

015

CONSULTA  
FD-3291

São Paulo  
2002

Dissertação apresentada à Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para a obtenção  
do Título de Mestre em Engenharia.

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS CARREGAMENTOS CÍCLICOS  
SOBRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS CAMADAS  
POLIMÉRICAS DOS CABOS SUBMARINOS ELETRÓ ÓPTICOS

NELSON CÂRDENAS OLIVER

NELSON CARDENAS OLIVER

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS CARREGAMENTOS CÍCLICOS  
SOBRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS CAMADAS  
POLIMÉRICAS DOS CABOS SUBMARIÑOS ELÉTRICO ÓPTICOS

Dissertação apresentada à Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para a obtenção  
do Título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração:

Eng.ª. Mecatrônica e Sistemas Mecânicos

Orientador:

Prof. Dr. Edison Gonçalves

São Paulo

2002

*A meus Pais: Zenuna e Alfredo*  
*A meus Irmãos: Mapy, David e Alfred*  
*A minha Família*  
*A meus Amigos*

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Edison Gonçalves pela confiança depositada em mim desde o início, pela orientação e ajuda em todos os momentos.

Aos professores Miguel Angel Buelta Martinez e Pedro Oliveira Almeida por me permitirem participar no projeto.

Ao professores Carlos Alberto Nunes Dias e Isabel Ferreira Machado por suas críticas e sugestões.

A Maite e Daniel pela amizade e ajuda, em grande medida por eles estou aqui.

Aos colegas do Centro de Estruturas Navais e Oceânicas (CENO), Miguel Angel, Gelson, Miguel Calle, Rodrigo, Anderson, Augusto, Gomes, Gilberto, Valin, Maria Luisa e Gustavo, pela amizade e a ajuda prestada.

Ao pessoal do Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM), Paula, Ivan, Juca, Zé, Luciano, Ruy, Marcia e Dorival, pela colaboração na montagem da bancada de fadiga e na realização dos ensaios.

“A los trabajadores de la Empresa Industrial de Instalaciones Fijas, en especial al grupo de desarrollo, Abreu, Cloris, Mireya, Eduardo, Del Rio, Nelson e Carlos, por su apoyo en este periodo”.

Ao doutorando Wanderson da faculdade da metalurgia (USP) pela ajuda prestada na realização dos ensaios de tração.

Ao CNPq, pela ajuda financeira.

As instituições CENO, LEM, PETROBRAS e PROTENDE as quais fizeram possível a realização do projeto.

A meus amigos latino-americanos, cubanos, brasileiros, argentinos, colombianos, e peruanos.

A todas as pessoas e instituições que de uma forma ou outra tiveram a ver com o desenvolvimento deste trabalho.

## MUITO OBRIGADO!

ERRATA

Ao Texto da Dissertação

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS CARREGAMENTOS CÍCLICOS SOBRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS CAMADAS POLIMÉRICAS DOS CABOS SUBMARINOS ELETRO ÓPTICOS

de

Nelson Cárdenas Olivier

CAPÍTULO 1

Página 13, eq(1.2):

onde se lê:

$$\delta'_i = \frac{\sigma_y a \ln \left( \sec \frac{\pi \sigma_y}{2\sigma_y} \right) F}{8/\pi}$$

leia-se:

$$\delta'_i = [(8/\pi)/(O_y/E)] a \ln \left( \sec \frac{\pi \sigma_y}{2\sigma_y} \right)$$

CAPÍTULO 3

Página 56, eq(3.6):

onde se lê:

$$v = \frac{\mathcal{E}_L}{\mathcal{E}_T}$$

leia-se:

$$v = -\frac{\mathcal{E}_L}{\mathcal{E}_T}$$

CAPÍTULO 5

Página 77, Tabela 5.4:

onde se lê: Tensão de Escocamento

leia-se: Tensão Máxima

Página 77, Tabela 5.4:

onde se lê: Deformação de Escocamento

leia-se: Deformação quando a Tensão é Máxima

Página 77, Tabela 5.5:

onde se lê: Tensão de Escocamento

leia-se: Tensão Máxima

Página 77, Tabela 5.5:

onde se lê: Deformação de Escocamento

leia-se: Deformação quando a Tensão é Máxima

Página 78, Tabela 5.6:

onde se lê: Tensão de Escocamento

leia-se: Tensão Máxima.

Página 78, Tabela 5.6:

onde se lê: Deformação de Escocamento

leia-se: Deformação quando a Tensão é Máxima.

Página 80, Tabela 5.8:

onde se lê: Tensão de Escocamento

leia-se: Tensão Máxima.

Página 80, Tabela 5.8:

onde se lê: Deformação de Escocamento

leia-se: Deformação quando a Tensão é Máxima.

## ÍNDICE

IV	LISTA DE TABELAS
VII	LISTA DE FIGURAS
XI	LISTA DE SÍMBOLOS
XIII	LISTA DE ABRÉVIATURAS
XIV	RESUMO
XV	ABSTRACT

### CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

1	1.1 - Considerações Gerais.....
2	1.2 - Características Estruturais e Funcionais dos Cabos Umbilicais.....
4	1.3 - Síntese Bibliográfica.....
4	1.3.1 - Generalidades.....
5	1.3.2 - Ensaios em cabos umbilicais.....
7	1.3.3 - Camadas poliméricas do cabo umbilical.....
14	1.4 - Objetivos do Trabalho.....

### CAPÍTULO II - CARACTERÍSTICAS DOS POLÍMEROS ESTRUTURAIS

15	2.1 - Generalidades.....
16	2.2 - Classificação dos Polímeros Estruturais.....
17	2.3 - Características do Polietileno.....
18	2.4 - Estados Físicos dos Polímeros Estruturais.....
20	2.5 - Característica da Deformação nos Polímeros Estruturais.....
21	2.5.1 - Relações tensão/deformação nos polímeros estruturais.....
23	2.5.2 - Módulo de relaxação visco-elástico.....
26	2.5.3 - Equações constitutivas e modelos matemáticos básicos representativos do comportamento mecânico dos polímeros estruturais.....
30	2.5.4 - Comportamento viscoso nos polímeros.....
31	2.6 - Comportamento a Fratura dos Polímeros.....
37	2.7 - Fadiga nos Polímeros Estruturais.....
40	2.7.1 - Influência da temperatura sobre a vida a fadiga dos polímeros.....

84	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....
82	6.2- Recomendações.....
81	6.1- Conclusões.....
<b>CAPÍTULO VI- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	
78	5.2- Análise e Discussão dos Resultados Numéricos.....
76	material da camada interna (LDPE) do cabo umbilical.....
72	5.1.2- Análise e discussão dos resultados do ensaio de tração nas amostras de material da camada externa (HDPE) do cabo umbilical.....
72	5.1.1- Análise e discussão dos resultados do ensaio de tração nas amostras de material da camada externa (HDPE) do cabo umbilical.....
72	5.1- Análise e Discussão dos Resultados Experimentais.....
<b>CAPÍTULO V- ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	
68	4.3- Resultados Obtidos na Modelagem.....
65	4.2- Formulação do Modelo Físico.....
64	4.1- Introdução.....
<b>CAPÍTULO IV- AVALIAÇÃO NUMÉRICA - COMPUTACIONAL</b>	
62	3.4.2- Camada interna do cabo umbilical.....
61	3.4.1- Camada externa do cabo umbilical.....
60	3.4- Resultados dos Ensaio de Tração.....
52	3.3- Ensaio de Tração de Amostras das Camadas Poliméricas.....
51	3.2.5- Procedimento do ensaio de fadiga.....
50	3.2.4- Controle e monitoração do ensaio de fadiga.....
49	3.2.3- Instrumentação do corpo de prova para ensaio de fadiga.....
49	3.2.2- Preparação do corpo de prova para o ensaio de fadiga.....
44	3.2.1- Montagem da bancada para o ensaio de fadiga.....
44	3.2- Ensaio de Fadiga de Cabos Umbilicais.....
43	3.1- Introdução.....
<b>CAPÍTULO III- ANÁLISE EXPERIMENTAL</b>	



	APÊNDICES	
I	APÊNDICE A- FOTOS DA BANCADA PARA ENSAIO DE FADIGA	
	MECÂNICA NO CABO UMBILICAL.....	
II	APÊNDICE B- FOTO DE ALGUNS DOS CORPOS DE PROVA	
	ENSAIADOS A TRAÇÃO.....	
III	APÊNDICE C- RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	
	APÊNDICE D- RESULTADOS DA AVALIAÇÃO NUMÉRICA-	
	COMPUTACIONAL COM OS CODIGOS	
XVII	COMPUTACIONAIS LUSAS E ALGOR.....	

3	Dados da geometria e materiais do cabo umbilical.....	Tabela 1.1-
5	Estadísticas dos sistemas de produção flutuantes instalados pela PETROBRAS até principio do ano 2002.....	Tabela 1.2-
18	Algumas das características físicas dos polietilenos de alta e baixa densidade.....	Tabela 2.1-
32	Valores de módulo de elasticidade e resistência à fratura para alguns materiais poliméricos.....	Tabela 2.2-
61	Dados de tensão e deformação máximas obtidas no ensaio do corpo de prova ET 1.3.....	Tabela 3.1-
62	Dados de tensão e deformação máximas obtidas no ensaio do corpo de prova ET 2.1.....	Tabela 3.2-
63	Dados de tensão e deformação máximas obtidas no ensaio do corpo de prova ET 3.7.....	Tabela 3.3-
63	Dados de tensão e deformação máximas obtidas no ensaio do corpo de prova ET 4.1.....	Tabela 3.4-
IV	Resultados de tensão e deformação obtidas no ensaio do corpo de prova ET 1.1.....	Tabela 3.5.-
V	Resultados de tensão e deformação obtidas no ensaio do corpo de prova ET 1.2.....	Tabela 3.6-
VI	Resultados de tensão e deformação obtidas no ensaio do corpo de prova ET 1.3.....	Tabela 3.7-
VIII	Resultados de tensão e deformação obtidas no ensaio do corpo de prova ET 2.2.....	Tabela 3.8-
IX	Resultados de tensão e deformação obtidas no ensaio do corpo de prova ET 2.3.....	Tabela 3.9-
X	Resultados de tensão e deformação obtidas no ensaio do corpo de prova ET 2.1.....	Tabela 3.10-
XI	Resultados de tensão e deformação obtidas no ensaio do corpo de prova ET 3.1.....	Tabela 3.11-

**LISTA DE TABELAS**

XII	Resultados de tensão e deformação obtidas no ensaio do corpo de prova ET 3.2.....	Tabela 3.12-
XIII	Resultados de tensão e deformação obtidas no ensaio do corpo de prova ET 3.3.....	Tabela 3.13-
XIV	Resultados de tensão e deformação obtidas no ensaio do corpo de prova ET 4.2.....	Tabela 3.14-
XV	Resultados de tensão e deformação obtidas no ensaio do corpo de prova ET 4.3.....	Tabela 3.15-
XVI	Resultados de tensão e deformação obtidas no ensaio do corpo de prova ET 4.1.....	Tabela 3.16-
65	Dados de deformação, tensão e módulo de Young fornecidos aos "softwares" LUSAS e ALGOR, como curva tensão/deformação do HDPE.....	Tabela 4.1-
66	Dados de deformação, tensão e módulo de Young fornecidos aos "softwares" LUSAS e ALGOR, como curva tensão/deformação do LDPE.....	Tabela 4.2-
66	Dados das propriedades dos materiais usados na modelagem.....	Tabela 4.3-
70	Resultados de tensões e deformações significativas obtidas para as modelagens dos corpos de prova feitos de HDPE e LDPE usando o "software" LUSAS.....	Tabela 4.4-
71	Resultados de tensões e deformações significativas obtidos para as modelagens dos corpos de prova feitos de HDPE e LDPE usando o "software" ALGOR.....	Tabela 4.5-
XVIII	Valores de deformação e tensão obtidos na modelagem do HDPE com o "software" LUSAS.....	Tabela 4.6-
XIX	Valores de deformação e tensão obtidos na modelagem do LDPE com o "software" LUSAS.....	Tabela 4.7-
XX	Valores de deformação e tensão obtidos na modelagem do HDPE com o "software" ALGOR.....	Tabela 4.8-
XXI	Valores de deformação e tensão obtidos na modelagem do LDPE com o "software" ALGOR.....	Tabela 4.9-

73	Valores de tensão e deformação significativos dos ensaios de tração dos corpos de prova de HDPE, material que não foi submetido a nenhum tipo de carregamento antes do ensaio de tração.....	Tabela 5.1-
74	Valores de tensão e deformação significativos dos ensaios de tração dos corpos de prova de HDPE, material que não foi submetido a nenhum tipo de carregamento antes do ensaio de tração.....	Tabela 5.2-
75	Magnitude da variação entre os valores médios das tensões e deformações significativas obtidas nos ensaios de tração da camada externa do cabo.....	Tabela 5.3-
77	Valores de tensão e deformação significativos dos ensaios de tração dos corpos de prova de LDPE, material que não foi submetido a nenhum tipo de carregamento prévio.....	Tabela 5.4-
77	Valores de tensão e deformação significativos dos ensaios de tração nos corpos de prova de LDPE, material que foi submetido a carregamentos cíclicos prévios.....	Tabela 5.5-
78	Magnitude da variação entre os valores médios das tensões e deformações significativas obtidas nos ensaios de tração da camada interna do cabo.....	Tabela 5.6-
79	Valores de tensão e deformação significativos obtidos da modelagem com os programas LUSAS e ALGOR e comparados com os dados fornecido pelo fabricante do cabo para o HDPE.....	Tabela 5.7-
80	Valores de tensão e deformações de von Mises mais significativos obtidos da modelagem com os programas LUSAS e ALGOR e comparados com os dados obtidos da bibliografia consultada para o LDPE.....	Tabela 5.8-

2	Figura 1.1- Cabos umbilicais usados nos sistemas de produao flutuantes.....
3	Figura 1.2- Estrutura típica de um cabo umbilical.....
6	Figura 1.3- Configuraao do ensaio de fadiga por flexao com rotaao.....
7	Figura 1.4- Configuraao do ensaio de fadiga por flexao plana (forma de U).....
8	Figura 1.5- Efeito da corrosao na estrutura interna de uma linha flexivel devido a fissuras na camada polimérica externa.....
19	Figura 2.1- Estados físicos dos polímeros estruturais.....
22	Figura 2.2- Curvas tensao/deformaao características dos diferentes tipos de materiais poliméricos.....
22	Figura 2.3- Efeitos da taxa de deformaao e temperatura sob a curva tensao deformaao dos polímeros.....
24	Figura 2.4- Curvas de logaritmo do módulo de relaxaao versus logaritmo do tempo para o polietileno.....
24	Figura 2.5- Curva de logaritmo do módulo de relaxaao versus temperatura para o poliestireno amorto.....
26	Figura 2.6- Modelos simples empregados para simular comportamento mecânico em polímeros estruturais e suas curvas tensao vs deformaao características.....
28	Figura 2.7- Modelo de uma trinca elíptica de comprimento 2a submetida a tensao uniforme numa prancha infinita.....
33	Figura 2.8- Trinca aguda numa lâmina infinita tensionada uniformemente.....
35	Figura 2.9- Diferentes modos de carregamentos que originam as trincas nos sólidos.....
36	Figura 2.10- Curva de vida a fadiga para alguns tipos de polímeros estruturais.....
39	Figura 3.1- Esquema tpico para um ensaio de fadiga em cabos umbilicais segundo a norma API-17E.....
44	Figura 3.2- Desenho da bancada para ensaio de fadiga mecânica no cabo umbilical.....
45	

## LISTA DE FIGURAS

45	Figura 3.3- Montagem da estrutura de suporte.....
47	Figura 3.4- Fase inicial da montagem da roda e colocação dos raios.....
47	Figura 3.5- Detalhe da fixação dos raios no cubo e roda já montada.....
47	Figura 3.6- Superfície de revestimento de madeira do aro da roda.....
48	Figura 3.7- Mecanismo de acionamento.....
48	Figura 3.8- Mecanismo de tração.....
49	Figura 3.9- Corpo de prova com flanges e extensômetros.....
49	Figura 3.10- Flange conector do corpo de prova.....
50	Figura 3.11- Instrumentação do corpo de prova.....
50	Figura 3.12- Sistema de aquisição de dados: ADS-2000 “LYNX”, microcomputador, Fonte Minipa e Multímetro HP.....
51	Figura 3.13- Corpo de prova para ensaio de tração com plásticos segundo a norma ASTM D 638.....
52	Figura 3.14- Curva tensão/deformação para um dos corpos de prova ensaiado (ET 1.3).....
61	Figura 3.15- Curva tensão/deformação para um dos corpos de prova ensaiado (ET 2.1).....
62	Figura 3.16- Curva tensão/deformação para um dos corpos de prova ensaiado (ET 3.3).....
63	Figura 3.17- Curva tensão/deformação para um dos corpos de prova ensaiado (ET 4.1).....
63	Figura 3.18- Curva tensão/deformação para o corpo de prova (ET 1.1).....
III	Figura 3.19- Curva tensão/deformação para o corpo de prova (ET 1.2).....
VII	Figura 3.20- Curva tensão/deformação para o corpo de prova (ET 2.2).....
VII	Figura 3.21- Curva tensão/deformação para o corpo de prova (ET 2.3).....
XI	Figura 3.22- Curva tensão/deformação para o corpo de prova (ET 3.1).....
XII	Figura 3.23- Curva tensão/deformação para o corpo de prova (ET 3.2).....
XIV	Figura 3.24- Curva tensão/deformação para o corpo de prova (ET 4.2).....
XV	Figura 3.25- Curva tensão/deformação para o corpo de prova (ET 4.3).....
65	Figura 4.1- Curva tensão/deformação do material fornecida aos “softwares” LUSAS e ALGOR, como propriedades do HDPE.....

74	Figura 4.2- Dados de deformação, tensão, e módulo de Young fornecidos aos "softwares" LUSAS e ALGOR, como curva tensão/deformação do LDPE.....
66	Figura 4.3- Modelo do corpo de prova com a malha e as condições de contorno e carregamento aplicados no "software" LUSAS; a) HDPE e b) LDPE.....
67	Figura 4.4- Modelo do corpo de prova com a malha e as condições de contorno e carregamento aplicados no "software" ALGOR; a) HDPE e b) LDPE.....
68	Figura 4.5- Distribuição das tensões (a) e deformações (b) de von Mises na HDPE e b) LDPE.....
68	Figura 4.6- Distribuição das tensões (a) e deformações (b) de von Mises na HDPE com o "software" LUSAS.....
69	Figura 4.7- Distribuição das tensões (a) e deformações (b) de von Mises na HDPE com o "software" ALGOR.....
69	Figura 4.8- Distribuição das tensões (a) e deformações (b) de von Mises na HDPE com o "software" ALGOR.....
70	Figura 4.9- Curva tensão/deformação obtidas como resultado da modelagem do LDPE com o "software" ALGOR.....
XVII	Figura 4.10- Curva tensão/deformação obtidas como resultado da modelagem do LDPE com o "software" LUSAS.....
XVII	Figura 4.11- Curva tensão/deformação obtidas como resultado da modelagem do HDPE com o "software" ALGOR.....
XXI	Figura 4.12- Curva tensão/deformação obtidas como resultado da modelagem do LDPE com o "software" ALGOR.....
73	Figura 5.1- Curva tensão/deformação para os corpos de prova de HDPE, material que não foi submetidos a nenhum tipo de carregamento antes dos ensaios de tração.....
74	Figura 5.2- Curva tensão/deformação para os corpos de prova de HDPE, material submetido a carregamentos cíclicos antes dos ensaios de tração.....

75	Figura 5.3- Curva tensão/deformação para os corpos de prova de HDPE ensaiados a tração.....
74	Figura 5.4- Curva tensão/deformação para os corpos de prova de LDPE, material que não foi submetido a nenhum tipo de carregamento antes dos ensaios de tração.....
76	Figura 5.5- Curva tensão/deformação para os corpos de prova de LDPE, material que foi submetido a carregamentos cíclicos antes dos ensaios de tração.....
77	Figura 5.6- Curva tensão/deformação para os corpos de prova feitos de LDPE ensaiados a tração.....
78	



A-	alongamento total
a-	semicomprimimento da trinca
$c_p$ -	calor específico
E-	módulo de Young
$E_r(t)$ -	módulo de relaxação
AE-	energia de ativação
f-	frequência
$f_{ij}$ -	função conhecida de $\theta$
$G_c$ -	energia de fratura
K-	fator de intensidade concentrada de tensões
$K_{I-}$	intensidade do campo de tensões na ponta da trinca
$K_{Ic}$ -	fator de intensificação de tensões para o modo I
$K_{max}$ -	valor máximo da intensidade de tensões durante o ciclo de carga
L-	distância final depois da ruptura do corpo de prova
$L_0$ -	distância marcada no corpo de prova antes do ensaio
AL-	incremento da distância marcada inicialmente no corpo de prova
MP-	perda no módulo de tração ou cisalhamento
N-	vida a fadiga em número de ciclos
Q-	carga aplicada
$Q_e$ -	carga de escoamento
$Q_n$ -	carga em que se observa uma deformação de n%
$Q_r$ -	carga de ruptura
R-	velocidade do ensaio
r-	raio de curvatura na ponta da trinca
S-	área da seção transversal do corpo de prova depois da ruptura
$S_0$ -	área da seção transversal do corpo de prova antes do ensaio
T-	temperatura
t-	tempo
$U_r$ -	resiliência
$U_T$ -	tenacidade

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\gamma$ -	energia superficial liberada
$\dot{\gamma}$ -	taxa de deformação ao cisalhamento
$\delta_c$ -	deslocamento crítico da trinca
$\delta_t$ -	incremento no comprimento da trinca
$\varepsilon, \varepsilon_0$ -	deformação convencional ou de engenharia
$\varepsilon_f$ -	deformação até a fratura
$\varepsilon_p$ -	deformação no limite de proporcionalidade
$\varepsilon_L$ -	deformação longitudinal
$\varepsilon_T$ -	deformação transversal
$\eta$ -	viscosidade
$\theta, r$ -	coordenadas polares do ponto
$\nu$ -	coeficiente de Poisson
$\xi_d$ -	energia dissipada
$\rho$ -	densidade
$\sigma, \sigma_0$ -	tensão aplicada
$\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ -	tensões principais
$\sigma_c$ -	tensão crítica para o início do crescimento da trinca
$\sigma_e$ -	tensão de escoamento
$\sigma_f$ -	tensão de fratura
$\sigma_{ij}$ -	componente do tensor de tensões no ponto
$\sigma_n$ -	limite convencional $n$
$\sigma_p$ -	limite de proporcionalidade
$\sigma_r$ -	limite de resistência do material
$\sigma(t)$ -	tensão dependente do tempo
$\sigma_y$ -	tensão de escoamento na ponta da trinca
$\tau$ -	tempo de relaxação
$\phi$ -	estricção

CTOD-	deslocamento da abertura da ponta da trinca, "Crack tip opening displacement"
EP-	resina epóxi, "epoxy resin"
EPR-	elastômero de propileno-etileno, "ethylene propylene rubber"
HDPE-	polietileno de alta densidade, "high density polyethylene"
LDPE-	polietileno de baixa densidade, "low density polyethylene"
MEF-	Método dos Elementos Finitos
MEFL-	Mecânica da Fratura Linear Elástica
PA-	poliamida, "polyamide"
PE-	polietileno, "polyethylene"
PET-	poli(tereftalato de etileno), "poly(ethylene terephthalate)"
PP-	polipropileno, "polypropylene"
PPO-	poli(óxido de propileno), "poly(propylene oxide)"
PS-	poliestireno, "polystyrene"
PTFE-	poli(tetrafluor-etileno), "polytetrafluorethylene"
SPF-	sistemas de produção flutuante
UHMWPE-	polietileno de altíssimo peso molecular, "ultra-high molecular weight polyethylene"

## LISTA DE ABREVIATURAS

Com o presente trabalho, pretendeu-se avaliar a influência dos carregamentos cíclicos sobre o comportamento mecânico das camadas poliméricas externa (HDPE) e interna (LDPE) dos cabos submarinos eletro-ópticos (cabos umbilicais) empregados nas operações offshore. Primeiramente, numa bancada projetada e fabricada especialmente para esse fim, foi ensaiada à fadiga, uma seção de um cabo umbilical de diâmetro exterior de 108 mm. Depois de ser submetida a um determinado número de ciclos de carga, retiraram-se dessa seção amostras de ambas as camadas poliméricas. Também foram retiradas amostras de uma seção do cabo que não sofreu nenhum tipo de carregamento. Com as amostras retiradas, foram confeccionados corpos de prova para ensaios de tração, segundo a norma ASTM 638. Estes espécimes foram ensaiados à tração e, a partir da análise e comparação dos resultados, comprovou-se que o material da camada externa do cabo, HDPE, sofreu variações no seu comportamento mecânico, observando-se uma diminuição brusca na tenacidade do material devido aos carregamentos cíclicos. No material da camada interna (LDPE) não se observou nenhuma variação perceptível no seu comportamento mecânico. Finalmente, usando o Método dos Elementos Finitos (MEF), e com ajuda dos códigos computacionais LUSAS e ALGOR estabeleceram-se modelos físico-matemáticos com a finalidade de avaliar as grandes deformações nestes tipos de materiais, e cuja geometria seguiu os padrões dos corpos de prova ensaiados à tração. Observou-se durante as simulações computacionais que com o “software” LUSAS para ambos os materiais, HDPE e LDPE obtiveram-se bons resultados, não acontecendo o mesmo com o “software” ALGOR. Com os resultados obtidos, foi possível avaliar o comportamento mecânico desses polímeros estruturais e sua indicação como materiais de engenharia confiáveis.

## RESUMO

The aim of the present work is to evaluate the cyclic loading influence on the mechanical behavior of the polymeric external (HDPE) and internal (LDPE) layers that conform the optical-power submarine cables, employed in offshore operations. First, in the laboratorial arrangement specially projected and constructed to the experimental work, was tested a section of a cable, whit external diameter of 108 mm, subjected to fatigue loading. After a pre-defined number of load cycles, samples of the external and internal layers were retired from loaded cable. Following the standard ASTM 638, tensile test specimens were machined from the obtained samples, as well as from unloaded samples. After the tensile test, the results analysis showed that the material corresponding to the external layer (HDPE), had suffered changes in its mechanical behavior. Was observed, in this case, an abrupt drop in the material tenacity caused by the cyclic loading. In the internal layer was not observed a significant variation. Finally, using the Finite Element Method (FEM), and with the help of softwares like LUSAS and ALGOR were developed physical-mathematical models with the purpose of evaluating large deformations in these types of materials, and the geometries used followed the patterns of the tensile test specimens. It was observed during the computational simulations using the LUSAS software that we can obtained good results for both materials, HDPE and LDPE, what did not happen with the software ALGOR. The results analysis and the final conclusions serve to evaluate the mechanical behavior of these structural polymers and to indicate them as engineering reliable materials.

## ABSTRACT

Os cabos umbilicais usados nos sistemas flutuantes de produção encontram-se submetidos a condições de ambiente marinho, ou seja, ondas e correntes marinhas originando deslocamentos laterais das plataformas e movimentação das linhas ao longo do comprimento dos cabos, ocasionando sobre os mesmos uma combinação de esforços de tração, flexão, torção e pressão externa. Tais esforços podem ocasionar diferentes falhas estruturais, como por exemplo: fratura das partes metálicas e poliméricas, assim como o envelhecimento precoce das partes poliméricas.

Os cabos submarinos eletro-óticos (cabos umbilicais) sevem para transmitir sinais de controle e alimentar com energia os sistemas de válvulas instalados nas cabeças dos poços petrolíferos no fundo do mar. Sua estrutura é composta por materiais metálicos e poliméricos, que lhe conferem sustentabilidade e flexibilidade, possibilitando sua fabricação contínua e utilização em instalações de longos segmentos de cabos. A principal vantagem é que eles apresentam maior tolerância ao movimento lateral dos sistemas flutuantes de produção, e como desvantagem, a dificuldade de fabricação dos mesmos envolvendo diferentes geometrias e materiais.

Os cabos submarinos eletro-óticos (cabos umbilicais) sevem para transmitir sinais de controle e alimentar com energia os sistemas de válvulas instalados nas cabeças dos poços petrolíferos no fundo do mar. Sua estrutura é composta por materiais metálicos e poliméricos, que lhe conferem sustentabilidade e flexibilidade, possibilitando sua fabricação contínua e utilização em instalações de longos segmentos de cabos. A principal vantagem é que eles apresentam maior tolerância ao movimento lateral dos sistemas flutuantes de produção, e como desvantagem, a dificuldade de fabricação dos mesmos envolvendo diferentes geometrias e materiais.

Com a descoberta de grandes bacias petrolíferas em águas profundas no Brasil, um grande esforço tem sido desenvolvido no País nas últimas décadas a fim de alcançar a auto-suficiência na produção de petróleo e seus derivados. Nesse contexto, surgiu a necessidade de desenvolvimento de novas técnicas de Engenharia devido às exigências atuais nas operações de prospecção de hidrocarbonetos no fundo marinho. Estas técnicas envolvem o emprego de sistemas flutuantes de produção, constituídos de plataformas de produção, de navios convertidos para o mesmo fim e dos subsistemas que os compõem, tais como, cabos submarinos eletro-óticos, cabos umbilicais, "risers" de produção flexíveis e não flexíveis, linhas de ancoragem, etc. Assim, percebeu-se a necessidade de grandes investimentos em pesquisa e desenvolvimento por parte do governo e de grandes empresas como a PETROBRAS, PIRELLI, BRASFLFX, etc. Os principais entôques das pesquisas são a adaptação, inovação e busca de novos equipamentos e tecnologias para tornar mais produtivas e seguras as operações oceânicas.

## 1.1- Considerações Gerais

# CAPÍTULO I INTRODUÇÃO

Deve-se ressaltar que a falha do cabo umbilical resulta numa consequência desastrosa sob o ponto de vista econômico, devido à paralisação de operações de produção ou perfuração.

## 1.2- Características Estruturais e Funcionais dos Cabos Umbilicais

Os cabos umbilicais ilustrados na Figura 1.1, são utilizados para transmitir sinais de controle e alimentar com energia elétrica os sistemas de válvulas instalados nas cabeças dos poços petrolíferos no fundo do mar.

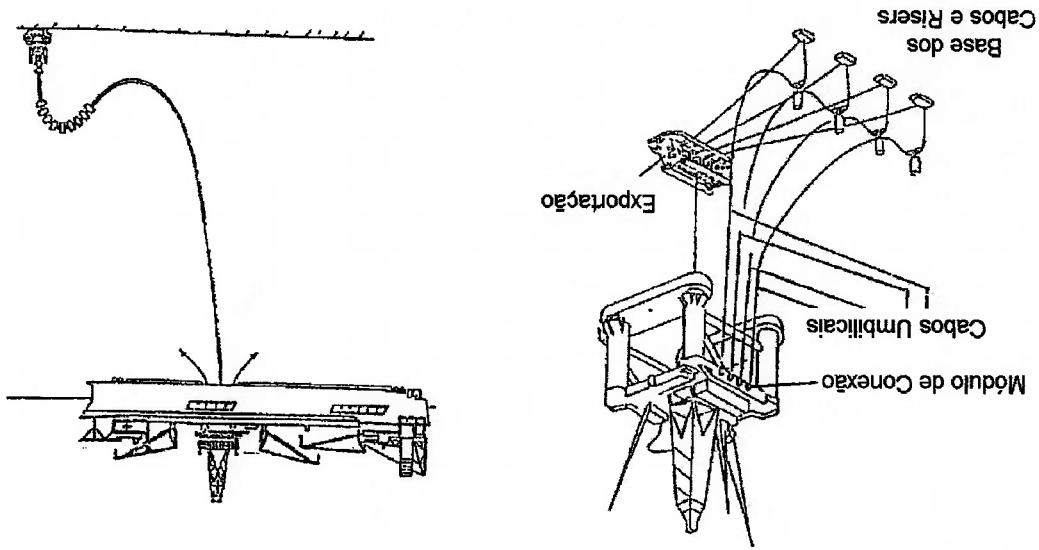


Fig. 1.1- Cabos umbilicais usados nos sistemas de produção flutuantes

Num projeto considerado adequado, os cabos umbilicais devem ser capazes de atender a certos requisitos básicos, tais como: suportar cargas de tração, resistir à pressão externa e resistir à flexão e à torção.

A estrutura típica de um cabo umbilical, mostrada na Figura 1.2, é composta basicamente de uma superposição de camadas plásticas e metálicas de caráter estrutural, cabos de cobre, os quais tem como função conduzir energia elétrica e um cabo de fibra óptica responsável pela transmissão de sinais.

Na Tabela 1.1 podem ser observados dados da geometria e materiais do cabo umbilical fornecidos pelo fabricante.

Tabela 1.1 - Dados da geometria e materiais do cabo umbilical (PIRELLI CABOS S. A)

	Dímetro Externo (mm)	Espessura (mm)	Material	YTS (MPa)	UTS (MPa)	Observações.
Camada Plástica Externa	108,0	5,0	HDPE	21	32	-
Camada Plástica Interna	84,1	3,0	LDPE	11	18	-
Armadura de Tração Externa	96,6	2,8	Aço Galvanizado	402	480	33 arames em espiral 12,34°
Armadura de Tração Interna	90,3	2,8	Aço Galvanizado	402	480	31 arames em espiral 13,52°
Condutores de Cobre	18,6	-	Cobre	205	205	-
Cabo de Fibra Óptica	14,0	-	Fibra Óptica de Silica	-	-	-
Borracha Extrudada	78,1	-	EPR	4,2	4,2	-

Nota:  
 HDPE- polietileno de alta densidade;  
 LDPE- polietileno de baixa densidade;  
 EPR- elastômero de propileno-etileno.

