$ a $y=90^\circ$.

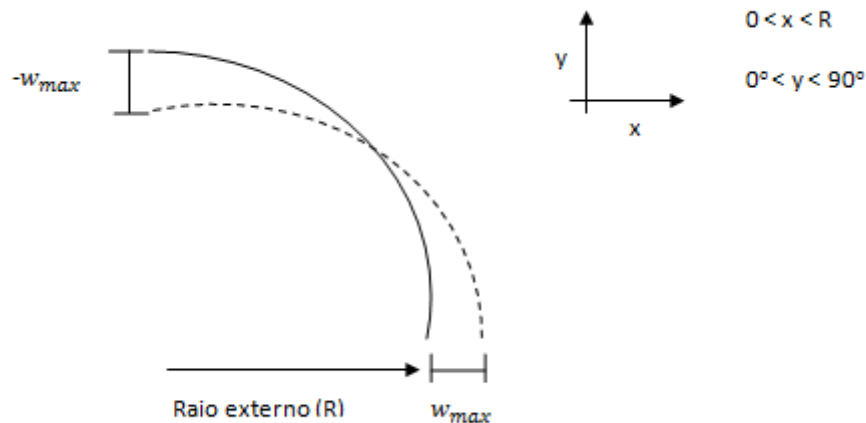


Figura 41: Ovalização Inicial da Seção da Mangueira.

6.2.2. Malha e Superfície de Contato

Para a camada de Poliamida 11, a malha de elementos finitos foi desenvolvida utilizando-se elementos sólidos bidimensionais com 8 nós e 2 graus de liberdade (translações nodais nas direções x e y) por nó, PLANE183. Este elemento apresenta funções de deslocamento quadráticas e é apropriado para a modelação de malhas irregulares. Os elementos foram gerados a cada $1,8^\circ$ na circunferência da mangueira (50 divisões em $\frac{1}{4}$ de arco) e de $y=0^\circ$ a $y=90^\circ$ os elementos perdem o refinamento progressivamente em até 80%. Ou seja, os elementos em $y=0^\circ$ são 8 vezes mais refinados do que em $y=90^\circ$, como mostra a Figura 42. O maior refinamento da parte inferior da seção da mangueira possibilita uma melhor análise dos resultados na região de concentração de deformações no colapso.

Para o fio, a malha foi desenvolvida utilizando-se elementos de ligação do tipo MPC184. Tal elemento é usado para modelar uma restrição rígida entre dois corpos deformáveis ou como um componente rígido usado para transmitir as forças e momentos em aplicações de engenharia. Este elemento é adequado para aplicações não lineares com elevados valores de tensão.

Para as molas, os elementos utilizados foram do tipo COMBIN14. Tal elemento tem dois nós (I e J) e é usado para modelar molas e amortecedores em 2D. Quando usado como uma mola longitudinal em duas dimensões, COMBIN14 é um elemento de tensão-compressão uniaxial com dois graus de liberdade por nó: translações em qualquer uma das duas direções nodais (x e y). O valor de rigidez para cada mola foi calculado da seguinte forma:

$$\text{Para o modelo em três dimensões: } k = 966,67 \frac{\text{MPa}}{\text{mm}} = 966,67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^3}$$

Considerando o modelo em duas dimensões como $\frac{1}{4}$ de um anel unitário com nove molas:

$$k = (966,67) \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \text{raio}_{N11}}{4} / 9 \right) \quad \therefore \quad k = 964,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

A Figura 42 apresenta a malha do modelo, onde estão representados apenas os elementos sólidos.

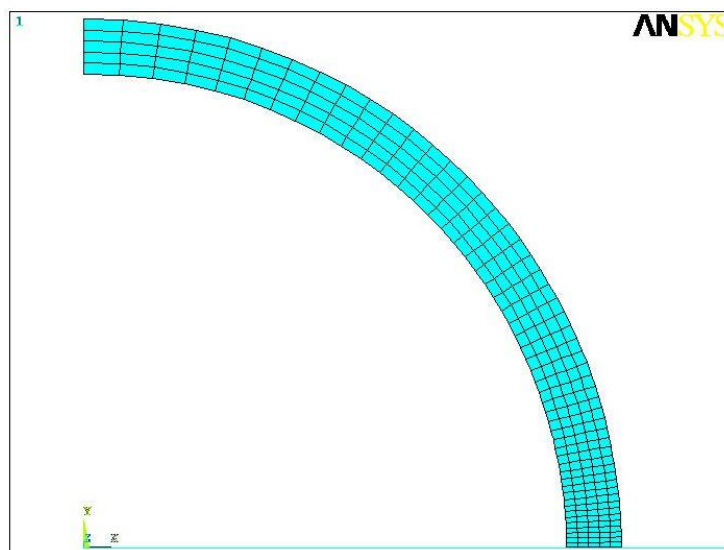


Figura 42: Malha de Elementos Finitos.

Malhas de contato

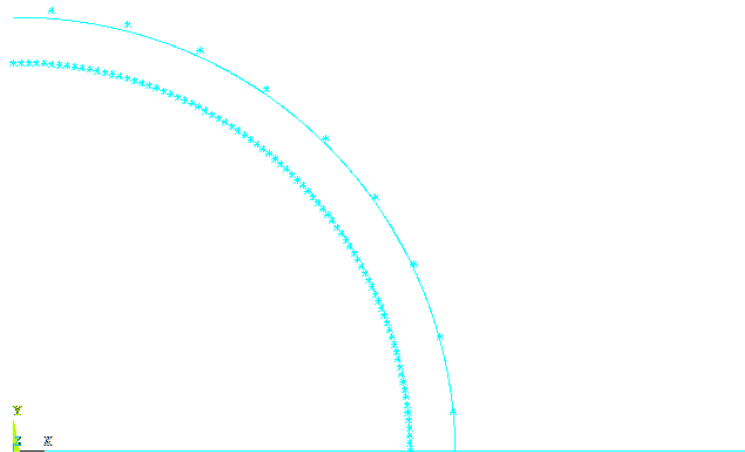


Figura 43: Geometria do Contato entre os Elementos TARGE169 e CONTA175.

A Figura 43 apresenta os dois pares de contato do modelo em 2D. Percebemos na figura os elementos para o contato entre o fio e o contorno interno da Poliamida 11 no carregamento de pressão externa; e os elementos para o contato das molas com o contorno externo da Poliamida 11 quando o mesmo se expande radialmente no carregamento de pressão interna.

Para o fio e o contorno externo da Poliamida 11 temos os elementos de contato TARGE169. E para o contorno interno da Poliamida 11 e a extremidade das molas temos os elementos de contato CONTA175. Os elementos do tipo TARGE169 têm dois nós e dois graus de liberdade de translação por nó. Já os elementos do tipo CONTA175 são definidos por apenas um nó com dois graus de liberdade. Os elementos subjacentes são sólidos bidimensionais. Esses elementos acompanham o refinamento e a face externa dos elementos sólidos que sofrem o carregamento, transferindo as forças de contato geradas pelas superfícies rígidas.

6.2.3. Condições de Contorno e Carregamentos

Assim como no modelo 3D, o modelo 2D também foi gerado segundo o sistema de coordenada global cartesiano. No entanto, para efeito de aplicação de carregamento, condições de contorno e análise de resultados, trabalha-se com um sistema de coordenadas cilíndricas nos nós. Assim, os deslocamentos nas direções x e y correspondem às direções radial e circunferencial respectivamente.

Nas análises de carregamento radial, para a simulação de apenas um quarto da seção da mangueira, são impostas condições de simetria através da restrição dos deslocamentos nodais na direção y dos nós contidos no plano global $x-y$ em $y=0$. E para os nós contidos no plano global $x-y$ na posição $x=0$ são restritos os deslocamentos nodais na direção x . Para o fio, são restritos todos os deslocamentos nodais no plano, evitando-se movimentos de corpo rígido. E para as molas, são restritos todos os deslocamentos nodais no plano para as extremidades que não estão em contato com a Poliamida 11; e para as extremidades em contato com a face externa do *liner*, são restritos os deslocamentos da direção y , para que as molas possam ter liberdade de comprimir e alongar radialmente.

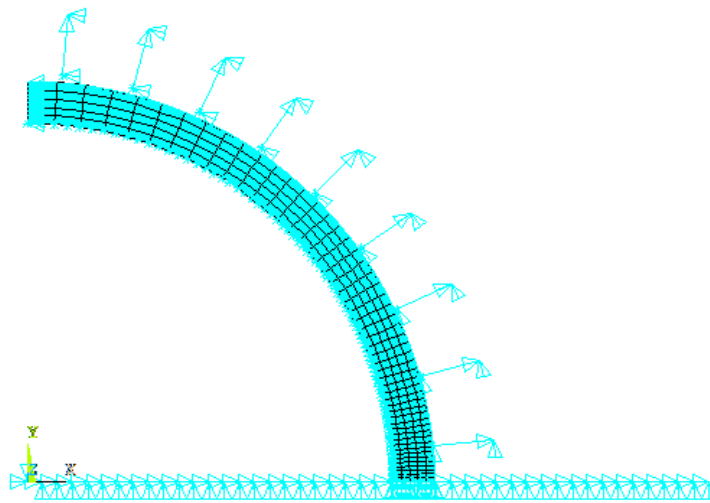


Figura 44: Condições de Contorno Impostas ao Modelo.

Em relação aos carregamentos impostos ao material, foi prescrita uma pressão externa no valor de 20 MPa correspondente, aproximadamente, à pressão que a mangueira sofreria no leito marinho sob uma lâmina d'água de 2000m. No passo de carga seguinte, foi prescrita uma pressão externa no valor de zero a fim de avaliar o comportamento do material frente à condição de descarregamento. E por fim, foi prescrita uma pressão interna ao *liner* no valor de 1 MPa.

Para o carregamento de pressão externa a mangueira experimenta elevadas tensões equivalentes de Von Mises, até 50,69 MPa, deformações plásticas no valor de 64,5% e deformações totais (elástica + plástica) que chegam a 81,5%. Tais valores, assim como a superposição da geometria deformada em azul com o contorno indeformado ao longo do carregamento de pressão externa, são mostrados nas figuras a seguir.

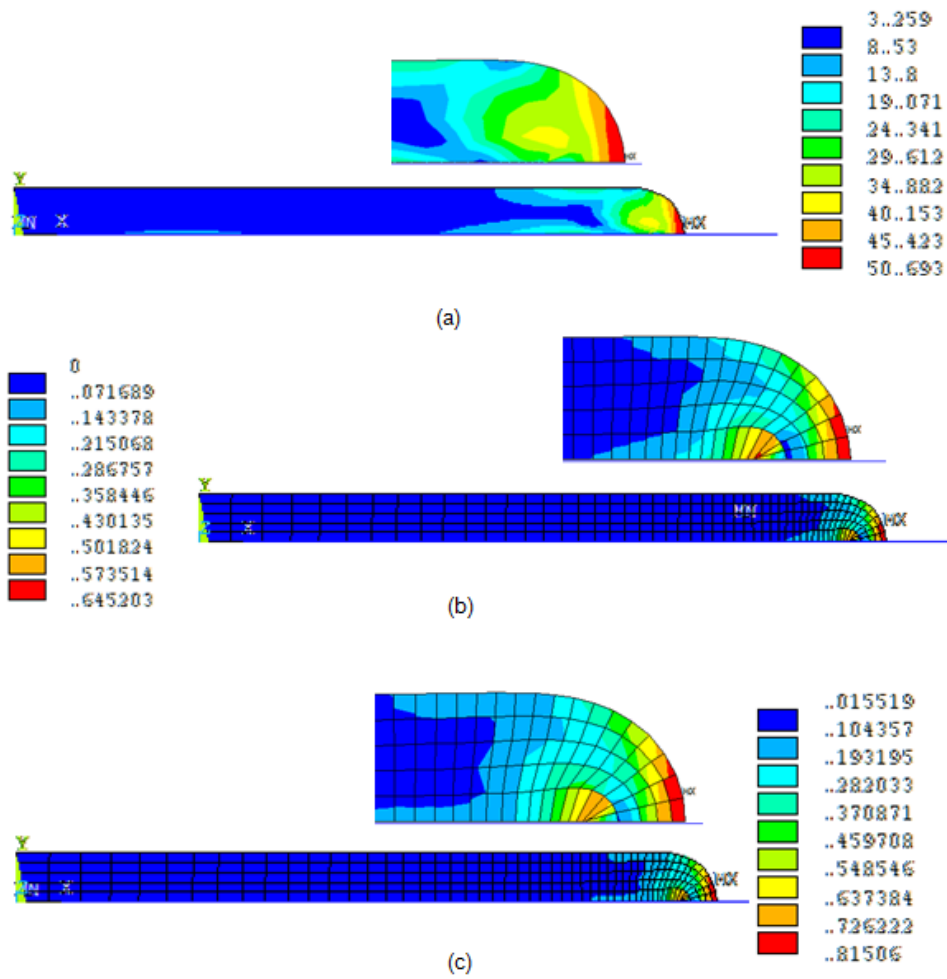


Figura 45: (a) Tensões Resultantes na Carga Limite de Pressão Externa. (b) Deformações Plásticas na Carga Limite de Pressão Externa. (c) Deformações Totais na Carga Limite de Pressão Externa.

