

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA**

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE CABOS  
VISCOELÁSTICOS**

LUCIANA DE ALMEIDA MOHNSAM

Dissertação apresentada à Comissão de Curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Humberto Camargo Píccoli,  
Doutor em Engenharia Mecânica  
Co-Orientador: Fernando Kokubun,  
Doutor em Ciências Físicas

Rio Grande, dezembro de 2008.

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

# **SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE CABOS VISCOELÁSTICOS**

**LUCIANA DE ALMEIDA MOHNSAM**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

***MESTRE EM ENGENHARIA OCEÂNICA***

tendo sido aprovada em sua forma final pela Comissão de Curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica.

Prof. Dr. André Guimarães  
Coordenador da Comissão de Curso

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Humberto Camargo Píccoli  
Orientador – FURG

Prof. Dr. Fernando Kokubun  
Co-orientador - FURG

Prof. Dra. Sandra Denise Prado  
UFRGS

"Quem é firme em seus propósitos molda o mundo a seu modo."

Johann Wolfgang Von Goethe

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus.

À minha família, em especial: aos meus pais José Normelio Lima de Almeida e Vera Maria Oliveira de Almeida, por sempre terem me incentivando aos estudos, acreditando no meu potencial, me apoiando sempre; ao meu irmão, Bruno O. de Almeida, pelo apoio; e ao meu marido, Julio Cesar Mohnsam, pelo incentivo e apoio diário durante esta caminhada. A vocês dedico este trabalho, pois vocês são as pessoas mais importantes da minha vida.

À Universidade Federal do Rio Grande por incentivar o estudo voltado à área costeira e marítima, contribuindo assim para o desenvolvimento d cidade do Rio Grande.

A CAPES pelo suporte financeiro para a realização desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Humberto C. Píccoli e ao Prof. Dr. Fernando Kokubun, pela orientação, apoio e pela confiança depositada em meu trabalho e ao Prof. Dr. Paulo Teixeira, por ter cedido muitas vezes o seu tempo para discussões construtivas.

A todos os funcionários desta instituição que me trataram sempre com muito respeito, exercendo seu papel com muita dedicação, simpatia e profissionalismo, em especial à Nilza e ao Elimar, que sempre se mostraram dispostos a ajudar no que fosse possível.

Aos meus colegas, pelo apoio nesta caminhada tão importante para todos nós. Jamais me esquecerei dos eventos em que participamos; da ansiedade e, ao mesmo tempo, da satisfação que sentimos antes da apresentação do nosso trabalho. Raquel Holtz, Karina Duarte, Jairo Coelho, Natália Leme vocês foram parte integrante de todo processo.

Muito obrigada,

a todos que, de alguma forma, colaboraram com incentivo, sugestões e críticas construtivas.

## RESUMO

Atualmente, há muito interesse em estudar e criar novos materiais sintéticos que apresentem alta resistência à ruptura. Um exemplo disto é o avanço na construção de linhas de ancoragem para plataformas em operações *offshore*, que são preferencialmente constituídas, além de outros componentes, por cabos de fibra sintética, como a de poliéster. O objetivo principal deste trabalho foi efetuar a simulação numérica do comportamento de cabos viscoelásticos submetidos a esforços externos até que ocorra a ruptura. Este trabalho é importante para compreender melhor o comportamento de cabos sintéticos utilizados na ancoragem de plataformas, ajudando assim, a estimar de forma mais adequada a durabilidade dos mesmos. No programa construído, considerou-se que o comportamento do cabo é uma sobreposição dos movimentos dos multifilamentos que o constitui. Um modelo viscoelástico foi usado para representar o comportamento de cada multifio e sua dinâmica foi analisada resolvendo numericamente as equações de movimento. Os parâmetros do modelo foram determinados mediante análise de dados obtidos em ensaios dinâmicos e de tração com multifios de poliéster, realizados no Laboratório de Análises de Tensões - POLICAB. Os resultados numéricos foram comparados aos encontrados na literatura e posteriormente aos resultados experimentais, que permitiram também validar o modelo para a simulação do comportamento de um multifilamento de poliéster até a ocorrência de ruptura.

Palavras-chave: Linhas de ancoragem; cabos sintéticos; modelos viscoelásticos; viscoelasticidade.

## ABSTRACT

Currently, there has been much interest in studying and creating new synthetic materials with high breaking strength. The advances in construction of anchorage lines designed for operating offshore platforms are, beyond other components, for synthetic fiber ropes, as of polyester. The main goal of this study was to elaborate the numerical simulation of the behavior of viscoelastics ropes submitted the external efforts until the rupture occurs. This study is important to better understand the behavior of synthetic ropes used in platforms anchorage helping, to estimate more adequate form and durabilities of them. In the elaborated program, it was considered that the behavior of the rope is an overlap of the movements of the multi-wires that constitutes it. A viscoelastic model was used to represent the behavior of each multi-wire and its dynamics was analyzed using the numerical solutions of the motion equations. The parameters of the model had been determined by the analysis of data gotten in dynamic assays and tractive with multi-wires of polyester, carried through in the Laboratory of Analyses of Tensions - POLICAB. The results have been compared with ones in the literature and later with the experimental results, that had also validate the model for the simulation of the behavior of a multi-wire of polyester until the imminence rupture.

Keywords: Anchorage lines; synthetic ropes; viscoelastics models; viscoelasticity.

# SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS.....	09
LISTA DE ABREVIATURAS.....	11
LISTA DE TABELAS.....	12
LISTA DE FIGURAS.....	13
1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1 OBJETIVO.....	16
1.1.1 Objetivo Geral.....	16
1.1.2 Objetivos Específicos.....	16
1.2 JUSTIFICATIVA.....	16
1.3 METODOLOGIA DO TRABALHO.....	17
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 CABOS VISCOELÁSTICOS USADOS NA ANCORAGEM OFFSHORE.....	19
2.1.1 Estrutura e Características Gerais dos Cabos.....	21
2.2 TIPOS DE ANCORAGEM <i>OFFSHORE</i> .....	24
2.2.1 Ancoragem em Catenária.....	24
2.2.2 Ancoragem <i>Taut-Leg</i> .....	25
2.2.3 Ancoragem Vertical.....	26
2.3 VISCOELASTICIDADE LINEAR.....	26
2.3.1 Modelo de Voigt-Kelvin.....	28
2.3.2 Modelo de Maxwell.....	30
2.3.3 Modelo de Zener.....	33
3. MATERIAL E METODOLOGIA .....	38
3.1 MODELAGEM .....	38
3.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	43
3.2.1 Ensaios de Tração e Determinação do Módulo de Elasticidade do Material.....	44
3.2.2 Ensaios Dinâmicos e Determinação do Módulo de Amortecimento do Material.....	47
3.2.3 Determinação dos Parâmetros $E_s$ , $E_M$ e $\eta$ .....	48
3.2.4 Determinação das Condições de Rompimento dos Multifilamentos.....	49
4. RESULTADOS E DISCUSÕES.....	50
4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	50
4.1.1 Estimativa do tamanho da amostra.....	50
4.1.2 Resultados dos Ensaios Dinâmicos e do Amortecimento do Material.....	55
4.1.3 Resultados dos Ensaios de Tração e da Rigidez do Material.....	55
4.1.4 Determinação dos Parâmetros $\eta$ , $E_s$ E $E_M$ .....	57
4.1.5 Determinação das Condições de Rompimento dos Multifilamentos.....	61

4.2 RESULTADOS NUMÉRICOS.....	63
4.2.1 Simulação do Comportamento de um Multifilamento.....	63
4.2.2 Simulação do Comportamento de um Conjunto de Multifios.....	65
4.2.3 Simulação do Comportamento de um Cabo Viscoelástico.....	69
5. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
-----	
APÊNDICE A – FLUXOGRAMA DO PROGRAMA <i>SNAP</i> .....	73
APÊNDICE B – RELATÓRIOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	74
APÊNDICE C – RELATÓRIOS DOS ENSAIOS DINÂMICOS.....	89
APÊNDICE D – CURVAS SELECIONADAS PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS: $E_s$ ; $E_M$ ; $\eta$ .....	90
APÊNDICE E – RESULTADO COM A RETIRADA DO COEFICIENTE $p_1$ .....	91
APÊNDICE F - VALORES DAS VARIÁVEIS DE SAÍDA NO MOMENTO DE RUPTURA DE CADA MULTIFILAMENTO.....	92
ANEXO A – MÉTODO INCREMENTAL PARA SOLUÇÃO DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS ORDINÁRIAS.....	95
ANEXO B – SOLUÇÃO ANALÍTICA DO MODELO DE ZENER.....	98
ANEXO C – CABO DE POLIÉSTER COM SEIS SUB-CABOS HELICOIDAIS.....	100
ANEXO D – DISTRIBUIÇÃO QUI-QUADRADO.....	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	103

## LISTA DE SÍMBOLOS

- C - Coeficientes da equação analítica de Zener.
- CR - Chance de rompimento do multifilamento.
- D - Índice referente ao amortecimento.
- E - Módulo de elasticidade.
- FD – Faixa de deformação em que se encontra o valor da deformação de ruptura do multifilamento.
- G - Constante considerada na dedução do modelo de Zener.
- L - Comprimento do cabo ou multifilamento.
- M - Índice referente ao modelo de Maxwell.
- P - Polinômio ajustado.
- T - Tamanho da amostra.
- TD - Índice referente ao polinômio ajustado aos dados Tensão-Deformação.
- TR - Tempo de ruptura.
- TT - Índice referente ao polinômio ajustado aos dados Tensão-Tempo.
- $V_A$  - Variância amostral.
- $V_{\max}$  - Valor máximo da amostra.
- $V_{\min}$  - Valor mínimo da amostra.
- $V_p$  - Variância da população.
- c - Densidade linear dos componentes (fibras, fios ou multifios).
- m - Massa.
- p - Teste estatístico.
- s - Índice referente à mola.
- t - Tempo.
- $\bar{x}$  - Média de ruptura da amostra.
- $z_{\alpha/2}$  - Valor crítico.
- $\alpha$  - Ângulo de hélice.
- $\chi_0^2$  - Valor estatístico Qui-Quadrado.
- $\chi_c^2$  - Valor crítico Qui-Quadrado.
- $\delta$  - Desvio padrão populacional.

$\varepsilon$  - Deformação do material.

$\dot{\varepsilon}$  - Taxa de deformação do material.

$\Phi$  - Desvio padrão amostral.

$\eta$  - Módulo de Amortecimento.

$\mu$  - Média de ruptura da população.

$\theta$  - Ângulo entre o eixo central do cabo e um componente (fibra, fio ou multifio).

$\rho$  - Densidade linear do cabo.

$\sigma$  - Tensão.

$\sigma_{Ext}$  - Tensão externa.

$\sigma_0$  - Tensão externa constante.

$\omega$  - Frequência.

$\xi$  - Tempo de relaxação.

## LISTA DE ABREVIATURAS

CLS - Cordoaria de São Leopoldo.

FPS - *Floating Production Systems* - Unidades Flutuantes de Produção.

FPSO - *Floating, Production, Storage & Offloading* - Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e Transferência de petróleo.

FPU - *Floating Production Units* - Unidades Flutuantes de Produção.