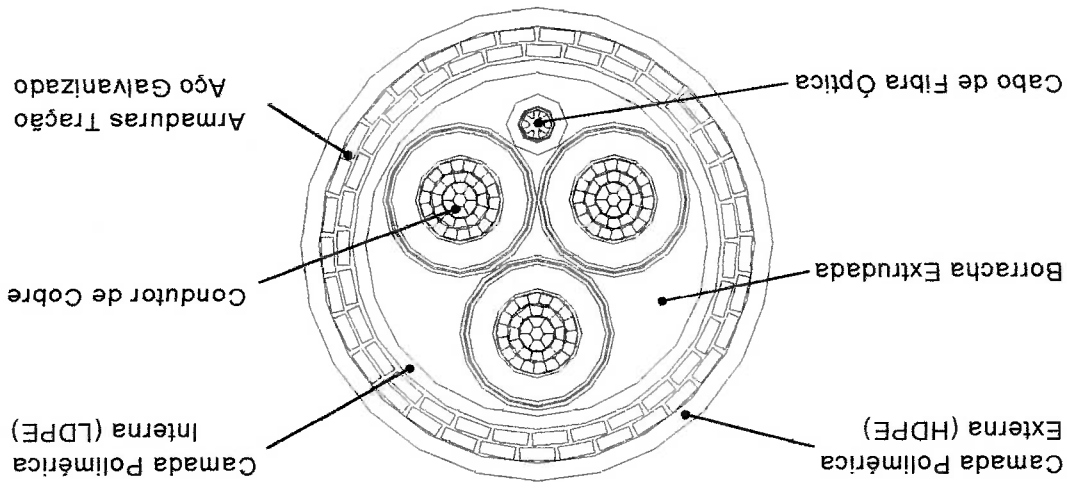


Fig. 1.2- Estrutura típica de um cabo umbilical



## 1.3-Síntese Bibliográfica

### 1.3.1- Generalidades

*A Engenharia Offshore* tem se mostrado como uma área com um desenvolvimento acelerado nas últimas décadas. O descobrimento de grandes bacias petrolíferas em águas profundas, mais de mil metros de profundidade, principalmente nos últimos dez anos, tem forçado o desenvolvimento de novas tecnologias na prospecção e exploração de petróleo e gás do fundo do mar.

Das plataformas fixas de produção, técnica e economicamente viáveis até profundidades de cerca de 500 metros, passou-se às plataformas semi-submersíveis e mais recentemente ao emprego de Sistemas de Produção Flutuantes (SPF). Estes sistemas são constituídos por plataformas de produção, navios convertidos para o mesmo fim e subsistemas, tais como, cabos umbilicais, "risers" de produção flexíveis e não flexíveis, linhas de ancoragem, etc.

Novos conceitos de posicionamento e fundeio foram desenvolvidos e outros tantos estão em pleno desenvolvimento como alternativa segura aos sistemas convencionais de posicionamento dinâmico, empregados com especial ênfase nas atividades de prospecção e perfuração.

Um dos elementos fundamentais na exploração e prospecção de petróleo e gás em águas profundas é o cabo umbilical, o qual tem a função de enviar sinais de controle e fornecer energia elétrica ao conjunto de válvulas (Árvores de Natal) instalado na cabeça do poço, no fundo do mar, que controlam os fluxos de entrada e saída de óleo e gás.

Os cabos umbilicais depois de serem instalados nos Sistemas de Produção Flutuantes têm duas zonas que ficam sob solicitações muito diferentes. Uma é a parte do cabo que fica assentada no fundo marinho, e a outra, a que fica suspensa desde a unidade de produção até o fundo, caracterizada por apresentar um longo vão suspenso. Na primeira zona as cargas atuantes são sempre estáticas, já na segunda as cargas são dinâmicas, originadas pela correnteza oceânica e pelas movimentações do sistema de produção flutuante, onde são evidenciadas a diversidade e complexidade dos carregamentos a que estão submetidos os cabos umbilicais durante sua vida em serviço.

Na Tabela 1.2 mostram-se alguns dados estatísticos do desenvolvimento dos sistemas flutuantes de produção da PETROBRAS nos últimos anos. Percebe-se o crescimento acelerado na instalação e utilização destes tipos de sistemas. Foram instalados mais de 1300 km de cabos umbilicais para operações Offshore.

Tabela 1.2- Estatísticas dos sistemas de produção flutuantes instalados pela PETROBRAS até princípio do ano 2002 (PETROBRAS)

Equipamentos	Quantidades Instaladas
Unidades Flutuantes de Produção	29 unidades
Arvores de Natal	386 unidades
Cabos Umbilicais	1344 km
Risers Flexíveis	2172 km

**1.3.2- Ensaio em cabos umbilicais**

As falhas dos cabos umbilicais podem ser originadas devido a vários fatores tais como: fadiga mecânica, sobrecargas, dano localizado (impacto), corrosão, envelhecimento dos materiais poliméricos, desgaste por atrito entre as diferentes camadas ou abrasão externa, entre outros (Fuku et al., 1992). Além disso, grandes mudanças de curvatura podem provocar fadiga e fluência nas camadas poliméricas e ao mesmo tempo comprometer a estanqueidade e o bom comportamento dos cabos umbilicais.

Ainda hoje, requisitos de projeto não são geralmente diferenciados no que diz respeito às possíveis falhas que podem ocorrer. Devido a isto, grandes esforços relativos ao tema têm-se desenvolvido no campo da pesquisa, podendo-se dizer, que não existe na atualidade uma correlação segura entre critérios de projeto e realidade de serviço.

Muitos ensaios mecânicos têm sido feitos no que diz respeito as linhas flexíveis. Fuku et al. (1992), Ishi et al. (1995), Spark et al. (1992) e poucos trabalhos reproduzem as condições reais de serviço dos cabos umbilicais.

Fuku et al. (1992) estudaram a vida a fadiga em tubulações flexíveis, eles simularam as complexas solicitações originadas pelo carregamento externo atuante no "riser" provocado pelo movimento da plataforma flutuante e as variações das

condições ambientais. Fizaram dois tipos de ensaios usando como corpos de provas seções de "risers" flexíveis com diâmetros exteriores de 4 e 8 pol. Durante os testes foram impostas mudanças de curvatura na tubulação originando carregamentos cíclicos nas suas diferentes camadas. No primeiro ensaio mostrado na Figura 1.3, o cabo foi submetido a solicitações de flexão e rotação combinadas. Neste teste usou-se um corpo de prova de 5 a 8 metros de comprimento com uma curvatura prescrita e aplicou-se uma rotação ao redor do eixo do corpo de prova, impondo a mudança de curvatura especificada. Além disso, também foi imposta uma pressão interna. Os números totais de ciclos aplicados até a falha do "riser" foram registrados.

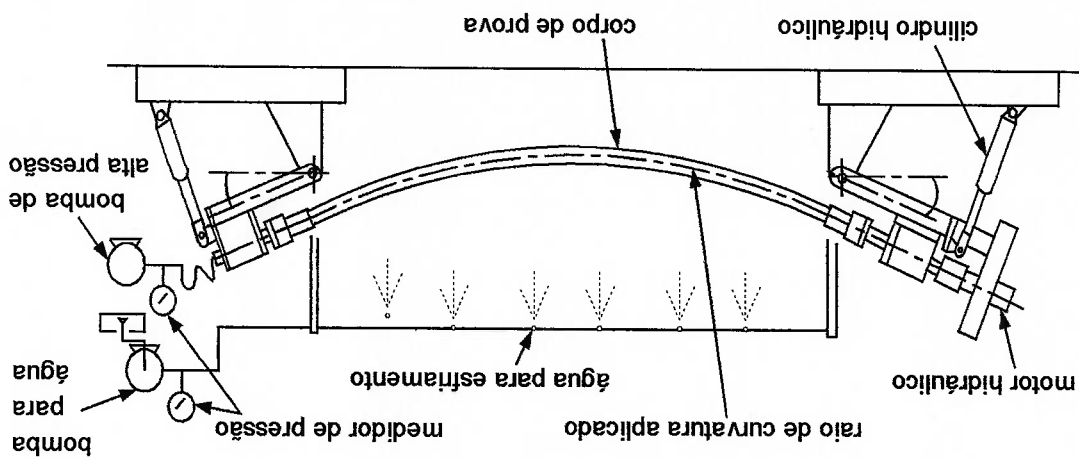


Fig. 1.3 - Configuração do ensaio de fadiga por flexão com rotação

O segundo ensaio feito foi de fadiga por flexão plana (forma de U). A Figura 1.4 mostra a configuração do ensaio. Neste os corpos de prova, com comprimento de 12 a 14 m, foram suspensos em forma de U, e foram impostas mudanças na curvatura mediante deslocamento de um de seus extremos para cima e para baixo. Além da tração de suspensão foi imposta uma pressão interna e registrou-se o número de ciclos até a falha.

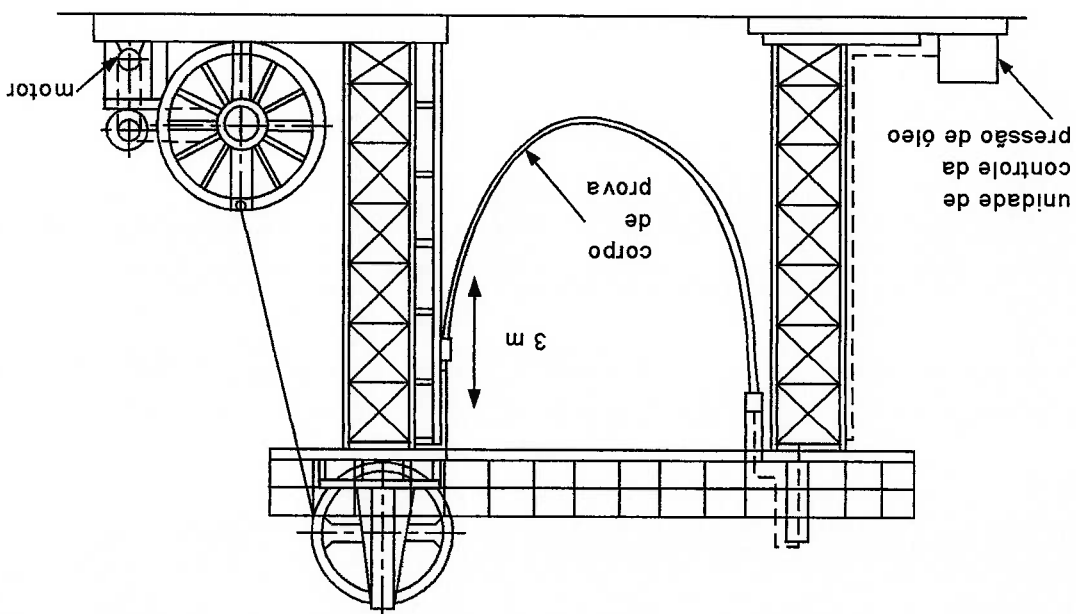
Na estrutura dos cabos umbilicais encontram-se duas camadas poliméricas, as quais têm funções fundamentais no bom funcionamento deles, estas são:

Um projeto de cabo umbilical considerado adequado, além do cabo ter boa resistência à tração axial, pressão externa, torção e flexão, ele deve possuir baixa rigidez à flexão, o que é possível por sua construção em camadas de diferentes materiais, geometrias e dimensões de acordo com as solicitações a que vai estar submetido. Estas camadas em trabalho solidário propiciam resistência e estanqueidade, sem comprometer a necessária flexibilidade do conjunto.

### 1.3.3-Camadas poliméricas do cabo umbilical

Depois da análise e comparação dos resultados obtidos em ambos ensaios, os autores comprovaram a existência de uma grande influência da taxa de mudança de curvatura e do tamanho do corpo de prova na vida a fadiga dos "risers", e que para uma mesma mudança de curvatura no ensaio de fadiga por flexão plana, o tempo de vida foi quatro vezes maior que no ensaio de fadiga por flexão com rotação. O modo de falha foi o mesmo para ambos os ensaios: ruptura por fadiga na armadura de tração interna. Finalmente, o trabalho estabelece procedimentos analíticos estatísticos para a predição do tempo de vida dos "risers" sob condições irregulares do meio.

Fig. 1.4-Configuração do ensaio de fadiga por flexão plana (forma de U)



- Camada Plástica Externa - é feita de polietileno de alta densidade (HDPE) normalmente extrudada sobre a armadura de tração externa, proporcionando estanquidade ao cabo, protegendo a estrutura interna contra danos de corrosão, abrasão e impacto, e também ajudando a manter os arames da armadura de tração na posição correta;

- Camada Plástica Interna - é feita de polietileno de baixa densidade (LDPE), extrudada sobre o elastômero que atua como isolante e proteção dos condutores de cobre e da fibra óptica. Esta camada é capaz de transmitir os esforços das pressões de contato entre a camada metálica e o elastômero adjacente.

As camadas devem ter boas propriedades em relação ao envelhecimento, resistência ao desgaste, grande elongação antes de atingir a ruptura e boa flexibilidade, já que o prolongado efeito dinâmico a que está submetido o cabo durante sua vida de serviço pode provocar fissuras e ruptura por fadiga e envelhecimento dos materiais poliméricos que o compõem. Na Figura 1.5 (Alves; Costa, 2001), (Quintela; Alves, 2002) podem-se observar os efeitos catastróficos da corrosão na estrutura interna de uma linha flexível originado pela fissura ou ruptura da camada polimérica externa.



Fig. 1.5- Efeito da corrosão na estrutura interna de uma linha flexível devido a fissuras na camada polimérica externa

Os testes de tração-deformação uniaxial são os ensaios mecânicos mais usados devido a seu baixo custo, rapidez e simplicidade com que podem ser feitos.

No entanto, somente uma curva levantada com uma temperatura e taxa de deformação é insuficiente. Para dar ao engenheiro ou desenhista informações mais práticas e precisas devem ser feitos ensaios com temperatura e taxas de deformação diferentes, o que aumenta o tempo e custos deste tipo de ensaio.

Liu; Pigott (1998) fizeram testes de tração e impacto Izod em oito polímeros termoplásticos diferentes, incluindo HDPE e LDPE. Para os ensaios de tração a metodologia usada foi, segundo a norma ASTM D 638, com corpo de prova tipo I. As velocidades de ensaio foram para o LDPE 500 mm/min e para o HDPE 50 mm/min, os corpos de prova foram confeccionados a partir de pranchas de espessura de 3 mm. Depois de comparar os resultados obtidos com a resistência ao cisalhamento, determinada previamente, os autores mostraram que para o HDPE e LDPE a resistência a tração nominal foi igual à tensão de escoamento e aproximadamente a mesma que a resistência a cisalhamento medida. Eles concluíram que o conceito de tensão última não é sempre útil no caso de polímeros dúcteis, já que suas propriedades mecânicas mudam radicalmente durante os ensaios de tração devido à reorientação das cadeias poliméricas.

Meyer; Pruitt (2001) estudaram a influência combinada dos carregamentos cíclicos e as radiações- $\gamma$  sobre o polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMWPE) empregado para substituir cartilagens articulares. Eles utilizaram UHMWPE extrudado para uso médico GUR 4150 e confeccionaram corpos de prova para ensaios de tração, segundo a norma ASTM D 638-97. Os corpos de prova foram usados no sentido paralelo à linha de extrusão. A metade dos corpos foi esterilizada com raios- $\gamma$  em ambiente de nitrogênio, além de serem envelhecidos por quatro anos ao ar antes de serem ensaiados.

Os ensaios consistiram em submeter os diferentes corpos de prova a carregamentos cíclicos de tração uniaxial. Os testes feitos mostraram que com o incremento do número de ciclos de cargas e as deformações reais resultou um aumento das deformações plásticas e com isso decresceu linearmente a densidade do material, assim como também se incrementou a formação de microporos e trincamento. Além disso, foi encontrado um incremento no alinhamento laminar.

A diferença desenvolvida nos graus das texturas entre o UHMWPE não esterilizado e esterilizado foi atribuída à micro-estrutura inicial de cada material. O estudo mostrou que os raios- $\gamma$  e o posterior envelhecimento tiveram um efeito fragilizante sobre o UHMWPE provocando microporos e trincamentos que poderiam originar fraturas prematuras nas próteses.

Quintela, Alves (2002) utilizaram seções de "risers" flexível de diâmetro 2 ½ pol. Estas foram expostas a atmosferas corrosivas naturais, além disso, foram tiradas amostras da camada externa de polietileno, a qual foi submetida a um envelhecimento acelerado em condições de laboratório. Em seguida, com estes materiais foram feitos corpos de prova, segundo a norma ASTM 638 para ensaios de tração uniaxial. Os corpos de prova foram confeccionados de duas formas diferentes, uns em sentido longitudinal e outros transversalmente à direção da extrusão com o objetivo de verificar a influência do sentido da laminação do polímero na sua resistência à tração. Eles demonstraram que as camadas externas dos dutos flexíveis sofreram reduções significativas na resistência a tração uniaxial devido aos efeitos corrosivos, e que os corpos de prova confeccionados transversalmente ao sentido da laminação sofreram maiores reduções na resistência a tração axial que os fabricados longitudinalmente.

Fratura e falha do material têm sido associadas com os testes de tensão/deformação ou à ruptura por fluência (Nielsen; Landel, 1994). A quantidade e diversidade dos trabalhos relacionados com o estudo de fratura mostram o grande interesse do tema, sendo que a sua aplicação no estudo de polímeros pode resultar num incremento da fabricação de peças e estruturas mecânicas.

O Método da Mecânica da Fratura por sua precisão na simulação do fenômeno é o mais recomendado de ser utilizado, sendo inclusive empregado na solução de problemas da engenharia aeroespacial (Nielsen; Landel, 1994). Os diversos estudos de comportamento a fratura de polímeros abordam o assunto através de três diferentes enfoques (Kinloch; Young, 1983):

- Mecânica dos meios contínuos;
- Comportamento da estrutura molecular; e
- Aproximação estatística.

A mecânica da fratura elasto-plástica procura simular o comportamento de trinças em materiais com comportamento não linear e independentemente do tempo. Os dois parâmetros mais utilizados para a representação da elasto-plasticidade no

1998).  
 permitissem o projeto da estrutura sob essa condição de serviço (Ricetti; Bittencourt, fraturamento elasto-plástico, e, consequentemente, métodos de cálculo que emprego industrial, houve grande motivação para se pesquisar o fenômeno do (MFEI). Esses materiais desenvolvem a fratura no regime plástico. Devido ao representação do fenômeno de fratura através da Mecânica da Fratura Linear Elástico valores muito superiores aos limites de escoamento. Portanto, tornava-se inviável a alguns materiais eram muito elevados, fazendo com que as tensões atingissem se que os valores obtidos para o Fator de Intensificação de Tensões Crítico,  $K_{Ic}$ , para No entanto, no desenvolvimento do estudo da mecânica da fratura, observou-

Landel, 1994); (Nielsen, 1962).  
 materiais frágeis, que pode ser aplicada para os polímeros cristalinos, (Nielsen, Medindo  $\sigma_f$  como uma função de  $a$ , obtém-se a equação de Griffith para os a-semicomprimimento da trinca (m).

$\gamma$ -energia superficial liberada ( $J m^{-2}$ );

E- módulo de Young (MPa);

$\sigma_f$  - tensão de fratura (MPa);

onde:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2 E \gamma}{\pi a}} \quad (1.1)$$

requerida para criar uma superfície nova. Desta forma, obtve-se a seguinte equação: fratura. Ele relacionou a energia liberada pela propagação da trinca com a energia que ocorre na ponta da trinca realizando um balanço energético para o modelo de Griffith (1920), resolveu o problema da singularidade matemática das tensões deformação plástica não serem consideradas.

forma elástico-linear, devido à dependência do tempo, a visco-elasticidade e a determinísticas. A situação é mais simples para materiais que são deformados de uma devido a uma série de eventos que podem ser previstos através de considerações A aproximação estatística permite apreciar o início do processo de fratura



Fraturamento são: a Integral  $J$  e o deslocamento da abertura da trinca  $\delta$  (CTOD). Seus valores críticos são praticamente independentes do Fator de Intensificação de Tensões Crítico ( $K_{Ic}$ ) do material, quando se consideram grandes deformações plásticas. A integral  $J$  e o CTOD podem ser utilizados como critérios para dimensionamento no regime elasto-plástico. Embora possuam limitações, esses parâmetros são mais abrangentes que a MFEL (Ricetti; Bittencourt, 1998).

O Método da Integral  $J$  é bastante eficiente, principalmente para materiais dúcteis, e de fácil implementação computacional. O desenvolvimento de modelos que combinam dano e fraturamento tem ganhado bastante ênfase por representarem mais fielmente o fenômeno físico, sendo validados para os casos de pequenas e grandes deformações. Apesar disso, ainda existem grandes dificuldades em acoplar de forma satisfatória estes modelos, pois a transição entre a predominância de efeitos microscópicos para os macroscópicos não é trivial (Castelain; Coulon; Gsell, 1997); (Ricetti; Bittencourt, 1998).

Na maioria das situações práticas, as fraturas são originadas por concentrações locais de tensões, tais como as imperfeições e os entalhes. Portanto, é extremamente importante o conhecimento do estado local de tensões e deformações (Kinloch; Young, 1983).

Muitos trabalhos estão sendo feitos com a finalidade de avaliar a integridade estrutural de componentes de engenharia. Massa; Piques; Laurent, (1997), pesquisaram o critério da propagação rápida da trinca (RCP) no polietileno de média densidade (MDPE) utilizado em tubulações para gás. O primeiro corpo de prova analisado foi um anel com trinca ("cracked ring") e depois um corpo de prova "Charpy", onde foram levantados o Fator de Intensificação de Tensões em função da temperatura,  $K(T)$  e a Taxa de Deformação, obtendo-se no limite inferior da temperatura o valor crítico ( $K_{Ic}$ ). Isto dá um critério para se prever a RCP.

Por outro lado Bureau; Dickson; Denaull (1998a) realizaram testes de propagação da trinca por fadiga (FCP) em misturas poliméricas de poliestireno (PS) e polietileno de alta densidade (HDPE) em diferentes proporções. Os corpos de prova empregados foram do tipo "compact test especimen" (CT) obtidos por processos de injeção, submetidos a cargas cíclicas com frequências entre 2 a 20 Hz. Constatou-se que o incremento da frequência de carga leva a uma diminuição do crescimento da

trinca por fadiga (Bureau; Dickson; Denault, 1998a). Além disso, foi constatado também que os corpos de prova carregados paralelamente ao sentido do fluxo de injeção, mostraram menor crescimento da trinca por fadiga em relação aos carregados perpendicularmente, comprovando as boas propriedades mostradas por estes materiais quando são submetidos a tensões paralelas no sentido do fluxo fundido, (Bureau; Dickson; Denault, 1998a); (Bureau; Dickson; Denault, 1998a); (Liu; Piggott, 1998); (Pegoretti; Marchi; Ricco, 1997).

Mills (1974), propôs uma forma de estimar o tamanho da região plastificada, que, em comparação com os resultados obtidos em ensaios, apresentou boa concordância para chapas de policarbonato, polissulfatos e poliorvínil. O modelo proposto é baseado na análise de escoamento, ou coesivo, para chapas finas trincadas. É um tipo de modelo de trinca que apresenta escoamento localizado, baseado em extensões da MFEL. Experimentalmente, foi determinado que o raio da zona plastificada ao redor da trinca é aproximadamente igual à espessura da chapa. Mills considerou que a zona de plastificação é muito maior que a espessura, e modelou a zona plastificada em forma de uma tira na frente da trinca. O material é considerado elasto-plástico perfeito na ponta da tira. Este modelo considera que o efeito do escoamento aumenta o tamanho da trinca, na direção da zona escoada. O incremento no comprimento da trinca ( $\delta_t$ ) pode ser calculado para uma placa infinita, submetida à tensão uniforme  $\sigma$ , através da eq.(1.2.)

$$\delta_t = \frac{\sigma_y a \ln \left( \sec \frac{\pi \sigma}{2\sigma_y} \right)}{8/\pi} \quad (1.2.)$$

onde:

$\delta_t$ - incremento no comprimento da trinca (m);

$\sigma_y$ - tensão de escoamento na ponta da trinca (M Pa)

E- módulo de Young (M Pa);

$\sigma$ - tensão aplicada na placa (M Pa);

a- semicomprimento da trinca (m).

#### 1.4- Objetivos do Trabalho

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a influência dos carregamentos cíclicos sobre o comportamento mecânico das camadas poliméricas dos cabos submarinos eletro-óptico, com o fim de aumentar a confiabilidade destes tipos de materiais.

Especificamente podem-se estabelecer os seguintes objetivos:

- a) Determinação experimental dos parâmetros que caracterizam o comportamento mecânico a tração do polietileno de alta densidade e o polietileno de baixa densidade que compõem as camadas externa e interna de um cabo submarino eletro-óptico antes e depois de ser submetido a carregamentos cíclicos (ensaio de fadiga) para ver a influência deste tipo de solicitação sob as propriedades mecânicas de ambas as camadas poliméricas.
- b) Avaliação matemático-computacional de um corpo de prova, segundo a norma ASMT 638, utilizando códigos computacionais de Elementos Finitos para se verificar a confiabilidade destes tipos de programas na simulação do comportamento mecânico de materiais poliméricos.

Com o passar do tempo o homem tem realizado trabalhos de engenharia cada vez mais complexos. Relacionado com isto, tem surgido a necessidade de procurar novos materiais que se adaptem a estas condições, tanto no sentido de maximizar as suas propriedades quanto no de minimizar os seus custos de produção.

Os primeiros materiais de engenharia utilizados pelo homem foram a madeira e a pedra. Posteriormente surgiram os metais, as cerâmicas e o vidro. Logo, no início do século XX apareceram os polímeros, os quais, devido às suas boas propriedades físico-químicas e seu baixo custo de produção têm substituído progressivamente os outros materiais de engenharia citados anteriormente em muitas de suas aplicações.

Os polímeros são materiais constituídos por moléculas de elevado peso molecular, chamadas macromoléculas, nas quais os átomos das cadeias são unidos por ligações covalentes, (Biasotto, 1985); (Biasotto, 1991); (Raymond, 1991). Estas moléculas são compostas por grande número de pequenas unidades químicas repetidas, as quais se arranjam em longas cadeias, (Masca, 1989).

Os polímeros estruturais têm uma ampla aplicação na vida moderna e a sua utilização tem-se estendido em larga escala na indústria. Suas principais vantagens, que os tem tomado materiais de grande interesse para a engenharia, são, (Biasotto, 1985), (Biasotto, 1991):

- a- Em temperatura ambiente, módulos de elasticidade considerados adequados para uso estrutural;
- b- peso reduzido em comparação com cerâmicas e metais;
- c- facilidades de fabricação e processamento;
- d- menor custo energético de fabricação e transformação;
- e- boa resistência ao impacto;
- f- eliminação de tratamento contra o fenômeno de corrosão, já que a ausência de insaturações olefinicas favorece as características de resistência à oxidação e a intempéries;
- g- bom isolamento elétrico e térmico;
- h- baixo custo de acabamento.

## CAPÍTULO II

### CARACTERÍSTICAS DOS POLÍMEROS ESTRUTURAIS

## 2.2- Classificação dos Polímeros Estruturais

Os polímeros podem ser divididos, de acordo com suas propriedades, em três

grandes grupos:

a) Termoplásticos;

b) Termorrígidos;

c) Elastômeros (Borrachas).

Os **termoplásticos**, grupo onde se encaixam os polítenos de alta e baixa densidade (HDPE e LDPE), são formados por cadeias moleculares bidimensionais unidas por forças secundárias fracas, forças de van der Waals, que permitem os movimentos individuais das cadeias. Eles são muito sensíveis às mudanças de temperatura, amolecendo quando aquecidos (eventualmente se liquefazendo) e endurecendo quando resfriados. Este processo é totalmente reversível e pode ser repetido (Suh, Turner, 1985).

Em nível molecular, as forças das ligações secundárias são diminuídas à medida que se elevam as temperaturas e pressões, devido ao aumento do movimento molecular, de tal forma que o movimento relativo das cadeias adjacentes é facilitado quando uma solitação mecânica é aplicada. Uma degradação irreversível acontece quando a temperatura de um termoplástico fundido é elevada até o ponto no qual a vibração molecular torna-se violenta o bastante para quebrar ligações covalentes primárias, (Suh, Turner, 1985).

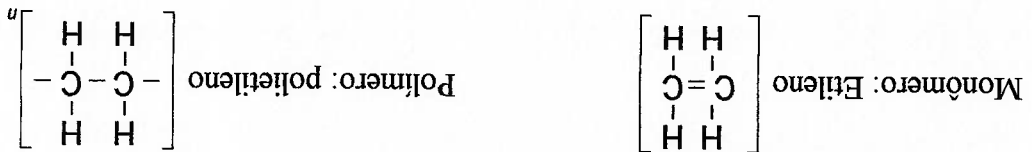
Os **termorrígidos** são formados por uma estrutura reticulada de cadeias moleculares tridimensionais unidas por enlaces covalentes primários muito fortes que impossibilitam as movimentações individuais das cadeias. Eles tornam-se permanentemente duros e não amolecem mesmo sob subsequente aquecimento.

Durante o tratamento térmico inicial, estabelecem-se ligações covalentes entre as cadeias moleculares adjacentes. Estas ligações ancoram as cadeias entre si de modo a resistir à vibração e movimento da cadeia a elevadas temperaturas. A reticulação é normalmente extensiva no caso de 10 a 50 % do meio da cadeia reticulada. Somente aquecendo a elevadíssimas temperaturas causaria ruptura destas ligações cruzadas com subsequente degradação do polímero (Suh, Turner, 1985). Estes polímeros são normalmente duros, fortes e mais frágeis que os termoplásticos e possuem melhor estabilidade térmica.

Os elastômeros não se cristalizam facilmente, são amorfos, as rotações das ligações da cadeia são relativamente livres para que as cadeias "enroladas" respondam prontamente ao esforço aplicado. A restrição ao movimento das cadeias passa de uma a outra pela reticulação neste tipo de material. As ligações cruzadas agem como ponto de ancoramento entre as cadeias prevenindo o escorregamento entre elas. Uma das principais propriedades dos elastômeros é a sua elasticidade, isto é, eles têm a capacidade de ser deformados em grande taxa e retornar a seu estado inicial sem perdas das propriedades. A reticulação em muitos elastômeros é realizada pelo processo chamado vulcanização.

### 2.3- Característica do Polietileno

O **Polietileno (PE)** é um plástico tenaz e coriáceo, com aparência untuosa, amplamente usado na confecção de isolamentos flexíveis para cabos elétricos. Ele é obtido pela polimerização do etileno ( $C_2H_4$ ) sob condições controladas de temperatura e pressão. Sob altas pressões, de 1 a 2 kbar, e altas temperaturas, de 100 a 300 °C, obtém-se polietileno de baixa densidade (LDPE) caracterizado por moléculas bastante ramificadas. Diminuindo-se as pressões abaixo de 30 bar e temperaturas de 40 a 150 °C e com catalisadores muito ativos obtém-se o polietileno de alta densidade (HDPE) caracterizado por longas moléculas lineares (Blass, 1988). A seguir apresenta-se a estrutura química dos polietilenos.



Na Tabela 2.1 mostram-se algumas das características destes materiais poliméricos.

Tabela 2.1 - Algumas das características físicas dos polietilenos de alta e baixa

Características	HDPE	LDPE
Peso molecular (g/mol)	200 000	50 000
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0.940...0.970	0.920...0.940
Índice de refração	1.54	1.51...1.52
Temperatura de fusão (°C)	130...135	109...125
Temperatura de transição vítrea (°C)	-100...-125	-20...-30
Cristalinidade (%)	até 95	até 60

densidade (Biasotto, 1991)

Os materiais poliméricos podem-se encontrar em quatro estados físicos

diferentes, dependentes da temperatura e do tempo. No entanto, na prática esta

divisão não é sempre clara:

- estado vítreo;
- estado de couro ou elasticidade entrópica atrasada;
- estado de elastômero ou elasticidade entrópica instantânea;
- estado viscoso.

Os polímeros estruturais podem se comportar como vítreos em temperaturas

abaixo da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), e o comportamento é elástico e

independente do tempo em conformidade com a "Lei de Hooke". Para temperaturas

superiores à temperatura de fusão ( $T_f$ ) os materiais poliméricos comportam-se como

um líquido viscoso, e para temperaturas maiores que a temperatura de transição

vítrea ( $T_g$ ) e menores que a temperatura de fusão ( $T_f$ ), os materiais poliméricos exibem

uma combinação de características mecânicas intermediárias dos dois estados

anteriores. Esta condição é denominada visco-elasticidade.

Na Figura 2.1 (Callister, 1997) pode-se apreciar o comportamento mecânico

para três dos estados físicos mencionados anteriormente. Mostram-se as curvas

deformação versus tempo para um ciclo de carga, onde  $T_a$  é o instante quando a

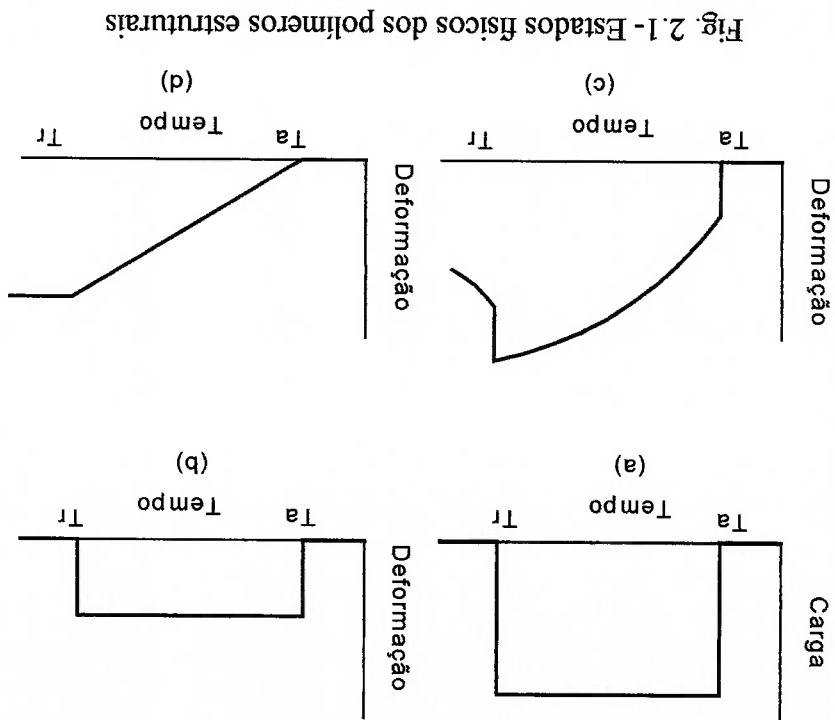
carga é aplicada e  $T_r$  quando esta é removida.

No estado vítreo, ou seja, a uma temperatura menor que  $T_g$ , ao aplicar uma carga sobre um material polimérico origina-se instantaneamente uma deformação elástica que é independente do tempo. Removida a carga, a deformação é recuperada e o material volta a suas dimensões originais. Este comportamento é mostrado na Figura 2.1(b).

A uma temperatura maior que  $T_g$ , a agitação térmica das cadeias poliméricas é suficiente para promover uma agitação elástica retardada e um escoamento viscoso. Ao remover a carga, a deformação elástica é recuperada, mas a viscosa se mantém. Este estado é chamado de couro ou de elasticidade entrópica atrasada "leathery state". O módulo elástico neste estado converte-se numa função da deformação e do tempo, a deformação não é completamente recuperável. Este estado é representado pela Figura 2.1(c).