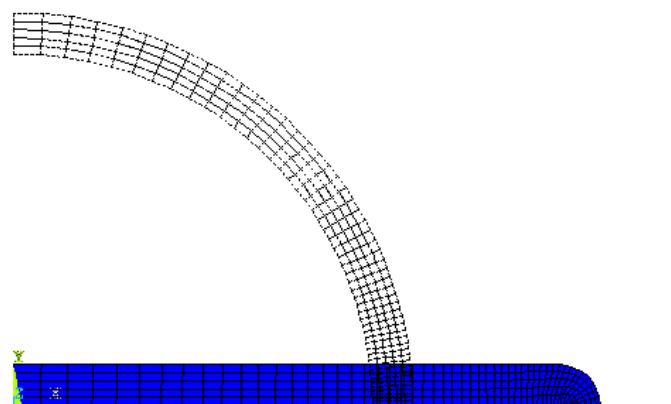


Figura 46: Configuração Indeformada sobre o Contorno Deformado após Aplicação de Pressão Externa.

A partir da análise da Figura 45 percebemos que os maiores valores de tensão e deformação experimentados pela mangueira são encontrados na extremidade inferior da face externa da camada de Poliamida 11 (região em vermelho), caracterizando uma possível formação de vinco naquele local.

As tensões equivalentes de Von Mises, deformações totais e plásticas, assim como a superposição da geometria deformada em azul com o contorno indeformado ao longo do carregamento, para os passos de carga de pressão zero e pressão interna igual a 1 MPa, são mostrados nas figuras a seguir.

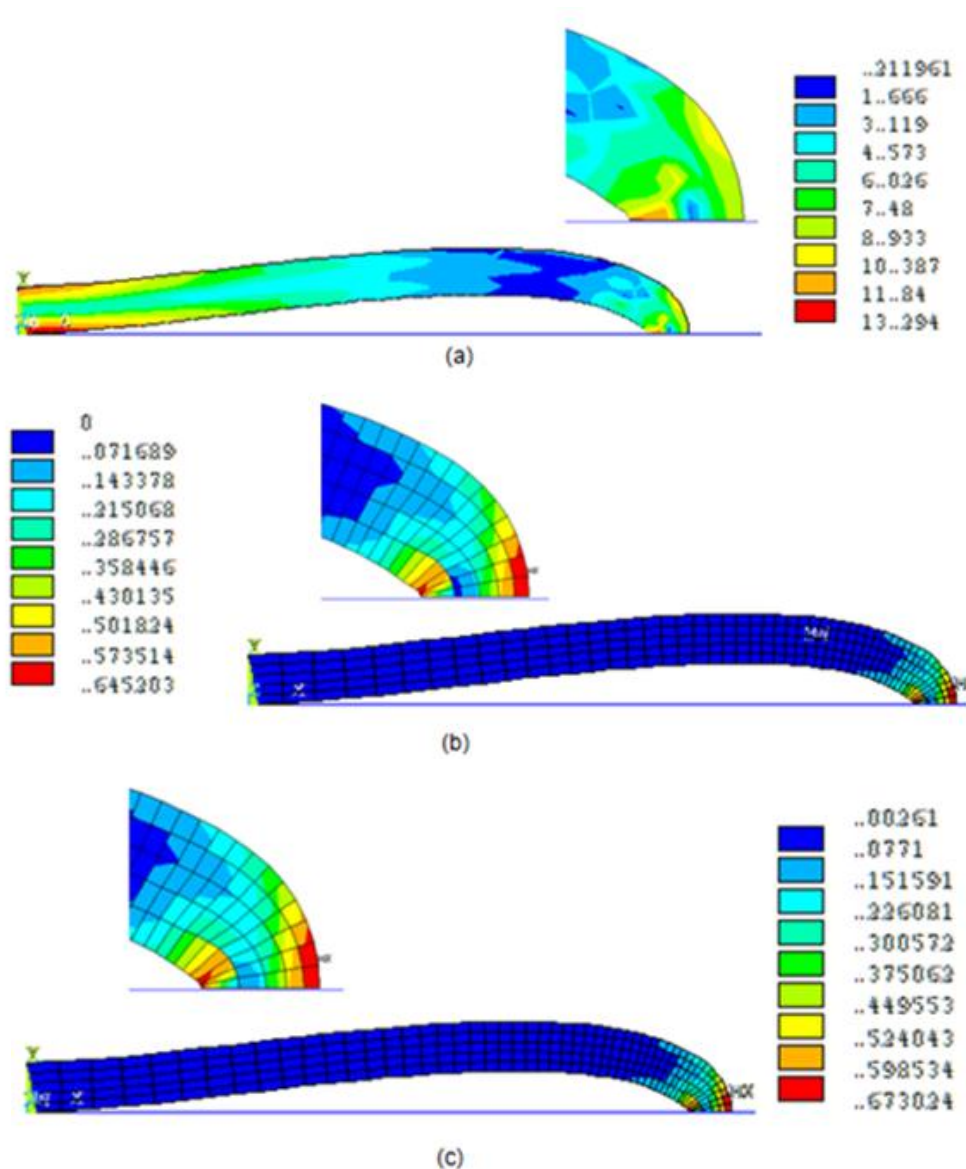
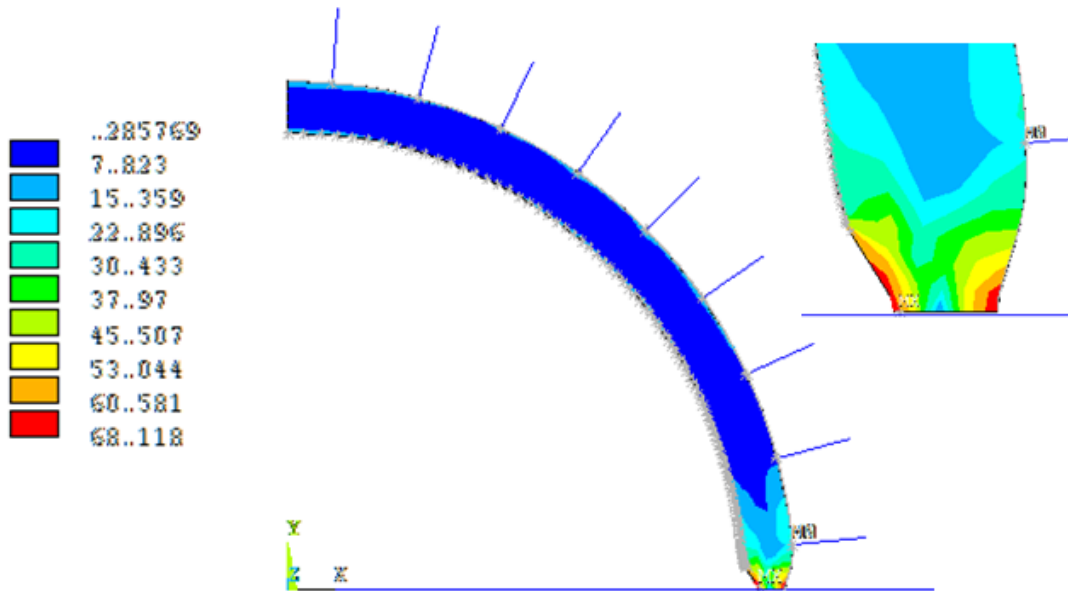
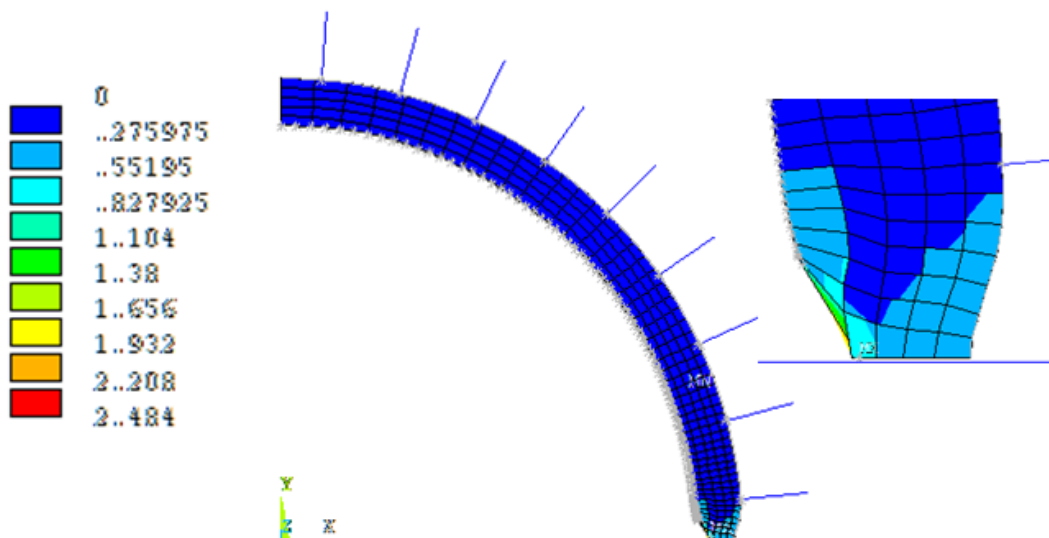


Figura 47: (a)Tensões Resultantes no Descarregamento de Pressão Externa. (b) Deformações Plásticas após o Descarregamento de Pressão Externa. (c) Deformações Totais após o Descarregamento de Pressão Externa.

Podemos observar que, após o descarregamento da pressão externa, o corpo não retorna à sua posição inicial. Isto se deve às deformações plásticas sofridas pelo corpo durante o colapso. Em comparação à Figura 45, percebemos uma queda nos níveis de tensão e deformação. Observamos valores de tensão de até 13,29 MPa, deformação plástica de 64% e deformações totais de 67%.