FSO - *Floating, Storage & Offloading* - Unidade Flutuante de Armazenamento e Transferência de petróleo, construída a partir de um navio.

HMPE - *High Modulus Polyethylene* - Polietileno de alto peso molecular.

NMI - Número de multifilamentos íntegros ao longo da simulação.

PE - Polietileno.

POLICAB - Laboratório de Análise de Tensões.

PP - Polipropileno.

QMR - Quantidade de multifilamentos rompidos em cada instante.

QMR - Quantidade acumulativa de multifilamentos rompidos.

TLP - *Tension Leg Platform* - Plataforma de pernas atirantadas.

VLA - *Vertical Load Anchor* - Âncora de carga vertical.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Parâmetros utilizados nos modelos de Voigt-Kelvin e Zener.....	36
Tabela 4.1 - Informações da primeira amostra de dados.....	51
Tabela 4.2 - Teste de aderência para os dados da primeira amostra.....	51
Tabela 4.3 - Informações sobre a amostra representativa dos dados.....	53
Tabela 4.4 - Teste de aderência para os dados da amostra representativa.....	53
Tabela 4.5 - Coeficientes do polinômio 4.1 (Tensão-deformação).....	56
Tabela 4.6 - Coeficientes do polinômio 4.2 (Tensão-tempo).....	58
Tabela 4.7 - Coeficientes para determinação do parâmetro $E_M$ .....	59
Tabela 4.8 - Coeficientes para determinação do parâmetro $E_S$ .....	60
Tabela 4.9 - Informações extraídas dos resultados de ruptura dos multifilamentos.....	61
Tabela 4.10 - Coeficientes da função de chance de ruptura dos multifilamentos.....	62
Tabela 4.11 – Valor das variáveis no momento do rompimento de um multifio.....	64
Tabela 4.12 – Valores das variáveis no momento de ruptura do conjunto de 30 multifios.....	66
Tabela 4.13 – Valores das variáveis no momento de ruptura do conjunto de 600 multifios....	67
Tabela 4.14 - Valores das variáveis no momento de ruptura do conjunto de 55.000 multifios.....	68
Tabela 4.15 - Valores das variáveis no momento de ruptura do cabo ideal.....	69

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Figura 2.1 - Diagrama do cabo de poliéster destinado para construção de linhas de ancoragem.....	22
Figura 2.2 - Componente do cabo com um ângulo $\theta$ com relação ao eixo central.....	23
Figura 2.3 - Ancoragem do tipo catenária e do tipo <i>taut-leg</i> .....	25
Figura 2.4 - Ancoragem do tipo vertical.....	26
Figura 2.5 - Elementos básicos usados na construção de modelos viscoelásticos.....	27
Figura 2.6 - Modelo de Voigt-Kelvin .....	28
Figura 2.7 - Comportamento de fluência de um modelo de Voigt-Kelvin.....	30
Figura 2.8 - Modelo de Maxwell.....	31
Figura 2.9 - Comportamento de fluência de um modelo de Maxwell.....	33
Figura 2.10 - Modelo de Zener.....	34
Figura 2.11 - Comparação entre a resposta analítica do modelo de Voigt-Kelvin e a obtida pelo método incremental.....	36
Figura 2.12 - Comparação da resposta analítica do modelo de Zener com a do método incremental.....	37
Figura 3.1 - Cabo ideal.....	40
Figura 3.2 - Modelos de Zener em paralelo.....	41
Figura 3.3 - Alma de poliéster.....	41
Figura 3.4 - Distribuição dos multifilamentos do cabo.....	42
Figura 3.5 - Corpo de prova.....	44
Figura 3.6 - Resposta do ensaio de tração com um multifilamento de poliéster.....	46
Figura 3.7 - Resposta do ensaio dinâmico com um multifilamento de poliéster.....	48
Figura 4.1 - Histograma dos dados de ruptura da primeira amostra.....	52
Figura 4.2 - Histograma dos dados de ruptura da amostra representativa.....	54
Figura 4.3 - Ajuste de curvas do comportamento dos multifilamentos de poliéster.....	56
Figura 4.4 - Rigidez média do multifilamento de poliéster.....	57
Figura 4.5 - Resultado do ajuste de curvas para Tensão-tempo.....	58
Figura 4.6 - Resultado do ajuste de curvas utilizando o modelo de Zener.....	60
Figura 4.7 - Chance de rompimento do multifilamento no programa <i>snap</i> .....	63

Figura 4.8 – Resultado da simulação numérica para um multifilamento de poliéster.....	64
Figura 4.9 – Resultado da simulação numérica para um conjunto de 30 multifios.....	65
Figura 4.10 – Resultado da simulação numérica para um conjunto de 600 multifios.....	67

# 1. INTRODUÇÃO

A descoberta de campos de petróleo em águas cada vez mais profundas incentivou o desenvolvimento de novos equipamentos voltados para ancoragem de Unidades Flutuantes de Produção (FPU - *Floating Production Units*), pois o sistema convencional, caracterizado por cabos de aço em catenária (figura 2.3) não se apresenta adequado para exploração *offshore*, em profundidades acima de 1000m. Segundo Del Vecchio e Meniconi (1999), o sistema de ancoragem convencional apresenta algumas desvantagens à medida que aumenta a profundidade da água, tais como: menor eficiência de restauração; grande raio de amarração e excesso de carga vertical do cabo de aço sob a unidade flutuante.

A construção de cabos de poliéster e a criação do sistema taut-leg, caracterizado por linhas de ancoragem inclinadas e tracionadas (figura 2.3) foram grandes inovações desenvolvidas para suprir as limitações do sistema convencional e, por isso, fundamentais para o avanço da exploração petrolífera *offshore* em águas profundas.