No estado viscoso, a deformação ou alongamento, não é instantânea, ou seja, em resposta a uma solitação aplicada, a deformação é função do tempo. Esta deformação não é reversível ou completamente recuperável depois que a solitação fora retirada, conforme mostra a Figura 2.1(d).

É conveniente distinguir estes estados físicos dos polímeros dependentes da temperatura. No entanto, na prática esta diferenciação nem sempre é clara. Os





termoplásticos empregados em estruturas de engenharia são usados quase sempre nos estado (b) e (c).

## 2.5- Características da Deformação nos Polímeros Estruturais

No comportamento dos materiais poliméricos podem-se mencionar três modos de deformação diferentes (Wyatt, 1974), que são:

- elasticidade pura;
- elasticidade entrópica;
- escoamento viscoso.

A elasticidade pura acontece quando se aplica uma carga externa no material, originando-se um deslocamento dos átomos das suas posições de mínima energia potencial, até o instante em que novas forças internas equilibram as forças externas. Os átomos nas cadeias poliméricas são mantidos em posições fixas por fortes ligações covalentes. Quando submetidos a cargas externas acontecem deslocamentos relativos entre eles, com o consequente incremento da energia interna. Ao ser removida esta força os átomos retornam às suas posições originais. Esta deformação é elástica e instantânea, sendo típica nos materiais termorrígidos e nos termoplásticos em temperaturas inferiores à de transição vítrea ( $T_g$ ).

A deformação do tipo elasticidade entrópica é a capacidade que os segmentos das cadeias poliméricas têm de girar em torno de suas ligações simples, criando vários arranjos torcidos, denominados conformações, os quais mudam constantemente devido às transições rotacionais que acontecem continuamente nas cadeias. A extensão média das cadeias de um polímero linear, sem carga, permanece constante, já que para cada molécula que tende a enrolar-se, haverá outra que tende a esticar-se. Com a aplicação de uma carga de tração, a extensão da molécula não é aleatória, originando-se na direção da aplicação da carga um alinhamento molecular e diminuindo a entropia das moléculas.

Ao deixar de atuar a carga, continuam acontecendo mudanças na forma das moléculas, mas, são preponderantes aquelas mudanças que aumentam a entropia das cadeias moleculares de modo a restabelecer sua extensão média original com o decorrer do tempo, ou seja, o processo não é instantâneo, este é elástico e depende do tempo, chamando-se então visco-elástico.

O ultimo tipo de deformação origina-se devido ao lento deslizamento das moléculas, em relação umas a outras para novas posições, ao que chamamos escoamento viscoso. Esta deformação acontece nas regiões amorfais dos polímeros onde as moléculas mantêm sua posição devido às forças de van der Waals. Assim, as moléculas podem se movimentar desde que seja fornecida uma energia térmica suficiente para aumentar suas vibrações e vencer as forças de van der Waals atuantes entre elas. Esta deformação não é um processo instantâneo, mas depende do tempo e da temperatura, já que é relacionado com a viscosidade do material. É irreversível, pois a deformação produzida é plástica (Wyatt, 1974).

## **2.5.1- Relações tensão/deformação nos polímeros estruturais**

Nas secções anteriores discutiu-se o comportamento mecânico dos polímeros estruturais, o qual depende em grande escala da temperatura e da taxa de deformação. Daí a influência destes fatores nas curvas tensão/deformação destes materiais. Na Figura 2.2, mostram-se as curvas tensão versus deformação características para os diferentes tipos de materiais poliméricos (Nielsen, Landel, 1994).

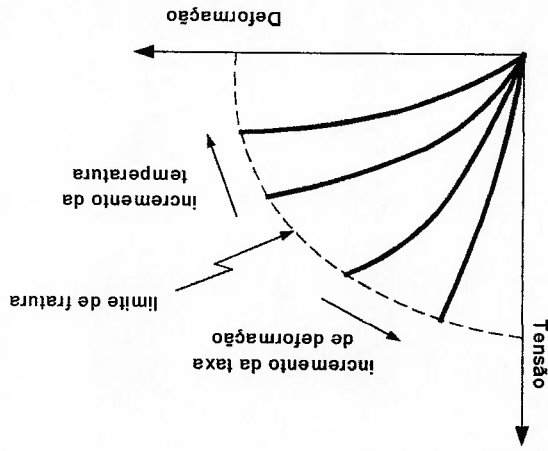
A Figura 2.2 a, apresenta as curvas tensão/deformação típicas dos materiais termorrígidos os quais são duros e frágeis, pelo que sua deformação máxima é somente um pequeno percentual. Este tipo de polímero é muito pouco sensível à taxa de deformação e à variação da temperatura.

Para os polímeros termoplásticos cristalinos e semicristalinos a forma típica das curvas tensão versus deformação é mostrada na Figura 2.2 b, e estes são muito sensíveis a variações de temperatura e a taxas de deformação. Geralmente o estranhamento e arrastamento destes começa nas secções mais frágeis. A deformação final neste tipo de materiais pode atingir até 700 %. A zona onde surge o pescoço não sofre ruptura imediatamente quando o fluxo de tensões aumenta devido à orientação das cadeias moleculares. Antes da fratura, a secção transversal do corpo de prova diminui uniformemente.

Para elastómeros e termoplásticos muito dúcteis que não fazem pescoço a curva de tensão/deformação características é mostrada na Figura 2.2(c).

dos polímeros

Fig. 2.3- Efeitos da taxa de deformação e temperatura sob a curva tensão/deformação

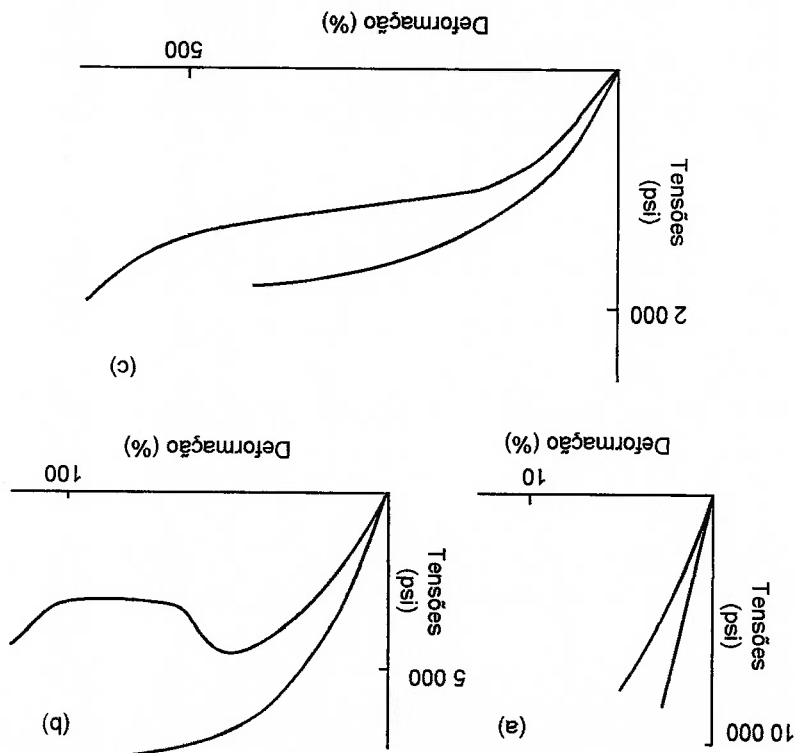


deformação e na temperatura.

Na Figura 2.3 (Suh; Turner, 1985) podem-se apreciar as variações que acontecem no comportamento dos polímeros devido as mudanças na taxa de

materiais poliméricos

Fig. 2.2- Curvas tensão/deformação características dos diferentes tipos de



As linhas contínuas mostram as curvas tensão/deformação para taxa de deformação constante e diferentes temperaturas ou para temperatura constante e diferentes taxas de deformação. Pode-se observar que para grandes taxas de deformação e para baixas temperaturas os materiais poliméricos apresentam um comportamento vítreo.

A deformação plástica dos materiais poliméricos depende da tensão hidrostática. Portanto, quando os metais escoam, o círculo de Mohr sempre tem raio constante, e o raio do círculo de Mohr dos polímeros em escoamento muda como uma função da tensão hidrostática (Suh; Turner, 1985).

A tenacidade nos polímeros cristalinos é influenciada pela formação de fissuras no material. A fissura é uma zona que está sob um tipo de deformação permanente, que aumenta o volume do material um grande percentual. Em muitos casos este aumento de volume é associado à formação de pequenos furos no material fissurado. Grandes deformações locais que acontecem durante a formação de fissuras causam mudanças substanciais nas propriedades do material. Com a diminuição da densidade do material fissurado, também diminui o módulo de elasticidade e acontece uma orientação molecular que origina o incremento da resistência do material. A fissuração, "crazing", contribui com a tenacidade dos polímeros, já que a formação da fissura na ponta da trinca dissipa o aumento de energia e diminui a concentração de tensão causada pela trinca, contribuindo com o aumento da tenacidade do material (Suh; Turner, 1985).

## 2.5.2- Módulo de relaxação visco-elástico

Em condições práticas são empregadas várias técnicas experimentais para se verificar o comportamento dos polímeros em função da temperatura e do tempo. Um destes ensaios é determinando o módulo de relaxação ( $E_r$ ), que é um módulo elástico dependente do tempo.

Neste ensaio uma amostra é inicialmente alongada rapidamente à tração para um pré-determinado e relativamente baixo nível de alongamento. A tensão necessária para manter este alongamento é medida como função do tempo, enquanto a temperatura é mantida constante. A tensão é forçada a diminuir com o tempo devido

ao processo de relaxação molecular que tem lugar dentro do polímero. O valor de  $E_r$  pode-se calcular a partir da eq.(2.1).

$$E_r(t) = \frac{\sigma^{(t)}}{\epsilon_0} \quad (2.1)$$

onde:

$E_r(t)$  - módulo de relaxação (M Pa);

$\sigma^{(t)}$  - medida da tensão dependente do tempo (M Pa);

$\epsilon_0$  - nível de deformação.

Além disso, a magnitude do módulo de relaxação é função da temperatura e nenhum polímero pode ser caracterizado no comportamento visco-elástico se não for feito de modo isotérmico sobre uma larga faixa de temperatura. A Figura 2.4 (Tobolsky, 1960) mostra as curvas de logaritmo do módulo de relaxação versus logaritmo do tempo para um polietileno que exhibe comportamento visco-elástico. No gráfico as curvas foram feitas em diferentes temperaturas e percebe-se o decrescimento do módulo de relaxação com o tempo e com o aumento da temperatura.

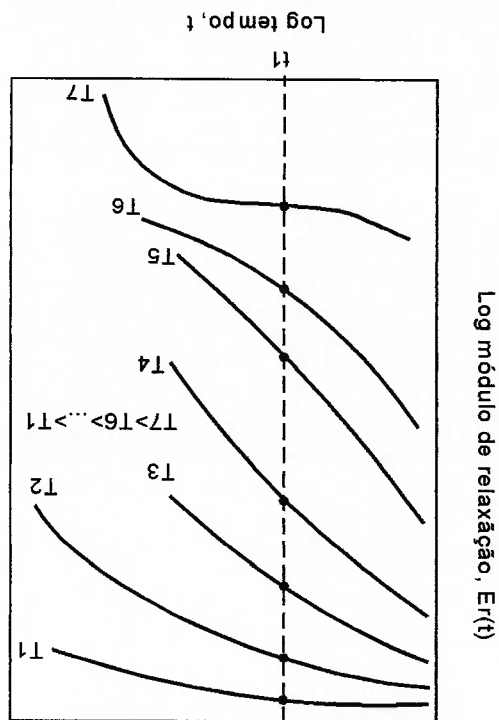


Fig. 2.4- Curvas de logaritmo do módulo de relaxação versus logaritmo do tempo para o polietileno

No caso da figura anterior  $t_1$  foi tomado aleatoriamente como 10 segundos depois da aplicação de carga. Diferentes zonas podem-se apreciar nas curvas mostradas. Primeiramente, para baixas temperaturas, na região vítrea, o material comporta-se como um sólido rígido, e o valor do módulo de relaxação é tal que o módulo elástico é virtualmente independente da temperatura. Nesta faixa de temperatura a característica de alongamento com o tempo é praticamente constante. As cadeias moleculares estão essencialmente congeladas em suas posições nesta temperatura.

Com o incremento da temperatura o módulo de relaxação para  $t=10$  seg decresce grandemente.

Dentro do platô de temperatura da região elastomérica o material se deforma como um elastômero; aqui estão presentes as componentes elástica e viscosa, e a deformação se produz facilmente porque o módulo de relaxação é relativamente baixo. Nas duas últimas regiões de temperaturas elevadas o material sofre um escoamento viscoso. Quando o polímero é aquecido até estas temperaturas experimenta uma transição gradual de um estado elastomérico para um líquido viscoso final. Dentro da região de fluxo viscoso o módulo de relaxação visco-elástico decresce bruscamente com o incremento da temperatura (Callister, 1997).

Em nível molecular a movimentação das cadeias intensifica-se tanto que no fluxo viscoso os segmentos de cadeia experimentam vibrações e movimentos rotacionais bastante independentes uns dos outros. Nesta faixa de temperatura as deformações são totalmente viscosas. Normalmente, o comportamento de deformação de um polímero é especificado em termos de viscosidade, que é a medida da resistência do material a se opor ao seu próprio movimento. A taxa de aplicação de tensão também influencia as características visco-elásticas.

Na Figura 2.5 (Callister, 1997), observa-se as cinco diferentes regiões dependentes da temperatura no comportamento de um termoplástico, o poliestireno amorto.

O comportamento mecânico dos polímeros tem uma dependência, muito marcada da temperatura e da velocidade com que o material é deformado, devido a

menos dois modos de deformação.

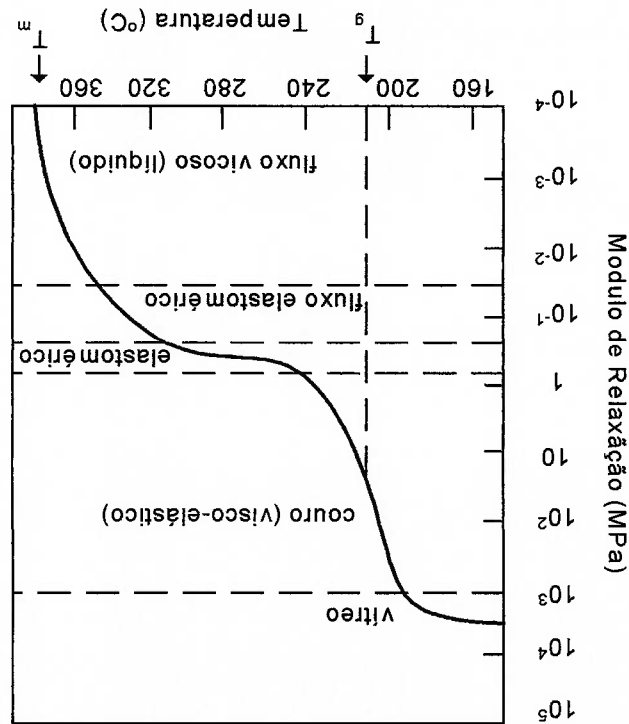
A maioria dos estudos experimentais do comportamento visco-elástico dos polímeros estruturais só leva em conta um modo de deformação, geralmente a medição do módulo de elasticidade, ou módulo de cisalhamento no tempo, mas para se descrever o comportamento de um polímero isotrópico devem ser analisados pelo

Chama-se equação constitutiva a toda relação que envolve os estados tensionais, ou outra grandeza estática, e de deformações, ou outra grandeza cinemática num dado corpo, incluindo ou não suas derivadas no tempo, sendo esta uma das características do material de que é feito o corpo.

### 2.5.3- Equações constitutivas e modelos matemáticos básicos representativos do comportamento mecânico dos polímeros estruturais

o poliestireno amorto

Fig. 2-5- Curva de logaritmo do módulo de relaxação versus temperatura para



sua natureza visco-elasto-plástica. Isto implica que tenham um comportamento similar aos sólidos puramente elásticos e aos líquidos viscosos (Nielsen; Landel, 1994).

Na simulação deste comportamento geralmente usam-se dois modelos matemáticos muito simples ou a combinação destes, quais sejam:

- sólido elástico;
- líquido viscoso.

O sólido elástico é representado por uma mola, com forma definida, sob a ação de uma carga que se deforma linearmente e ao ser removida a carga, o corpo volta a sua forma original, ou seja, recupera-se a deformação. Neste sistema, todo o trabalho é armazenado como energia potencial, tal qual uma mola deformada.

O líquido viscoso é representado por um amortecedor, não tem forma definida e flui irreversivelmente sob a ação de cargas externas. Neste sistema todo o trabalho feito sobre ele é dissipado em forma de calor.

Na Figura 2.6 (Nielsen; Landel, 1994), pode-se apreciar os modelos simples mais empregados para simular o comportamento mecânico dos polímeros estruturais, e as curvas tensão/deformação características destes.

A Figura 2.6(a), representa a curva tensão/deformação de uma mola a qual tem módulo elástico constante pelo que não depende da velocidade do ensaio. Ela obedece a lei de Hooke eq.(2.2).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

(2.2)

onde:

E- módulo de elasticidade (MPa);

$\varepsilon$ - deformação na mola.

Na Figura 2.6(b), mostra-se um amortecedor o qual não tem módulo de elasticidade, mas a força resistiva ao movimento é proporcional à velocidade do ensaio eq.(2.3).



(2.3)

$$\sigma = R \cdot \eta$$

onde:

R- velocidade do ensaio (m/s);

$\eta$ - viscosidade do amortecedor (poise).

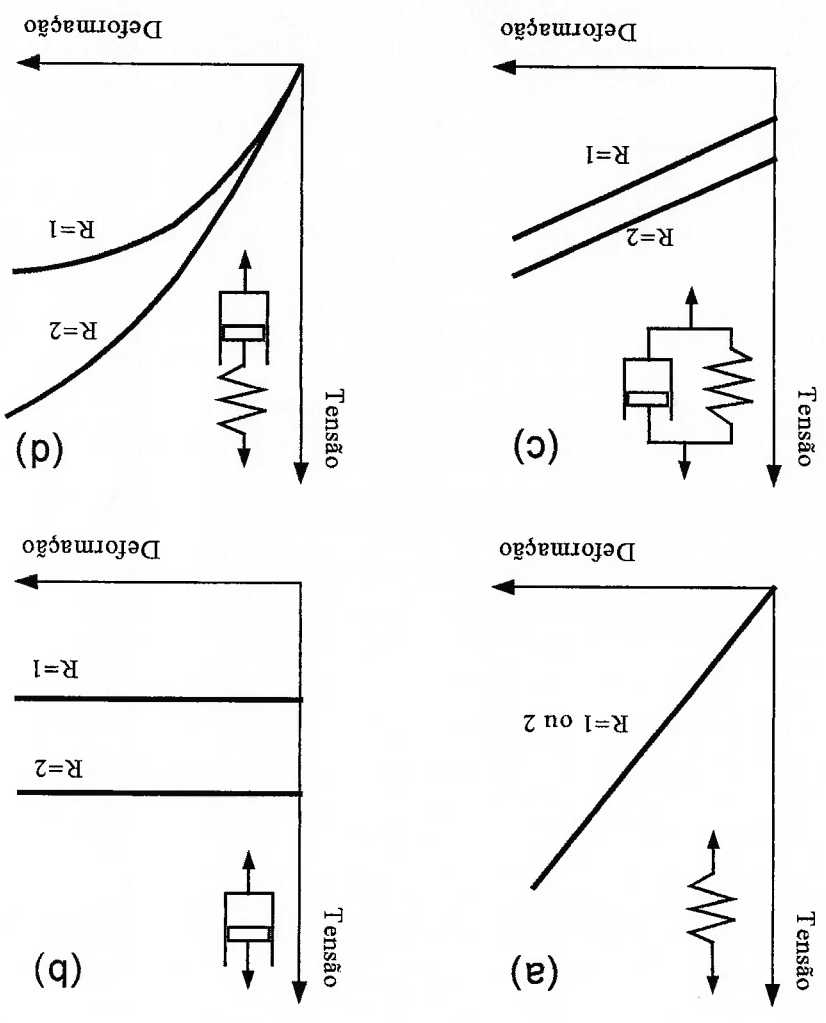


Fig. 2.6- Modelos simples empregados para simular comportamento mecânico em polímeros estruturais e suas curvas tensão/deformação características. ( $R_1$  e  $R_2$  velocidades usadas para os ensaios,  $R_2=2R_1$ ,  $R=de/dt$ )

Já na Figura 2.6(c), no modelo de Voigt-Kelvin a curva tensão/deformação é dada pela eq.(2.4).

A declividade inicial corresponde ao estiramento da mola e é dado por seu módulo de elasticidade, o qual é independente da taxa de deformação. Ao aumentar a deformação, a declividade da curva decresce e sua magnitude depende da velocidade do ensaio quando o cilindro começa a relaxar parte das tensões. Eventualmente a mola para de esticar-se e todo o deslocamento decorre do movimento do amortecedor. A curva tende a ficar plana e comporta-se como na Figura 2.6(b).

t - tempo de relaxação (s).

t - tempo (s);

e - deformação da mola;

E - módulo de elasticidade (MPa);

$\eta$  - viscosidade do amortecedor (poise);

R - velocidade do ensaio (m/s);

$\sigma$  - tensão (MPa);

onde:

$$\sigma = R \cdot \eta \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{t}\right) \right] \quad (2.6)$$

ou

$$\sigma = R \cdot \eta \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E \cdot \varepsilon}{R \cdot \eta}\right) \right] \quad (2.5)$$

da curva tensão/deformação é mais complexo, é dado pelas eq.(2.5) e (2.6).

A Figura 2.6(d) corresponde ao modelo de Maxwell, onde o comportamento

elasticidade da mola.

mola esticada incrementa-se a tensão, a declividade da linha é o módulo de

Neste modelo a tensão inicial do cilindro tem um valor maior que zero, e na

e - deformação na mola.

E - módulo de elasticidade (MPa);

$\eta$  - viscosidade do amortecedor (poise);

R - velocidade do ensaio (m/s);

onde:

$$\sigma = R \cdot \eta + E \cdot \varepsilon \quad (2.4)$$

Realmente os polímeros estruturais mostram um comportamento mais complexo que os modelos apresentados na Figura 2.6. Não obstante, os polímeros muito frágeis tem curvas semelhantes às da Figura 2.6(a), abaixo do ponto da falha, e os menos frágeis tem curvas similares às da Figura 2.6(d). Nenhum destes modelos mostram o ponto de escoamento característico dos polímeros muito dúcteis.

#### 2.5.4- Comportamento viscoso nos polímeros

Na análise do comportamento viscoso dos termoplásticos as equações de energia devem ser sempre consideradas com outras equações que as governam, devido a viscosidade destes plásticos ser muito sensível à temperatura. Em contraste à análise elasto-plástica feita nos metais, onde é assumido que o fluxo de tensões não é sensivelmente dependente da temperatura.

O comportamento viscoso do material é caracterizado em termos de viscosidade, a qual é definida pelas eq. (2.7) e (2.8).

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.7)$$

$$\eta = A \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{R \cdot T}\right) = n_0 \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{R \cdot T}\right) \quad (2.8)$$

onde:

$\eta$ - viscosidade (poise);

$\tau$ - tensão de cisalhamento (MPa);

$\dot{\gamma}$  - taxa de deformação ao cisalhamento ( $s^{-1}$ );

$\Delta E$ - energia de ativação (J);

R- velocidade do ensaio (m/s);

T- temperatura ( $^{\circ}C$ );

n- constantes empiricamente determinadas.

A energia de ativação dos fluidos não-Newtonianos depende da temperatura e das taxas de deformação e tensão. A equação anterior pode ser simplificada pela eq.(2.9).

onde:  
 $\eta$  - viscosidade (poise);  
 a e b - constantes empiricamente determinadas, tabela VI p.344 (Suh; Turner, 1985);  
 T - temperatura (°C).

## 2.6- Comportamento a Fratura dos Polímeros

Entende-se por fratura a separação de um corpo ou peça em duas ou mais partes como resposta da aplicação de uma carga sobre o mesmo. Esta tem dois modos de acontecer: fratura dúctil ou fratura frágil.

A fratura dúctil é caracterizada por uma deformação plástica extensiva na vizinhança da propagação da trinca com grande absorção de energia antes que aconteça a falha. Este processo é lento e a sua extensão não aumenta, a não ser que aconteça um incremento das tensões aplicadas. O segundo modo, a fratura frágil, acontece com uma deformação plástica pequena e muito pouca absorção de energia. Durante esta, a propagação da trinca é extremamente rápida, contínua, propagando-se espontaneamente sem um incremento na magnitude da carga aplicada.

A fratura dúctil é menos perigosa do que a frágil, já que a presença de uma deformação plástica maior dá um aviso da iminência da falha, ao contrário da segunda que acontece repentina e catastróficamente sem prévio aviso como consequência da espontânea e rápida propagação da trinca. Além disso, precisa-se de maior quantidade de energia de deformação para induzir a fratura dúctil. Todo processo de fratura envolve duas etapas, primeiro a formação e depois a propagação da trinca, (Callister 1997).

Os polímeros tendem a ter menor resistência à fratura que outros materiais, como metais e cerâmicas, ou seja, possuem uma menor tensão onde ocorre a fratura, *cf.* Na Tabela 2.2 (Kinloch; Young, 1983) mostram-se valores típicos de módulo de elasticidade e resistência a fratura para materiais poliméricos típicos.

$$\eta = a \cdot \exp(-b \cdot T) \quad (2.9)$$

Tabela 2.2- Valores de módulo de elasticidade e resistência à fratura para alguns materiais poliméricos

Tipo de polímero	Módulo de Elasticidade E (MPa)	Resistência a Fratura $\sigma_f$ (MPa)
Elastômeros	$\sim 10^6$	$\sim 10$
Polímeros semicristalinos (acima de $t_g$ )	$\sim 10^8$	$\sim 30$
Polímeros semicristalinos (abaixo de $t_g$ )	$\sim 10^9$	$\sim 50$
Polímeros cristalinos	$\sim 10^9$	$\sim 70$

O principal problema dos polímeros dúcteis é sua tendência a sofrer uma transição para um comportamento frágil devido a modificações nas condições de ensaio, por exemplo diminuição da temperatura ou incremento da taxa de deformação.

Na maioria das situações práticas, as fraturas são originadas por concentrações locais de tensões, tais como as imperfeições e os entalhes. Portanto, é extremamente importante o conhecimento do estado local de tensões e deformações (Kinloch, Young, 1983).

Para materiais com comportamento elásticos, a análise do fenômeno de fratura é mais simples, já que independe do tempo. A dependência do tempo e a deformação plástica nos materiais que se comportam visco-elasticamente tornam mais complexa esta análise.

Um destes casos simples é a análise das tensões ao redor de um furo elíptico numa prancha fina submetida a uma tensão  $\sigma_0$ , como é mostrado na Figura 2.7 (Kinloch, Young, 1983). Neste caso as tensões  $\sigma_r$  nos extremos do eixo maior são dadas pela eq. (2.10).

$$\sigma_r = \sigma_0 \left( 1 + 2\sqrt{\frac{r}{a}} \right) \quad (2.10)$$

onde:  
 $\sigma$ - tensão (MPa);

a- semicomprimento da trinca no eixo maior (m);  
 r- raio de curvatura na ponta da trinca (m).

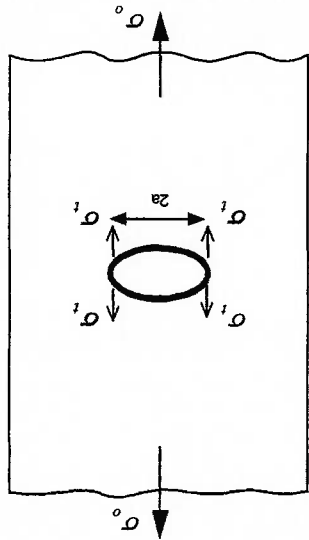


Fig. 2.7- Modelo de uma trinca eliptica de comprimento  $2a$  submetida à tensão uniforme numa prancha infinita

Neste caso, a falha acontece onde a concentração de tensões é maior e ( $\sigma_i/\sigma_o$ ) aumenta com incremento de  $a$  e o decréscimo de  $r$ , ainda que, como  $r$  tende a zero o furo eliptico converte-se numa trinca, a concentração de tensão passa a ser infinita e só uma aproximação modificada é necessária. Uma forma de superar este problema é usando a análise clássica de Griffith.

Griffith (1920), resolveu o problema da singularidade matemática da concentração de tensões infinitas na ponta da trinca realizando um balanço energético para o modelo de trinca. Ele relacionou a energia liberada pela propagação da trinca com a energia requerida para criar uma superfície nova. Desta forma, relacionou a tensão de trinca  $\sigma_f$ , com o semicomprimento do maior eixo da trinca e obteve a eq.(2.11).

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot \gamma}{\pi \cdot a}} \tag{2.11}$$

onde:

$\sigma_f$  - tensão de trinca (MPa);

$E$  - módulo de Young (MPa);

$\gamma$ -energia superficial liberada ( $J m^{-2}$ );

$a$ -semicomprimento da trinca (m).

Medindo-se a tensão de fratura como uma função de  $a$ , obtêm-se a equação de Griffith para os materiais frágeis, como é o caso dos polímeros cristalinos (Kinloch; Young, 1983), (Nielsen; Landel, 1994); (Nielsen, 1962). No entanto, o valor de  $\gamma$ , derivado das medições, é maior que a energia superficial liberada, devido a um elevado grau de deformações plásticas locais na ponta da trinca. A energia dissipada por este processo, o termo  $2\gamma$  da equação de Griffith é substituído pela energia de fratura  $G_c$ , eq.(2.12) e (2.13).

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{E \cdot G_c}{\pi \cdot a}} \quad \text{(estado plano de tensões)} \quad (2.12)$$

ou

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{E \cdot G_c}{\pi(1-\nu^2)} a} \quad \text{(estado plano de deformações)} \quad (2.13)$$

onde:

$\sigma_f$  - tensão de fratura (MPa);

$E$ - módulo de Young (MPa);

$G_c$ - energia de fratura ( $J m^{-2}$ );

$\nu$ - coeficiente de Poisson;

$a$ - semicomprimento da trinca (m).

Ainda que a resistência à fratura seja um parâmetro fácil de definir, não acontece o mesmo com a energia de fratura  $G_c$ . Kinloch; Young (1983) a definem como a energia requerida para formar uma unidade de trinca.

Um aspecto útil da aproximação de Griffith é que o efeito dos defeitos presentes no corpo de prova pode ser observado rapidamente. O módulo de elasticidade e a energia de fratura podem ser tratados como constantes do material para umas dadas condições de ensaio. A resistência à fratura poderá ser controlada principalmente pela dimensão do defeito ou comprimento da trinca ou defeitos na estrutura. Daí, se as dimensões do defeito são conhecidas, a resistência na fratura pode-se prever.

Uma outra forma de abordar a análise de fratura é através da utilização do Fator de Intensificação de Tensões definido através do desenvolvimento teóricos de

Westergaard 1939, que apresenta soluções para certas funções de tensão considerando a presença de uma trinca numa lâmina infinita, como a representada na Figura 2.8.

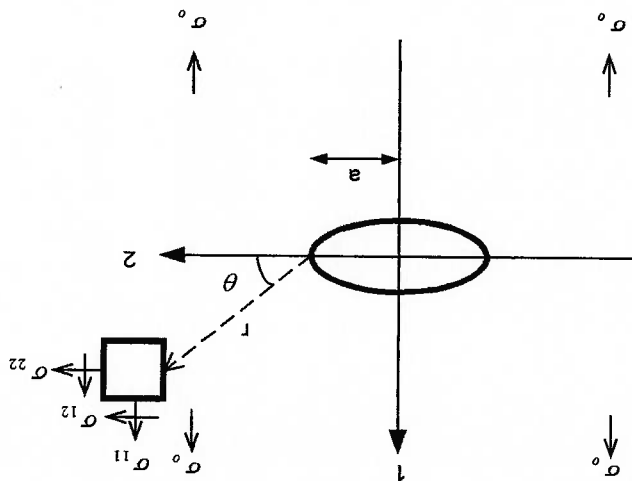


Fig. 2.8- Trinca aguda numa lâmina infinita tensionada uniformemente

Para regiões fechadas na ponta da trinca a solução é dada pela eq.(2.14)

$$\sigma_{ij} = \sigma_0 \sqrt{\frac{a}{2 \cdot r}} f_{ij}(\theta) \tag{2.14}$$

onde:

$\sigma_{ij}$ - componente do tensor de tensões no ponto (MPa);

$\sigma_0$ - tensão aplicada (MPa);

$a$ - semicomprimento da trinca (m);

$r$  e  $\theta$ - coordenadas polares do ponto;

$f_{ij}$ - função conhecida de  $\theta$ .

Irwing, 1964, modificou esta solução como se mostra na eq.(2.15).

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot r}} f_{ij}(\theta) \tag{2.15}$$

onde  $K$  foi definido como o Fator de Intensificação de Tensões, sendo estabelecido para a lâmina infinita como sendo igual a  $K = \sigma_0 (\pi a)^{1/2}$ .



O fator de intensidade de tensões  $K_I$ , refere-se à magnitude das intensidades de tensões locais na trinca em termos de carregamento aplicado e geometria da estrutura onde é localizada a trinca.

Uma trinca num sólido pode ser feita de três modos diferentes os quais são mostrados na Figura 2.9. A superposição destes três diferentes modos constitui o caso geral de carregamento da trinca.