(a)



(b)

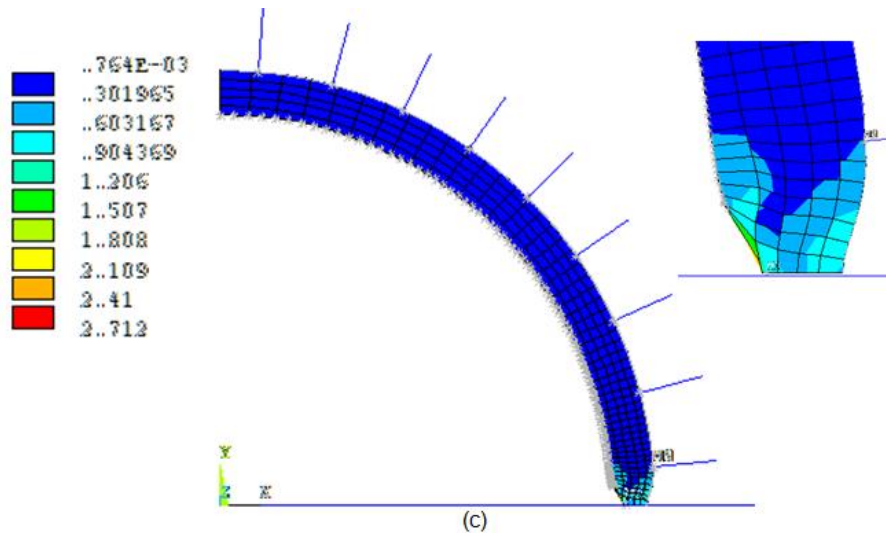


Figura 48: (a) Tensões Resultantes na Carga Limite de Pressão Interna. (b) Deformações Plásticas na Carga Limite de Pressão Interna. (c) Deformações Totais na Carga Limite de Pressão Interna.

A partir da análise das figuras acima percebemos que o maior valor de tensão equivalente de Von Mises experimentado pela mangueira sob uma pressão interna de 1 MPa é de 68,11 MPa (Figura 48a). Em relação às deformações, pode-se dizer que a malha de elementos finitos sofreu distorções no canto inferior da face interna (região em vermelho na Figura 48), chegando a se deformar plasticamente cerca de 248,4%. Tal deformação não será considerada porque foi ocasionada apenas por uma distorção da malha. Assim, a deformação plástica máxima atingida pelo modelo foi considerada como sendo sofrida pelos elementos mais inferiores na face externa da camada de Poliamida 11, que atingem deformações plásticas de, em média, 81%, e totais de 90%.

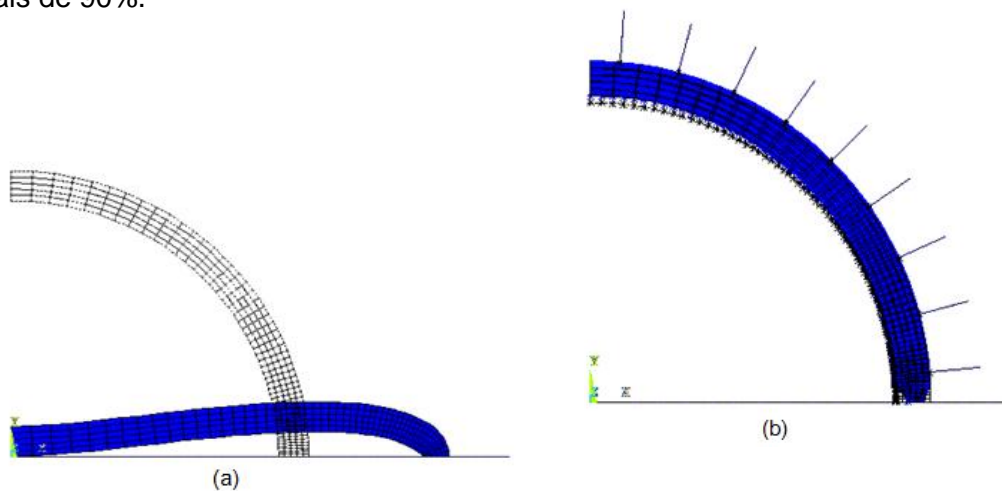


Figura 49: (a) Configuração Indeformada sobre o Contorno Deformado no Descarregamento de Pressão Externa; (b) Configuração Indeformada sobre o Contorno Deformado na Carga Limite de Pressão Interna.

Observando tais resultados percebemos que com a camada interna da mangueira feita de Poliamida 11 e com a presença da camada de Kevlar®, a mangueira consegue suportar os esforços de pressão externa no valor de 20 MPa, seguido de descarregamento e pressão interna no valor de 1 MPa, que são valores experimentados pela mangueira no leito marinho sob uma lâmina d'água de 2000 m e preenchida com fluido hidráulico.

6.2.4. Substituição da Poliamida 11 pelo Viton®

Para o modelo em duas dimensões foram usadas a mesma geometria, condições de contorno e carregamento da modelagem para a Poliamida 11. Houve uma mudança na malha de elementos finitos, que ficou menos refinada, como mostra a Figura 50. Devido a sua grande capacidade de deformação, o elastômero responde a carregamentos com uma malha menos refinada com a mesma precisão. Foram feitas simulações para o Viton® utilizando a mesma malha usada para a Poliamida 11 e malhas menos refinadas, e o equilíbrio entre precisão de resultados e o menor processamento computacional possível, foi obtido com os elementos gerados a cada $2,25^\circ$ na circunferência da mangueira (40 divisões em $\frac{1}{4}$ de arco).

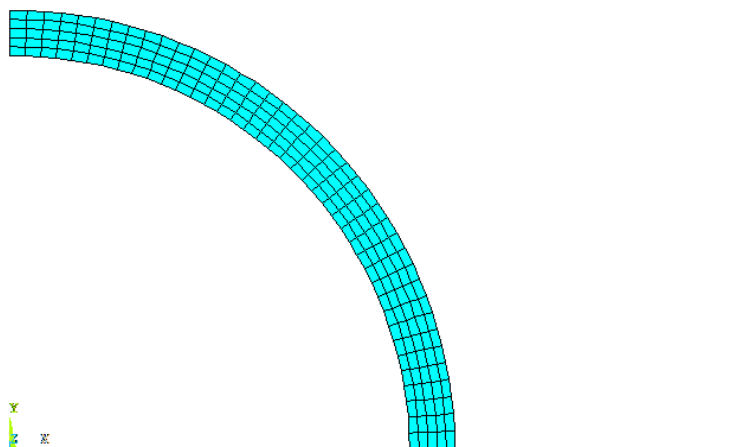
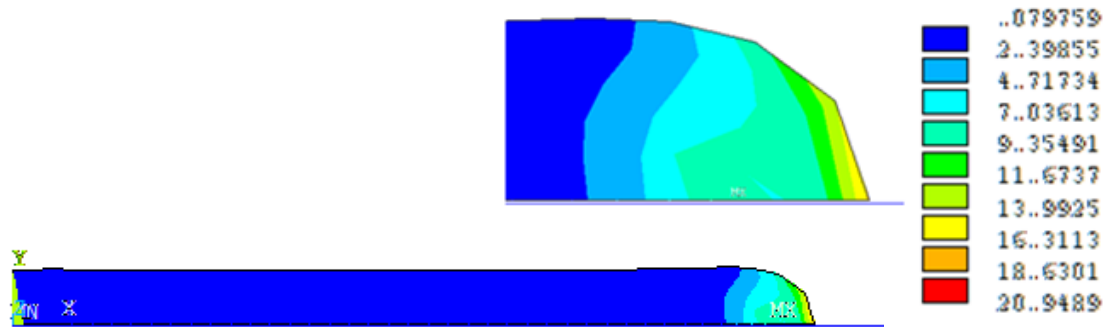


Figura 50: Malha de Elementos Finitos para o Modelo com o Viton®.

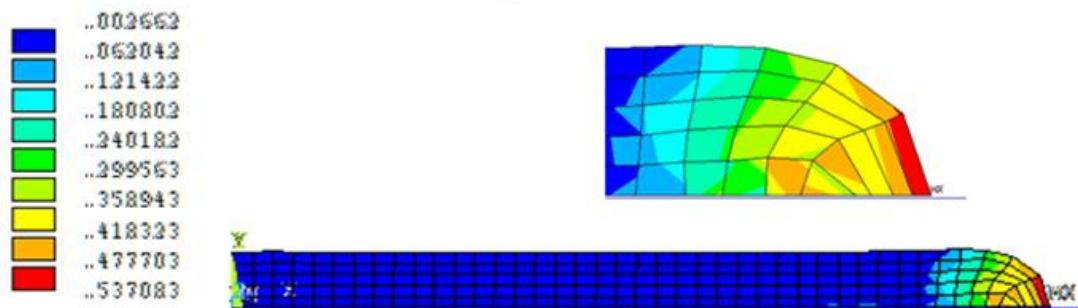
Para o carregamento de pressão interna e externa usou-se o Método Modificado de Riks para atingir a convergência do modelo. Tal método foi explicado no Item 4.1.3 do Capítulo 4.

Assim como no modelo com a Poliamida 11, foi aplicada uma carga de pressão externa para o modelo com o Viton® no valor de 20 MPa. Em um segundo passo de

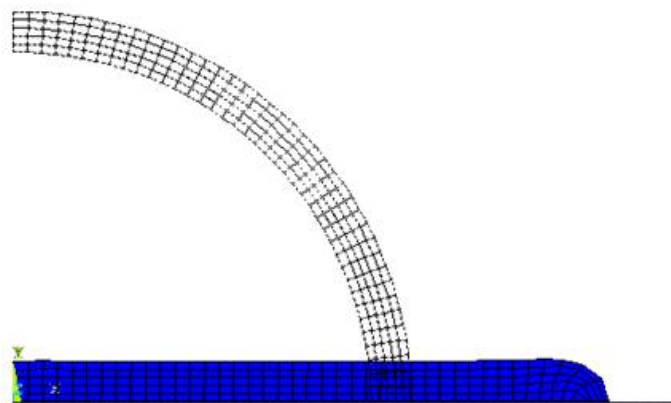
carga simulou-se o descarregamento, aplicando uma pressão externa muito baixa, no valor de 0,05 MPa. E finalmente foi aplicada uma pressão interna no valor de 1 MPa. As tensões equivalentes de Von Mises e deformações durante o carregamento assim como o contorno deformado em azul sobre a configuração indeformada do corpo, são mostrados nas figuras a seguir.



(a)



(b)



(c)

Figura 51: (a) Tensões Resultantes na Carga Limite de Pressão Externa; (b) Deformações Totais na Carga Limite de Pressão Externa; (c) Configuração Indeformada sobre o Contorno Deformado na Carga Limite de Pressão Externa.

Analisando a Figura 51 percebemos que o maior valor de tensão sofrida pelo corpo com aplicação de 20 MPa de pressão externa é de 20,94 MPa, e as maiores deformações são de 53,7%.