O cabo de poliéster além de ser mais leve do que o de aço apresenta melhores propriedades mecânicas, é muito mais resistente ao impacto, à corrosão, à abrasão, etc. Atualmente, outras fibras sintéticas também são utilizadas na construção de cabos de ancoragem, tais como HMPE (*High Modulus Polyethylene*), nylon e uma fibra híbrida, constituída pela mistura de polietileno (PE) e polipropileno (PP), conhecida no mercado como *polysteel*® ou como *poliblend*®.

As fibras sintéticas apresentam muitas vantagens em relação ao aço, porém apresentam um comportamento complexo devido a uma propriedade característica destes materiais, a viscoelasticidade.

Tal comportamento pode ser simulado através de um modelo constituído basicamente por dois elementos: a mola hookeana, que representa o comportamento elástico e o amortecedor newtoniano, o comportamento viscoso. O acoplamento desses elementos forma um modelo viscoelástico (visco, de viscosidade e elástico, de elasticidade). É possível elaborar diversos modelos de acordo com a complexidade do material em estudo.

## 1.1 OBJETIVO

### 1.1.1 Objetivo Geral:

O principal objetivo deste trabalho é realizar a simulação numérica do comportamento de cabos viscoelásticos até ocorrer a ruptura, caracterizada pelo rompimento dos multifilamentos que os constituem.

### 1.1.2 Objetivos específicos:

- Selecionar um modelo viscoelástico que represente de forma satisfatória o comportamento de um material viscoelástico;
- verificar se o modelo escolhido representa o comportamento de um multifilamento de poliéster;
  - estimar as características dos multifilamentos de poliéster através de ensaios dinâmicos e de tração;
  - determinar os parâmetros do modelo de Zener de forma a representar o comportamento da fibra de poliéster;
  - construir um programa de simulação numérica do comportamento de cabos viscoelásticos;
  - comparar os resultados numéricos com os obtidos nos ensaios de tração com multifilamentos de poliéster;
- contribuir para o conhecimento do comportamento de materiais viscoelásticos.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Atualmente, a crescente exploração *offshore* em grandes lâminas d'água continua estimulando a criação novos equipamentos, especificamente na descoberta de novos materiais viscoelásticos para construção de linhas de ancoragem mais resistentes e duráveis do que os já existentes no mercado têxtil.

Para isso, é necessário fazer análises do comportamento das fibras sintéticas já existentes, permitindo compreender melhor o comportamento destes materiais, facilitando assim, estimar com mais precisão a iminência de ruptura de cabos viscoelásticos. Dessa forma, contribuindo à manutenção dos cabos de ancoragem, extremamente importantes na estabilidade de unidades flutuantes em operações *offshore*.

### 1.3 METODOLOGIA DO TRABALHO

Foi construído um programa de simulação numérica do comportamento dinâmico de materiais viscoelásticos utilizando o modelo de Zener. Como se trata de equações diferenciais ordinárias utilizou-se o método de Runge Kutta para a solução das equações.

Primeiramente, os resultados numéricos foram comparados com os resultados adquiridos numericamente por Creus e Sias (2004), cujo principal objetivo foi comparar as diferenças entre os comportamentos gerados pelos os modelos de Voigt-kelvin e Zener. Para tal comparação foram utilizados os mesmos parâmetros e a mesma equação de movimento, extraída do modelo de Zener, que segundo Creus e Sias (2004), representa de forma satisfatória um material viscoelástico.

Para simular o comportamento de um multifilamento viscoelástico foi necessário realizar ensaios dinâmicos e de tração com multifilamentos de poliéster usados na construção de linhas de ancoragem. Com os resultados dos ensaios foi possível estimar os módulos de elasticidade e de amortecimento que caracterizam o material em estudo. A partir dessas características foi possível calcular os parâmetros do modelo de Zener e aplicá-los para simular o comportamento de um multifilamento de poliéster, aplicando as mesmas condições de ensaio.

Posteriormente, os resultados experimentais foram comparados aos obtidos numericamente pelo programa construído, validando assim o modelo para a simulação de um multifilamento de poliéster.

Como o cabo é constituído por vários multifilamentos o seu comportamento é uma consequência do comportamento dos multifios. Dessa forma, o rompimento de alguns multifios significa o processo de ruptura do cabo, tendo seu total rompimento quando todos os multifilamentos se rompem.

## 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O atual capítulo apresenta uma visão geral dos objetivos e da justificativa que motivou a realização deste trabalho. Além disso, é feita uma descrição resumida da metodologia aplicada para este estudo.

No segundo capítulo estão reunidas informações da literatura e de trabalhos anteriores, essenciais na construção e validação do modelo. Apresenta, especificamente, a constituição do equipamento em estudo, o cabo; as principais fibras viscoelásticas utilizadas na construção de linhas de ancoragem e suas características. Aborda também a propriedade viscoelástica linear e os modelos viscoelásticos mais simples.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia aplicada para construção do programa, explicitando o modelo viscoelástico utilizado para a extração da equação do movimento, assim como, o método de solução numérica usado, as considerações feitas no programa construído e o material utilizado para realizar a simulação numérica do rompimento de cabos viscoelásticos. Apresenta também o equipamento e o material utilizados para realização dos ensaios e a metodologia utilizada na determinação dos parâmetros e das condições de ruptura dos multifilamentos, a partir dos dados experimentais obtidos, bem como, o funcionamento do programa.

No capítulo quatro estão expostos os resultados e as análises dos dados adquiridos da simulação numérica e dos ensaios experimentais. São feitas comparações entre ambos e também dos mesmos com as informações abordadas no capítulo dois.