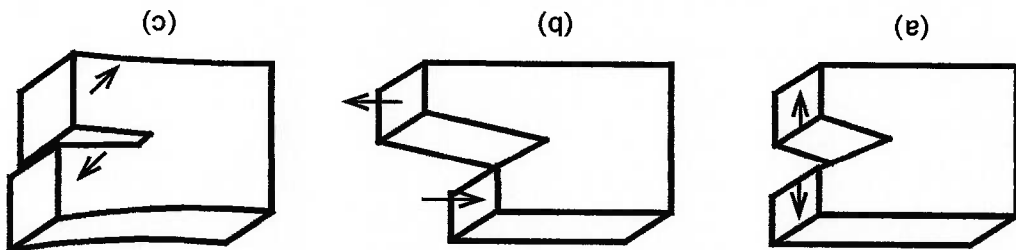


Fig. 2.9- Diferentes modos de carregamentos que originam as trincas nos sólidos:

a) Modo I, abertura; b) Modo II, cisalhamento no plano; c) Modo III, cisalhamento fora do plano

O Modo I, abertura à tração, tecnicamente, é o mais importante (Kinloch; Young, 1983) já que é o que mais comumente ocorre originando a falha. Para este modo as tensões na ponta da trinca podem-se desenvolver a partir das eq.(2.16); (2.17); (2.18) e (2.19).

$$(2.16) \quad \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{22} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot r}}{K_I} \cos \frac{\theta}{2} \begin{bmatrix} 1 + \frac{\theta}{3\theta} \cdot \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{2} \\ \frac{\theta}{3\theta} \cdot \frac{\cos \frac{\theta}{2}}{2} \\ 1 - \frac{\theta}{3\theta} \cdot \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{2} \end{bmatrix}$$

$$(2.17) \quad \sigma_{33} = 0 \quad \text{(para estado plano de tensões)}$$

$$(2.18) \quad \sigma_{33} = \nu \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad \text{(para estado plano de deformações)}$$

$$(2.19) \quad \sigma_{23} = \sigma_{13} = 0$$

onde:

$\sigma_{11}, \sigma_{22}$ , e  $\sigma_{33}$  - tensões principais (MPa);

K<sub>I</sub>- fator de intensificação de tensões para o modo I (MPa m<sup>1/2</sup>);

r e θ - coordenadas polares do ponto;

v - coeficiente de Poisson.

Para o plano onde θ = 0 a tensão de cisalhamento é zero, e que para θ = 0° as tensões σ<sub>11</sub>, σ<sub>22</sub> e σ<sub>33</sub> são tensões principais.

Analisando a eq.(2.16) é evidente que como o raio tende a zero, então a

tensão σ<sub>ij</sub> tende a infinito, portanto a tensão não é suficiente para o estabelecimento

de um critério local de fratura. Devido a isso, Irwing 1964, postulou a critério de

fratura baseado no Fator de Intensificação de Tensões da seguinte forma, unicamente

define o campo de tensões ao redor da trinca eq.(2.20)

$$K_I \geq K_{Ic} \quad (2.20)$$

onde:

K<sub>I</sub>- intensidade do campo de tensões na ponta da trinca (MPa m<sup>1/2</sup>);

K<sub>Ic</sub>- tenacidade à fratura ou valor crítico do fator de intensificação de tensões para o

modo I (MPa m<sup>1/2</sup>).

O valor de K<sub>Ic</sub> é uma propriedade do material, e K<sub>I</sub> é um valor que caracteriza

a intensidade do campo de tensões na ponta da trinca.

## 2.7- Fadiga nos Polímeros Estruturais

Define-se fadiga como o fenômeno ou processo de alteração estrutural

permanente e localizado num material devido à aplicação de tensões e deformações

cíclicas em um ou mais pontos que pode culminar no aparecimento de trincas ou na

completa fratura do material após um número suficiente de ciclos (Fuchs, 1980). A

vida a fadiga é definida com o número de ciclos de oscilação N, até que um corpo

atinge a fratura é dado pelas tensões e deformações aplicadas. A vida a fadiga é uma

função das tensões máximas, as curvas de fadiga são dadas geralmente como as

tensões versus o número de ciclos que originam a falha (Nielsen; Landel, 1994).

Para acontecer o fenômeno de fadiga é necessária a existência de três fatores

básicos, os quais são (Fuchs, 1980):

- tensões cíclicas;

- tensões de tração;

- deformações plásticas localizadas

O processo de fadiga decorre da aplicação repetida de cargas, ao longo do período de uso da estrutura. A falha por fadiga frequentemente ocorre de forma repentina sem indicação prévia em pontos localizados da estrutura, sendo que estes normalmente correspondem a áreas de elevadas tensões e deformações devido ao carregamento externo, locais onde ocorrem mudanças abruptas de geometria, presença de tensões residuais e imperfeições do material. Deve-se ressaltar que o processo de fadiga caracteriza-se também pela propagação de uma trinca até que esta atinja um comprimento tal que parte do material remanescente não possa mais suportar as tensões e deformações decorrentes do carregamento externo, ocorrendo falha por fratura frágil.

Como os plásticos têm substituído os metais e outros materiais em muitas aplicações estruturais críticas, os testes de fadiga têm-se tornado de muita importância, já que as máximas cargas cíclicas que o material pode suportar são somente uma fração de sua resistência (Nielsen; Landel, 1994).

Os ensaios de fadiga mais convencionais dão uma pequena indicação da vida limite dos objetos submetidos a vibrações ou deformações repetidas. Estes são especialmente importantes para os plásticos de engenharia e materiais compostos que são usados em estruturas submetidas à carga variável.

A Figura 2.10 (Riddell, 1974) mostra as curvas de vida à fadiga típicas, Curva S-N, para vários materiais poliméricos. A frequência usada para os ensaios foi de 30 Hz. A vida à fadiga, expressa como o número de ciclos (N) antes que aconteça a falha, incrementa-se quando as tensões máximas por ciclo decrescem. Abaixo de alguns valores de tensão máxima, chamado limite de resistência a fadiga, o material pode ser submetido a um número de ciclos muito grande ou infinito sem atingir a falha. O limite para a maioria dos polímeros, é de 20 a 40 % da resistência a tração estática (Nielsen; Landel, 1994).

A fonte básica da trinca são os defeitos dos materiais, daí a grande dispersão estatística nos dados e o grande número de ensaios requeridos para a construção da curva S-N, particularmente o limite de resistência a fadiga.

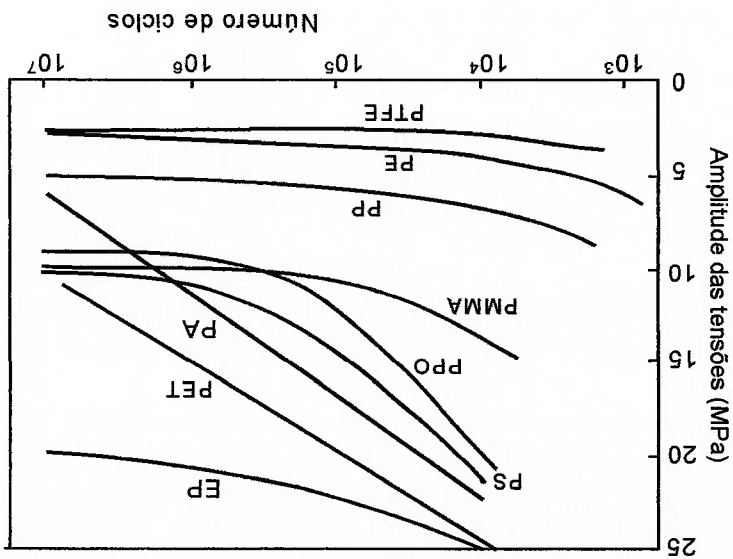
onde:  
 $\frac{da}{dN}$  - taxa de crescimento da trinca por ciclos de carga (m);  
 A e m - são constantes que caracterizam o material;

$$\frac{da}{dN} = A \cdot \Delta K^m \quad (2.21)$$

As curvas de fadiga são somente o resultado de um ensaio de observação específico, e não a base do processo de crescimento da trinca, não se podendo usá-las como parâmetro de predição. A mecânica da fratura examina a taxa do crescimento da trinca pré-existente em termos de tensões locais na ponta da mesma. Isto requer um entendimento ou uma estimativa (modelo) da morfologia e propriedades da zona localmente deformada à frente da ponta da trinca.

Os materiais sempre contêm defeitos que desenvolvem trincas submicroscópicas se as tensões são maiores que um valor crítico. Durante os picos de carga de cada ciclo acontece um pequeno crescimento das trincas microscópicas até um ponto em que começam a propagar-se rapidamente ocasionando a falha. As propriedades de fadiga são relacionadas com a energia de rasgamento "tearing" do material.

Fig. 2.10- Curva de vida a fadiga para alguns tipos de polímeros estruturais



A vida à fadiga geralmente diminui com a temperatura. O efeito da temperatura sobre a vida à fadiga está relacionado com o fato de que geralmente a resistência dos polímeros decresce com o aumento da temperatura, e facilita-se o crescimento da trinca (Nielsen; Landel, 1994).

## 2.7.1- Influência da temperatura sobre a vida a fadiga dos polímeros

A taxa de crescimento da trinca é zero até que  $K$  exceda os valores críticos  $\sigma_c$ ,  $\delta_c$  e  $E$ .

$E$ - módulo de Young (MPa).

$\delta_c$ - deslocamento crítico da trinca (m);

$K_{max}$ - valor máximo da intensidade de tensões durante o ciclo de carga ( $MPa \cdot m^{1/2}$ );

$R$ - relação dos valores da intensidade de tensões;

$\sigma_c$ - tensão requerida para produzir o trincamento (MPa);

$\sigma_0$ - tensão local na ponta da trinca (MPa);

$\frac{da}{dN}$  - taxa de crescimento da trinca por ciclos de carga (m);

onde:

$$\frac{da}{dN} = \frac{8}{\pi} \cdot \frac{(\sigma_0 - \sigma_c)^2}{1} [(1-R)^2 \cdot K_{max}^2 - \sigma_c \cdot \delta_c \cdot E] \quad (2.22)$$

cada ciclo, pode ser feita utilizando-se a eq.(2.22).

Uma análise mais detalhada, na qual se considera o crescimento uniforme em

próximo à frente da trinca.

iniciação e propagação que podem acontecer num volume muito deformado e moleculares, o crescimento da trinca é controlado por múltiplos processos de  $R$  e  $A$  são a relação dos valores da intensidade de tensões. Em níveis morfológicos e relacionada com as tensões máximas e mínimas em cada ciclo,  $R[A=(1-R)A_0]$ , onde Quando a dependência do tempo é forte,  $A$  é também uma função fortemente é frequentemente dependente, refletindo da natureza visco-elástica dos polímeros. metais.  $A$  e  $m$  são características de um polímero ou sistema polimérico dado, mas  $A$

A equação 2.21 é chamada a "Lei de Paris", e é aplicável a polímeros e

$AK$ - fator de intensidade de tensões ( $MPa \cdot m^{1/2}$ ).

A vida à fadiga para polímeros rígidos é dada pela eq.(2.23).

$$\log N = A + \frac{T}{B} \quad (2.23)$$

onde:

N-vida a fadiga em número de ciclos;

A e B- constantes;

T- temperatura absoluta (°K).

Num ensaio de fadiga dinâmico, um material perfeitamente elástico se

manterá na mesma temperatura do ambiente do ensaio, desde que a energia não seja dissipada pelo corpo de prova. No entanto, os polímeros são materiais visco-elásticos

e mostram histerese mecânica para deformações moderadas e grandes. Assim,

quando submetidos a carregamentos cíclicos e deformações inelásticas, a energia

será dissipada como calor em cada ciclo. Isto resultará num aumento da temperatura

do corpo de prova até que o calor gerado por ciclo seja igual ao calor dissipado como

resultado da condução, da convecção e da radiação (Kinloch; Young, 1983).

O aumento da temperatura do corpo de prova depende de fatores tais como a

temperatura do ambiente de ensaio, as dimensões do corpo de prova, frequência de

aplicação da carga e da amplitude das tensões aplicadas. Outros fatores que também

influenciam são o atrito interno do material, sua condutividade térmica e seu calor

específico. Com o aumento da frequência, das máximas tensões e do atrito interno

aumenta a temperatura do material ensaiado, (Kinloch; Young, 1983).

O efeito da frequência sobre a vida à fadiga é pequeno quando esta é baixa,

mas a diminuição de vida a fadiga pode ser grande quando ocorre um incremento na

temperatura do corpo de prova devido ao amortecimento. A temperatura do corpo de

prova pode ser consideravelmente maior que a temperatura ambiente pelo

amortecimento.

A energia dissipada por segundos no corpo de prova,  $\xi_a$ , e dada pela

eq.(2.24).

$$\xi_a = \pi \cdot f \cdot M'' \cdot \varepsilon_0^2 = \pi \cdot f \cdot C'' \cdot \sigma_0^2 \quad (2.24)$$

onde:

$\xi_a$ - energia dissipada (J);

f- frequência (Hz);

Nos polímeros a diferença dos metais a falha térmica é o mecanismo de maior potencial de falha quando são feitos ensaios de fadiga mecânica. Neste caso a falha que acontece não é necessariamente por fratura do corpo de prova ou seja sua separação em peças (fadiga mecânica), mas pode acontecer devido a uma excessiva deformação plástica (fadiga térmica). O corpo de prova amolece tanto que falhará por sua baixa rigidez.

Além disso o aumento da temperatura durante a fadiga dinâmica afeta as propriedades mecânicas, tais como: o módulo de elasticidade e a tensão de escoamento. De fato, o incremento local da temperatura pode causar embotamento na ponta da trinca, devido à diminuição na tensão de escoamento e melhora a resistência à fadiga (Kinloch, Young, 1983).

$c_p$ - calor específico (J/kg-°K).

$\rho$ - densidade (kg/m<sup>3</sup>);

$\xi_d$ - energia dissipada (J);

$\Delta T$ - variação da temperatura (°K);

onde:

$$\Delta T = \frac{\xi_d}{\rho \cdot c_p} \quad (2.25)$$

adiabático a variação da temperatura é dada pela eq.(2.25).

Para tensões e deformações no regime visco-elástico linear, num sistema

$\sigma_0$ - tensão máxima (M Pa).

$C''$ - perdas na deformação e tensão devido a tração ou cisalhamento;

$\epsilon_0$ - deformação máxima;

$M'$ - perda no módulo devido a tração ou cisalhamento (M Pa);

Os ensaios mecânicos têm várias utilidades tais como: controle da produção, seleção de materiais em projetos de peças e fornecimento de resultados comparativos. Neste trabalho, como se desejava obter resultados comparativos, fatores como a preparação dos corpos de prova, velocidade e ambiente dos ensaios foram cuidadosamente controlados, já que eles podem influenciar substancialmente nos resultados.

É muito importante que as amostras retiradas para o ensaio sejam representativas do material, devido à possibilidade de existência de variação das propriedades mecânicas nas diferentes partes do produto a ser ensaiado.

Em geral, a escolha do tipo de ensaio mecânico mais adequado a ser feito depende de vários fatores tais como: tipo de material que se vai ensaiar, história de solicitação, ou seja, os esforços a que esteve ou estará submetido o material e as propriedades mecânicas que se desejam medir. Outros fatores que determinam a seleção do tipo de ensaio a se fazer são a quantidade e tamanho das amostras a serem testadas.

No campo da engenharia, uma ampla gama de ensaios com o objetivo de determinar as diferentes propriedades mecânicas nos materiais poliméricos são realizados. Estes ensaios podem-se dividir em dois tipos: destrutivos e não destrutivos. Os destrutivos são aqueles que promovem a ruptura inutilizando o material testado como, por exemplo, ensaios de tração, flexão, torção, fadiga, impacto, etc. Os não destrutivos são aqueles que não inutilizam os materiais testados, entre eles estão os ensaios de raios X, ultra-som, elétricos e outros. A instrumentação empregada em cada tipo de ensaio vai depender de sua finalidade. Se o fim é controlar a qualidade de uma determinada produção industrial os equipamentos empregados não têm que ser muito precisos, entretanto, quando a finalidade do ensaio é determinar as propriedades mecânicas para estudos e pesquisas, os equipamentos a serem usados devem ser muito mais precisos e sensíveis.

### 3.1- Introdução

## ANÁLISE EXPERIMENTAL

### CAPÍTULO III



### 3.2- Ensaio de Fadiga do Cabo Umbilical

Com este ensaio experimental tratou-se de simular os diversos e complexos carregamentos, tais como: tração, flexão, torção, etc, a que estão submetidos os cabos umbilicais durante sua instalação e serviço nas operações offshore.

Para a realização dos ensaios de fadiga empregou-se como guia de referência a norma técnica API 17-E. A Figura 3.1, reproduz o esquema da *Figuras I-2 do Appendix I- Fatigue Testing (API-17E)*, onde mostra-se esquematicamente a disposição do cabo ao redor de uma polia oscilante.

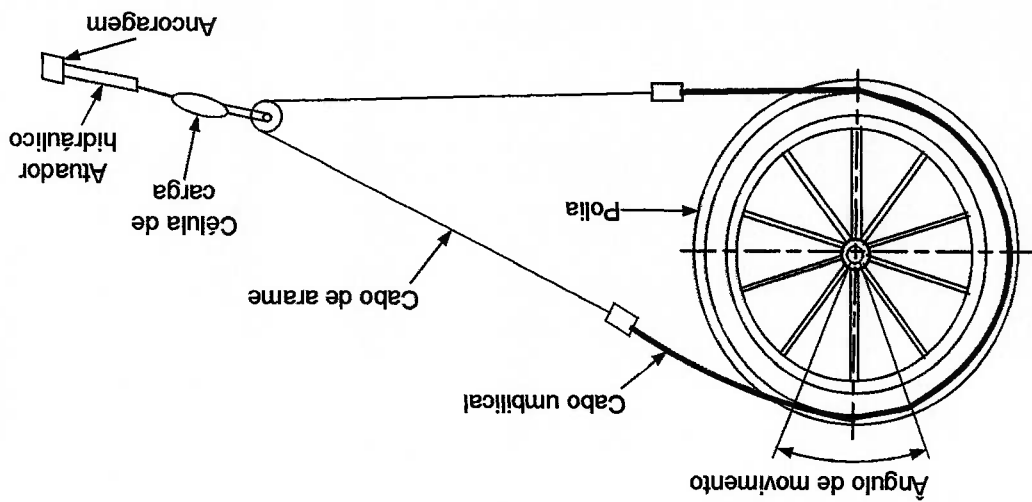
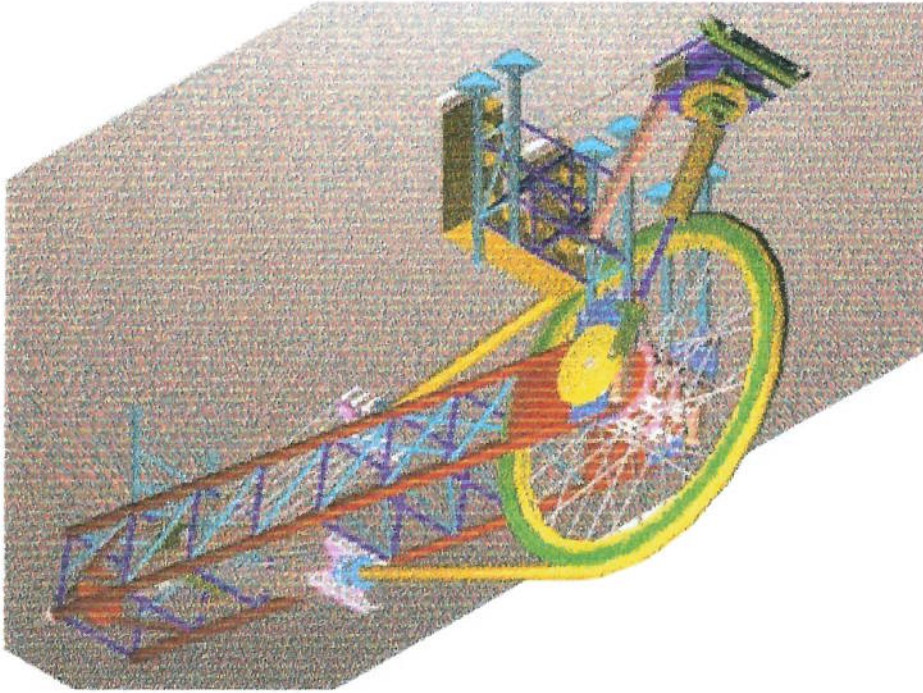


Fig. 3.1- Esquema típico para um ensaio de fadiga em cabos umbilicais segundo a norma API-17E

### 3.2.1- Montagem da bancada para o ensaio de fadiga

Os ensaios de fadiga foram realizados numa bancada especialmente projetada e construída para tal, a qual pode-se observar na Figura 3.2. Esta foi concebida a partir de uma roda (polia) de 3,5 metros de diâmetro e um sistema capaz de tracionar o corpo-de-prova (cabo umbilical) com uma carga de 200 tf. Para uma melhor compreensão das etapas da montagem, a bancada de ensaios foi dividida em módulos os quais são descritos a seguir.

Fig. 3-2- Desenho da bancada para ensaio de fadiga mecânica no cabo umbilical



O primeiro módulo na montagem foi a **Estrutura Suporte ou de Reação**, formada por quatro pilares tubulares, travados por barras cilíndricas transversais e diagonais, Figura 3.3. Esta foi projetada para suportar um esforço de tração no corpo de prova de 100 tf que corresponderia a uma compressão na estrutura de 200 tf.

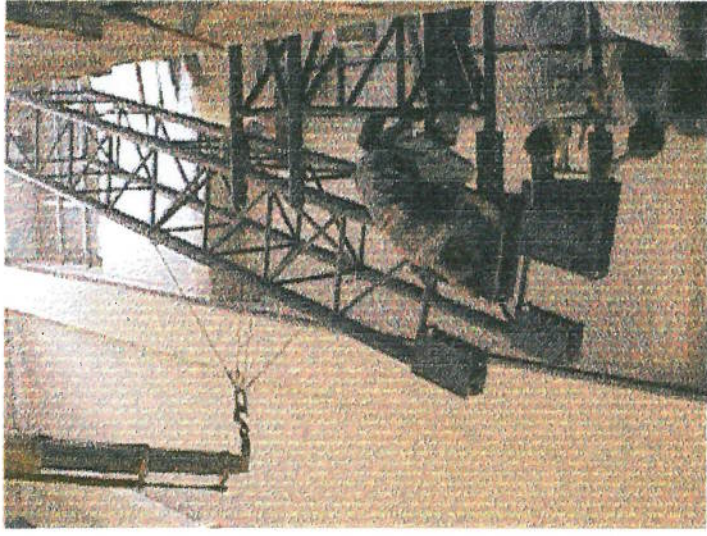


Fig. 3-3- Montagem da estrutura de suporte

O segundo módulo foi a **Roda**, sua concepção baseia-se nos mesmos princípios de montagem e funcionamento de uma "roda de bicicleta". Este módulo é formado por vários subconjuntos, que são:

a- **O Aro** - constituído por dois perfis em formato de "C", constituídos a partir de chapas de aço estrutural (A36) de espessura 20 mm, soldadas. O diâmetro do aro é de 3,5 m;

b- **O Cubo** - composto por quatro discos concêntricos, fixados em um eixo mecânico. A estabilidade dos discos internos é garantida por um tubo de parede grossa, soldado nos mesmos. A fixação dos discos no eixo foi feita por meio de anéis de pressão, devidamente ajustados para resistirem aos esforços tangenciais decorrentes do torque aplicado pelo sistema de acionamento. Na borda externa dos discos, são encontradas ranhuras de alojamento das placas de ancoragem dos raios. Essas placas são fixadas nos discos por meio das coras externas. O sistema do cubo é fixado na estrutura de reação por meio de duas chapas quadradas fixadas nas extremidades do eixo principal;

c- **Os Raios** - (quantidade de 36) tem como função fixar o aro ao cubo. Dispostos em dois planos inclinados em relação ao plano principal da roda. Cada plano inclinado tem 18 barras de aço de 32mm de diâmetro. Estas barras são fabricadas pela "DYWIDAG" e possuem alta resistência ao escoamento, da ordem de 1000 MPA. Os raios são ancorados ao aro e ao cubo pelo sistema "dywidag" de ancoragem, que é constituído por uma arruela e uma porca. Nesse caso, na extremidade de fixação no aro, a placa é substituída pela chapa calandrada. Na extremidade de fixação ao cubo, a placa é também substituída por uma placa de maior espessura para resistir aos esforços localizados da pré-tensão;

A montagem da roda foi realizada na posição vertical, com o posicionamento dos raios com uma pré-tensão inicial de aproximadamente 150 kN. Após a montagem, a máxima falta de circularidade detectada no aro foi de  $\pm 10$ mm (0,6% do raio) e a máxima falta de planicidade foi de  $\pm 7$ mm. Esses valores são aceitáveis, e garantem a boa operação da estrutura. Nas Figuras 3.4 e 3.5 podem-se apreciar detalhes da montagem da Roda.

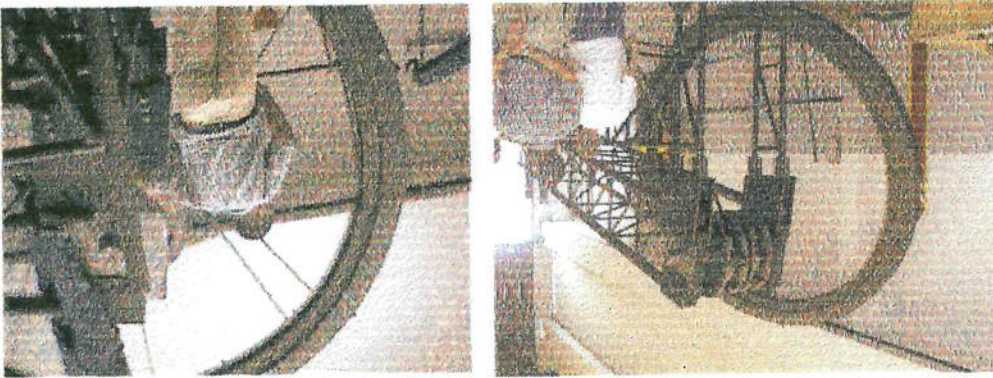


Fig. 3.4- Fase inicial da montagem da roda e colocação dos raios

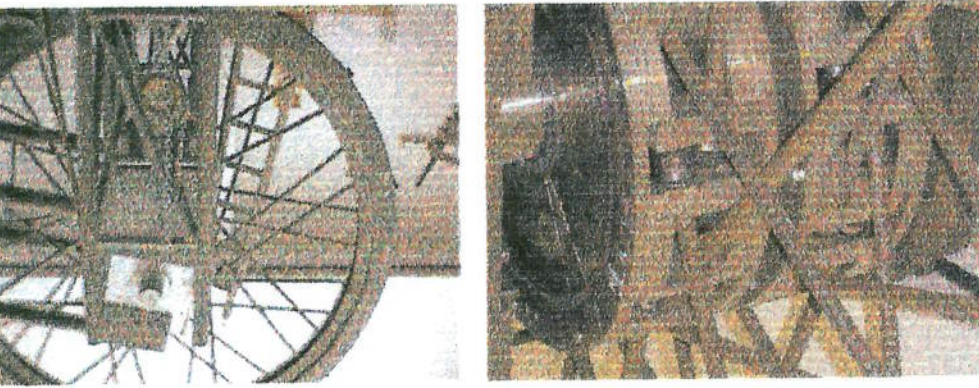


Fig. 3.5- Detalhe da fixação dos raios no cubo e roda já montada

A superfície de contato entre o aro e o cabo umbilical foi revestida com uma camada de madeira ao longo do perímetro do aro, Figura 3.6, com o objetivo de simular os diferentes ângulos de contato do umbilical com a superfície, e proteger o cabo dos raios, arruelas e porcas empregados na fixação do aro.

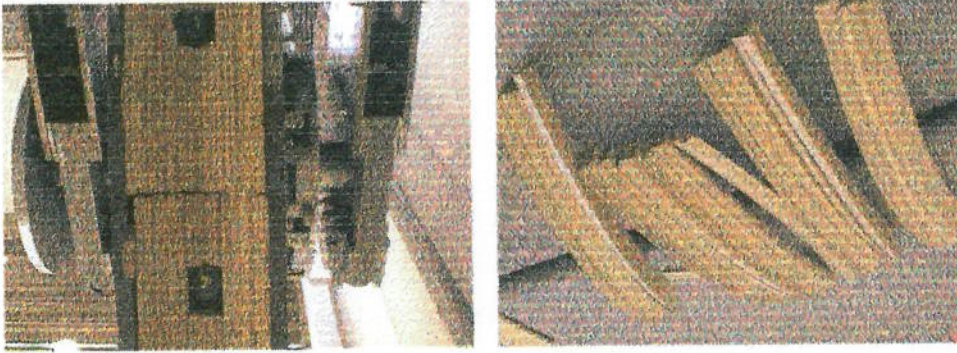


Fig. 3.6- Superfície de revestimento de madeira do aro da roda

O terceiro módulo é o **Mecanismo de Acionamento**, Figura 3.7, que tem como função movimentar a Roda. Ele é constituído por um servo-atuador hidráulico "DARTEC", acoplado a um mecanismo de quatro barras.

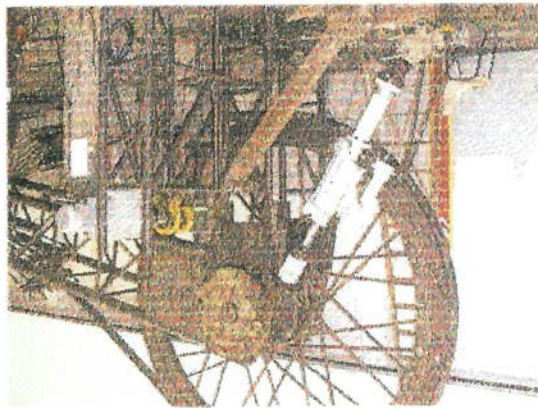


Fig. 3.7- Mecanismo de acionamento

O quarto módulo é o **Mecanismo de Tração**, Figura 3.8, cuja função é impor um carregamento de tração ao corpo de prova inicialmente estimada para um máximo de 100 tf, que origina uma tração total de 200 tf. Este mecanismo é formado por doze polias fixadas a uma base de reação por um eixo mecânico. Essa base de reação é acionada pelo atuador de 200 tf, com pistão vazado, por um eixo de aço. Em operação, a base de reação fica suspensa entre os cabos de ancoragem do corpo-de-prova e o eixo de tração do atuador. A ancoragem do corpo-de-prova às polias é feita por doze cabos de aço (AACI 6x41) de 1" de diâmetro, que foram fixados em chapas, por sua vez fixadas nas duas flanges do umbilical.

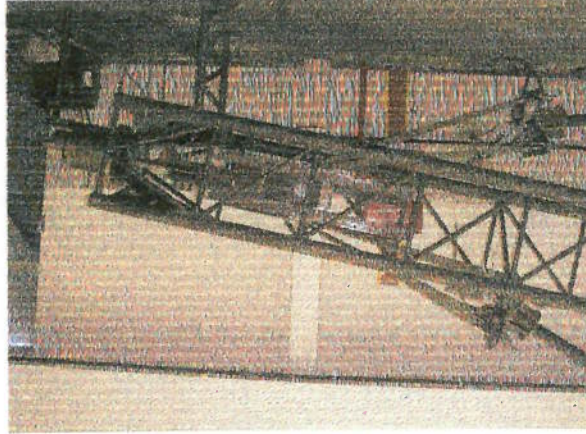


Fig. 3.8- Mecanismo de tração

armadura de tração externa do cabo. Primeiramente, foram abertas pequenas janelas na

### 3.2.3- Instrumentação do corpo de prova para o ensaio de fadiga

A instrumentação consistiu na colocação de sensores de deformação na bancada de ensaio para posteriormente proceder a sua instrumentação.

Depois de finalizada a preparação do corpo de prova, este foi montado na

Fig. 3.10- Flange conector do corpo de prova

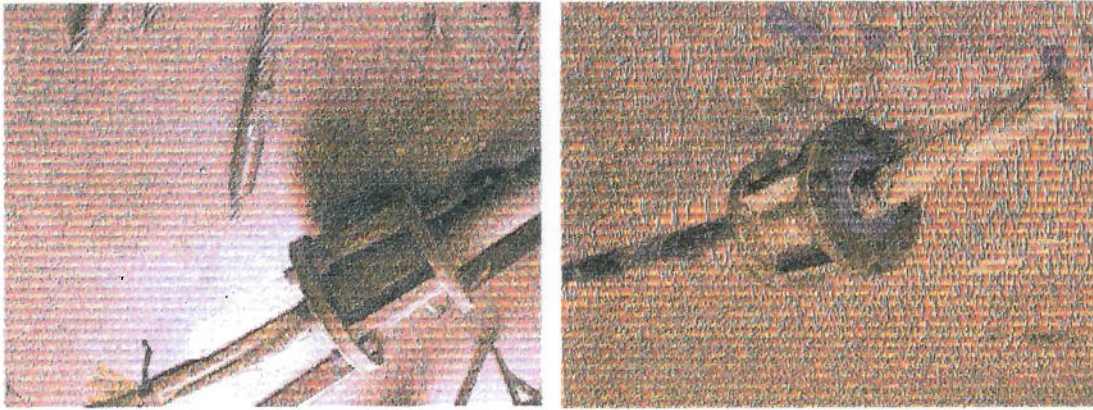
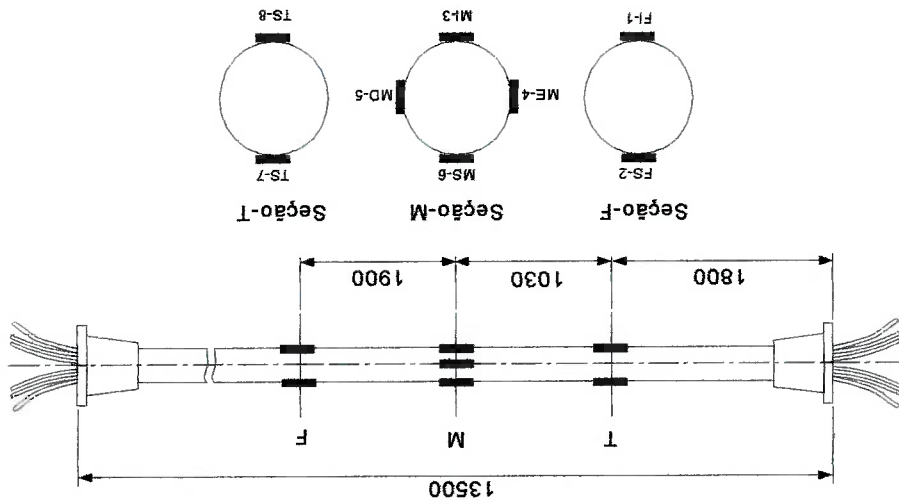


Fig. 3.9- Corpo de prova com flanges e extensômetros



montadas conexões tipo flange Figura 3.10. Como corpo de prova para o ensaio foi empregada um segmento de cabo umbilical de 13,5 m de comprimento Figura 3.9, nas suas extremidades foram

### 3.2.2- Preparação do corpo de prova para o ensaio de fadiga

quadradas, com dimensões não maiores que 40mm, na camada externa polimérica do cabo com ajuda de um estilete e, assim, possibilitar o acesso à armadura de tração externa. Já com essa parte da armadura descoberta, a superfície foi polida e limpa para, em seguida, fixarem-se os extensômetros. O cabo foi instrumentado em 8 pontos, os quais são mostrados na Figura 3.11.