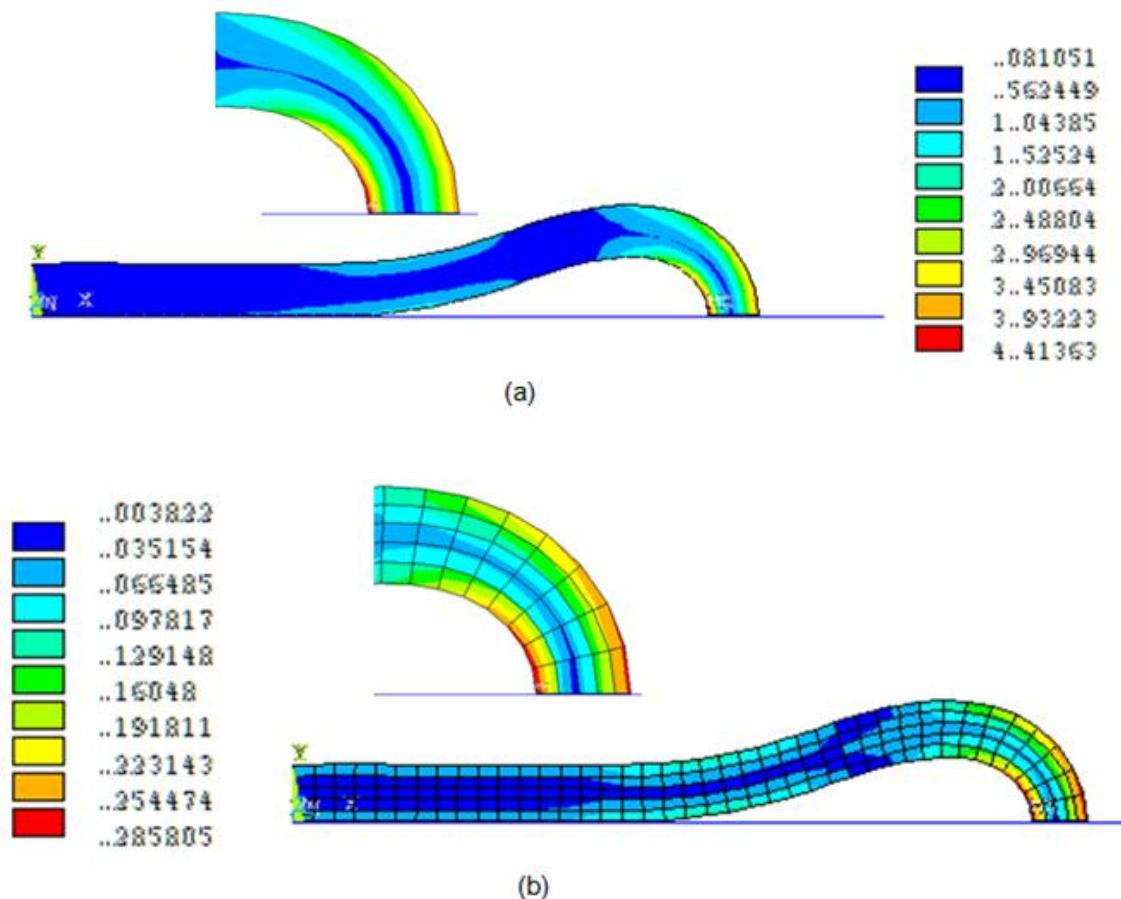
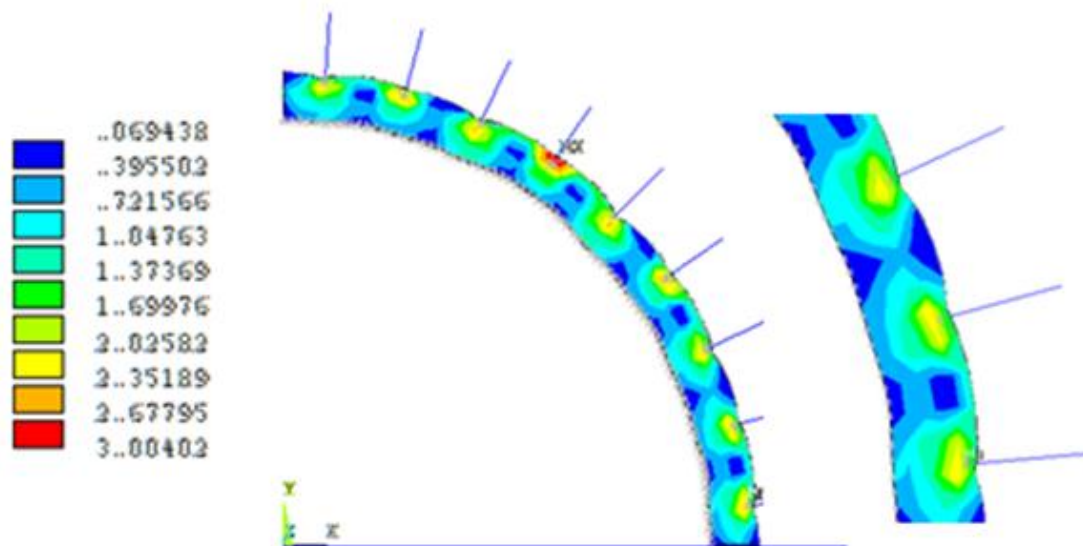
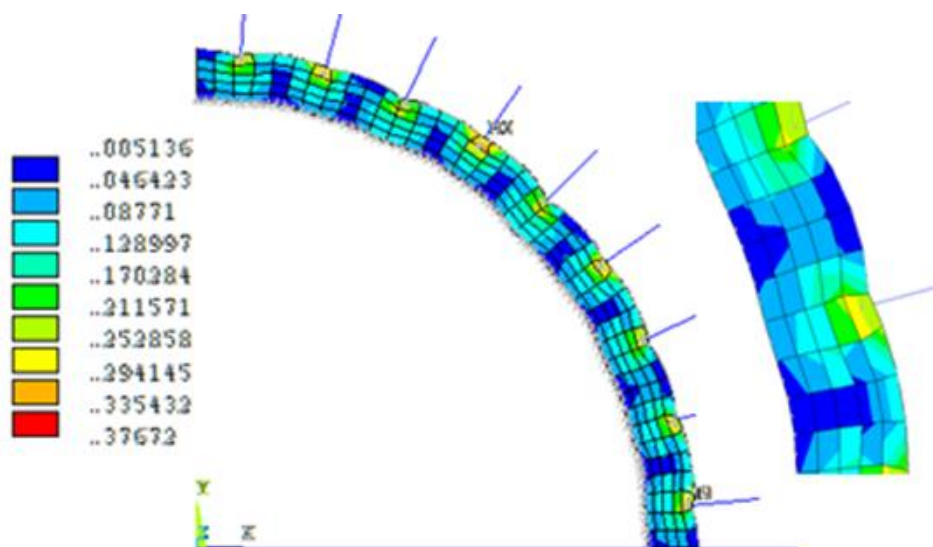


Figura 52: (a)Tensões Resultantes no Descarregamento de Pressão Externa; (b) Deformações após o Descarregamento de Pressão Externa.

Com o descarregamento de toda a pressão externa era esperado que o corpo voltasse à posição inicial, visto que o Viton® é um elastômero hiperelástico, ou seja, não apresenta plasticidade. Foi aplicada então, uma pressão externa muito baixa (0,05 MPa), que como observado na Figura 52, foi capaz de deformar em até 28% o elastômero.



(a)



(b)

Figura 53: (a)Tensões Resultantes na Carga Limite de Pressão Interna; (b) Deformações Totais na Carga Limite de Pressão Interna.

Observando a figura acima percebemos que os maiores valores de tensão equivalente de Von Mises e deformação experimentadas pela mangueira sob uma pressão interna de 1 MPa é de 3 MPa e 37,67% respectivamente.

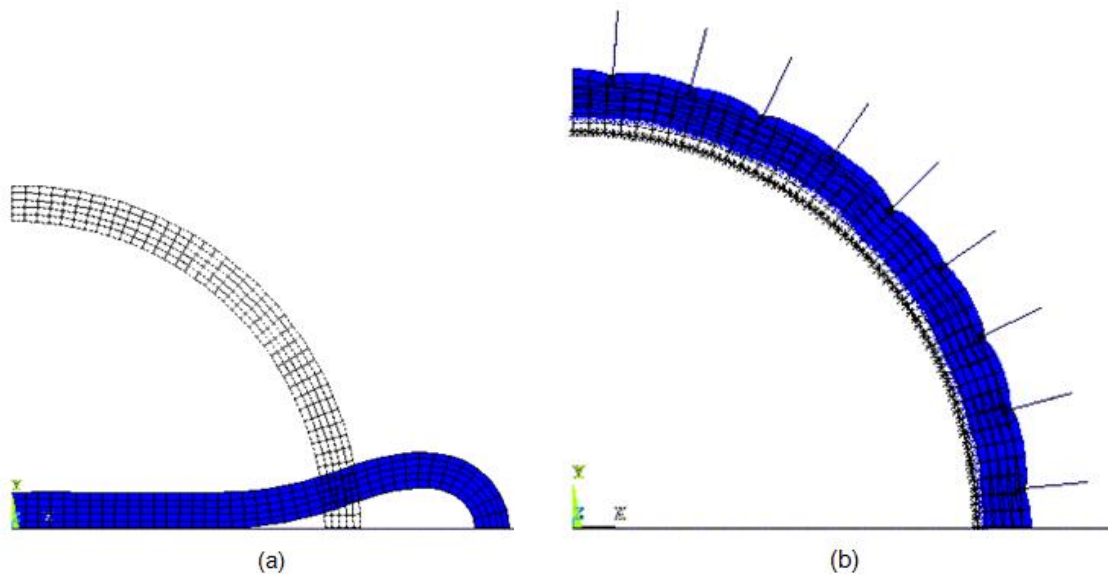


Figura 54: (a) Configuração Indeformada sobre o Contorno Deformado no Descarregamento de Pressão Externa; (b) Configuração Indeformada sobre o Contorno Deformado na Carga Limite de Pressão Interna.

7. Caracterização dos Materiais

Para a camada intermediária de Kevlar® o modelo de elementos finitos foi definido no regime elástico segundo um comportamento isotrópico linear adotando-se módulo de elasticidade igual a 70.5000 MPa e coeficiente de Poisson igual 0,36. Já para as camadas de Poliamida 11 e Poliuretano definiu-se o modelo no regime inelástico segundo um comportamento isotrópico não linear com módulo de elasticidade de 300 MPa e 318,18 MPa, e coeficiente de Poisson igual a 0,31 e 0,4 para a Poliamida 11 e o Poliuretano, respectivamente. No regime elasto-plástico, foi adotada uma lei de fluxo potencial e associada segundo a função de escoamento de Von Mises com encruamento isotrópico para todos os modelos descritos acima. No modelo constitutivo e nas equações de equilíbrio foram assumidas grandes deformações e grandes rotações. Por fim, para a camada de fluoroelastômero Viton®, o modelo de elementos finitos foi definido no regime não linear hiperelástico seguindo o método de Mooney-Rivlin com 5 parâmetros. Tal método foi explicado no Capítulo 4, Item 4.1.3.

As propriedades do Kevlar® foram cedidas pela fabricante Du Pont e foram detalhadas no Capítulo 3, Item 3.3.1. Para o Poliuretano, o modelo numérico no regime não linear isotrópico foi definido a partir da curva de tração do Poliuretano de densidade 1.12 g/cm³. Em seu trabalho, YI, 2006, observou para o Poliuretano, uma

transição entre um comportamento elastomérico a baixas taxas de deformação, e um comportamento plástico a elevadas taxas de deformação. A curva que mostra tal comportamento é mostrada na Figura 55, de onde foi calculado o valor do módulo de Young (318,18 MPa) a uma taxa de deformação verdadeira de 1.0 s^{-1} .

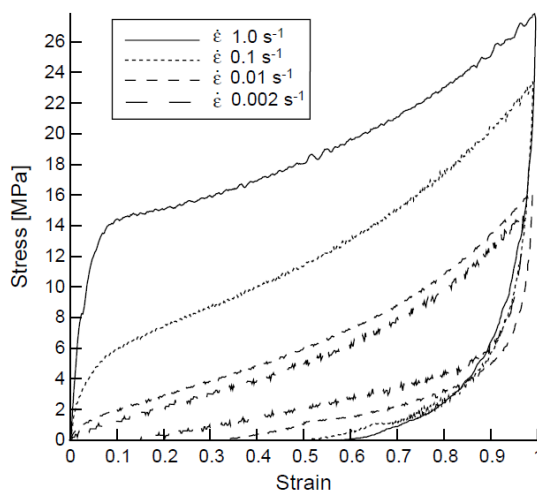


Figura 55: Curva Tensão Real versus Deformação Real do Poliuretano (YI, 2006).

Como o objetivo do presente trabalho é a substituição da Poliamida 11 pelo Viton®, para definir as propriedades mecânicas de ambos os materiais foram feitos testes de ensaios uniaxiais de tração realizados no Laboratório de Tecnologia Submarina e no Laboratório de Polímeros II, ambos da COPPE. Os testes são descritos a seguir.

7.1. Teste de Tração Uniaxial para a Poliamida 11

Para a caracterização da Poliamida 11, o material cedido pela fabricante *Arkema* foi processado no Laboratório de Polímeros II utilizando um molde com dimensões de $170,0 \times 170,0 \times 3,0 \text{ mm}^3$, fabricado em aço inox e constituído por cavidades capazes de produzir, simultaneamente, um lote de cinco corpos de prova, já em forma de gravata e de acordo com a norma ASTM D 638 (Tipo I). O material foi prensado com uma carga de 6 toneladas por cinco minutos a 220°C seguido de um resfriamento controlado conduzido à temperatura de 80°C , sob uma carga de meia tonelada, por dez minutos. Após este tempo, o molde foi deixado sob outro resfriamento, agora à temperatura ambiente, por um intervalo de cinco minutos.