No quinto capítulo são apresentadas as considerações finais e a conclusão em relação à validação do modelo e da metodologia aplicada para simulação. Aborda também, algumas sugestões para trabalhos futuros e para o aperfeiçoamento do modelo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta algumas informações extraídas da literatura, importantes para a construção do programa de simulação numérica do comportamento dinâmico de cabos viscoelásticos. A seguir, são exibidas as características gerais e a arquitetura de cabos sintéticos usados na ancoragem *offshore*, bem como os tipos de ancoragem existentes, as fibras sintéticas utilizadas e a aplicação mais adequada para cada uma delas. É feita também uma revisão sobre viscoelasticidade linear.

### 2.1 CABOS VISCOELÁSTICOS USADOS NA ANCORAGEM OFFSHORE

A decisão tomada pela Petrobrás, em 1993, de implantar de forma permanente estruturas flutuantes para exploração de petróleo em profundidades superiores a 1000 metros despertou o interesse no desenvolvimento de novos equipamentos e sistemas de ancoragem. Isto resultou em uma tecnologia inovadora para cabos e pontas de âncoras, já que o sistema convencional (figura 2.3) se tornara inviável devido à alta carga vertical que seria imposta à estrutura pelos cabos de aço em catenária (CARNEIRO et al, 1997).

Tendo isto em vista, em 1995, foi desenvolvido pela Cordoaria de São Leopoldo (CSL), um cabo sintético feito da fibra de poliéster para ancoragem de unidades flutuantes *offshore*, como plataformas, monobóias e Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e Transferência de Petróleo (FPSO - *Floating, Storage & Offloading*), apresentando excelente performance para ancoragem e atracação em águas profundas (CSL, 2007).

Com o avanço da exploração em águas cada vez mais profundas, devido ao aumento na demanda de óleo, há uma necessidade de se analisar outras fibras sintéticas que apresentem maior tenacidade (massa linear ou carga de ruptura) e menor peso linear do que o poliéster. Com isso, em 1998, foram desenvolvidos os cabos de náilon, de HMPE (*High Modulus Polyethylene*) e de uma fibra híbrida constituída pela mistura de polipropileno (PP) e polietileno (PE), conhecida no mercado como *polysteel*® ou *poliblend*®.

As fibras de alta performance mais utilizadas atualmente na construção de cabos para operações *offshore* são apresentadas a seguir:

## **Poliéster**

Segundo a CSL (2003), a fibra de poliéster tem boas características termoplásticas e alto ponto de fusão (260°C), conservando sua rigidez mesmo acima de 150°C; além disso, apresenta higroscopia praticamente nula (ou seja, não há absorção de umidade), boa resistência às soluções salinas, aos ácidos e solventes orgânicos e aos oxidantes. Os cabos constituídos desta fibra possuem excelente performance a fadiga, alto módulo de elasticidade, alta resistência, alongamento reduzido, ótima resistência contra os raios ultravioletas (UV) e boa capacidade de recuperação elástica. Para aplicações de trabalho cíclico, o poliéster pode ser tratado com lubrificantes especiais com a finalidade de aumentar resistência à abrasão. Sendo assim, podem ser utilizados na ancoragem *offshore* de monobóias e plataformas petrolíferas em águas profundas e ultraprofundas. Atualmente, estão sendo utilizados na ancoragem de algumas plataformas flutuantes do Brasil e do Golfo do México (DAVIES; FOREST; LACOTE, 2007).

## **Nylon**

Ao contrário do poliéster, o nylon, quando imerso em água, absorve umidade entre 10% e 12% de sua massa, o que resulta em um aumento no diâmetro e diminuição do comprimento do cabo constituído por esta fibra (LOPES, 2003). Contudo, o cabo de nylon responde muito bem a choques e estresses dinâmicos, pelo fato de combinar as seguintes características: menor desgaste interno, devido ao pouco atrito entre as fibras, alta resistência à ruptura e por apresentar inerentemente torque balanceado. Seu uso é recomendado a navios petroleiros atracados a FSO's (*Floating, Storage & Offloading*), FPSO's (*Floating, Production, Storage & Offloading*) e a monobóias, podendo ser aplicado também como *shock-line*, cabo utilizado para absorver esforços em um “engrenagem de reboque”

## **HMPE**

O cabo de HMPE (*High Modulus Polyethylene*) apresenta uma excelente resistência à abrasão e à ruptura; um alto módulo dinâmico; alta resistência à radiação ultravioleta; elevada

flexibilidade e flutuação positiva. Possui, também, uma tenacidade excepcionalmente alta em relação aos cabos de outras fibras, permitindo ser submetido a uma tensão muito maior para o mesmo diâmetro de cabo. Este equipamento é muito utilizado em aplicações *offshore*, principalmente em monobóias e operações especiais em águas profundas. É usado também em sistemas de ancoragem principalmente como *pennant wire* (cabo de pequeno comprimento com sapatilhos (ferros redondos) nas extremidades, para a união entre outros acessórios de reboque ou manuseio de âncoras).

### **Polipropileno + Polietileno**

É uma fibra híbrida constituída pela mistura de polipropileno (PP) e polietileno (PE), conhecida no mercado por *Polyblend*® ou como *polysteel*® . Segundo a Cotesi (1999), a última é formada por 70% de PP e 30% de PE . Estas fibras apresentam uma tenacidade muito alta e excelentes características, que as fazem extraordinariamente adequadas a estruturas de construção elástica e de vasta responsabilidade (CSL, 2007).