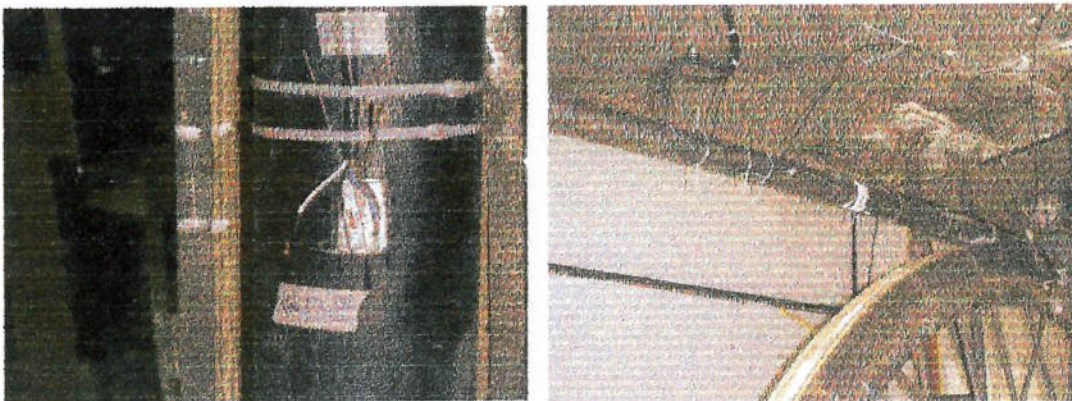


Fig. 3.11 - Instrumentação do corpo de prova

Depois da fixação, feita por meio de colagem, fizeram-se testes de verificação de desempenho dos extensômetros e foram realizadas as respectivas soldas. Concluída a fase de solda, testou-se novamente o desempenho do circuito elétrico.

Após a instrumentação do corpo de prova e o cabeamento, precedeu-se à proteção da instrumentação. Primeiramente foram protegidas as cavidades abertas na camada externa do cabo com resina de silicone especial, a fixação foi fixada externamente ao corpo de prova com um comprimento suficiente para evitar o perigo de arrancamento. Com a conclusão desta fase de montagem, os terminais da instrumentação foram conectados aos condicionadores de sinais do sistema de monitoração e controle de dados.

### 3.2.4- Controle e monitoração do ensaio de fadiga

O controle e monitoração das operações da máquina de ensaio foi feito por um sistema baseado em um microcomputador, com placas A/D e D/A, ligado aos respectivos condicionadores de pressão, curso linear, curso angular, temperatura e deformações específicas. Na aquisição dos dados empregou-se um sistema ADS2000

(Lynx) junto a um microcomputador utilizando como base, o software AqDados, versão 7.

O carregamento aplicado ao corpo-de-prova (cabo umbilical) foi monitorado por um transdutor de pressão posicionado na linha hidráulica, que envia o respectivo sinal a um sistema de controle com malha fechada, onde é especificada a pressão de serviço. As flutuações da força, que são inerentes ao sistema de inversão de movimento angular foram monitoradas simultaneamente com outras variáveis de interesse, tais como deformações específicas, cursos, temperaturas, etc., pelo sistema de aquisição de dados. Na figura 3.12 mostra-se o sistema de aquisição de dados.

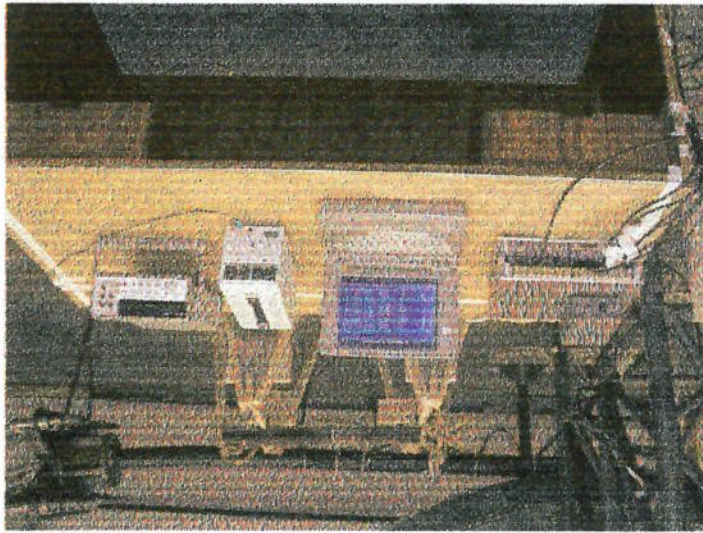


Fig. 3.12- Sistema de aquisição de dados: ADS-2000 "LYNX", Microcomputador, Fonte Minipa e Multímetro HP

### 3.2.5- Procedimentos do ensaio de fadiga

Uma vez que se previu que o sistema estrutural estaria sujeito a deslocamentos permanentes, decorrentes principalmente das acomodações das camadas internas da estrutura do cabo umbilical, recomendou-se que o corpo de prova fosse inicialmente tracionado, com controle de força, até a carga do ensaio. Em seguida, o corpo de prova seria descarregado até um valor de 10% do carregamento que atingiria durante o ensaio. Estando descarregado a 10% da carga do ensaio, o corpo de prova deveria permanecer com esse nível de carga durante o dobro do tempo de descarregamento, ou um tempo necessário para a avaliação da recuperação elástica do sistema. Só então este seria carregado novamente até a carga do ensaio de



fadiga, dando-se início à sua execução. Os resultados desta fase foram registrados para efeito de comparação com o ciclo final de carregamento a ser aplicado ao corpo de prova.

Durante o ensaio de fadiga o corpo de prova foi submetido a um carregamento de tração de 60 toneladas. Em seguida, mantendo-se essa carga, fez-se oscilar a polia (diâmetro externo de 3,5 m) com um movimento alternativo onde foram impostas mudanças de curvatura ao cabo umbilical originando assim esforços e deformações cíclicos nas suas diferentes camadas. O cabo, em cada ciclo, flexionava um comprimento de 1,8 m. A duração do ensaio foi de 30 000 ciclos, e o período de cada ciclo foi entre 5 e 10 segundos.

Durante a realização do ensaio de fadiga observou-se que com o aumento do número dos ciclos cresceram as deformações residuais na armadura de tração externa do cabo. Antes e depois de concluído o ensaio, foram efetuadas medições da passagem de corrente elétrica ao longo dos condutores de cobre e na atenuação óptica das fibras, observando-se um ligeiro aumento na resistência elétrica dos condutores e nenhum efeito na atenuação óptica das fibras.

### 3.3- Ensaios de Tração de Amostras das Camadas Poliméricas

O ensaio consistiu em se submeter o corpo de prova, Figura 3.13, a um esforço de tração ao longo de seu comprimento que tende a esticá-lo originando uma deformação do material na direção da força aplicada. Ao se aplicar a carga, a deformação cresceu continuamente até quase o final do ensaio.

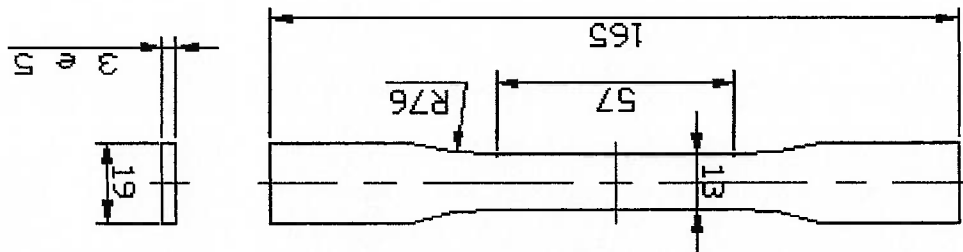


Fig. 3.13- Corpo de prova para ensaio de tração com plásticos segundo a norma ASTM D 638

Neste estudo, tanto as deformações como os esforços foram medidos por dispositivos acoplados na própria máquina de ensaio e o corpo de prova foi solicitado até a ruptura.

Com este tipo de ensaio, pôde-se afirmar que praticamente as deformações promovidas no material são uniformemente distribuídas em todo o seu corpo, até ser atingida uma carga máxima próxima no final do ensaio e, como é possível fazer com que a carga cresça numa velocidade razoavelmente lenta durante todo o teste, o ensaio de tração permite medir satisfatoriamente a resistência do material. A uniformidade da deformação permite ainda obter medições precisas da variação dessa deformação em função da tensão aplicada. Essa variação, extremamente útil para o engenheiro, é determinada pelo traçado da curva carga/deslocamento e a partir dela, obter-se a curva tensão/deformação. Para que os valores de tensão e deformação obtidos sejam confiáveis, é necessário que os corpos de prova a serem ensaiados sejam feitos conforme os métodos especificados na norma.

A metodologia seguida para a realização dos ensaios de tração feitos neste trabalho consta da norma ASTM D 638 "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics". Este método de ensaio permite determinar as propriedades de tração em plásticos reforçados e não reforçados, na forma de corpo de prova tipo "dumbbell-shaped" ou "Borboleta", quando testado sob condições pré-definidas de pré-tratamento, temperatura, umidade e velocidade com que é feito o ensaio. Este método pode ser utilizado para testar materiais de qualquer espessura até 14 mm (0,55 polegadas). Para materiais com espessura menor de 1 mm é preferível usar a norma ASTM D 882 e para espessuras maiores de 14 mm, esta deve ser reduzida por usinagem.

Os dados obtidos com este ensaio são relevantes e apropriados para uso de projetos de engenharia com plásticos. Não obstante, devido ao alto grau de sensibilidade mostrado por estes materiais à taxa de deformação e condições do meio, os dados obtidos neste ensaio não podem ser considerados válidos para aplicações envolvendo condições do meio e velocidades de aplicação da carga muito diferentes das empregadas no ensaio.

Quando se fazem ensaios de tração em polímeros, como resultados diretos podem-se obter os valores de cargas aplicadas e os deslocamentos originados por

estas, e com estes dados construir a curva tensão/deformação do material. A partir da curva tensão/deformação é possível determinar o módulo de elasticidade do material (E), o qual nos dá a medida da rigidez deste. Quanto maior é E mais rígido é o material. Esta propriedade nos polímeros é determinada pelas forças de ligação entre os átomos. Determina-se por meio da eq.(3.2), a qual se obtém a partir da eq.(3.1), que descreve o comportamento linear elástico do material na primeira parte da curva de acordo com a "Lei de Hooke".

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.1)$$

$$E = \frac{Q \cdot L_0}{S_0 \cdot \Delta L} \quad (3.2)$$

onde:

$\sigma$ - tensão (Pa);

E- módulo de elasticidade (Pa);

$\varepsilon$ - deformação;

Q- carga aplicada (N);

$L_0$ - distância marcada no corpo de prova antes do ensaio (m);

$S_0$ - área da seção transversal do corpo de prova antes do ensaio (m<sup>2</sup>);

$\Delta L$ - incremento da distância marcada inicialmente no corpo de prova (m).

O início da plasticidade do material acontece ao ser atingido o escoamento,

que é um tipo de transição heterogênea e localizada, caracterizada por um aumento relativamente grande da deformação com variação pequena da tensão durante sua maior parte (Souza, 1982). A tensão atingida durante o escoamento chama-se limite

de escoamento e é dada pela eq.(3.3).

$$\sigma_e = \frac{Q_e}{S_0} \quad (3.3)$$

onde:

$\sigma_e$ - limite de escoamento (Pa);

$Q_e$ - carga de escoamento (N);

$S_0$ - área da seção transversal do corpo de prova (m<sup>2</sup>).

No caso de materiais dúcteis para projetos é mais usado o limite de escoamento ou limite n. Para materiais frágeis o limite de resistência é um critério não é levada em conta na fórmula.

Depois de superar o limite de escoamento, o material começa a comportar-se plasticamente e atinge o limite de resistência ( $\sigma_r$ ), que é a tensão máxima atingida durante o ensaio. Na realidade, a tensão que o material sofre ao atingir a carga máxima é maior que a tensão calculada, devido à diminuição da área, que desvantagem de que são menos precisos.

O limite elástico e o limite de proporcionalidade nos mostram o final da zona de comportamento elástico do material, eles podem ser determinados mediante carregamentos e descarregamentos sucessivos dos corpos de prova, até que seja obtida uma carga onde se observe, com boa precisão, a deformação permanente para o limite elástico, ou uma tensão onde a deformação deixe de ser proporcional a ela para o limite de proporcionalidade. Este processo é muito laborioso e a qualidade dos resultados depende em grande parte da medida da precisão dos dispositivos de medição e da máquina de ensaio usada. Os limites elástico e de proporcionalidade podem-se determinar também por métodos gráficos (Souza, 1982) com a

Na prática, n pode ter o valor de 0.1 % no caso mais geral (ASTM D 638).

$S_o$  – área da seção transversal ( $m^2$ ).

$Q_n$  – carga em que se observa uma deformação de n% do material (N);

$\sigma_n$  – limite convencional n (Pa);

onde:

$$\sigma_n = \frac{Q_n}{S_o} \quad (3.4)$$

( $\sigma_n$ ) dado pela equação (3.4).

Nos casos em que não seja possível encontrar o limite de escoamento com precisão, adota-se, por convenção, o limite convencional n de escoamento ou limite n entre a zona de comportamento elástico e a de comportamento plástico.

Nos materiais poliméricos às vezes é muito difícil determinar com precisão o valor de limite de escoamento, já que o desvio da linearidade é sempre gradual e não há precisamente um ponto bem determinado, ou seja, é como uma zona de transição

válido para projetos, já que o limite de escoamento é muito difícil de se calcular e a diminuição da área da seção transversal é desprezível por causa da pequena zona de comportamento plástico que estes materiais apresentam.

O limite de resistência do material é determinado mediante a eq.(3.5).

$$\sigma_r = \frac{Q_r}{S_o} \quad (3.5)$$

onde:

$\sigma_r$ - limite de resistência do material (Pa);

$Q_r$ - carga de ruptura (N);

$S_o$ - área da seção transversal (m<sup>2</sup>).

No ensaio, após ser atingido o limite de resistência, começa a ruptura do material, caracterizada pelo fenômeno da estricção, ou seja a diminuição da seção transversal do corpo de prova, numa região determinada do mesmo. Onde se dá a ruptura e com ela o final do ensaio. Nesta fase final a deformação torna-se não uniforme e a força deixa de agir unicamente na direção normal à seção transversal do corpo de prova.

Outras propriedades do material que se podem determinar pelo ensaio de tração são o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), o alongamento total ( $A$ ) e a estricção ( $\phi$ ).

Conhece-se como coeficiente de Poisson a propriedade que nos dá a rigidez do material na direção perpendicular à direção da carga de tração aplicada no ensaio.

Para seu cálculo aplica-se a eq.(3.6).

$$\nu = \frac{\epsilon_T}{\epsilon_L} \quad (3.6)$$

onde:

$\nu$ - coeficiente de Poisson;

$\epsilon_T$ - deformação transversal;

$\epsilon_L$ - deformação longitudinal.

O alongamento é a porcentagem do incremento do comprimento do corpo de prova medido depois da ruptura e é calculado mediante a eq.(3.7).

$$A = \frac{L - L_o}{L_o} \cdot 100 \quad (3.7)$$

onde:

A- alongamento total (%);

L<sub>o</sub>- distância marcada no corpo de prova antes do ensaio (m);

L- distância final depois da ruptura do corpo de prova (m).

A estricção da a medida da porcentagem da diminuição da seção transversal

do corpo de prova depois da ruptura e é determinada pela eq.(3.8).

$$\phi = \frac{S_o - S}{S_o} \cdot 100 \quad (3.8)$$

onde:

φ- estricção (%);

S<sub>o</sub>- área da seção transversal antes do ensaio (m<sup>2</sup>);

S- área da seção transversal depois da ruptura (m<sup>2</sup>).

A área abaixo da parte elástica da curva tensão versus deformação nos dá o

valor da **resiliência** do material, que nada mais é do que a capacidade do material de

absorver energia quando é deformado elasticamente ou seja dentro da zona elástica, e

libera-la quando descarrega. Esta propriedade é medida pelo módulo de resiliência

(U<sub>r</sub>) que é a energia de deformação por unidade de volume necessária para tensionar

o material da origem até a tensão do limite de proporcionalidade.

Para determinar U<sub>r</sub>, uma vez que a carga é aplicada gradualmente, o trabalho

exercido para tensionar até atingir o limite de proporcionalidade é igual à tensão

média multiplicada pela deformação ε<sub>p</sub>, causada, segundo a eq.(3.9).

$$U_r = \frac{\sigma}{2} \cdot \epsilon_p = \frac{\sigma}{2} \cdot \frac{F}{\sigma_p} \cdot \frac{F}{\sigma_p}$$

então,

$$U_r = \frac{\sigma_p^2}{2E} \quad (3.9)$$

onde:

U<sub>r</sub>- resiliência (N m/m<sup>3</sup>);

$\sigma_p$ - limite de proporcionalidade (Pa);

$\epsilon_p$ - deformação no limite de proporcionalidade;

E- módulo de elasticidade (Pa).

Agora, então, se agregamos as áreas abaixo as curvas das zonas elástica e a plásticas obtêm-se o valor da **tenacidade** que é a capacidade que tem um material de absorver energia até sua ruptura. Ela é medida através do módulo de tenacidade ( $U_T$ ), que é a quantidade de energia absorvida por unidade de volume que o material pode resistir até atingir a ruptura, e calculada pela eq.(3.10).

$$U_T = \sigma_r \cdot \epsilon_f \quad (3.10)$$

onde:

$U_T$ - tenacidade (N/m<sup>3</sup>);

$\sigma_r$ - limite de resistência do material (Pa)

$\epsilon_f$ - deformação até a fratura.

Uma das melhores formas de achar propriedades de tração em polímeros é retirando um corpo de prova do produto do qual se quer conhecer suas propriedades mecânicas.

Para aplicação neste tipo de estudo, a norma ASTM D 638 estabelece o uso

de corpos de prova tipo "Dumbbell-Shaped" do tipo I, o qual foi mostrado na Figura 3.1. Foi escolhido este tipo de corpo de prova já que é o preferível quando os polímeros a serem testados, o polietileno de baixa densidade (LDPE) e o polietileno de alta densidade (HDPE), são incluídos dentro do grupo dos plásticos semi-rígidos e sua espessura é maior que 1 mm e menor que 7 mm.

Primeiramente, foram retiradas do cabo umbilical amostras das duas camadas poliméricas a serem ensaiadas: a externa de HDPE e a interna de LDPE. Este processo foi feito cuidadosamente com ferramentas manuais para que o aumento da temperatura durante a operação de corte não afetasse as propriedades mecânicas originais do material.

As amostras foram retiradas da zona de onde o cabo esteve submetido a carregamentos cíclicos combinadas de tração e flexão durante o ensaio de fadiga prévio. Além disso, também foram retiradas amostras das mesmas camadas poliméricas de um cabo umbilical que não tinha sido submetido a nenhum tipo de

carregamento, com o objetivo de verificar a variação das propriedades mecânicas do cabo ensaiado e do que não sofrera nenhum tipo de sollicitação.

Depois de preparadas todas as amostras dos materiais a serem ensaiados, e com a ajuda de um gabarito, foram cortados os corpos de prova em uma serra e, em seguida, com uma esmerilhadora e uma lixadeira foram atingidas as dimensões desejadas, e feito o acabamento final, conseguindo a maior uniformidade possível entre todos os corpos de prova. Suas dimensões ficaram dentro das tolerâncias admitidas pela norma ASTM D 638. Todas as superfícies usinadas dos corpos de prova ficaram livres de defeitos, ranhuras e imperfeições.

Foram confeccionados cinco corpos de prova (quantidade que estabelece a norma) de cada uma das amostras de materiais a serem testadas. Tendo em conta que são duas camadas uma de LDPE e outra de HDPE, além das duas camadas do umbilical, que não foi submetido ao ensaio de fadiga, foram testados quatro lotes de cinco corpos de prova cada um, totalizando vinte corpos de prova.

Denomina-se velocidade do ensaio a variação relativa do movimento da mordaga móvel da máquina de ensaio durante os testes. Este parâmetro é de vital importância, já que com uma pequena variação pode alterar os resultados das propriedades mecânicas a serem obtidas, tais como tensões, deformações, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, etc. Devido a isso, quando os resultados a se obter forem comparativos, deve-se controlar rigorosamente este fator.

A norma ASTM D 638 estabelece as velocidades em que se devem fazer os ensaios de tração em polímeros. Na Tabela I desta norma aparecem os valores de velocidade recomendados, no caso deste trabalho, segundo o material e o tipo de corpo de prova recomendam-se três velocidades, que são 5, 50 ou 500 mm/min. A velocidade empregada no ensaio foi de 50 mm/min por ser uma velocidade média entre as três recomendadas.

A maioria dos materiais plásticos são afetados por pequenas mudanças de temperatura e umidade relativa. Isto se deve ao fato de que estes tipos de materiais são formados predominantemente por cadeias de átomos de carbono unidos por ligações covalentes. Então, quando se pretende obter resultados comparativos é essencial que os ensaios sejam feitos com valores de temperatura e umidade relativa similares (Brown, 1988).



O bom condicionamento do ambiente onde se realizarão os ensaios é de

grande importância para que os resultados obtidos sejam reproduzíveis. Segundo a norma ASTM D 638, quando forem realizados ensaios de tração com polímeros, é recomendável ter uma temperatura ambiente de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  ( $73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$ ) e uma unidade relativa de  $50 \pm 5\%$  por não menos de 40 horas antes do ensaio. No caso de diferir a tolerância deve ser  $\pm 1^\circ\text{C}$  ( $1.8^\circ\text{F}$ ) e  $\pm 2\%$  de umidade relativa.

Nós conseguimos fazer os ensaios de tração à temperatura de  $24^\circ\text{C}$  e umidade relativa de 52%, valores toleráveis pela norma ASTM D 638.

Na execução dos ensaios a máquina de tração empregada foi do tipo eletromecânica (parafuso), modelo INSTRON TTL-DM-L, com capacidade de carga de 10 000 kgf.

Para fazer o ensaio de tração com polímeros, a norma ASTM D 638 faz as seguintes recomendações:

- a) Verificar as dimensões principais do corpo de prova (largura e espessura) com micrômetro de 0.025 mm (0.001 polegada);
- b) Colocar o corpo de prova nas mordidas da máquina de ensaio. O eixo médio traçado ao longo do comprimento do corpo de prova deve coincidir com os pontos centrais das mordidas, já que qualquer erro de alinhamento pode alterar o valor das propriedades mecânicas a se obter. As mordidas devem ficar bem apertadas ao corpo de prova para evitar escorregamento do mesmo durante o ensaio, que possa ocasionar erros nos dados obtidos ou ruptura do corpo de prova fora da zona de trabalho (pescoço);
- c) Registrar a curva de carga/deslocamento;
- d) Registrar a carga e deslocamento dos pontos de escoamento e ruptura.

### 3.4- Resultados dos Ensaio de Tração

A seguir, mostram-se os resultados obtidos durante os ensaios de tração das camadas poliméricas dos cabos umbilicais.

### 3.4.1-Camada externa do cabo umbilical

A camada externa do cabo umbilical é manufaturada com o polietileno de alta densidade (HDPE) e foram realizados ensaios de tração com corpos de prova previamente ensaiados e não ensaiados à fadiga.

i)- Corpo de Prova (ET 1.3) Não Ensaiado Previamente à Fadiga.

Na Figura 3.14 mostra-se a curva tensão/deformação obtida para o corpo de prova ET 1.3 e na Tabela 1.3 alguns dos resultados do ensaio.

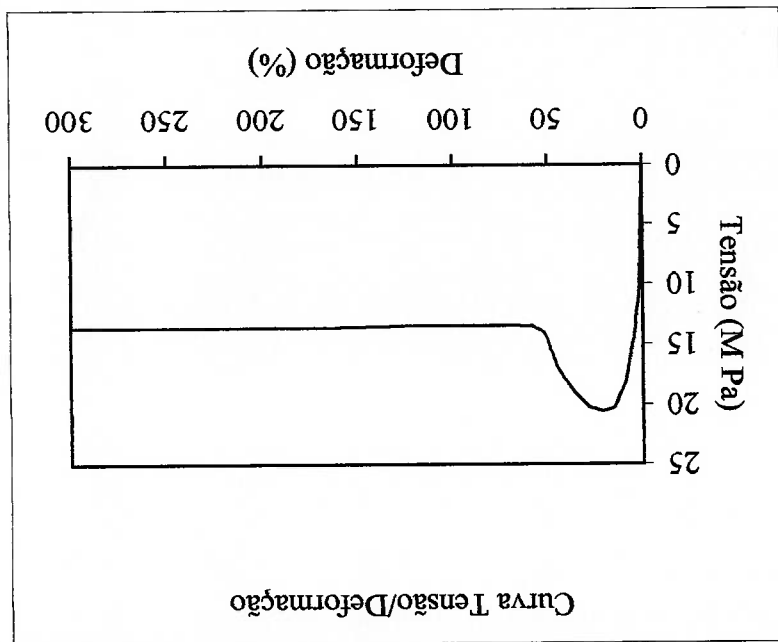


Fig. 3.14-Curva tensão/deformação para um dos corpos de prova ensaiado (ET 1.3)

Tabela 3.1- Dados de tensão e deformação máximas obtidas no ensaio do corpo de prova ET 1.3

Corpo de Prova	Material	$\sigma$ máxima (MPa)	$\epsilon$ máxima (%)
ET 1.3	HDPE	20,52	300

ii)- Corpo de Prova (ET 2.1) Ensaiado Previamente à Fadiga.

Na Figura 3.15 mostra-se a curva tensão/deformação obtida para o corpo de prova ET 2.1 e na Tabela 3.2 alguns dos resultados do ensaio.

i)- Corpo de Prova (ET 3.3) Não Ensaado Previamente a Fadiga.  
 Na Figura 3.16 mostra-se a curva tensão/deformação obtida para o corpo de prova ET 3.3 e na Tabela 3.3 alguns dos resultados do ensaio.

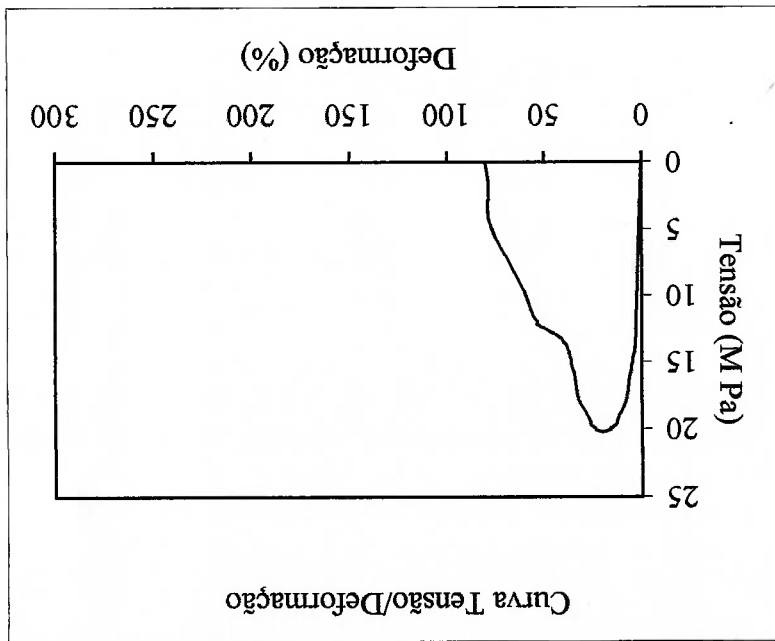
A camada interna do cabo umbilical é manufaturada com o polietileno de baixa densidade (LDPE) e foram realizados ensaios de tração com corpos de prova previamente ensaiados e não ensaiados a fadiga.

**3.4.2-Camada interna do cabo umbilical**

Corpo de Prova	Material	$\sigma$ máxima (MPa)	$\epsilon$ máxima (%)
ET 2.1	HDPE	20,22	80

Tabela 3.2- Dados de tensão e deformação máximas obtidas no ensaio do corpo de prova ET 2.1

Fig. 3.15- Curva tensão/deformação para um dos corpo de prova ensaiado (ET 2.1)

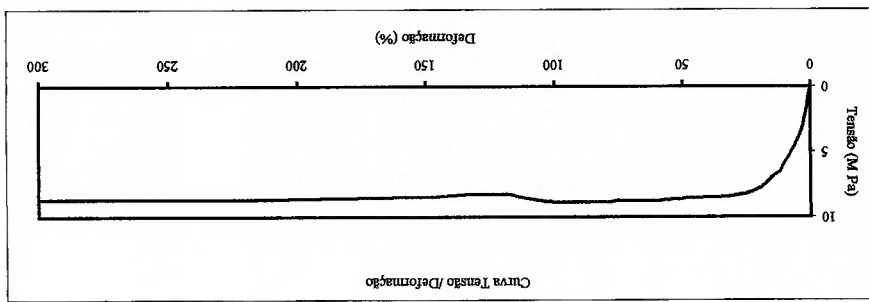


ET 4.1	LDPE		300
Corpo de Prova	Material	$\sigma$ máxima (MPa)	$\epsilon$ máxima (%)

prova ET 4.1

Tabela 3.4- Dados de tensão e deformação máximas obtidas no ensaio do corpo de

Fig. 3.17- Curva tensão/deformação para um dos corpo de prova ensaiado (ET4.1)



prova ET 4.1 e na Tabela 3.4 alguns dos resultados do ensaio.

Na Figura 3.17 mostra-se a curva tensão/deformação obtida para o corpo de

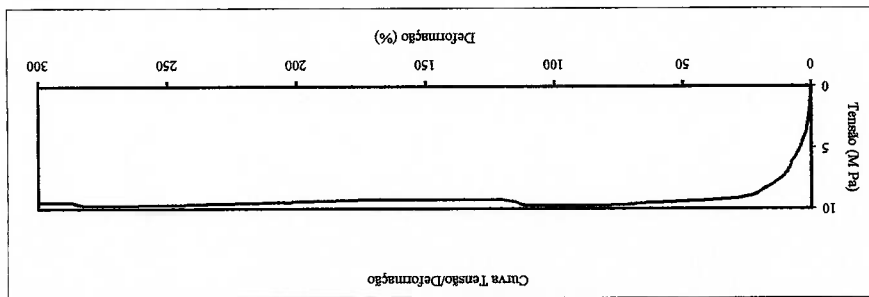
ii)- Corpo de Prova (ET 4.1) Ensaio Previamente a Fadiga.

ET 3.3	HDPE		300
Corpo de Prova	Material	$\sigma$ máxima (MPa)	$\epsilon$ máxima (%)

prova ET 3.3

Tabela 3.3- Dados de tensão e deformação máximas obtidas no ensaio do corpo de

Fig. 3.16- Curva tensão/deformação para um dos corpo de prova ensaiado (ET 3.3)



## CAPÍTULO IV AVALIAÇÃO NUMÉRICA-COMPUTACIONAL

### 4.1- Introdução

O desenvolvimento acelerado da engenharia, a construção de estruturas de geometria cada vez mais complexas e o emprego de materiais tais como os polímeros com comportamento mecânico diferente dos materiais convencionais têm conduzido ao desenvolvimento de ferramentas mais complexas e eficientes que ajudam na solução desses problemas.

No caso em que o problema envolva materiais cujo comportamento é função de vários parâmetros tais como tempo, temperatura, taxas de deformação, etc; as soluções puramente analíticas existem apenas para uma quantidade limitada de problemas. Assim, o emprego de métodos numéricos é geralmente considerado como a única forma possível e mais abrangente para sua abordagem.

Entre estes tipos de métodos, um dos mais usados hoje dia é o Método dos Elementos Finitos (MEF), que consiste em procedimentos gerais de discretização de problemas contínuos descritos por expressões definidas matematicamente (Zienkiewicz 1980). Ou seja, é um método de cálculo numérico mediante o qual são discretizados elementos ou estruturas contínuas (aqueles cujas subdivisões prosseguem indefinidamente e o problema somente pode ser definido usando-se a função matemática do infinitésimo, conduzindo as equações diferenciais ou expressões equivalentes com um número infinito de elementos implicados) para chegar a modelos matemáticos discretos (aqueles que têm número finito de elementos bem definidos) que facilitam as tarefas de engenharia, podendo-se obter soluções aproximadas satisfatórias.

O presente capítulo tem como objetivo apresentar uma contribuição na avaliação numérico-computacional de materiais poliméricos quando submetidos às grandes deformações. O MEF foi utilizado na análise de corpos de provas estabelecidos de acordo com a norma ASTM 638 e simulados com as propriedades mecânicas dos polímeros das camadas externa e interna.

#### 4.2- Formulação do Modelo Físico

As partes do cabo analisadas foram a camada plástica externa, a qual é manufaturada de polietileno de alta densidade (HDPE), e a camada plástica interna, manufaturada de polietileno de baixa densidade (LDPE). Para a modelagem dos corpos de prova foram utilizados os códigos computacionais LUSAS [Theory manual. United Kingdom: FEA Ltd., 2000] e ALGOR [<http://www.algor.com>].

Foram simulados dois ensaios de tração o primeiro para o material da camada externa HDPE, e o segundo para o material da camada interna LDPE. Para ambas as modelagens o tipo de análise feita foi Não Linear Estático, devido às propriedades do material visco-elástico e à baixa velocidade com que foram feitos os ensaios.