Foram realizados dois testes de tração com taxas de deformação diferentes. O primeiro, à taxa de deformação de 5 mm/min foi realizado em uma máquina servo-

hidráulica INSTRON com capacidade de carga de 250 KN no Laboratório de Tecnologia Submarina, com a deformação sendo controlada por um extensômetro fixado ao corpo de prova. O segundo teste, realizado à taxa de deformação de 50 mm/min foi realizado em uma máquina hidráulica INSTRON com capacidade de carga de 10KN no Laboratório de Polímeros II, com a taxa de deformação controlada por um extensômetro óptico.

Teste de Tração à Taxa de Deformação de 5 mm/min



Figura 56: Teste de Tração Uniaxial a uma Taxa de Deformação de 5mm/min.

Após a realização do teste nos três corpos de prova, podemos perceber um alongamento dos mesmos. Na Figura 57 observamos, da esquerda para a direita, o corpo de prova indeformado antes do teste e os corpos de prova 1, 2 e 3 após o teste.



Figura 57: Comparação entre as Geometrias dos Corpos de Prova antes e após o Teste de Tração Uniaxial a uma Taxa de Deformação de 5mm/min.

Os resultados do teste de tração para os três corpos de provas foram comparados nos gráficos da Figura 58.

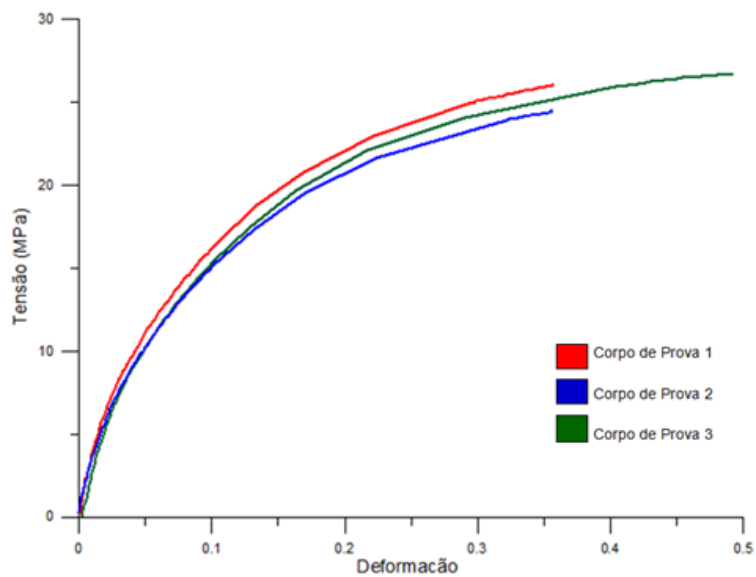


Figura 58: Curva Tensão versus Deformação de Engenharia dos Corpos de Prova da Poliamida11 a uma taxa de deformação de 5 mm/min.

No entanto, para que o material seja caracterizado adequadamente na simulação numérica, foram definidas também as curvas de tensão real versus deformação logarítmica, como pode ser visto na Figura 59.

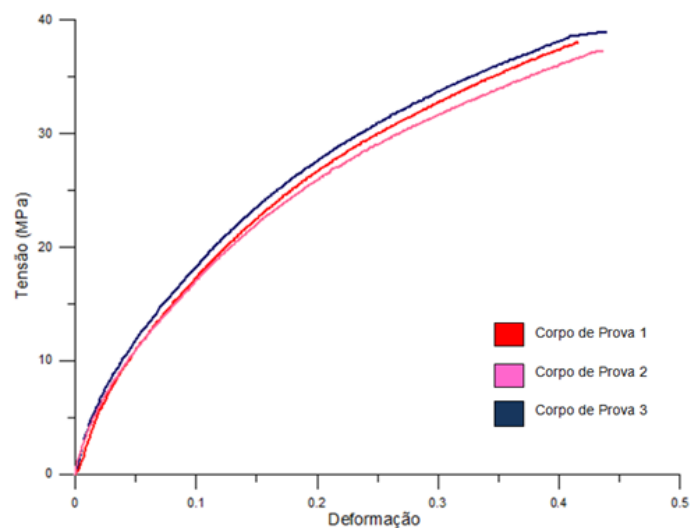


Figura 59: Curvas Tensão Real versus Deformação Logarítmica dos Corpos de Prova da Poliamida 11 a uma taxa de deformação de 5 mm/min.

Em ambos os gráficos mostrados acima, se verifica que as curvas tensão-deformação obtidas são muito próximas. A partir dessa comparação foi definida uma curva média de tensão real versus deformação plástica, representativa do comportamento de material da Poliamida11, que está apresentada na Figura 60.

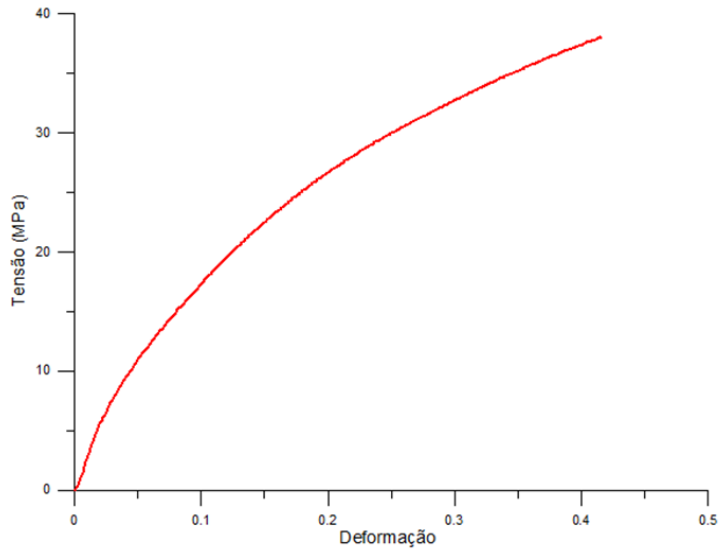


Figura 60: Curva Tensão Real versus Deformação Logarítmica Representativa da Poliamida11 a uma taxa de deformação de 5 mm/min.

Teste de Tração à Taxa de Deformação de 50mm/min.



Figura 61: Teste de Tração Uniaxial a uma Taxa de Deformação de 50 mm/min.

Após a realização do teste nos três corpos de prova, podemos perceber um alongamento dos mesmos, como mostrado na Figura 62. Em 62a temos o corpo de prova indeformado antes do teste de tração. E em 62b, da esquerda para a direita, temos o corpo de prova 1, corpo de prova 2 e corpo de prova 3 após do teste.

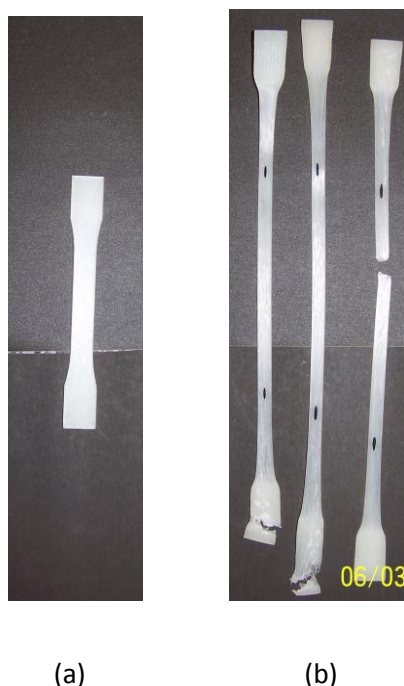


Figura 62: (a) Corpo de Prova Indeformado Antes do Teste e Tração; (b) Comparação entre as Geometrias dos Corpos de Prova após o Teste de Tração Uniaxial a uma Taxa de Deformação de 50 mm/min.

Comparando as geometrias deformadas dos corpos de prova nos testes a 5 e 50 mm/min (Figuras 57 e 62), percebemos que no segundo teste os corpos de prova foram levados à ruptura por apresentarem uma taxa de deformação dez vezes maior que no primeiro teste. Levar os corpos de prova à falha a uma velocidade de 5 mm/min precisaria de um tempo de teste muito grande devido à característica dúctil do Poliamida 11, que apresenta grandes deformações antes da ruptura.

Analisando a Figura 62 percebemos que os corpos de prova 2 e 3 falharam fora da parte útil. Isto se explica pela presença de alguma imperfeição (como bolhas por exemplo) na estrutura do material ou imperfeições na geometria do corpo de prova devido a ineficiências no processamento.

Assim como no teste a 5 mm/min, foram plotadas curvas de tensão versus deformação de engenharia (Figura 63) e curvas de tensão real versus deformação logarítmica (Figura 64) para uma melhor simulação numérica.

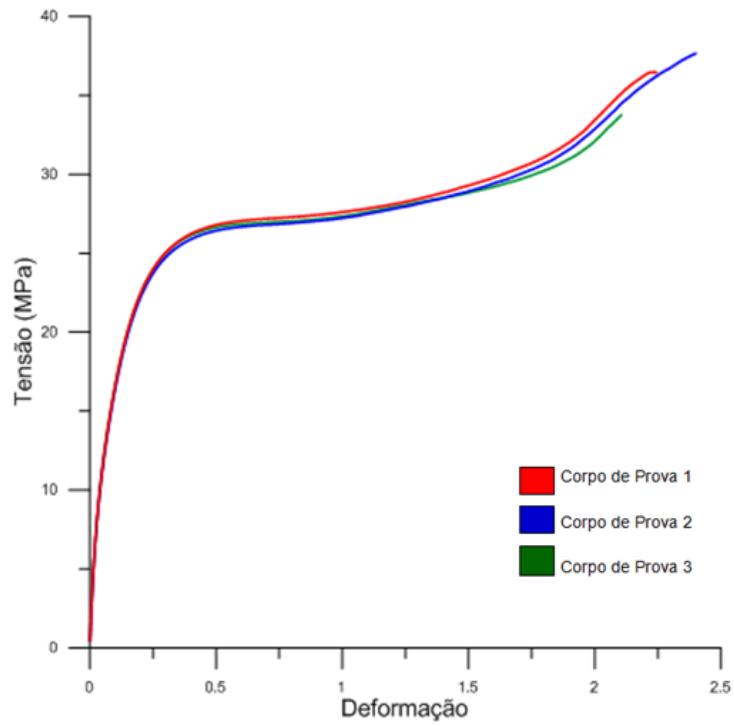


Figura 63: Curva Tensão versus Deformação de Engenharia dos Corpos de Prova da Poliamida 11 a uma taxa de deformação de 50 mm/min.

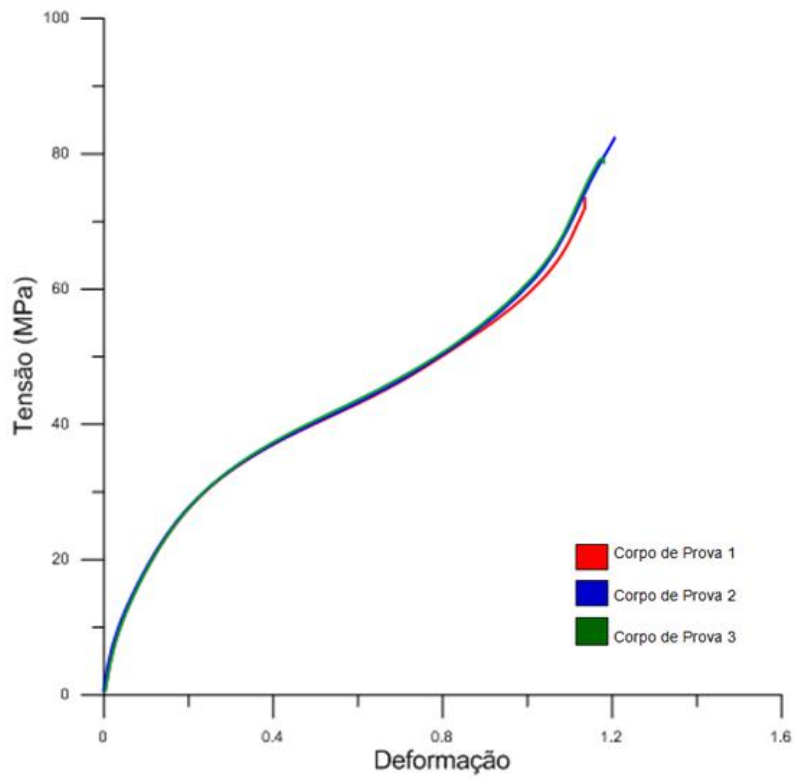


Figura 64: Curvas Tensão Real versus Deformação Logarítmica dos Corpos de Prova da Poliamida 11 a uma taxa de deformação de 50 mm/min

Definiu-se também, uma curva média de tensão real versus deformação plástica, representativa do comportamento de material da Poliamida11, que está apresentada na Figura 65.