#### **2.1.1 Estrutura e Características Gerais dos Cabos**

Os cabos utilizados na ancoragem *offshore* são basicamente construídos pelo conjunto de fios sintéticos depositos de forma específica para esta finalidade. Os mesmos são constituídos por uma capa utilizada principalmente para proteção contra abrasão, um filtro, que evita a entrada de resíduos marinhos, sete sub-cabos em paralelo, formadas por doze pernas entrelaçadas em que cada perna é composta por vários multifilamentos (conjunto de n fios), conforme ilustra a figura 2.1. Esta estrutura aliada a fios de alta qualidade, permite a redução da abrasão entre as fibras e o aumento à resistência à fadiga, prolongando, assim, a vida útil do cabo (CSL, 2007).

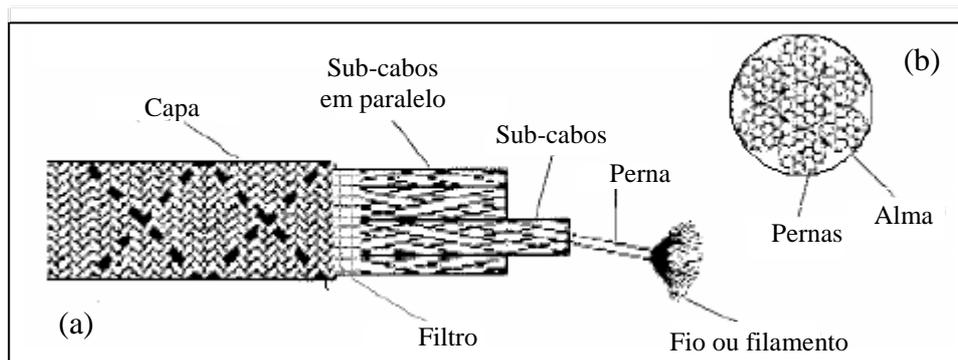


Figura 2.1 - Diagrama do cabo de poliéster destinado para construção de linhas de ancoragem. (a) indica os elementos que constituem o cabo. (b) mostra a disposição dos sete sub-cabos em paralelo e a das doze pernas entrelaçadas através de um corte transversal.

Segundo a CSL, os sub-cabos, paralelos entre si, apresentam um longo passo de trança, o que proporciona um torque inerentemente balanceado e características mecânicas adequadas às aplicações de ancoragem, tais como resistência e alto módulo elástico. Também é importante salientar que, aproximadamente 80% da massa total do cabo, corresponde aos sub-cabos; e os 20% restantes, à capa, sendo assim, por critério conservativo, os sub-cabos são responsáveis por 100% da capacidade de resistência à tração, destinando a capa somente a função de resistir à abrasão (CSL, 2007). As extremidades desses cabos apresentam um acabamento diferenciado, feitos com materiais e procedimentos especiais, melhorando a resistência à abrasão, gerada pelo contato de acessórios metálicos e outros componentes do sistema de amarração (CSL, 2007).

De acordo com Davies, Forest e Lacote (2007), a tensão é, nitidamente, o carregamento dominante em cabos viscoelásticos em aplicações *offshore*, porém a torção e a flexão também estão presentes. A torção pode ser induzida durante a aplicação da tensão, devido à construção desequilibrada de alguns cabos, como por exemplo, cabos com uma alma central cercada por seis sub-cabos helicoidais (DAVIES; FOREST; LACOTE, 2007), como mostra a figura C.1(a) (ANEXO C), localizada no anexo 3. Entretanto, em uma construção balanceada, a torção pode ocorrer durante as operações de manipulação e/ou de instalação do cabo. A flexão pode rapidamente danificar os cabos de alta performance, causada sempre quando o cabo passa por polias, como mostra a figura C.1(b) (anexo C) (DAVIES; FOREST; LACOTE, 2007).

Segundo McKenna, Hearle e O’Hear (2004), a análise quantitativa dos cabos de fibras sintéticas não é tão simples quanto os de materiais modelos; pois, devido à arquitetura

particular que apresentam, a definição da área de corte transversal é incerta, já que apresentam limites de contorno irregulares e espaços entre os multifilamentos. Com isso, o comprimento do cabo é melhor expressado pela densidade linear (massa por unidade de comprimento (kg/m)). Uma primeira aproximação da densidade linear do cabo seria multiplicar o número de fibras pela densidade linear da fibra, ou um cálculo equivalente para fios ou multifios. Contudo, este cálculo deverá ser corrigido uma vez que, ao longo do comprimento do cabo, as fibras aproximam-se do eixo central devido à torção ou ao trançado das mesmas. A figura 2.2 ilustra uma componente com densidade linear  $c$  para um ângulo  $\theta$  em relação ao eixo central do cabo. Este multifio contribuirá com uma massa de  $cL \sec \theta$  para um comprimento  $L$  do cabo. Então, torna-se mais conveniente expressar a densidade linear do cabo pela equação 2.1.

$$\rho = n.c.\sec \theta \tag{2.1}$$

onde:  $n$  é o número de componentes (fibras, fios ou multifios) do cabo e  $c$  é a densidade linear dos componentes.

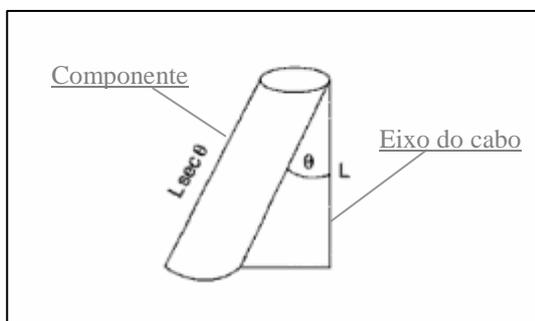


Figura 2.2 – Componente do cabo com um ângulo  $\theta$  com relação ao eixo central. (MCKENNA; HEARLE; O’HEAR, 2004)

Um parâmetro conveniente de usar é o fator de contração (MCKENNA, HEARLE e O’HEAR, 2004), dado por:

$$\begin{aligned} \text{Fator de contração} &= (\text{comprimento médio dos componentes})/(\text{compr. do cabo}) \\ &= (\text{densidade linear do cabo})/(\text{somat. das densid. linear dos comp.}) \\ &= \text{valor médio de } \sec \theta \\ &= \frac{1}{2}(1 + \sec \alpha) \end{aligned}$$

onde  $\alpha$  é o ângulo de hélice, ângulo formado entre o componente e a superfície perpendicular ao eixo do cabo.