Como modelo do material, escolheu-se o "Stress Potential tipo von Mises" no "software" LUSAS e "von Mises curve with Isotropic Hardening" no "software" ALGOR, já que se conheciam as curvas tensão/deformação dos materiais de ambas as camadas do cabo, fornecidas pelo fabricante e da bibliografia consultada. Os valores de tensão, deformação e módulo de elasticidade, assim como a curva tensão/deformação fornecidos ao "software" para as simulações são mostrados nas Tabelas 4.1 e 4.2 e nas Figuras 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1. Dados deformação, tensão e módulo de Young fornecidos aos "softwares" LUSAS e ALGOR, como curva tensão/deformação do HDPE

Portos	Deformação (%)	Tensão(M Pa)	Módulo de Young (M Pa)
1	0,00	0,00	0,00
2	3,13	21,00	670,00
3	300,00	32,00	3,71

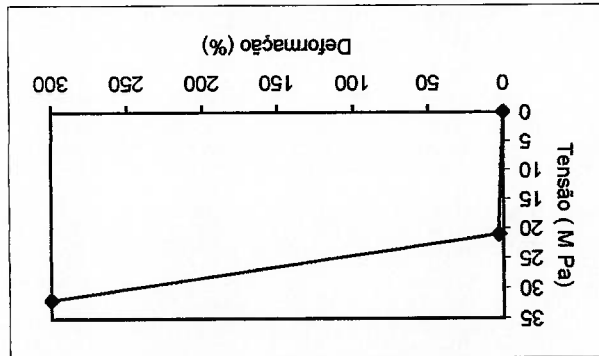


Fig. 4.1- Curva tensão/deformação do material fornecida aos "softwares" LUSAS e ALGOR, como propriedades do HDPE

Aproveitando a tripla simetria das geometrias dos corpos de prova foi modelado somente um quarto destes. Na extremidade superior do modelo foi aplicado um carregamento de tração, na direção +Z, distribuído na superfície superior para evitar concentrações de tensões indesejáveis nos seus vértices. No

Dados	HDPE	LDPE
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	945,00	930,00
Coefficiente de Poisson	0,38	0,38

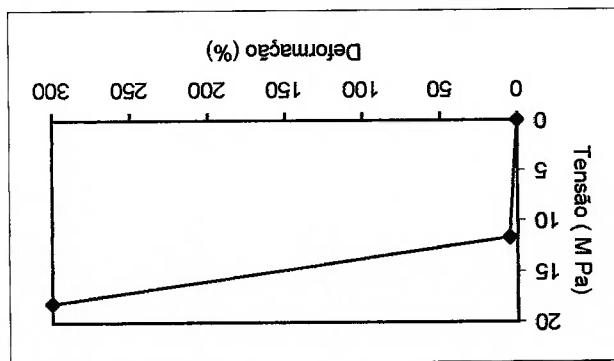
Tabela 4.3- Dados das propriedades dos materiais usados na modelagem

cabos: PIRELLI CABOS S.A. Outros dados usados na modelagem são mostrados na Tabela 4.3. Estes foram obtidos da bibliografia e dos catálogos e normas fornecidos pelo fabricante dos outros dados usados na modelagem são mostrados na Tabela 4.3. Estes foram obtidos da bibliografia e dos catálogos e normas fornecidos pelo fabricante dos

Para ambos os modelos usaram-se elementos Hexaédricos com 8 nós, já que a espessura dos corpos a serem modelados eram de 5 mm (HDPE) e 3 mm (LDPE), bastante consideráveis, levando-se em conta que os corpos de prova tinham largura de 13 mm na área de trabalho (pescoço) e comprimento de 165 mm.

ALGOR, como propriedades do LDPE

Fig. 4.2- Curva tensão/deformação do material fornecida aos "softwares" LUSAS e



Pontos	Deformação (%)	Tensão (M Pa)	Módulo de Young (M Pa)
1	0,00	0,00	0,00
2	5,14	11,70	227,50
3	300,00	18,14	2,19

Tabela 4.2. Dados de deformação, tensão e módulo de Young fornecidos aos "softwares" LUSAS e ALGOR, como curva tensão/deformação do LDPE

modelo de HDPE foi aplicada uma carga de 520 N e no modelo de LDPE o carregamento foi de 175,5 N.

Para ambos modelos as condições de contorno impostas foram:

- No plano X-Y, somente ficaram livres as translações no sentido dos eixos X e Y;
- No plano X-Z, somente ficaram livres as translações no sentido dos eixos X e Z;
- No plano Y-Z, somente ficaram livres as translações no sentido dos eixos Y e Z;

As malhas configuradas para ambos modelos com as condições de contorno e carregamento impostas tanto no "software" LUSAS como no ALGOR são mostradas nas Figuras 4.3 e 4.4.

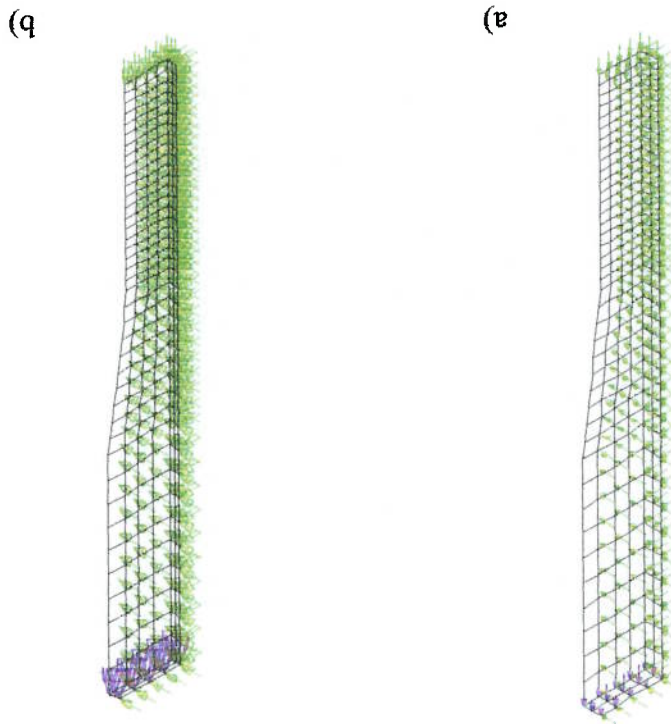
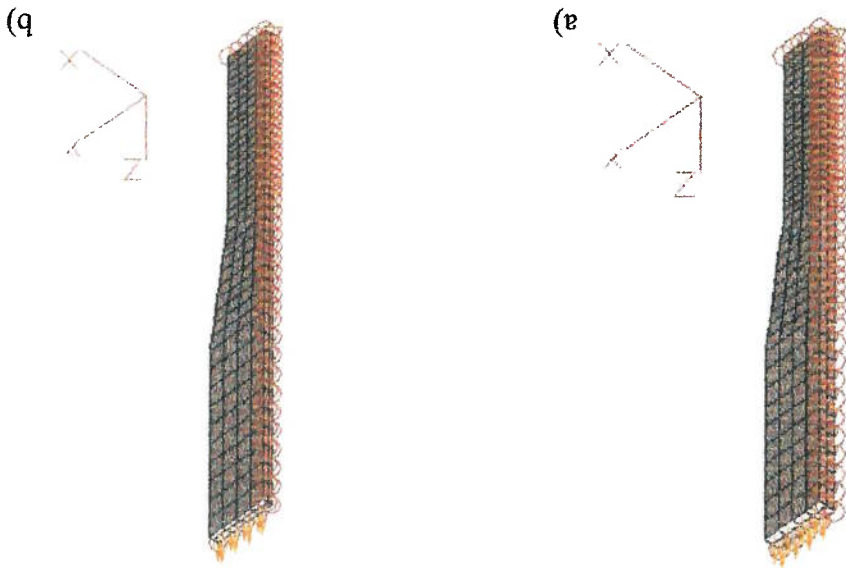


Fig. 4.3- Modelo do corpo de prova com a malha e as condições de contorno e carregamentos aplicados no "software" LUSAS; a) HDPE e b) LDPE



Fig. 4.4- Modelo do corpo de prova com a malha e as condições de contorno e carregamentos aplicados no "software" ALGOR; a) HDPE e b) LDPE



### 4.3- Resultados Obtidos na Modelagem

A seguir, mostram-se nas Figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 as distribuições das tensões e deformações de von Mises para as modelagens feitas com os "softwares" LUSAS e ALGOR, respectivamente, para ambos materiais HDPE e LDPE.

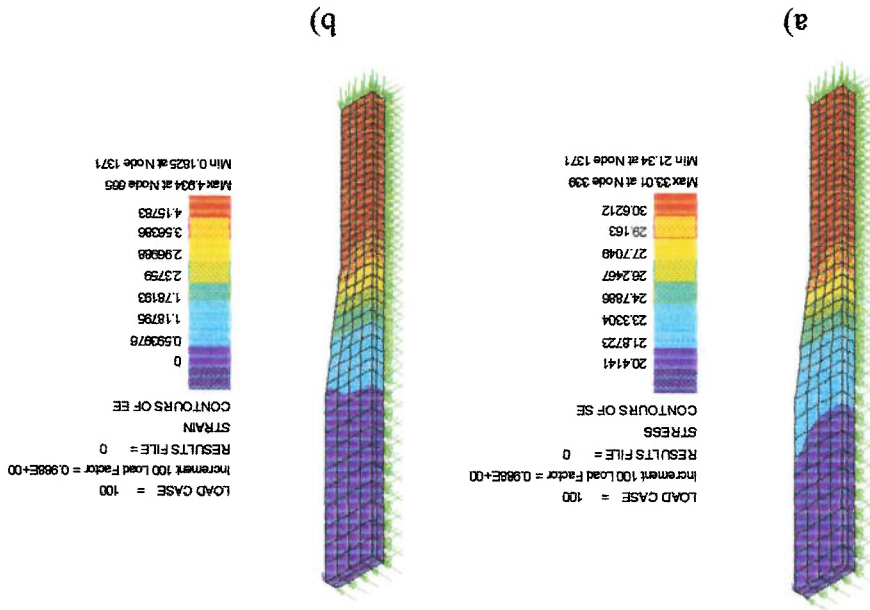


Fig. 4.5- Distribuição das tensões (a) e deformações (b) de von Mises na modelagem do HDPE com o "software" LUSAS

Fig. 4-7- Distribuição das tensões (a) e deformações (b) de von Mises na modelagem do HDPE com o "software" ALGOR

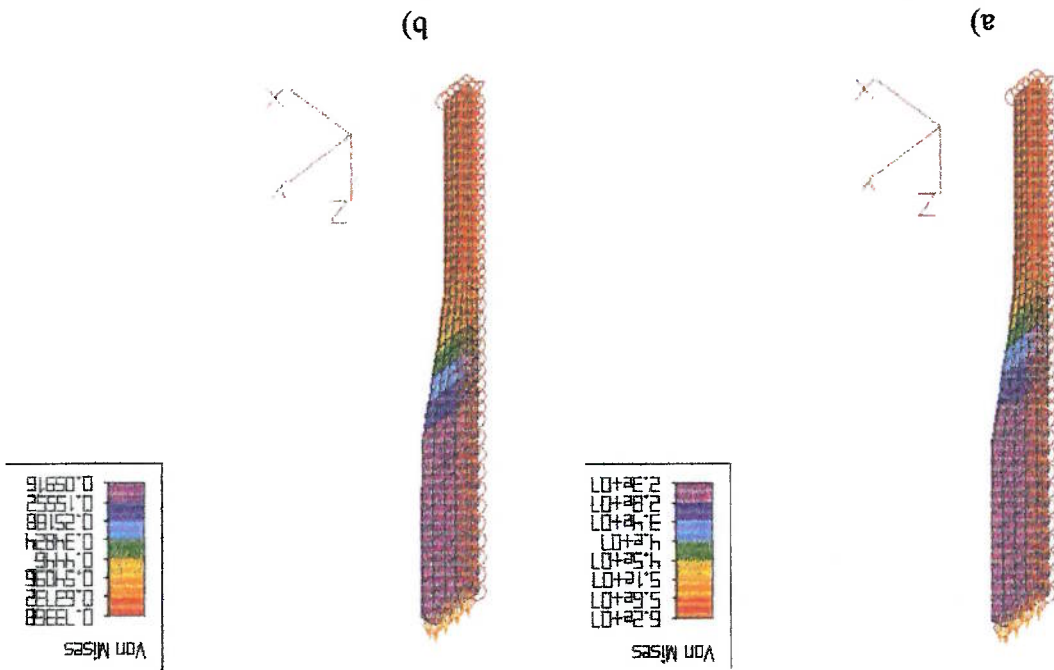
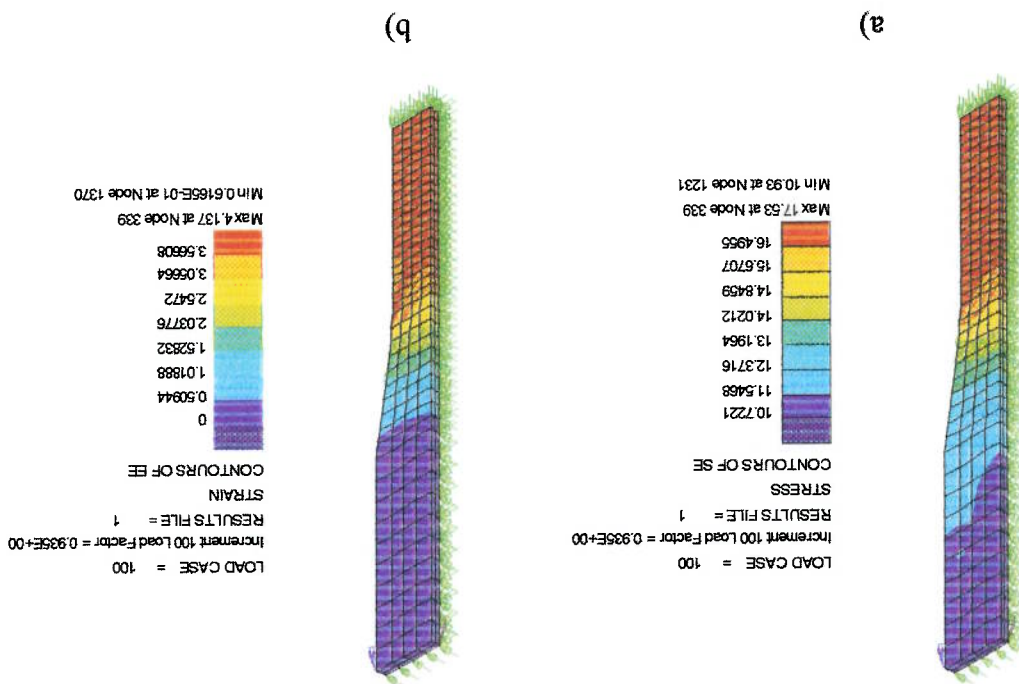


Fig. 4-6- Distribuição das tensões (a) e deformações (b) de von Mises na modelagem do LDPE com o "software" LUSAS



Resultados das Modelagens	HDPPE	LDPE
Tensão de escoamento (M Pa)	21,00	11,70
Deformação de escoamento (%)	8,27	7,42
Tensão última (M Pa)	28,26	15,89
Deformação última (%)	300,00	300,00

LUSAS

Tabela 4-4- Resultados de tensões e deformações significativas obtidas para as modelagens dos corpos de prova feitos de HDPPE e LDPE usando o "software"

Nas Tabelas 4.4 e 4.5 são apresentados valores de tensões e deformações significativos obtidos como resultado da modelagem dos corpos de prova de HDPPE e LDPE usando os "softwares" LUSAS e ALGOR.

Fig. 4-8- Distribuição das tensões (a) e deformações (b) de von Mises na modelagem do LDPE com o "software" ALGOR

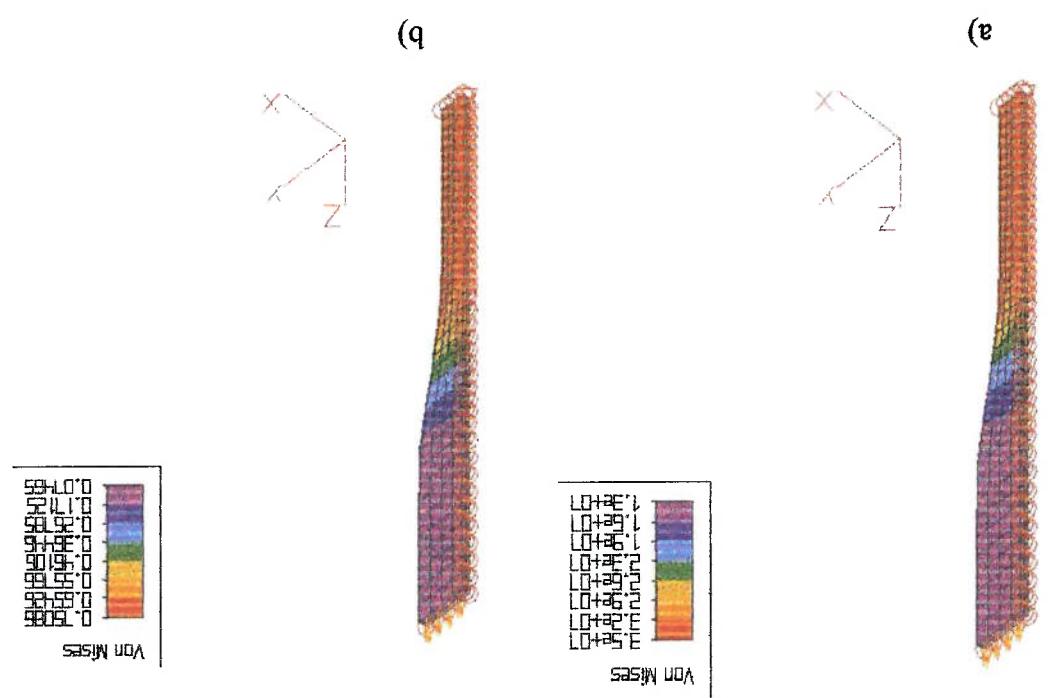


Tabela 4.5- Resultados de tensões e deformações significativas obtidos para as modelagens dos corpos de prova feitos de HDPE e LDPE usando o “software” ALGOR

Resultados das Modelagens	HDPE	LDPE
Tensão de escoamento (M Pa)	21,00	11,70
Deformação a escoamento (%)	7,45	12,50
Tensão última (M Pa)	75,90	41,70
Deformação última (%)	69,20	72,80

No Apêndice D mostram-se outros resultados obtidos na modelagem com os “softwares” LUSAS e ALGOR para ambos os materiais poliméricos.

## CAPÍTULO V ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1- Análise e Discussão dos Resultados Experimentais

Os resultados deste estudo mostraram claramente que os carregamentos cíclicos a que foi submetida uma das seções do cabo submarino eletro-óptico tiveram grande influência nas propriedades mecânicas da camada externa do cabo, feita de HDPE, não acontecendo o mesmo na camada interna, feita de LDPE, que não foi afetado perceptivelmente. Percebeu-se isto depois de analisar e comparar os resultados obtidos nos ensaios de tração dos corpos de prova feitos com as amostras de material polimérico, das seções de cabo, uma seção submetida a carregamentos cíclicos previamente e outra que não sofreu nenhum tipo de carregamento.

#### 5.1.1- Análise e discussão dos resultados do ensaio de tração nas amostras de material da camada externa (HDPE) do cabo umbilical

Comparando as curvas tensão/deformação obtidas nos ensaios de tração dos corpos de prova confeccionados com as duas amostras de material da camada externa do cabo feita de HDPE, pôde-se observar que o comportamento para ambas é similar na primeira parte da curva até atingir a tensão de escoamento média de 20,3 MPa com uma deformação média de 22,3 %.

No entanto, quando o material começou a escoar nos corpos de prova feitos com a amostra de polímero que não tinha sido submetido a carregamentos cíclicos antes do ensaio de tração, a tensão decresceu bruscamente até um valor médio de 13,34 MPa e uma deformação média de 57 %. A partir desse instante iniciou-se um estrangulamento uniforme na zona de trabalho do corpo de prova originado por uma reorientação nas cadeias poliméricas e apreciando-se um platô na curva tensão deformação, ou seja, mantendo-se uma tensão quase constante nesta parte da curva com tendência a um pequeno aumento, pelo fenômeno de reorientação mencionado anteriormente, até o final do ensaio onde o valor de tensão média foi de 13,57 com uma deformação de 300 %.

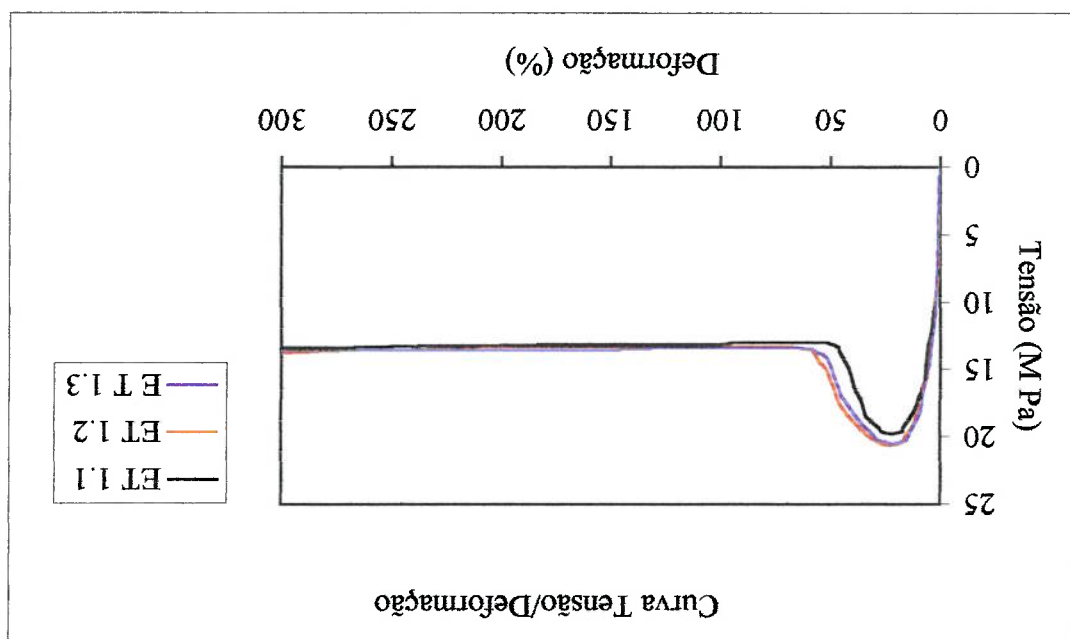
O comportamento dos três corpos de prova do lote Nº.1 elaborados com a amostra de material da camada externa, HDPE, do cabo que não tinha sido

Para os corpos de prova do lote Nº. 2, confeccionados com HDPE e submetido a carregamentos cíclicos antes de ser ensaiado à tração, no instante depois de ter atingido a tensão de escoamento, nota-se um decréscimo brusco da tensão e ao

Propriedades Mecânicas	ET 1.1	ET 1.2	ET 1.3	Média	Desv. Padrão
Tensão de Escoamento (M Pa)	19,79	20,66	20,52	20,32	0,467
Deformação de Escoamento (%)	22,50	22,50	21,70	22,20	0,461
Tensão de Reorientação (M Pa)	12,96	13,59	13,46	13,34	0,332
Deformação de Reorientação(%)	53,30	58,30	61,60	57,70	4,178
Tensão Última (M Pa)	13,37	13,80	13,56	13,57	0,215
Deformação Última (%)	300,00	300,00	300,00	300,00	0,000

Tabela 5.1 - Valores de tensão e deformação significativos dos ensaios de tração dos corpos de prova de HDPE, material que não foi submetido a nenhum tipo de carregamento antes do ensaio de tração

Fig. 5.1 - Curva tensão/deformação para os corpos de prova de HDPE, material que não foi submetidos a nenhum tipo de carregamento antes dos ensaios de tração



submetido a nenhum tipo de carregamento foram muito similares. Na Figura 5.1 mostram-se as curvas tensão/deformação para os três corpos de provas do lote Nº.1, ET 1.1; ET 1.2; ET 1.3, e na Tabela 5.1 pode-se observar os valores de tensão e deformação significativos dos três ensaios com os valores médios de cada um deles.

mesmo tempo um estrangulamento não uniforme da zona de trabalho do corpo de prova até a ruptura deste. Isto é devido a uma nucleação de defeitos e micro-poros que funcionam como concentradores de tensões, diminuindo assim a tenacidade do material.

O comportamento dos corpos de prova do lote Nº.2 feitos com o material da camada polimérica externa, HDPE do cabo que tinha sido submetido a carregamentos cíclicos, foram muito similares. Na Figura 5.2 mostram-se as curvas tensão/deformação para os três corpos de provas do lote Nº.2, ET 2.1; ET 2.2; ET 2.3, e na Tabela 5.2 podem-se observar alguns dos valores de tensão e deformação significativos dos três ensaios com os valores médios de cada uns deles.

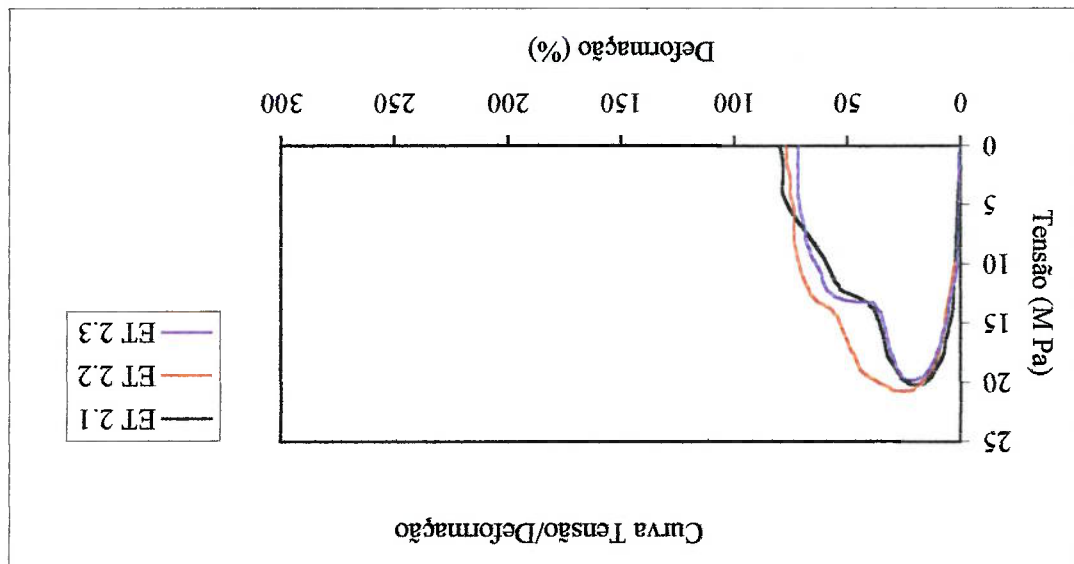


Fig. 5.2- Curva tensão/deformação para os corpos de prova de HDPE, material submetido a carregamentos cíclicos antes dos ensaios de tração

Tabela 5.2- Valores de tensão e deformação significativos dos ensaios de tração dos corpos de prova de HDPE, material que não foi submetido a nenhum tipo de carregamento antes do ensaio de tração.

Propriedades Mecânicas	ET 2.1	ET 2.2	ET 2.3	Média	Desv. Padrão
Tensão de Escoamento (M Pa)	20,22	20,78	19,82	20,27	0,482
Deformação de Escoamento (%)	20,00	25,80	21,70	22,50	2,981
Tensão Última (M Pa)	11,91	12,31	12,06	12,10	0,202
Deformação Última (%)	53,70	66,70	59,20	59,90	6,525

Na Figura 5.3 pode-se observar uma superposição das curvas tensão/deformação dos lotes de corpos de provas feitos de HDPE ensaiados a tração, podendo-se observar a brusca diminuição da tenacidade do material depois de sofrer os carregamentos cíclicos.

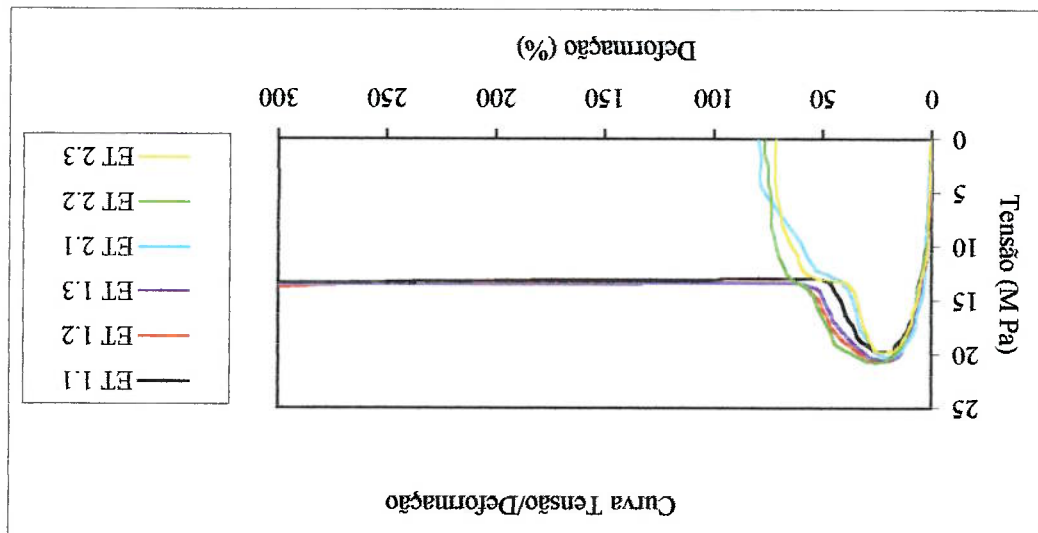


Fig. 5.3- Curva tensão/deformação para os corpos de prova de HDPE ensaiados a tração

Na Tabela 5.3 pode-se observar a magnitude da variação entre os valores médios das tensões e deformações significativas dos ensaios de tração feitos das amostras de materiais da camada externa da seção do cabo umbilical que não sofreu nenhum tipo de carregamento antecipadamente (Lote Nº.1) e da seção do cabo que foi submetida a carregamentos cíclicos anteriormente (Lote Nº.2).

Tabela 5.3- Magnitude da variação entre os valores médios das tensões e deformações significativas obtidas nos ensaios de tração da camada externa do cabo

Propriedades Mecânicas	Lote Nº. 1	Lote Nº. 2	Variação (%)
Tensão de Escoamento (M Pa)	20,32	20,27	0,25
Deformação de Escoamento (%)	22,20	22,50	1,35
Tensão de Reorientação (M Pa)	13,34	12,10	10,25
Deformação de Reorientação(%)	57,70	59,90	3,81
Tensão Última (M Pa)	13,57	12,10	12,15
Deformação Última (%)	300,00	59,90	400,83



### 5.1.2- Análise e discussão dos resultados do ensaio de tração nas amostras de material da camada interna (LDPE) do cabo umbilical

Na camada interna do cabo umbilical feita de LDPE os carregamentos cíclicos a que foi submetida a seção do cabo não tiveram uma influência perceptível nas suas propriedades mecânicas. Observou-se isto depois da análise e comparação das curvas de tensão/deformação obtidas nos ensaios de tração feitos nos corpos de prova do lote Nº 3, Figura 5.4, confeccionados a partir da amostra retirada do cabo que não havia sido submetido a nenhum tipo de carregamento prévio e do lote Nº 4, Figura 5.5, feitos a partir da amostra de material da seção do cabo que sofrera carregamentos cíclicos antes do ensaio de tração.

Os lotes Nº 3 e 4, tiveram comportamentos mecânicos muito similares durante os ensaios de tração. Isto se deve ao fato de que a camada de LDPE com menor diâmetro que a camada de HDPE encontra-se mais próxima do eixo central (linha neutra) do cabo, por isto as tensões normais e de cisalhamento originada pelas solicitações externas (flexão, torção e tração) durante o ensaio de fadiga foram menores que as sofridas pela camada externa de HDPE. Dessa forma, percebe-se que na camada interna de LDPE os carregamentos cíclicos exerceram uma menor influência, e originaram poucas deformações plásticas residuais, o que não provocou uma fragilização marcante desta camada.

Nas curvas tensão/deformação observou-se, depois de o material atingir a tensão de escoamento, uma reorientação das cadeias poliméricas (plato das curvas) com um comportamento quase constante das tensões até o término do ensaio.

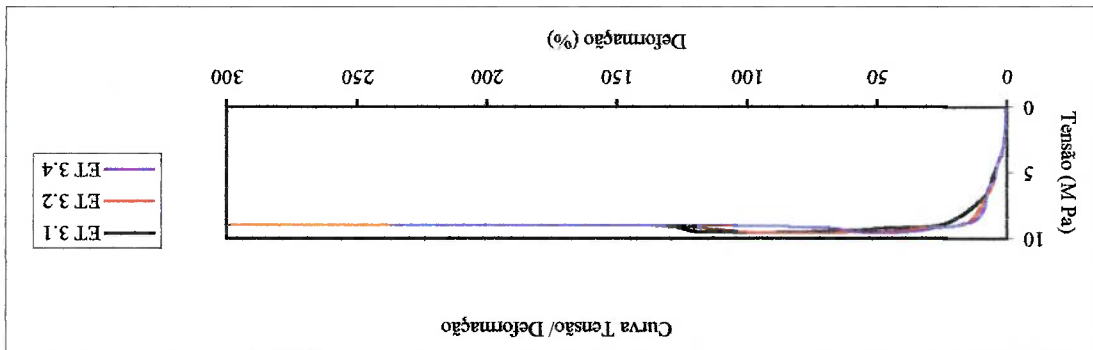


Fig. 5.4- Curva tensão/deformação para os corpos de prova de LDPE, material que não foi submetido a nenhum tipo de carregamento antes dos ensaios de tração

Nas Tabelas 5.4 e 5.5 mostram-se valores significativos de tensões e deformações obtidos dos ensaios de tração aos lotes de prova Nº. 3 e 4.