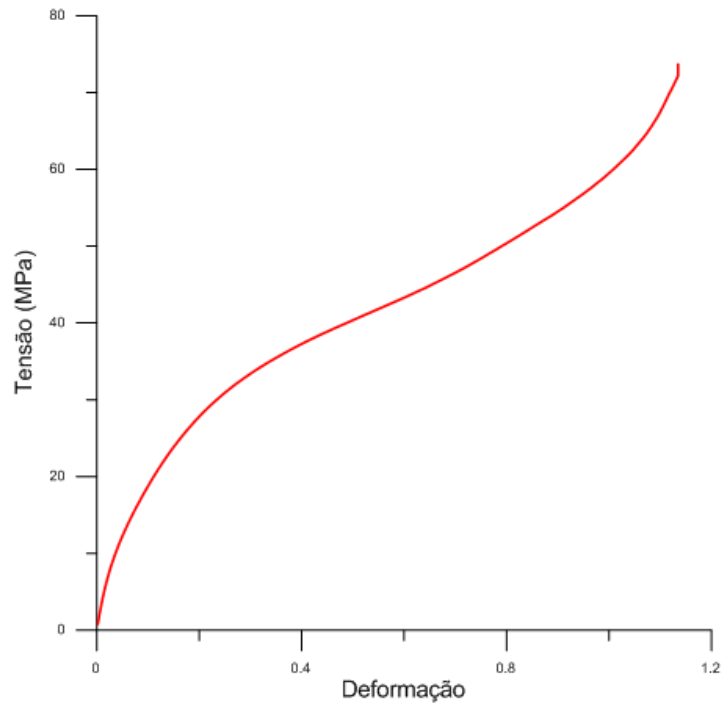


Figura 65: Curva Tensão Real versus Deformação Logarítmica Representativa da Poliamida 11 a uma taxa de deformação de 50 mm/min.

Comparação entre os dois Testes de Tração Uniaxial da Poliamida 11

Como visto no Capítulo 3, Item 3.1.2, Figura 13, os polímeros apresentam diferentes propriedades mecânicas de acordo com a taxa de deformação a qual são submetidos em testes de tração. Comparou-se então os resultados obtidos nos dois testes a taxas de deformações diferentes e o resultado é mostrado a seguir.

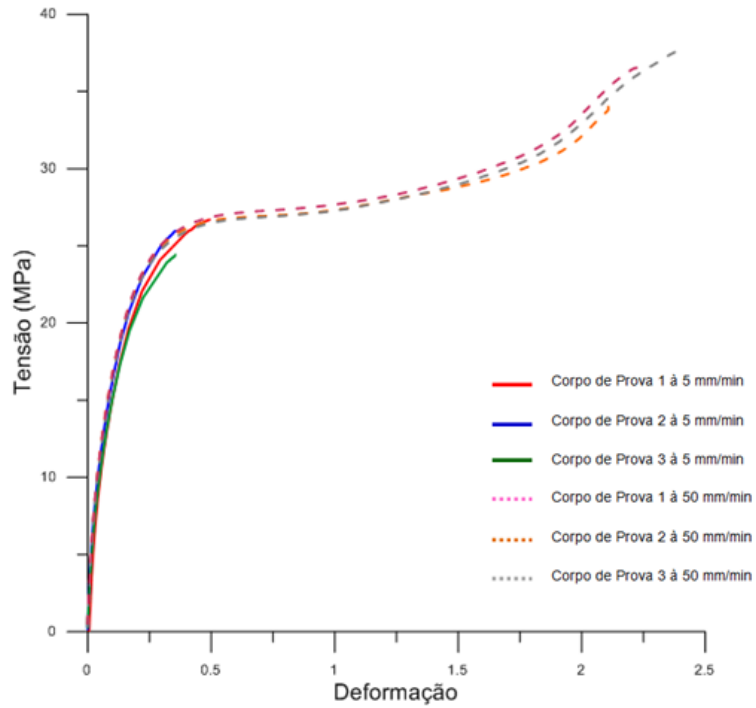


Figura 66: Curva Tensão versus Deformação de Engenharia dos Corpos de Prova da Poliamida 11 à Taxas de Deformação de 5 mm/min e 50 mm/min.

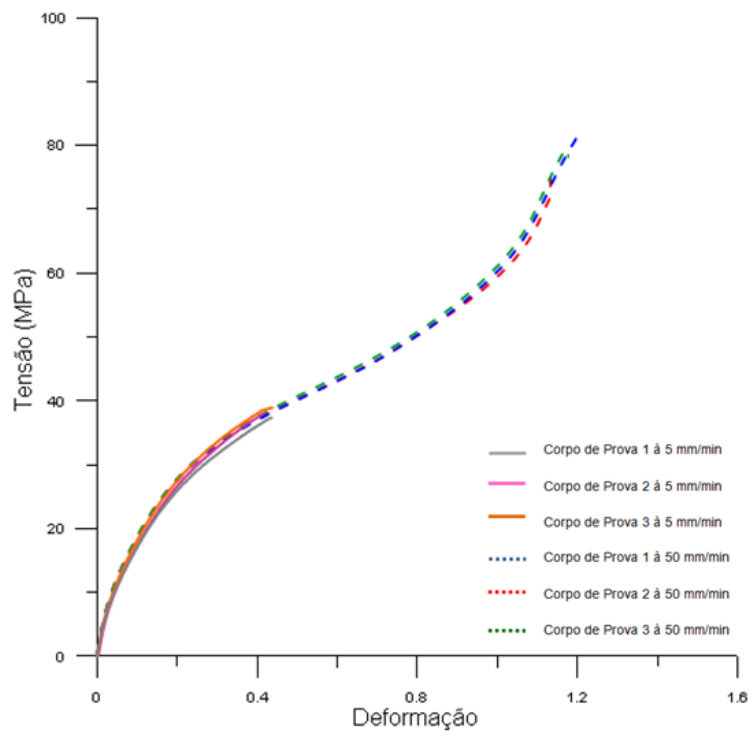


Figura 67: Curva Tensão Real versus Deformação Logarítmica dos Corpos de Prova da Poliamida11 à Taxas de Deformação de 5 mm/min e 50 mm/min.

Como podemos perceber a partir da análise das curvas acima, a Poliamida 11 não apresenta diferenças na resposta ao carregamento a taxas de deformação de 5 mm/min e 50 mm/min. Tal comportamento caracteriza a não viscoelasticidade do material nessa faixa de taxa de deformação.

Como as curvas de tensão real versus deformação logarítmica representativa da Poliamida 11 nas duas taxas de deformação apresentam inclinação inicial idênticas, como foi mostrado a partir da superposição das curvas na Figura 68, o Módulo de Young calculado através das duas curvas também é idêntico e igual a 300MPa.

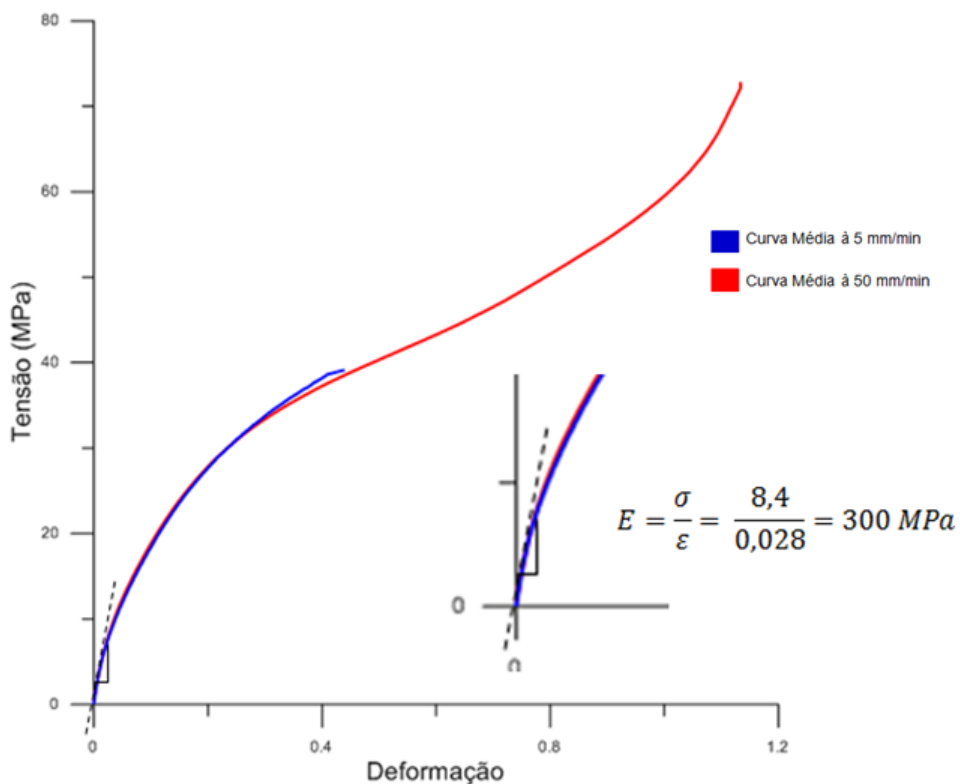


Figura 68: Cálculo do Módulo de Young.

7.2. Teste de Tração Uniaxial para o Viton®

Para a caracterização do Viton®, o material cedido pela DuPont foi cunhado no Laboratório de Polímeros II e foram fabricados corpos de prova com 28 mm de comprimento e 2 mm de largura na parte útil.

O teste de tração foi realizado a uma taxa de deformação de 50 mm/min em uma máquina hidráulica INSTRON com capacidade de carga de 10 KN no Laboratório de Polímeros II, com a deformação sendo controlada por um extensômetro óptico.



Figura 69: Teste de Tração Uniaxial à Taxa de Deformação de 50 mm/min

Após a realização do teste nos três corpos de prova, podemos perceber alongamento e ruptura nos mesmos. Na Figura 70 são mostrados, da esquerda para a direita, o corpo de prova indeformado antes do teste e os corpos de prova 1, 2 e 3 após o teste de tração.



Figura 70: Comparação entre as Geometrias dos Corpos de Prova antes e após o Teste de Tração Uniaxial.

Analisando a Figura 70 percebemos que o corpo de prova 3 falhou fora da parte útil. Assim como na fratura de dois corpos de prova da Poliamida 11, isto se

explica pela presença de alguma imperfeição na geometria do corpo de prova ou bolhas na estrutura do material devido a ineficiências no processamento. As curvas de tensão versus deformação de engenharia (Figura 71) e curvas de tensão real versus deformação logarítmica (Figura 72) são mostradas a seguir.