A densidade linear, também chamada de “título” na indústria têxtil, é uma característica do material usada para diferenciar as diversas fibras viscoelásticas destinadas à fabricação de cabos para ancoragem *offshore*.

O cabo de ancoragem é um dos componentes das linhas de ancoragem para Unidades Flutuantes de Produção (FPU) em águas profundas. As linhas de ancoragem são estruturas flexíveis geralmente constituídas por trechos de aço, amarras e/ou cabos sintéticos e têm a função de garantir o posicionamento das plataformas petrolíferas durante as operações *offshore*. Na extremidade das mesmas são utilizadas âncoras e nos trechos intermediários alguns acessórios podem ser encontrados para a conexão de segmentos de materiais diferentes (CARBONO, 2005).

As linhas de ancoragem funcionam como molas, aplicando forças restauradoras para manter o posicionamento das unidades flutuantes. O que é extremamente importante durante a extração de petróleo *offshore* em águas profundas evitando a possível retirada e/ou dano de risers (elementos tubulares que interligam a cabeça do poço petrolífero à embarcação, localizada na superfície do mar para extração de petróleo).

O tipo de ancoragem aplicada na unidade flutuante e a distribuição das linhas de ancoragem são fatores que influenciam diretamente os deslocamentos sofridos pelas estruturas quando submetidas a ações ambientais, como ventos, correntes e ondas.

## **2.2 TIPOS DE ANCORAGEM OFFSHORE**

A escolha do tipo de ancoragem aplicado em uma unidade flutuante depende da geometria das linhas de ancoragem e principalmente do tipo de embarcação e de operação, da quantidade de risers, do custo e da profundidade do mar (CARBONO, 2005).

### **2.2.1 Ancoragem em Catenária**

Na ancoragem em catenária (figura 2.3), o raio de ancoragem razoavelmente grande (aproximadamente três vezes maior do que a lâmina d'água) e o atrito do cabo no fundo do

mar são responsáveis por absorver as solicitações do carregamento ambiental em condições normais de operação, diminuindo os esforços nas âncoras que, por este fato, podem apresentar menor poder de garra. Sua principal desvantagem é o possível congestionamento de linhas de unidades próximas e a colisão em equipamentos ou submarinos, interferindo, assim, diretamente no posicionamento dos mesmos (CARBONO, 2005).

### 2.2.2 Ancoragem *Taut-Leg*

Para contornar as desvantagens do sistema em catenária usa-se a ancoragem *taut-leg* (figura 2.3). Neste sistema as linhas se encontram inclinadas e tracionadas com um ângulo de topo de aproximadamente  $45^\circ$  com a vertical, tendo assim uma projeção vertical menor, para uma mesma ordem de grandeza da lâmina d'água. Este tipo de ancoragem proporciona maior rigidez ao sistema, limitando a embarcação a menores *offsets* (deslocamentos da unidade flutuante em relação ao eixo vertical que passa pelo poço de extração de petróleo). Neste caso, as âncoras a serem utilizadas precisam resistir a valores elevados de cargas verticais, como a VLA (*Vertical Load Anchor* – âncora de carga vertical). A ancoragem do tipo *taut-leg* é geralmente usada em sistemas localizados em regiões de grandes profundidades (CARBONO, 2005).

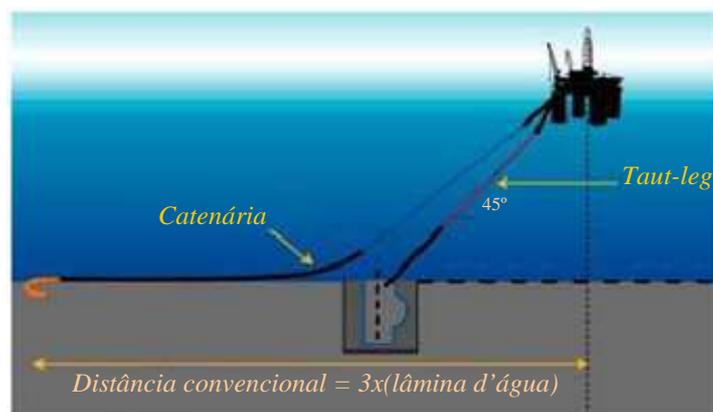


Figura 2.3 – Ancoragem do tipo catenária e do tipo *taut-leg* (AUGUSTO; ANDRADE; ROSSI, 2002).

### 2.2.3 Ancoragem Vertical

A ancoragem vertical (figura 2.4) é baseada na utilização de tendões verticais, que precisam estar sempre tracionados devido ao excesso de empuxo proveniente da parte submersa da embarcação. Trata-se de ancoragem usada principalmente em plataformas de pernas atirantadas (*Tensio Leg Platform - TLP*), podendo ser adotada por bóias e monobóias. Os tendões podem ser de cabo de aço ou de material sintético proporcionando rigidez elevada na direção vertical e baixa na horizontal. Neste plano, a força de restauração é fornecida pela componente da força de tração. Para tendões de pequenos diâmetros ( $d \cong 0.25m$ ) os efeitos de flexão podem ser desprezados, enquanto que, para grandes diâmetros ( $d \cong 1.00m$ ), tais efeitos devem ser considerados (CARBONO, 2005).