Tabela 5.4- Valores de tensão e deformação significativos dos ensaios de tração dos corpos de prova de LDPE, material que não foi submetido a nenhum tipo

de carregamento prévio

Propriedades Mecânicas	ET 3.1	ET 3.2	ET 3.3	Média	Desv. Padrão
Tensão de Escocamento (M Pa)	9,53	9,50	9,72	9,58	0,119
Deformação de Escocamento (%)	100,00	100,00	81,70	93,90	10,565
Tensão Última (M Pa)	8,99	9,05	9,50	9,18	0,278
Deformação Última (%)	300,00	300,00	300,00	300,00	0,000

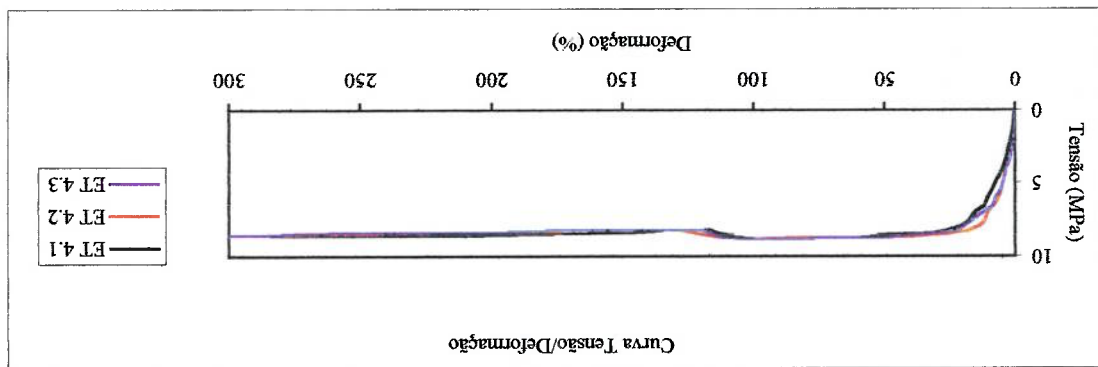


Fig. 5.5- Curva tensão/deformação para os corpos de prova de LDPE, material que foi submetido a carregamentos cíclicos antes dos ensaios de tração

Tabela 5.5- Valores de tensão e deformação significativos dos ensaios de tração nos corpos de prova de LDPE, material que foi submetido a carregamentos cíclicos prévios

Propriedades Mecânicas	ET 4.1	ET 4.2	ET 4.3	Média	Desv. Padrão
Tensão de Escocamento (M Pa)	8,81	9,36	9,38	9,18	0,323
Deformação de Escocamento (%)	78,30	80,00	81,70	80,00	1,700
Tensão Última (M Pa)	8,61	8,88	9,17	8,89	0,280
Deformação de Última (%)	300,00	300,00	300,00	300,00	0,000

Na Figura 5.6 pode-se observar uma superposição das curvas tensão/deformação dos lotes de corpos de prova de LDPE ensaiados a tração,

Depois de analisados os resultados da modelagem do ensaio de tração dos corpos de prova, simulando os polímeros HDPE e LDPE, pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), com os códigos computacionais LUSAS e ALGOR, observou-se que na simulação do ensaio os valores de tensão e deformação obtidos com ambos os “softwares” foram satisfatórios até o escoamento do material, já que

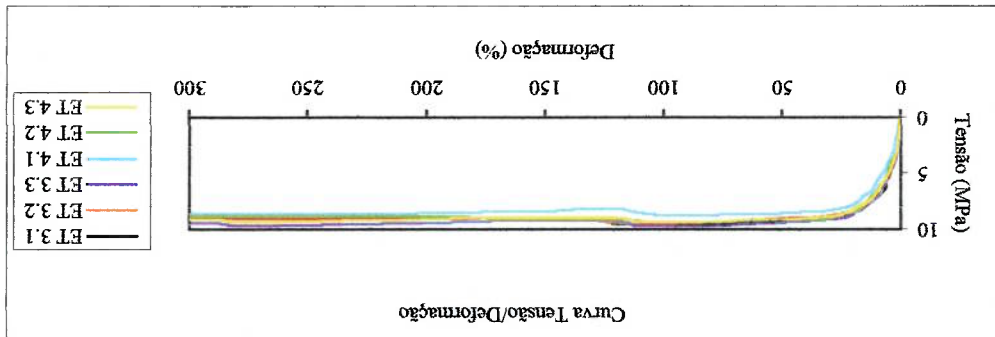
## 5.2- Análise e Discussão dos Resultados Numéricos

Propriedades Mecânicas	Lote Nº. 3	Lote Nº. 4	Variação (%)
Tensão de Escoamento (M Pa)	9,58	9,18	4,36
Deformação de Escoamento (%)	93,90	80,00	17,37
Tensão Última (M Pa)	9,18	8,89	3,26
Deformação Última (%)	300,00	300,00	0,00

Tabela 5.6- Magnitude da variação entre os valores médios das tensões e deformações significativas obtidas nos ensaios de tração da camada interna do cabo

Na Tabela 5.6 pode-se observar a magnitude da variação entre os valores médios das tensões e deformações significativas dos ensaios de tração feitos das amostras de materiais da camada interna da seção do cabo umbilical que não sofreu nenhum tipo de carregamento antecipadamente (Lote Nº.3) e da seção do cabo que foi submetida a carregamentos cíclicos anteriormente (Lote Nº.4).

Fig. 5.6- Curva tensão/deformação para os corpos de prova feitos de LDPE ensaiados a tração



podendo-se observar a pouca influência dos carregamentos cíclicos nas propriedades mecânicas do material durante o ensaio de fadiga.

apresentaram boa concordância com os números relativos às propriedades mecânicas dados pelo fabricante dos cabos e pela bibliografia consultada.

Posteriormente, com o programa LUSAS, para ambos os materiais, HDPE e LDPE, obtiveram-se bons resultados ao longo de toda a curva tensão/deformação resultante da simulação, alcançando-se uma deformação de mais de 300%. Já com o "software" ALGOR os materiais depois de atingirem o escoamento e no momento em que a deformação alcançou 69,20% para o HDPE e 72,80% para o LDPE, praticamente todos os elementos da área de trabalho (pescoço) atingiram um estado tal que os valores de tensão e deformação se mantiveram constantes, impossibilitando a realização dos cálculos de esforços e deslocamentos subsequentes pelos "softwares". Além disso, os valores de tensões de últimas obtidas para as modelagens de ambos os materiais foram maiores que os que se deveriam obter como resultado da simulação computacional.

Os resultados de tensões e deformações de von Mises mais significativos obtidas na modelagem do HDPE e LDPE com os códigos computacionais LUSAS e ALGOR, assim como a variação dos resultados das modelagens com os dados fornecidos pelo fabricante do cabo e da bibliografia consultada, mostraram-se nas Tabelas 5.7 e 5.8.

Tabela 5.7- Valores de tensões e deformações de von Mises mais significativos obtidos da modelagem com os programas LUSAS e ALGOR e comparados com os dados fornecido pelo fabricante do cabo para o HDPE

Propriedade	Fabricante	LUSAS	Variação(%)	ALGOR	Variação(%)
Tensão de Escoamento (M Pa)	21,00	21,00	-	21,00	-
Deformação de Escoamento(%)	3,13	8,27	164,21	7,45	138,02
Tensão de Última (M Pa)	32,00	28,26	11,68	75,90	137,18
Deformação Última (%)	300,00	300,00	-	(*)	-

(\*) No programa ALGOR não se conseguiu atingir a deformação de 300% os cálculos foram interrompidos com a deformação de 69,20%.

Tabela 5.8- Valores de tensões e deformações de von Mises mais significativos obtidos da modelagem com os programas LUSAS e ALGOR e comparados com os dados obtidos da bibliografia consultada para o LDPF

Propriedade	Fabricante	LUSAS	Variação(%)	ALGOR	Variação(%)
Tensão de Escocamento (M Pa)	11,70	11,70	-	11,70	-
Deformação a Escocamento (%)	5,14	7,42	44,35	12,50	143,19
Tensão de Última (M Pa)	18,14	15,89	12,40	41,70	129,88
Deformação Última (%)	300,00	300,00	-	(*)	-

(\*) No programa ALGOR não se conseguiu atingir a deformação de 300 % os cálculos foram interrompidos com a deformação de 72,80 %.

## CAPÍTULO VI CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 6.1- Conclusões

No presente trabalho o objetivo principal foi estudar a influência dos carregamentos cíclicos nas camadas poliméricas, externa (HDPE) e interna (LDPE), dos cabos submarinos eletro-ópticos empregados em operações de exploração e prospecção petrolíferas. Com este fim, primeiramente o cabo foi submetido a carregamentos cíclicos e posteriormente foram confeccionados corpos de prova, padronizados, para ensaios de tração com materiais poliméricos da seção do cabo que havia sido submetido a carregamentos cíclicos e de outra seção do cabo que não tinha sofrido nenhum carregamento. Por último os corpos de prova de ambas as camadas foram modelados matematicamente, usando o Método dos Elementos Finitos para simular os ensaios de tração.

Depois de finalizado o estudo levantaram-se as seguintes conclusões:

- a) Os carregamentos cíclicos a que foi submetido o cabo submarino tiveram uma marcada influência nas propriedades mecânicas da camada externa do cabo, HDPE, provocando uma grande diminuição de sua tenacidade. Observou-se isto quando o material começou a escoar. Nos corpos de prova feitos com a amostra de polímero que não fora submetido a carregamentos cíclicos anteriores ao ensaio de tração, percebeu-se um alongamento de mais de 300 % sem atingir a ruptura. Já os corpos de prova elaborados com o HDPE submetido a carregamentos cíclicos antes de ser ensaiado a tração, no instante posterior ao escoamento, notou-se um decréscimo brusco na tensão a ruptura dos corpos de prova, sendo o alongamento médio no momento da ruptura 59,9 %;

- b) Na camada interna de LDPE a influência dos carregamentos cíclicos foi imperceptível. Isto pode ser comprovado ao se analisarem as curvas tensão/deformação para os corpos de prova feito com a amostra de material que sofreu carregamentos cíclicos e os que não sofreram nenhum tipo de carregamento, observando que ambas as curvas são similares;

c) Na modelagem dos corpos de prova pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) empregando o código computacional LUSAS obtiveram-se bons resultados tanto para o HDPE como para o LDPE, demonstrando o bom desempenho deste “software” para a simulação de modelos que envolvem não linearidade e grandes deformações como no caso dos materiais poliméricos;

d) No caso da modelagem dos corpos de prova pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) empregando o código computacional ALGOR os resultados obtidos não foram satisfatórios, demonstrando a pouca adequabilidade deste “software” para a simulação de modelos que envolvem não linearidade e grandes deformações, maiores que 69,20 %.

## 6.2- Recomendações

Neste estudo comprovou-se a influência dos carregamentos cíclicos sob o comportamento mecânico das camadas poliméricas dos cabos submarinos. Para próximos trabalhos recomenda-se:

a) Submeter os cabos a quantidades maiores e diferentes de carregamentos cíclicos para verificar a influência destes no comportamento mecânico das camadas poliméricas do cabo, de acordo com o número de carregamentos cíclicos aplicados;

b) Colocar extensômetros na camada externa do cabo para registrar o comportamento das tensões e deformações durante o ensaio de fadiga;

c) Para os testes de tração usar uma máquina de ensaios com uma célula de carga de capacidade não maior do que 1000 kgf, com o objetivo de melhorar a precisão na medição das cargas. Além disso, o curso da mordaga móvel da máquina não deve ser menor de 300 mm, para que todos os corpos de prova possam atingir a ruptura;

d) Fazer ensaios de tração com diferentes taxas de deformação para ver como influencia esta variável no comportamento do material;

e) Fazer ensaios de tração com diferentes temperaturas para ver como influencia esta variável no comportamento do material;

- f) Ensaiar corpos de prova feitos no sentido transversal da linha de extrusão das camadas poliméricas do cabo com o fim de estudar a ortotropia do material;
- g) Para a modelagem de materiais poliméricos com o código computacional ALGOR testar com outros tipos de elementos e outros tipos de modelo de materiais que tenham em conta fatores como temperatura e taxa de deformação;
- h) Para ambos os “softwares” empregados implementar a simulação de um ensaio a tração de um material polimérico, após de ter sido submetidos a carregamentos cíclicos.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

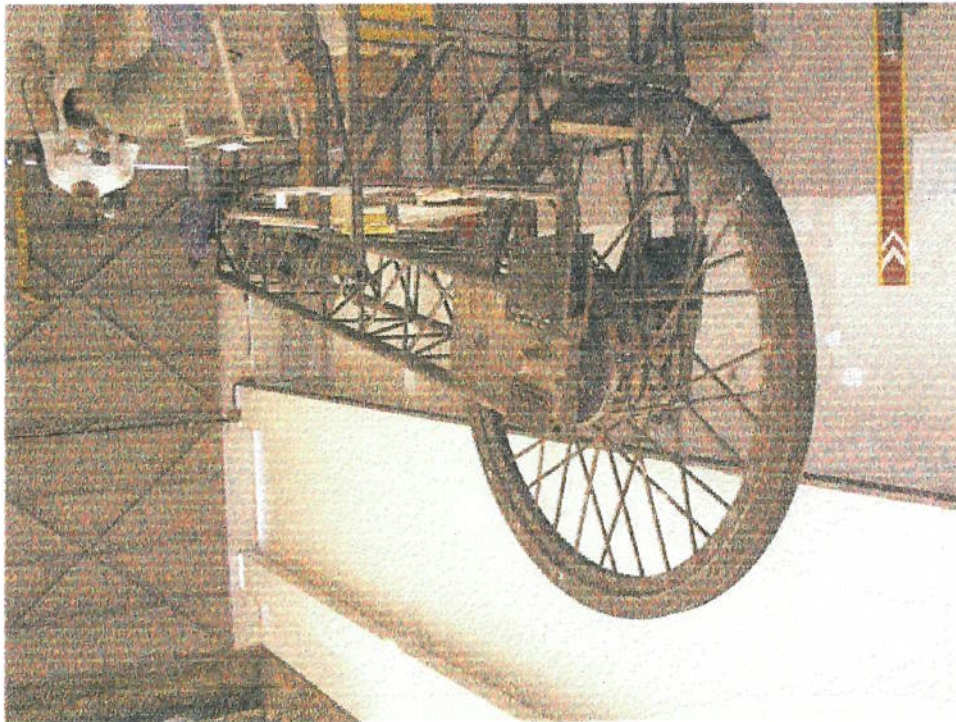
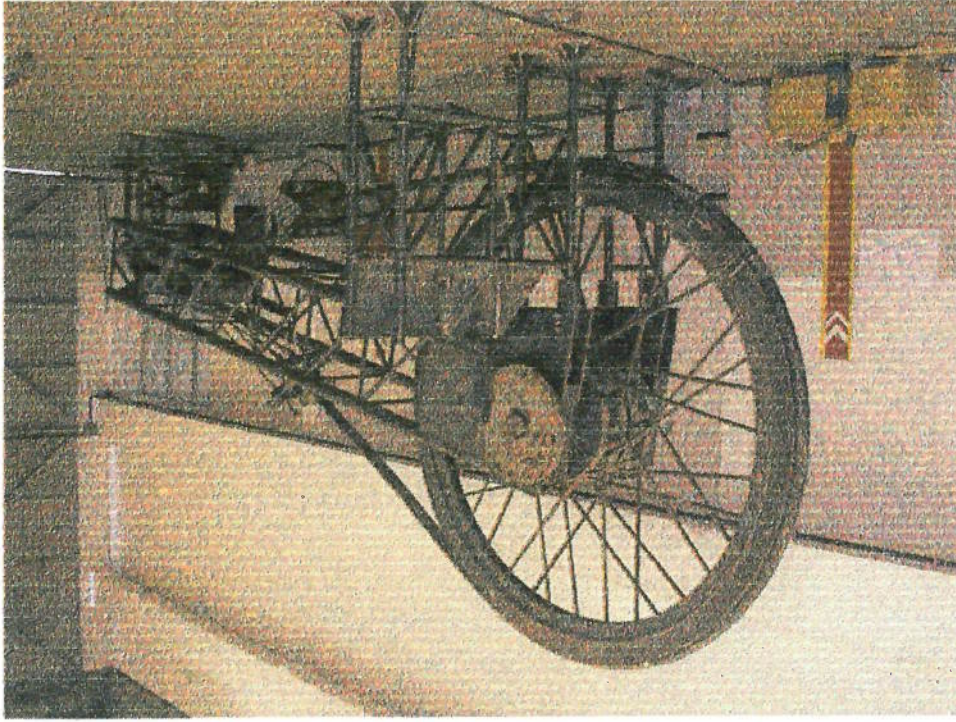
- AGUIAR, J. B. Durability of polymeric pipes in contact with domestic products. *Construction and Building Materials*, vol. 13, p.155-157, 1999. Disponível em: <http://www.probe.br/sciencedirect.htm> Acesso em 7 mar. 2000.
- ALGOR. <http://www.algor.com>.
- ALVES, A. F. Elementos finitos a base da tecnologia CAE. São Paulo: Erica, 2000. 320p.
- ALVES, T. M. J.; COSTA, L. C. S. Resistência Residual de Linhas Flexíveis com Defeitos Naturais. *Bol. Téc. PETROBRAS*, vol. 44, n. 1/4, p. 60-74, Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/portal/tecnologia.htm> Acesso em 10 maio 2002.
- BATHE, K. J. *Finite Element Procedures*. New Jersey: Prentice Hall, 1996. 1037p.
- BIASOTTO, E. *Introdução a polímeros*. São Paulo: Edgard Blucher, 1985. 111p.
- BIASOTTO, E. Polímeros como materiais de engenharia. São Paulo: Edgard Blucher, 1991. 197p.
- BLASS, A. *Processamento de polímeros*. Florianópolis: Ed. UFSC, 1988. 313p.
- BROWN, R. P. *Handbook of plastic test methods*. 3rd. Ed. London: Logman Scientific & Technical, 1988. 442p.
- BUREAU, M. N.; DICKSON, J. I.; DENAULT, J. Comparison of Fatigue Propagation Behavior of polystyrene and 95/5 /polyethylene blends. *J. Of Mater. Sci., England*, v.33, n.6, p.1591-1606, 1998.
- BUREAU, M. N.; DICKSON, J. I.; DENAULT, J. Fatigue Propagation Behavior of Polystyrene/polyethylene blends. *J. Of Mater. Sci., England*, v.33, n.6, p.1405-1419, 1998.
- CALLISTER, W. D. *Materials science and engineering: An introduction*. New York: John Wiley & Sons, 1997. 852p.
- CARTAYA, S. O. *Introducción al Laboratorio de Física Fundamentos a la Teoría de Errores*. La Habana: Ed. Pueblo y Educación, 1986. 137 p.
- CASTEIN, G.; COULON, G.; GSELL, C. Polymers under mechanical stress: Deformation of the nanostructure of isotactic polypropylene revealed by scanning force microscopy. *Polym. Eng. Sci., USA*, v.37, n.10, p.1694-1701, 1997.

- FUCHS, H. O.; STEPHENS, R. I. Metal fatigue in engineering. New York: John Wiley & Sons, 1980.
- FUKU, T. et al. Fatigue properties and analysis of flexible risers. Offshore Technology Conference, 24<sup>th</sup>, Houston, Texas, May 4-7, 1992, p. 35-44.
- GRIFFITH, A. A. The phenomenal of rupture and flow in solids. Phil. Trans. Roy. Soc., v.221, p. 163, 1920.
- IRWIN, G. R. Appl. Mats. Res. 3, 65, 1964.
- ISHI, K. et al. Flexible riser technology for deep water. Applications. Offshore Technology Conference, 27<sup>th</sup>, Houston, Texas, May 1-4, 1995, p. 327-334.
- KINLOCH, A. J.; YOUNG, R. J. Fracture behavior of polymers. London: Chapman & Hall, 1983. 496p.
- KURTZ, S. et al. The yielding, plastic flow, and fracture behavior of ultra-high molecular weight polyethylene used in total joint replacements. Biomaterials. USA, v 19, p 1998-2003, 1998.
- LIU, K.; PIGGOTT, R. Fracture failure processes in polymers In: Mechanical tests and results. Polym. Eng. Sci., USA, v.38, n.1, p.60-68, 1998.
- LOGAN, D. L. A first course in the finite element method using ALGOR. Boston: PWS Publishing Company, 1997. 908p.
- LUSAS. Modeler user manual. United Kingdom: FEA Ltd., 2000.
- LUSAS. Theory manual. United Kingdom: FEA Ltd., 2000.
- MASCIA, L. Thermoplastic: Materials engineering. 2nd ed. London: Elsevier, 1989. 550p.
- MASSA, F.; PIQUES, R.; LAURENT, A. A rapid crack propagation in polyethylene pipe: combined effect of strain rate and temperature on fracture toughness. J. Of Mater. Sci., England, v.32, n.24, p.6583-6587, 1997.
- MEYER, R. W.; PRUITT, L. A. The effect of cyclic true strain on the morphology, structure, and relaxation behavior of ultra high molecular weight polyethylene. Polymers, v.42, p. 5293-5306, 2001. Disponível em: <http://www.probe.br/sciencedirect.htm> Acesso em 3 abr. 2002.
- MILLS, M. J. Dug dale yielding zones in cracked sheets of glassy polymers. Eng. Fract. Mec. E.U.A, v.6, n.6, p. 537-549, 1974.

- NIELSEN, L. Mechanical properties of polymers. New York: Van Nostrand Reinhold, 1962, 274p.
- NIELSEN, L.; LANDEL, R. F. Mechanical properties of polymers and composites. 2.ed. New York: M. Dekker, 1994, 557p.
- PEGORETTI, A.; MARCHI, A.; RICCO, T. Determination of the fracture toughness of thermofomed polypropylene cups by the essential work method. *Polym. Eng. Sci., USA*, v.37, n.6, p.1045-1052, 1997.
- PETROBRAS. Mini site Águas Profundas. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/porta/tecnologia.htm> Acesso em 7 maio 2002.
- QUINTELA, J.P.; ALVES, T. M. J. Corrosão atmosférica em linhas flexíveis causadas por danos na camada plástica externa. *Bol. Tec. PETROBRAS*, vol. 45, n. 1, p. 6-15, Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/porta/tecnologia.htm> Acesso em 10 maio 2002.
- RAYMOND, S. Polymers for engineering applications. Washington: ASM International, 1991, 198p.
- RASHED, H.; TASSOULA, L. Strength evaluation of composite risers. *Offshore Technology Conference*, 27<sup>th</sup>, Houston, Texas, May 1-4, 1995, p. 215-222.
- RIDDELL, M. N. A guide to better testing of plastic. *Plast. Eng.* Vol. 30, No. 4, p. 78, 1974.
- RICETTI, E. M.; BITTENCOURT, J. N. Introdução aos conceitos básicos da mecânica da fratura elasto-plástica. *Boletim Técnico da EPUSP*, 1998.
- SIH, G. C. Handbook of stress intensity factors for researchers and engineers. Bethlehem: Lehigh Univ., 1973.
- SOUZA, S. A. Ensaios mecânicos de materiais metálicos. 5ta. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1982, 286p.
- SUH, N. P.; TURNER, P. L. Elements of the behavior of solid. Washington, D. C.: McGraw-Hill, 1985. 615p.
- SPARK, C. P. et al. Composite riser tubes: Defect tolerance assessment and nondestructive testing. *Offshore Technology Conference*, 24<sup>th</sup>, Houston, Texas, May 4-7, 1992, p. 191-198.
- TORRES, F. Análise estrutural de linhas flexíveis pelo método de elementos finitos, Dissertação apresentada à Escola Politécnica, USP, São Paulo, 1996.

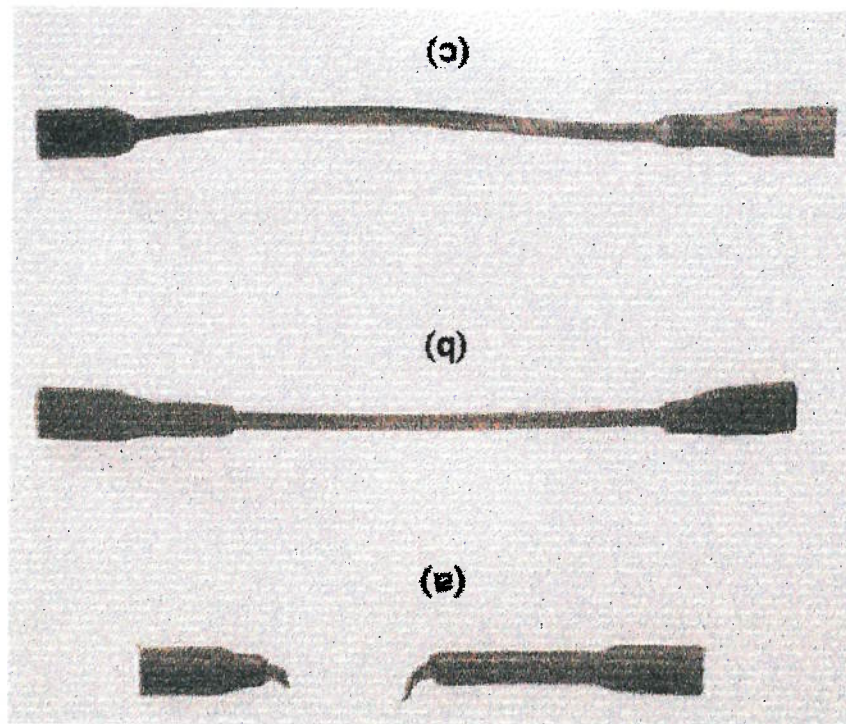
- TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J. N. Theory of elasticity. 3rd Ed. New York: McGraw-Hill, 1970. 567p.
- TOBOLSKY, A. V. Properties and structures of polymers. New York: John Wiley & Sons, 1960. 331p.
- WESTERGARD, H. M. J. Appl. Mech., A, June, 46, 1939
- WYATT, O. H.; HUGHES, D. D. Metals, ceramics and polymers: An introduction to the structure and properties of engineering materials. London: Cambridge University Press, 1974. 640p.
- ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. The finite element method. 3rd ed. London: McGraw-Hill, 1994. 648p.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Specification for sub sea production control umbilicals (17E). 2nd ed. API, 1998.
- AMERICAN STANDARDS FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) D 638-97. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.
- PIRELLI CABOS S.A. "Submarine Electrical and Optical Power Umbilical".

## **APÉNDICES**



**APÊNDICE A- FOTOS DA BANCADA PARA ENSAIO DE FADIGA  
MECÂNICA NO CABO UMBILICAL**

## APÊNDICE B- FOTO DE ALGUNS DOS CORPOS DE PROVA ENSAIADOS A TRAÇÃO



- a) Corpo de prova elaborado com a amostra de material da camada externa, HDPE, que foi submetido a carregamentos cíclicos antes do ensaio de tração.
- b) Corpo de prova elaborado com a amostra de material da camada externa, HDPE, que não sofreu nenhum tipo carregamento antes do ensaio de tração.
- c) Corpo de prova elaborado com a amostra de material da camada interna, LDPE.

APÊNDICE C- RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO

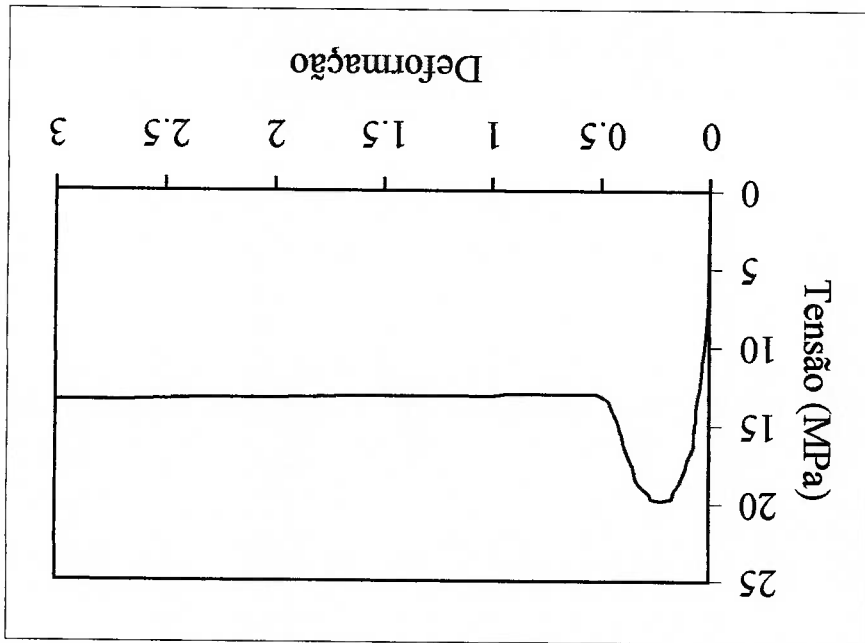


Fig. 3. 18- Curva tensa/deformação para o corpo de prova ET 1.1

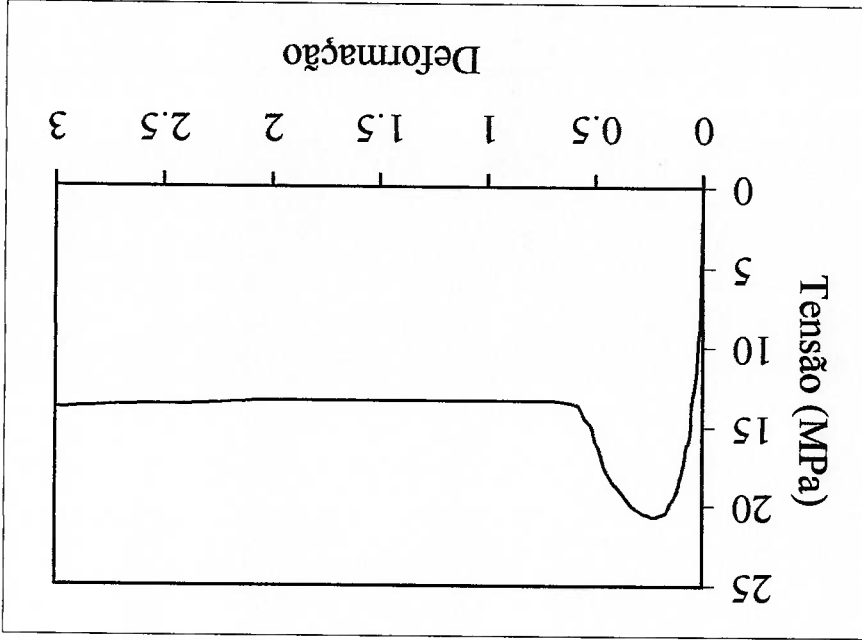


Fig. 3. 19- Curva tensão/deformação para o corpo de prova ET 1.2



Tabela 3.5- Resultados de tensão e deformação obtidas no ensaio do corpo de prova

ET 1.1

Desloc. (mm)	Força (N)	Deform.	Tensão (MPa)	Desloc. (mm)	Força (N)	Deform.	Tensão (MPa)
0,00	0,00	0,00	0,00	13,75	1420,00	0,28	19,38
0,03	100,00	0,00	1,36	16,67	1360,00	0,33	18,56
0,07	200,00	0,00	2,73	17,50	1300,00	0,35	17,74
0,10	300,00	0,00	4,09	18,33	1260,00	0,37	17,19
0,13	400,00	0,00	5,46	19,58	1200,00	0,39	16,38
0,17	500,00	0,00	6,82	20,00	1160,00	0,40	15,83
0,42	600,00	0,01	8,19	20,83	1100,00	0,42	15,01
0,83	700,00	0,02	9,55	21,67	1060,00	0,43	14,47
1,67	800,00	0,03	10,92	22,92	1000,00	0,46	13,65
2,08	900,00	0,04	12,28	23,33	980,00	0,47	13,37
2,92	1000,00	0,06	13,65	25,00	960,00	0,50	13,10
3,17	1060,00	0,06	14,47	26,67	950,00	0,53	12,96
3,33	1100,00	0,07	15,01	30,00	950,00	0,60	12,96
3,50	1160,00	0,07	15,83	33,33	950,00	0,67	12,96
3,75	1200,00	0,08	16,38	46,67	950,00	0,93	12,96
5,00	1260,00	0,10	17,19	50,00	960,00	1,00	13,10
5,42	1300,00	0,11	17,74	66,67	960,00	1,33	13,10
6,67	1360,00	0,13	18,56	83,33	960,00	1,67	13,10
7,92	1400,00	0,16	19,11	100,00	970,00	2,00	13,24
8,33	1420,00	0,17	19,38	116,67	970,00	2,33	13,24
8,75	1440,00	0,18	19,65	133,33	980,00	2,67	13,37
11,25	1450,00	0,23	19,79	150,00	980,00	3,00	13,37
13,33	1440,00	0,27	19,65				

Tabela 3.6- Resultados de tensão e deformação obtidas no ensaio do corpo de prova

ET 1.2

Desloc. (mm)	Força (N)	Deform.	Tensão (MPa)	Desloc. (mm)	Força (N)	Deform.	Tensão (MPa)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1510,00	0,27	20,52
0,07	100,00	0,00	1,36	14,17	1500,00	0,28	20,39
0,13	200,00	0,00	2,72	16,67	1460,00	0,33	19,84
0,20	300,00	0,00	4,08	19,17	1400,00	0,38	19,03
0,27	400,00	0,01	5,44	20,83	1360,00	0,42	18,48
0,35	500,00	0,01	6,80	22,50	1300,00	0,45	17,67
0,42	600,00	0,01	8,16	23,33	1260,00	0,47	17,13
0,83	700,00	0,02	9,51	24,17	1200,00	0,48	16,31
1,25	800,00	0,03	10,87	25,00	1160,00	0,50	15,77
1,67	900,00	0,03	12,23	25,83	1100,00	0,52	14,95
2,25	960,00	0,05	13,05	27,50	1060,00	0,55	14,41
2,50	1000,00	0,05	13,59	28,33	1020,00	0,57	13,86
2,67	1060,00	0,05	14,41	29,17	1000,00	0,58	13,59
2,75	1100,00	0,06	14,95	32,50	985,00	0,65	13,39
2,92	1160,00	0,06	15,77	35,83	980,00	0,72	13,32
3,75	1200,00	0,08	16,31	49,17	980,00	0,98	13,32
4,17	1260,00	0,08	17,13	65,83	980,00	1,32	13,32
4,58	1300,00	0,09	17,67	82,50	980,00	1,65	13,32
5,42	1360,00	0,11	18,48	99,17	980,00	1,98	13,32
5,83	1400,00	0,12	19,03	102,50	980,00	2,05	13,32
7,50	1460,00	0,15	19,84	115,83	995,00	2,32	13,52
8,33	1500,00	0,17	20,39	132,50	1000,00	2,65	13,59
9,17	1510,00	0,18	20,52	149,17	1015,00	2,98	13,80
11,25	1520,00	0,23	20,66	155,83	1020,00	3,12	13,86

Tabela 3.7- Resultados de tensão e deformação obtidas no ensaio do corpo de prova ET 1.3

Desloc. (mm)	Força (N)	Deform. (MPa)	Tensão (MPa)	Desloc. (mm)	Força (N)	Deform. (MPa)	Tensão (MPa)
0,00	0,00	0,00	0,00	14,17	1440,00	0,28	20,24
0,12	100,00	0,00	1,41	15,83	1400,00	0,32	19,68
0,25	200,00	0,01	2,81	17,50	1360,00	0,35	19,11
0,37	300,00	0,01	4,22	19,58	1300,00	0,39	18,27
0,48	400,00	0,01	5,62	20,83	1260,00	0,42	17,71
0,60	500,00	0,01	7,03	22,50	1200,00	0,45	16,86
0,72	600,00	0,01	8,43	22,92	1160,00	0,46	16,30
0,83	700,00	0,02	9,84	24,17	1100,00	0,48	15,46
1,00	800,00	0,02	11,24	24,58	1060,00	0,49	14,90
1,67	900,00	0,03	12,65	25,83	1000,00	0,52	14,05
2,08	1000,00	0,04	14,05	27,50	980,00	0,55	13,77
2,50	1060,00	0,05	14,90	29,17	960,00	0,58	13,49
2,92	1100,00	0,06	15,46	30,83	957,50	0,62	13,46
3,33	1160,00	0,07	16,30	34,17	955,00	0,68	13,42
3,75	1200,00	0,08	16,86	50,83	955,00	1,02	13,42
4,17	1260,00	0,08	17,71	64,17	955,00	1,28	13,42
4,58	1300,00	0,09	18,27	67,50	960,00	1,35	13,49
5,83	1360,00	0,12	19,11	84,17	965,00	1,68	13,56
6,67	1400,00	0,13	19,68	100,83	965,00	2,02	13,56
7,50	1440,00	0,15	20,24	117,50	965,00	2,35	13,56
8,33	1450,00	0,17	20,38	134,17	965,00	2,68	13,56
10,83	1460,00	0,22	20,52	150,83	965,00	3,02	13,56
12,50	1450,00	0,25	20,38				