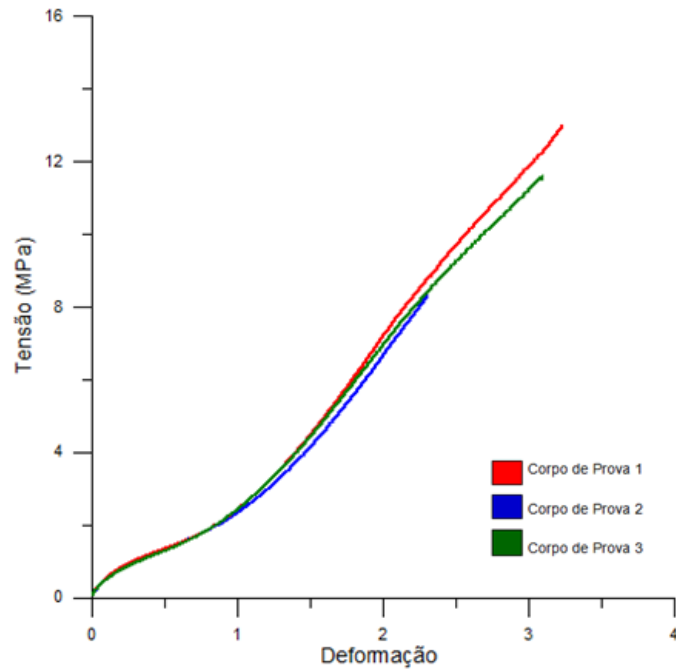


Figura 71: Curva Tensão versus Deformação de Engenharia dos Corpos de Prova do Viton®.

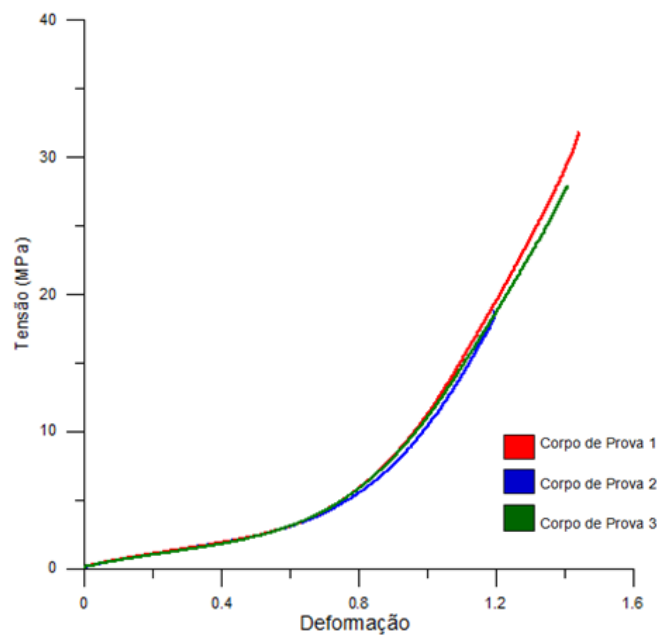


Figura 72: Curvas Tensão Real versus Deformação Logarítmica dos Corpos de Prova do Viton®.

Definiu-se também, uma curva média de tensão real versus deformação logarítmica, representativa do comportamento de material do Viton®, que está apresentada na Figura 73.

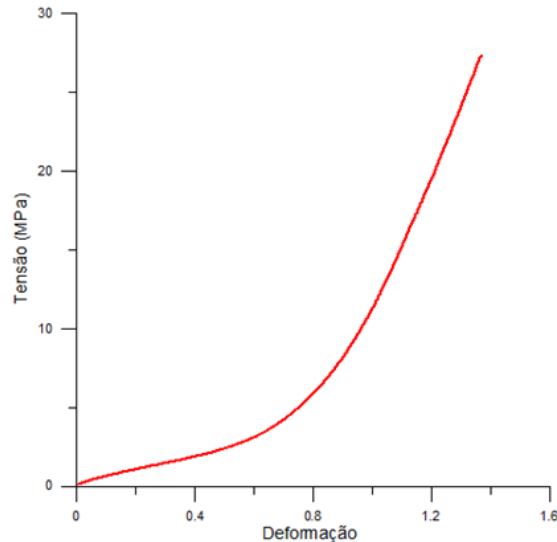


Figura 73: Curva Tensão Real versus Deformação Logarítmica Representativa do Viton®.

A partir da curva tensão-deformação da Figura 73, o software ANSYS calculou as constantes C_{10} , C_{20} , C_{11} , C_{01} , C_{02} e d necessárias para a execução do método de Mooney-Rivlin. A superposição das curvas de tensão-deformação média dada como entrada para o modelo e a curva ajustada pelo método de Mooney-Rivlin, assim como os valores das constantes, são mostradas na Figura 74.

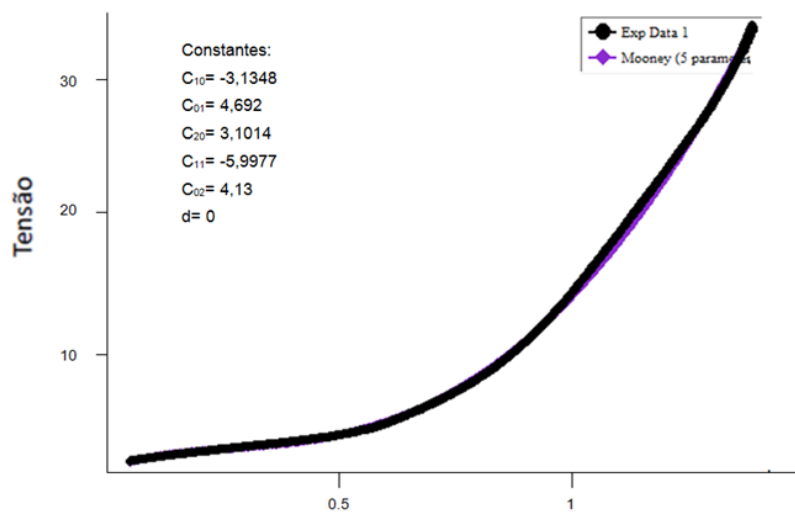


Figura 74: Superposição das Curvas Tensão-Deformação com a Curva Ajustada pelo Método de Mooney-Rivlin.

8. Análise de Resultados

Analisando as deformações totais sofridas pela Poliamida 11 no colapso, percebemos que este concentra um nível muito elevado de deformações e permanece com tais deformações após o carregamento de pressão interna. Já o Viton®, apesar de concentrar um nível também elevado de deformações, recupera essa deformação após o equilíbrio de pressões.

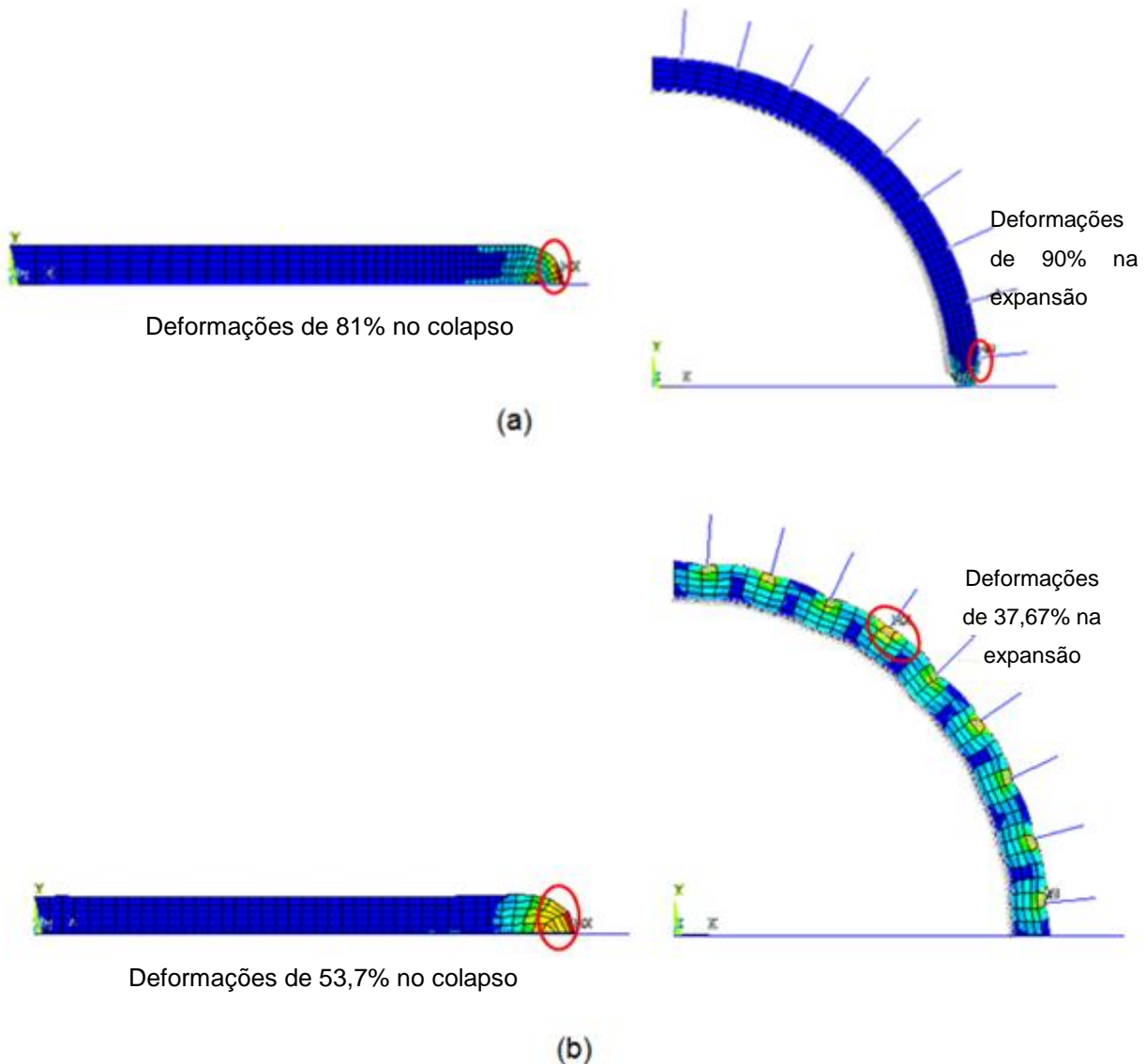


Figura 75: (a) Deformações no colapso e expansão da Poliamida 11; (b) Deformações no colapso e expansão do Viton®.

Em relação à rigidez imposta ao *liner* pelo trançado de Kevlar®, podemos observar que esta é capaz de conter a expansão tanto da Poliamida 11 quanto do Viton®, não deixando esses materiais permearem pelo trançado.

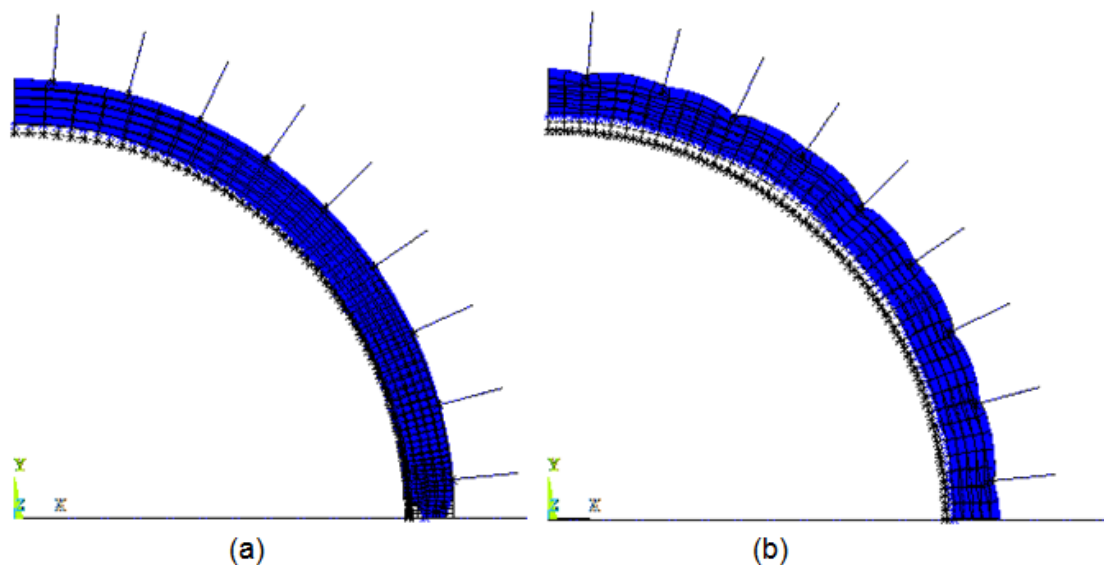


Figura 76: (a) Expansão da Poliamida 11 sobre o trançado de Kevlar®; (b) Expansão do Viton® sobre o Trançado de Kevlar®.