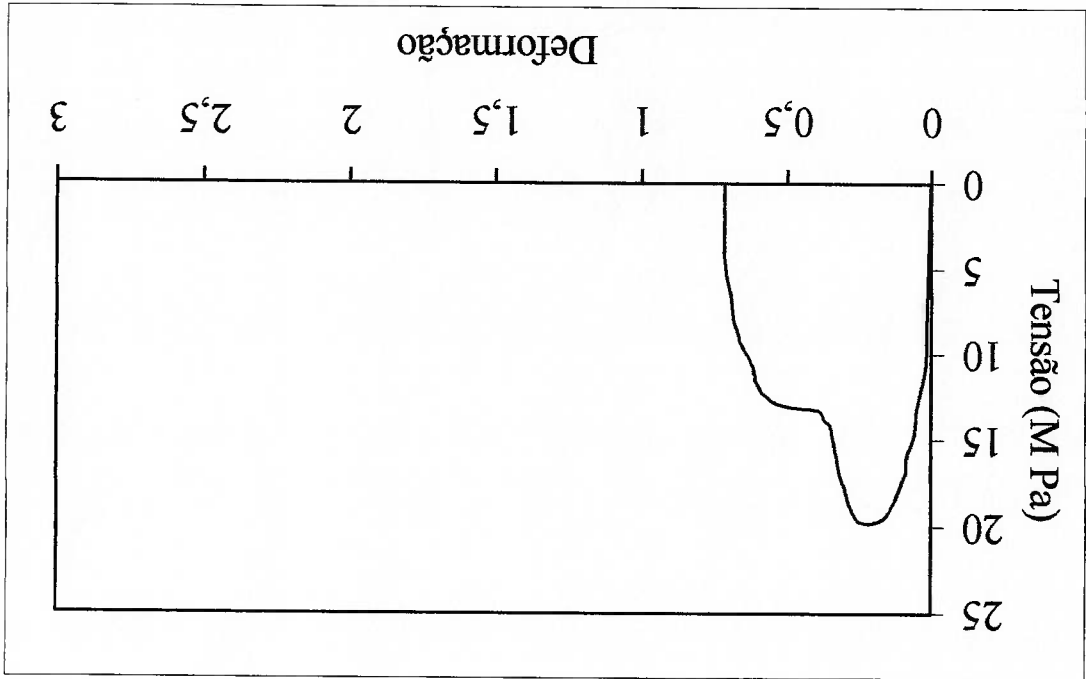


Fig. 3.21 - Curva tensão/deformação para o corpo de prova ET 2.3

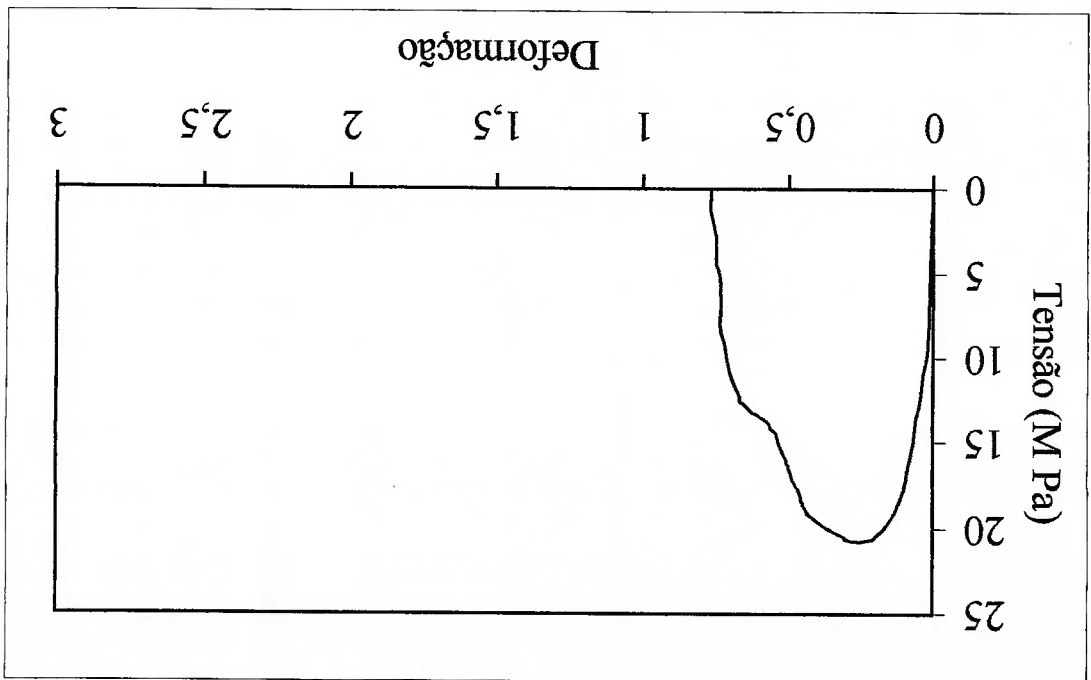


Fig. 3.20 - Curva tensão/deformação para o corpo de prova ET 2.2

Tabela 3.8- Resultados de tensão e deformação obtidas no ensaio do corpo de prova ET 2.2

Desloc. (mm)	Força (N)	Deform. Deform.	Tensão (MPa)	Desloc. (mm)	Força (N)	Deform. Deform.	Tensão (MPa)
0,00	0,00		0,00	21,67	1400,00	0,43	19,14
0,12	100,00		0,00	1,37	1360,00	0,45	18,60
0,23	200,00		0,00	2,73	1300,00	0,47	17,78
0,35	300,00		0,01	4,10	1260,00	0,48	17,23
0,47	400,00		0,01	5,47	1200,00	0,50	16,41
0,58	500,00		0,01	6,84	1100,00	0,53	15,04
0,72	600,00		0,01	8,20	1060,00	0,54	14,49
0,83	700,00		0,02	9,57	1040,00	0,56	14,22
1,67	800,00		0,03	10,94	1020,00	0,57	13,95
2,08	900,00		0,04	12,31	1000,00	0,58	13,67
2,92	1000,00		0,06	13,67	980,00	0,61	13,40
3,33	1100,00		0,07	15,04	960,00	0,63	13,13
4,17	1200,00		0,08	16,41	940,00	0,65	12,85
4,58	1260,00		0,09	17,23	920,00	0,67	12,58
5,00	1300,00		0,10	17,78	900,00	0,67	12,31
5,83	1360,00		0,12	18,60	800,00	0,70	10,94
6,67	1400,00		0,13	19,14	700,00	0,72	9,57
8,33	1460,00		0,17	19,96	600,00	0,73	8,20
10,00	1500,00		0,20	20,51	500,00	0,73	6,84
10,42	1510,00		0,21	20,65	400,00	0,73	5,47
12,92	1520,00		0,26	20,78	300,00	0,75	4,10
15,00	1510,00		0,30	20,65	200,00	0,75	2,73
15,42	1500,00		0,31	20,51	100,00	0,77	1,37
18,33	1460,00		0,37	19,96	0,00	0,77	0,00

Tabela 3.9- Resultados de tensão e deformação obtidas no ensaio do corpo de prova ET 2.3

Desloc. (mm)	Força (N)	Deform.	Tensão (MPa)	Desloc. (mm)	Força (N)	Deform.	Tensão (MPa)
0,00	0,00	0,00	0,00	15,42	1300,00	0,31	17,41
0,12	100,00	0,00	1,34	15,83	1260,00	0,32	16,88
0,22	200,00	0,00	2,68	16,25	1200,00	0,33	16,07
0,33	300,00	0,01	4,02	17,08	1100,00	0,34	14,73
0,42	400,00	0,01	5,36	17,50	1060,00	0,35	14,20
0,53	500,00	0,01	6,70	18,33	1040,00	0,37	13,93
0,63	600,00	0,01	8,04	19,17	1000,00	0,38	13,40
0,73	700,00	0,01	9,38	20,83	990,00	0,42	13,26
0,83	800,00	0,02	10,72	24,17	980,00	0,48	13,13
1,67	900,00	0,03	12,06	27,08	960,00	0,54	12,86
2,50	1000,00	0,05	13,40	28,33	940,00	0,57	12,59
2,92	1100,00	0,06	14,73	29,17	920,00	0,58	12,32
4,17	1200,00	0,08	16,07	29,58	900,00	0,59	12,06
4,33	1260,00	0,09	16,88	30,00	880,00	0,60	11,79
5,00	1300,00	0,10	17,41	30,42	860,00	0,61	11,52
5,83	1360,00	0,12	18,22	30,83	800,00	0,62	10,72
6,67	1400,00	0,13	18,75	32,92	700,00	0,66	9,38
7,50	1440,00	0,15	19,29	33,33	660,00	0,67	8,84
8,33	1460,00	0,17	19,56	34,17	600,00	0,68	8,04
9,17	1470,00	0,18	19,69	34,58	500,00	0,69	6,70
10,83	1480,00	0,22	19,82	35,42	400,00	0,71	5,36
12,50	1470,00	0,25	19,69	35,83	300,00	0,72	4,02
12,92	1460,00	0,26	19,56	35,83	200,00	0,72	2,68
13,33	1440,00	0,27	19,29	35,83	100,00	0,72	1,34
14,17	1400,00	0,28	18,75	35,83	0,00	0,72	0,00
14,58	1360,00	0,29	18,22				

Tabela 3.10- Resultados de tensão e deformação obtidas no ensaio do corpo de prova  
ET 2.1

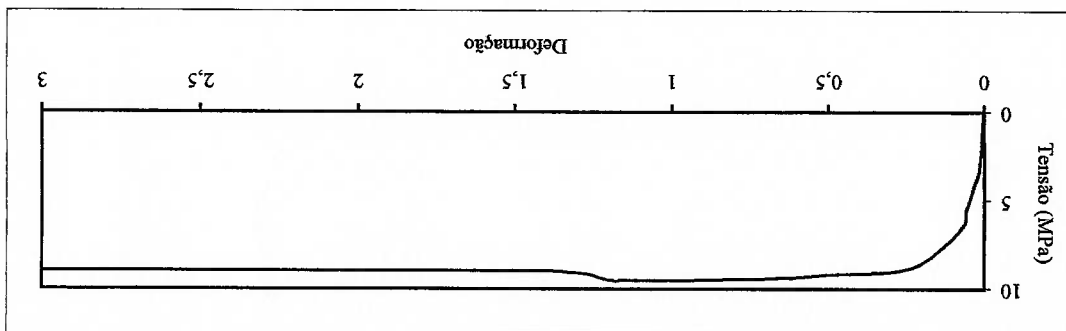
Desloc. (mm)	Força (N)	Deform. (MPa)	Tensão (MPa)	Desloc. (mm)	Força (N)	Deform. (MPa)	Tensão (MPa)
0,00	0,00	0,00	0,00	13,17	1420,00	0,26	19,67
0,17	100,00	0,00	1,39	13,33	1400,00	0,27	19,39
0,33	200,00	0,01	2,77	15,83	1300,00	0,32	18,01
0,50	300,00	0,01	4,16	16,50	1260,00	0,33	17,45
0,67	400,00	0,01	5,54	17,08	1160,00	0,34	16,07
0,83	500,00	0,02	6,93	17,92	1100,00	0,36	15,24
1,00	600,00	0,02	8,31	18,33	1060,00	0,37	14,68
1,17	700,00	0,02	9,70	19,17	1000,00	0,38	13,85
1,33	800,00	0,03	11,08	20,00	980,00	0,40	13,58
1,50	900,00	0,03	12,47	20,42	960,00	0,41	13,30
1,67	1000,00	0,03	13,85	21,67	940,00	0,43	13,02
2,08	1060,00	0,04	14,68	23,33	920,00	0,47	12,74
2,50	1100,00	0,05	15,24	25,00	900,00	0,50	12,47
2,92	1160,00	0,06	16,07	26,67	880,00	0,53	12,19
3,33	1200,00	0,07	16,62	26,83	860,00	0,54	11,91
3,58	1260,00	0,07	17,45	27,50	840,00	0,55	11,64
4,17	1300,00	0,08	18,01	28,33	800,00	0,57	11,08
5,42	1360,00	0,11	18,84	30,00	700,00	0,60	9,70
6,25	1400,00	0,13	19,39	32,50	600,00	0,65	8,31
6,67	1420,00	0,13	19,67	35,00	500,00	0,70	6,93
7,92	1440,00	0,16	19,95	37,50	400,00	0,75	5,54
8,33	1450,00	0,17	20,09	39,17	300,00	0,78	4,16
10,00	1460,00	0,20	20,22	39,17	200,00	0,78	2,77
11,67	1450,00	0,23	20,09	39,17	100,00	0,78	1,39
12,08	1440,00	0,24	19,95	40,00	0,00	0,80	0,00

Desloc. (mm)	Força (N)	Deform.	Tensão (MPa)	Desloc. (mm)	Força (N)	Deform.	Tensão (MPa)
0,00	0,00	0,00	0,00	50,00	445,00	1,00	9,53
0,42	100,00	0,01	2,14	56,67	445,00	1,13	9,53
0,83	160,00	0,02	3,43	60,00	445,00	1,20	9,53
1,67	200,00	0,03	4,28	63,33	430,00	1,27	9,21
2,92	260,00	0,06	5,57	66,67	425,00	1,33	9,10
3,33	300,00	0,07	6,42	70,00	420,00	1,40	8,99
6,67	360,00	0,13	7,71	76,67	420,00	1,53	8,99
10,00	400,00	0,20	8,56	83,33	420,00	1,67	8,99
13,33	420,00	0,27	8,99	101,25	420,00	2,03	8,99
16,67	425,00	0,33	9,10	134,17	420,00	2,68	8,99
23,33	430,00	0,47	9,21	150,00	420,00	3,00	8,99
33,33	440,00	0,67	9,42				

ET 3.1

Tabela 3.11 - Resultados de tensão e deformação obtidas no ensaio do corpo de prova

Fig.3.22 - Curva tensão/deformação para o corpo de prova ET 3.1



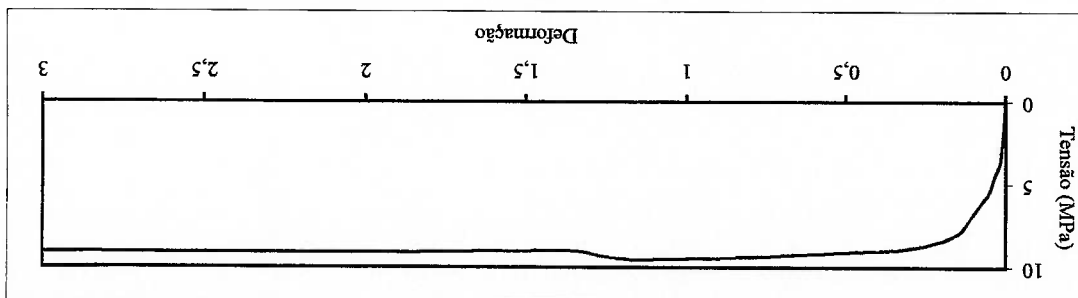


Desloc. (mm)	Força (N)	Deform. (mm)	Tensão (MPa)	Desloc. (mm)	Força (N)	Deform. (mm)	Tensão (MPa)
0,00	0,00	0,00	0,00	33,33	410,00	0,67	9,27
0,42	100,00	0,01	2,26	40,00	415,00	0,80	9,39
0,83	160,00	0,02	3,62	50,00	420,00	1,00	9,50
1,67	200,00	0,03	4,52	60,00	420,00	1,20	9,50
2,50	240,00	0,05	5,43	66,67	400,00	1,33	9,05
3,33	260,00	0,07	5,88	70,00	397,50	1,40	8,99
5,00	300,00	0,10	6,79	83,33	400,00	1,67	9,05
6,67	340,00	0,13	7,69	100,00	402,50	2,00	9,10
8,33	360,00	0,17	8,14	116,67	402,50	2,33	9,10
11,67	380,00	0,23	8,60	136,67	402,50	2,73	9,10
16,67	395,00	0,33	8,94	143,33	400,00	2,87	9,05
23,33	400,00	0,47	9,05	150,00	400,00	3,00	9,05

ET 3.2

Tabela 3.12- Resultados de tensão e deformação obtidas no ensaio do corpo de prova

Fig. 3.23- Curva tensa/deformação para o corpo de prova ET 3.2



ET 3.3  
 Tabela 3.13- Resultados de tensão e deformação obtidas no ensaio do corpo de prova

Desloc. (mm)	Força (N)	Deform.	Tensão (MPa)	Desloc. (mm)	Força (N)	Deform.	Tensão (MPa)
0,00	0,00	0,00	0,00	34,17	435,00	0,68	9,61
0,42	100,00	0,01	2,21	40,83	440,00	0,82	9,72
0,83	160,00	0,02	3,53	50,83	440,00	1,02	9,72
1,67	200,00	0,03	4,42	55,83	440,00	1,12	9,72
2,50	240,00	0,05	5,30	57,50	430,00	1,15	9,50
3,75	280,00	0,08	6,18	60,83	420,00	1,22	9,28
4,17	300,00	0,08	6,63	67,50	420,00	1,35	9,28
5,83	340,00	0,12	7,51	84,17	420,00	1,68	9,28
9,17	380,00	0,18	8,39	100,83	430,00	2,02	9,50
10,83	400,00	0,22	8,83	117,50	435,00	2,35	9,61
14,17	415,00	0,28	9,17	134,17	440,00	2,68	9,72
17,50	420,00	0,35	9,28	140,83	440,00	2,82	9,72
20,83	425,00	0,42	9,39	144,17	430,00	2,88	9,50
24,17	427,50	0,48	9,44	150,83	430,00	3,02	9,50
27,50	430,00	0,55	9,50				

Desloc. (mm)	Força (N)	Deform. (MPa)	Tensão (MPa)	Desloc. (mm)	Força (N)	Deform. (MPa)	Tensão (MPa)
0,00	0,00	0,00	0,00	33,33	385,00	0,67	9,24
0,42	100,00	0,01	2,40	40,00	390,00	0,80	9,36
0,83	140,00	0,02	3,36	50,00	390,00	1,00	9,36
1,67	160,00	0,03	3,84	53,33	390,00	1,07	9,36
2,50	200,00	0,05	4,80	56,67	385,00	1,13	9,24
3,33	240,00	0,07	5,76	60,00	380,00	1,20	9,12
4,17	260,00	0,08	6,24	66,67	380,00	1,33	9,12
5,00	280,00	0,10	6,72	83,33	380,00	1,67	9,12
6,25	300,00	0,13	7,20	86,67	380,00	1,73	9,12
8,33	340,00	0,17	8,16	87,00	375,00	1,74	9,00
11,67	360,00	0,23	8,64	100,00	370,00	2,00	8,88
13,33	370,00	0,27	8,88	116,67	370,00	2,33	8,88
16,67	380,00	0,33	9,12	133,33	370,00	2,67	8,88
23,33	380,00	0,47	9,12	150,00	370,00	3,00	8,88

ET 4.2

Tabela 3.14- Resultados de tensão e deformação obtidas no ensaio do corpo de prova

Fig. 3.24- Curva tensão/deformação para o corpo de prova ET 4.2

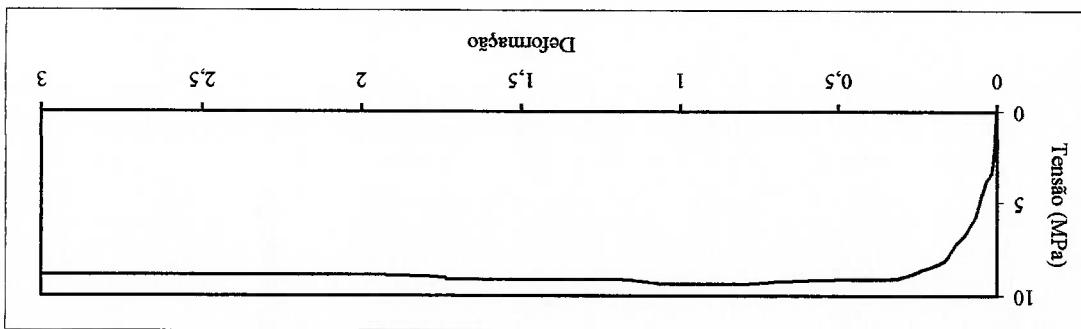
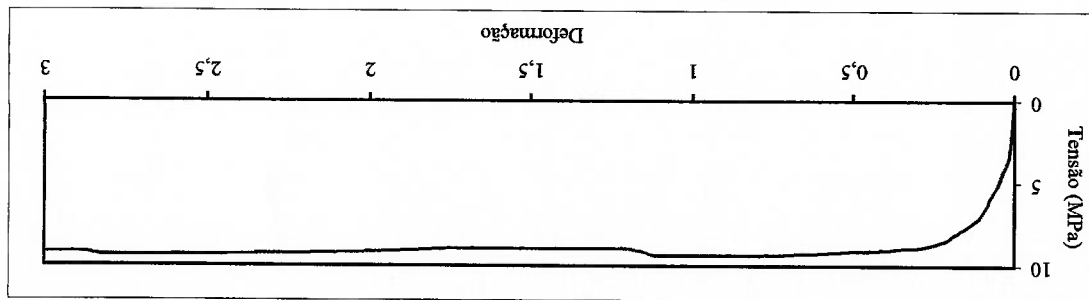


Fig. 3.25 - Curva tensão vs. deformação para o corpo de prova ET 4.3



ET 4.3

Desloc. (mm)	Força (N)	Deform. (mm)	Tensão (MPa)	Desloc. (mm)	Força (N)	Deform. (mm)	Tensão (MPa)
0,00	0,00	0,00	0,00	34,17	435,00	0,68	9,28
0,42	100,00	0,01	2,13	40,83	440,00	0,82	9,38
0,83	160,00	0,02	3,41	50,83	440,00	1,02	9,38
1,67	200,00	0,03	4,26	55,83	440,00	1,12	9,38
2,50	240,00	0,05	5,12	57,50	430,00	1,15	9,17
3,75	280,00	0,08	5,97	60,83	420,00	1,22	8,96
4,17	300,00	0,08	6,40	67,50	420,00	1,35	8,96
5,83	340,00	0,12	7,25	84,17	420,00	1,68	8,96
9,17	380,00	0,18	8,10	100,83	430,00	2,02	9,17
10,83	400,00	0,22	8,53	117,50	435,00	2,35	9,28
14,17	415,00	0,28	8,85	134,17	440,00	2,68	9,38
17,50	420,00	0,35	8,96	140,83	440,00	2,82	9,38
20,83	425,00	0,42	9,06	144,17	430,00	2,88	9,17
24,17	427,50	0,48	9,12	150,83	430,00	3,02	9,17
27,50	430,00	0,55	9,17				

Tabela 3.16- Resultados de tensão e deformação obtidas no ensaio do corpo de prova ET 4.1

Desloc. (mm)	Força (N)	Deform. (MPa)	Tensão (MPa)	Desloc. (mm)	Força (N)	Deform. (MPa)	Tensão (MPa)
0,00	0,00	0,00	0,00	37,50	425,00	0,75	8,71
0,83	100,00	0,02	2,05	39,17	430,00	0,78	8,81
1,67	160,00	0,03	3,28	49,17	430,00	0,98	8,81
2,50	200,00	0,05	4,10	52,50	425,00	1,05	8,71
4,17	260,00	0,08	5,33	55,83	415,00	1,12	8,51
5,42	300,00	0,11	6,15	59,17	400,00	1,18	8,20
5,83	320,00	0,12	6,56	62,50	400,00	1,25	8,20
7,50	340,00	0,15	6,97	65,83	400,00	1,32	8,20
9,58	380,00	0,19	7,79	72,50	410,00	1,45	8,40
12,50	400,00	0,25	8,20	79,17	410,00	1,58	8,40
15,83	410,00	0,32	8,40	82,50	412,50	1,65	8,46
22,50	415,00	0,45	8,51	99,17	417,50	1,98	8,56
25,83	420,00	0,52	8,61	105,83	420,00	2,12	8,61
29,17	425,00	0,58	8,71	150,00	420,00	3,00	8,61
32,50	425,00	0,65	8,71				

APÊNDICE D- RESULTADOS DA AVALIAÇÃO NUMÉRICA-  
 COMPUTACIONAL COM OS CÓDIGOS COMPUTACIONAIS LUSAS E  
 ALGOR

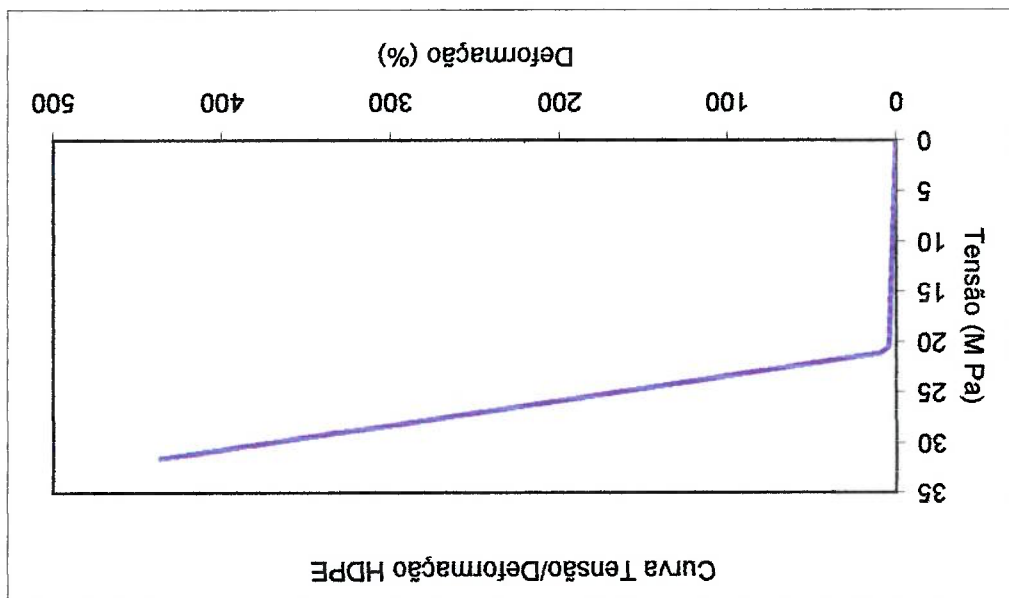


Fig. 4-9-Curva tensão/deformação obtidas como resultado da modelagem do HDPE com o "software" LUSAS

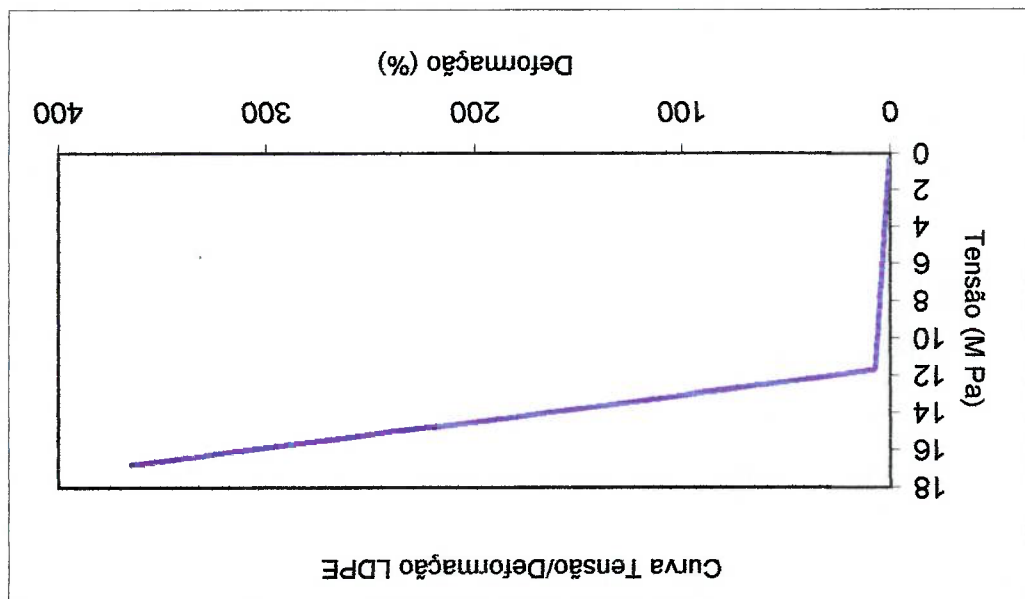


Fig. 4-10-Curva tensão/deformação obtidas como resultado da modelagem do LDPE com o "software" LUSAS

Tabela 4.6- Valores de deformação e tensão obtidos na modelagem do HDPE com o "software" LUSAS

Deformação	Tensão (MPa)	Deformação	Tensão (MPa)
0.13	0.64	3.43	16.64
0.26	1.28	3.56	17.28
0.40	1.92	3.69	17.92
0.53	2.56	3.82	18.56
0.66	3.20	3.95	19.20
0.79	3.84	4.09	19.84
0.92	4.48	4.22	20.48
1.05	5.12	9.23	21.12
1.19	5.76	23.25	21.47
1.32	6.40	48.62	22.09
1.45	7.04	74.31	22.72
1.58	7.68	100.10	23.35
1.71	8.32	126.00	23.99
1.85	8.96	151.96	24.63
1.98	9.60	177.92	25.27
2.11	10.24	203.89	25.90
2.24	10.88	229.82	26.54
2.37	11.52	255.76	27.18
2.50	12.16	281.71	27.82
2.64	12.80	307.66	28.45
2.77	13.44	333.52	29.09
2.90	14.08	359.36	29.73
3.03	14.72	385.28	30.36
3.16	15.36	410.75	30.99
3.30	16.00	435.98	31.61

Deformação (%)	Tensão (MPa)	Deformação (%)	Tensão (MPa)
0.22	0.36	5.68	9.36
0.44	0.72	5.90	9.72
0.66	1.08	6.11	10.08
0.87	1.44	6.33	10.44
1.09	1.80	6.55	10.80
1.31	2.16	6.77	11.16
1.53	2.52	6.99	11.52
1.75	2.88	7.45	11.71
1.97	3.24	8.16	11.72
2.18	3.60	10.59	11.75
2.40	3.96	19.92	11.88
2.62	4.32	40.17	12.17
2.84	4.68	65.00	12.53
3.06	5.04	89.82	12.89
3.28	5.40	114.71	13.24
3.49	5.76	139.68	13.60
3.71	6.12	164.67	13.96
3.93	6.48	189.67	14.32
4.15	6.84	214.67	14.68
4.37	7.20	239.68	15.04
4.59	7.56	264.68	15.39
4.80	7.92	289.69	15.75
5.02	8.28	314.67	16.11
5.24	8.64	339.54	16.47
5.46	9.00	364.50	16.83

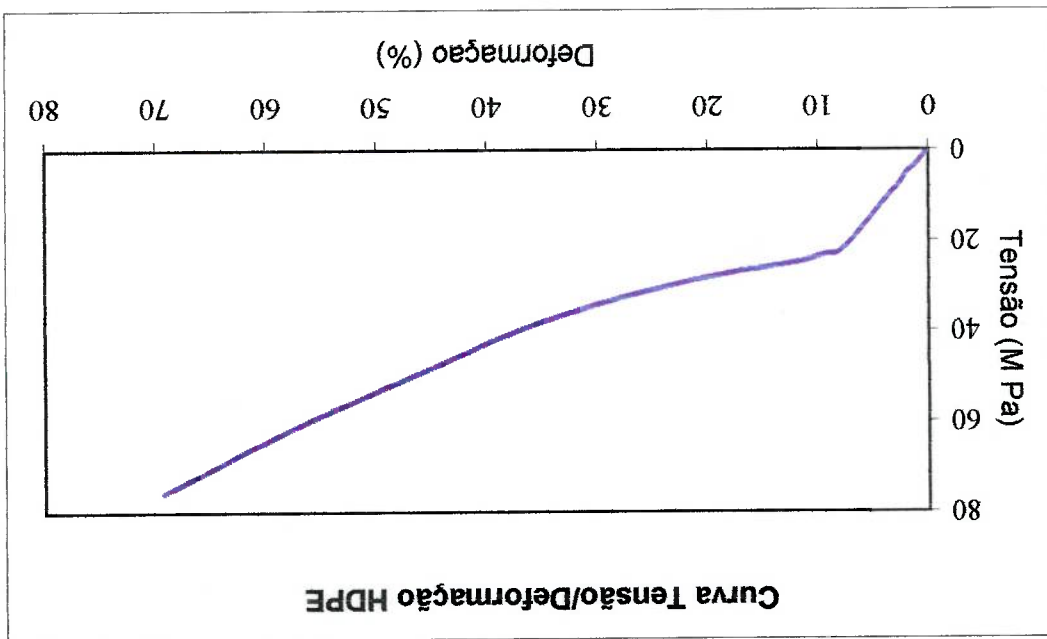
Tabela 4.7- Valores de deformação e tensão obtidos na modelagem do LDPE com o "software" LUSAS



Deformação (%)	Tensão (M Pa)	Deformação (%)	Tensão (M Pa)
0,00	0,00	7,10	20,36
0,65	1,85	7,75	21,60
1,29	3,70	8,39	22,83
1,94	4,94	9,01	22,83
2,58	7,40	11,63	24,68
3,23	9,26	19,19	27,77
3,87	11,11	27,91	32,70
4,52	12,96	37,22	40,11
5,16	14,81	46,52	49,98
5,81	16,66	56,41	60,47
6,45	18,51	69,20	75,90

Tabela 4.8 - Valores de deformação e tensão obtidos na modelagem do HDPE com o "software" ALGOR

Fig. 4.11 - Curva tensão/deformação obtidas como resultado da modelagem do HDPE com o "software" ALGOR



Deformação (%)	Tensão (MPa)	Deformação (%)	Tensão (MPa)
0,00	0,00	10,93	11,56
0,99	1,05	11,93	12,62
1,99	2,10	12,92	12,97
2,98	3,15	13,93	13,32
3,98	4,21	16,14	14,02
4,97	5,26	24,06	16,12
5,96	6,31	32,92	18,57
6,96	7,36	41,78	22,78
7,95	8,41	51,28	27,68
8,94	9,46	60,77	33,64
9,94	10,51	72,80	41,70

Tabela 4-9 - Valores de deformação e tensão obtidos na modelagem do LDPE com o "software" ALGOR

Fig. 4.12- Curva tensão/deformação obtidas como resultado da modelagem do LDPE com o "software" ALGOR