Em relação à falha, foi observado que ambos os materiais não falham após o carregamento de pressão externa seguido de pressão interna. Os maiores valores de deformação observados (81% e 37,67 % para a Poliamida 11 e Viton® respectivamente) foram inferiores aos valores observados nos testes de tração uniaxial para a fratura dos materiais. A Poliamida 11 falha a 116% de deformação, e o Viton®, a 140%, sendo estes valores de deformação logarítmica.

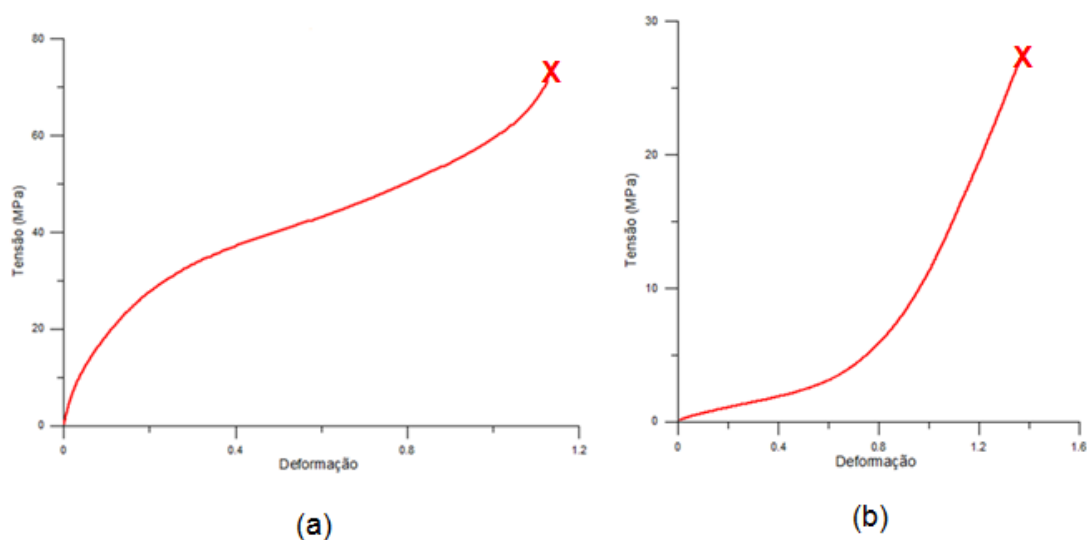


Figura 77: (a) Níveis de Tensões e Deformações na Falha da Poliamida 11; (b) Níveis de Tensões e Deformações na Falha do Viton®.

9. Conclusão

A seleção de um novo material para a fabricação do *liner* da mangueira hidráulica de umbilicais submarinos baseia-se na eliminação de modos de falha que possam vir a ocorrer durante a instalação, manuseio e operação do umbilical. Este estudo baseou-se na comparação entre o material usado atualmente pela indústria (Poliamida 11) e um elastômero fluorado, o Viton®, para validar a utilização deste último. Ressalta-se que tal comparação baseou-se no comportamento mecânico de ambos os materiais frente a carregamentos de pressão interna e externa sofridos pelo umbilical em serviço.

Para tanto, foram recolhidos dados e amostras de fabricantes dos dois materiais para possibilitar a realização de testes de tração uniaxial assim como simulações computacionais. Os dados recolhidos da indústria e dos testes de tração são resumidos a seguir.

Tabela 11: Propriedades dos Polímeros Estudados.

	Unidade	Material			
		Poliuretano	Kevlar®	Poliamida 11	Viton®
Polímero		Elastômero Termoplástico	Fibra	Termoplástico Dúctil	Elastômero Fluorado
Densidade	g/cm ³	1,12	1,44	—	—
Propriedade Mecânica					
Módulo de Elasticidade	MPa	318,18	70.500,00	300,00	*
Coefficiente de Poisson	—	0,40	0,36	0,31	—

* Não foi calculado o Módulo de Elasticidade do material pois o Viton® foi caracterizado no modelo hiperelástico através do Método de Mooney-Rivlin.

O estudo foi feito através de simulações computacionais no software comercial ANSYS versão 13.0. O método matemático utilizado foi o Método de Elementos Finitos em duas e três dimensões. Foi feito um modelo tridimensional para avaliar a rigidez no contato entre o *liner* e o trançado de Kevlar®. Tal valor de rigidez foi aplicado na simulação em duas dimensões para *liners* de Poliamida 11 e Viton®. Os resultados do modelo são resumidos na tabela 12.

Tabela 12: Resumo dos Resultados das Simulações Numéricas.

		Material do <i>liner</i>	
		Poliamida 11	Viton®
Carregamento	Resposta		
Pressão externa de 20 MPa	Tensão equivalente de Von Mises (MPa)	50,67	20,94
	Deformações totais (%)	81	56,7
Pressão interna de 1 MPa	Tensão equivalente de Von Mises (MPa)	68,11	3
	Deformações totais (%)	90	37,67

Foi possível observar também, pelos resultados da simulação computacional, que tanto o Poliamida 11 quanto Viton® não permeiam pela camada de Kevlar®, pois este consegue conter a expansão do *liner*. Foi observado também que a Poliamida 11 e o Viton® não falharam após os carregamentos de pressão, visto que as deformações apresentadas por estes materiais foram inferiores aos valores encontrados nos testes de tração para a fratura dos mesmos.

Para a Poliamida 11 foi possível concluir que o material não falha com carga limite, porém concentra um valor muito elevado de deformações no colapso e permanece com essas deformações, o que pode ocasionar a falha do *liner* após alguns ciclos de carregamento. Para o Viton®, conclui-se que este material concentra deformações no colapso e tais deformações são recuperadas quando aplicada pressão interna. Logo, o Viton® é dito mecanicamente mais eficiente que Poliamida 11 para aplicações em *liners* de umbilicais submarinos sujeitos a carregamentos de pressão externa devido à lâmina d'água, seguido de pressão interna devido à passagem de fluido hidráulico.

9.1. Trabalhos Futuros

Com base nos bons resultados apresentados na comparação entre o comportamento mecânico de *liners* feitos de Poliamida 11 e Viton®, seria base para um estudo futuro a análise experimental de mangueiras hidráulicas confeccionadas com o Viton®. Seria interessante extrudar um corpo de prova cilíndrico de Viton®, revestir de trançado de Kevlar® e colocar ainda uma capa externa de Poliuretano,

simulando uma mangueira hidráulica de três camadas. A partir da confecção da mangueira com o Viton® seria possível fazer testes de colapso e explosão para comparar com os resultados das simulações numéricas.

Outra questão interessante que deve ser analisada para validar o Viton® como substituto da Poliamida 11 na fabricação de *liners* para mangueiras hidráulicas, são os testes químicos. Devem ser feitos testes de compatibilidade química do polímero com o fluido hidráulico conduzido, para verificar se este não perde massa, não incha, e não tem suas propriedades mecânicas alteradas.

Estudos com enfoque econômico também podem ser realizados visando analisar a viabilidade econômica da substituição da Poliamida 11 pelo Viton®. É o objetivo de qualquer atividade comercial, como é o caso da extração de petróleo, maximizar os lucros. E no caso de falhas em umbilicais, seria necessário um estudo de comparação entre possíveis gastos com manutenção, retirada de umbilicais que falharam, substituição de linhas etc, com gastos de fabricação de umbilicais com mangueiras hidráulicas com o *liner* feito de elastômero fluorado.

10. Referências Bibliográficas

- ANSYS, **Documentation for ANSYS: User's Guide**. Release 13.0.
- API RP 17E, **Specification for Subsea Umbilicals, 4th ed.**, American Petroleum Institute, Washington, 2011.
- BATHE, K. J. **Finite Element Procedures**. New Jersey, Prentice Hall, 1996.
- BRIEG, W. F. **Mathematical and Experimental Pressure Response of Helically Wound Wire Reinforced Elastomeric Hose**. SAE 88 1301, 1988.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5 ed. LTC, São Paulo, SP, Brasil, 2002. 408p.
- DA SILVA, A.P. **Análise da Influência da Temperatura na Rigidez à Flexão de Linhas Flexíveis**. Monografia, Graduação em Engenharia Naval e Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.
- DE MIRANDA, P.E.V. **Princípio da Ciência dos Materiais**. Notas de Aula. Graduação em Engenharia de Petróleo, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.
- DI MARZO, G. R. **Aplicação do Método dos Elementos Finitos na Análise de Tensões Induzidas em Cabos Umbilicais**. Dissertação de M.Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2010.
- DUPONT, **Kevlar® Fibra de Aramida**. Manual técnico, São Paulo, SP, Brasil.
- DUPONT, **Viton® Fluoroelastômero**, Manual Técnico, USA, 2010.
- FRANÇA, M.R. **Análise Estrutural de Diferentes Concepções de Tubo para Contenção de Areia**. Monografia, Graduação em Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.
- HUEBNER, K.; THORTON, E. **The Finite Element Method for Engineers**. 2 ed. New York, USA. Wiley & Sons, Incorporated, John, 1982.
- LABANCA, E.L. **Metodologia para a Seleção de Arranjos Submarinos Baseada na Eficiência Operacional**. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

LEGALLAIS, L., STRATFOLD, M., HARDY, J. "A New Generation of Umbilical Hoses." **25thAnnualOffshore Technology Conference**. Houston, Texas, USA, 3-6 May 1993.

MOONEY, M. J. **Applied. Phys.** 582p. 1940.

NETTO, T.A. **Comportamento Hidrodinâmico de Sistemas Oceânicos**. Notas de Aula. Graduação em Engenharia de Petróleo, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.

PASQUALINO, I.P. **Sistemas Oceânicos**. Notas de Aula. Graduação em Engenharia de Petróleo, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.

R.R. Jakeman, P.H. Knight. **Development of a High Pressure Thermoplastic Hose**. The Society for Underwater Technology, England, 1995.

RABELO, A.S. **Repreentação Numérica de Mangueira Termoplástica de Umbilical Submarino**. Seminário de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.

RIVLIN, P.R.S. **Trans. R. Soc. London**, Ser. A, 459p. 1948

SEGERLIND, L. J. **Applied Finite Element Analysis**. 19 ed. USA. Wiley & Sons, Incorporated, John, 1976. 422 p. ISBN 10: 0471774405 ISBN-13: 9780471774402.

STABLES, J.D.,DODGE, I.R., MACRAILD, D. "A More Realistic Method for Predicting the Compatibility of Thermoplastic Hoses When Used in Subsea Umbilical Systems." **25thAnnualOffshore Technology Conference**. Houston, Texas, USA, 3-6 May 1993.

STRAMANDINOLI, R. S. B., **Modelo de Elementos Finitos para Análise Não Linear Física e Geométrica de Vigas e Pórticos Planos de Concreto Armado**. Tese de D.Sc. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / UFSC, Florianópolis, SC, Brasil 2007. 209 p.

TIMOSHENKO, S. P., GERE, J. M. **Theory of Elastic Stability**. 2 ed. New York, NY, USA.McGraw-Hill International Book Company, 1985. 541 p. ISBN 0-07-Y85821-7.

YI, J., BOYCE, M.C., LEE, G.F., BALIZER, E. **Large Deformation Rate-dependent Stress-Starin Behavior of Polyurea and Polyurethanes**. Elsevier, Polymer 47. USA, August 2005.