Figura 2.4 – Ancoragem do tipo vertical

## 2.3 VISCOELASTICIDADE LINEAR

Os sólidos elásticos apresentam forma geométrica bem definida e se deformados pela ação de forças externas, assumem outra forma de equilíbrio. Por outro lado, os líquidos viscosos não possuem forma geométrica definida e escoam irreversivelmente quando submetidos a forças externas. Muitos materiais, principalmente os de natureza polimérica, apresentam um comportamento mecânico intermediário entre estes dois extremos,

evidenciando tanto características viscosas como elásticas; e por este motivo, são conhecidos como viscoelásticos (SILVA, 2005).

Os fenômenos de relaxação e de fluência são comportamentos característicos observados nos materiais viscoelásticos. A relaxação de tensão ocorre quando um material é submetido a um estado de deformações constantes com uma lenta redução das tensões ao longo do tempo; já a fluência é observada em um material, quando há um aumento gradual da deformação do material, submetido a uma tensão constante no decorrer do tempo.

Uma análise aplicando as condições destes dois estágios de comportamento auxilia na análise de modelos permitindo identificar com clareza se o comportamento do modelo escolhido representa de forma satisfatória o comportamento do material em estudo.

Os modelos viscoelásticos são constituídos basicamente em termos de dois elementos básicos: a mola hookeana e o amortecedor newtoniano, representados na figura 2.5. O amortecedor newtoniano possui um líquido viscoso em seu interior, tendo assim um comportamento viscoso (expressão 2.3) e a mola, um comportamento elástico, como mostra a equação 2.2,

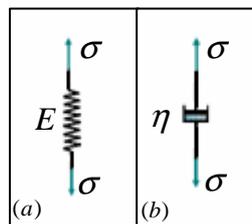


Figura 2.5 – Elementos básicos usados na construção de modelos viscoelásticos. (a) Mola hookeana. (b) Amortecedor newtoniano.

$$\sigma_s = E \varepsilon_s \quad (2.2)$$

$$\sigma_d = \eta \frac{d\varepsilon_d}{dt} \quad (2.3)$$

onde  $\varepsilon$  é a deformação do sistema e  $\sigma$ ,  $E$  e  $\eta$  são, nesta ordem, a tensão, o módulo de elasticidade e o módulo de amortecimento. Os índices  $s$  e  $d$  significam mola (*spring*) e amortecedor (*damping*), respectivamente.

O uso destes elementos permite a criação de vários de modelos, desde os mais simples até os mais complexos, dependendo do comportamento do material em estudo. Os mais conhecidos devido à simplicidade são os modelos de Voigt-Kelvin e o de Maxwell, apresentados e analisados a seguir nas seções 2.3.1 e 2.3.1.

### 2.3.1 Modelo de Voigt-Kelvin

O modelo de Voigt-Kelvin é constituído por uma mola hookeana e um amortecedor newtoniano em paralelo, como mostra a figura 2.6. Deste modelo é extraída a relação mais simples do comportamento de um material, como mostra a equação 2.6.

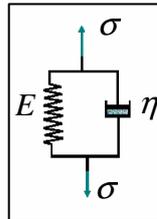


Figura 2.6 – Modelo de Voigt-Kelvin

Quando aplicada uma tensão  $\sigma$ , em um sistema em paralelo, a mesma deformação é induzida em ambos elementos e a tensão total  $\sigma$  é a soma das tensões  $\sigma_s$  e  $\sigma_d$ , ou seja:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_d = \varepsilon \quad (2.4)$$

$$\sigma = \sigma_s + \sigma_d \quad (2.5)$$

Substituindo-se as equações (2.2) e (2.3) em (2.5) e levando em consideração a equação (2.4), tem-se que o comportamento do modelo de Voigt-Kelvin é dado por:

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.6)$$

A partir da equação 2.6 percebe-se que quando a deformação for constante (taxa de deformação nula) o modelo descreve o comportamento hookeano.

Para entender melhor o comportamento descrito pelo modelo viscoelástico é conveniente fazer uma análise aplicando-se as condições de fluência e de relaxação definindo assim que tipo de material se encaixa em tal comportamento.

Na análise de fluência considera-se que o sistema seja submetido a uma tensão constante ( $\sigma = \sigma_0$ ), até um determinado instante  $t_1$ . Aplicando esta condição na equação (2.3), tem-se que:

$$\sigma_0 = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt}$$

$$\frac{d\varepsilon}{(\sigma_0 - E\varepsilon)} = \frac{1}{\eta} dt \quad (2.7)$$

Integrando-se a equação 2.7 em ambos lados, obtêm-se:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} \left( 1 - e^{\left(\frac{-E}{\eta}\right)t} \right) \quad (2.8)$$

que expressa a lei tensão-deformação ilustrada na figura 2.7, ou seja quando o modelo é submetido a uma tensão constante a deformação cresce exponencialmente de zero até a deformação total igual a  $\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E}$ .

Ao atingir a deformação total, a tensão  $\sigma_0$  se torna nula ( $\sigma_0 = 0$ ) e com isso espera-se que ocorra a recuperação do material:

$$E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} = 0$$

$$\frac{1}{\varepsilon} d\varepsilon = -\frac{E}{\eta} dt$$

integrando tem-se que:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{\left(\frac{E}{\eta}\right)t} \quad (2.9)$$

Pela expressão (2.9) observa-se que a deformação diminui exponencialmente até anular-se. O tempo de recuperação do material depende das características,  $E$  e  $\eta$ . Nota-se também que quando  $t \rightarrow \infty$ , o a deformação tende a zero ( $\epsilon \rightarrow 0$ ), ou seja, a recuperação não é total. A figura abaixo ilustra o comportamento de fluência e de recuperação do modelo de Voigt-Kelvin.

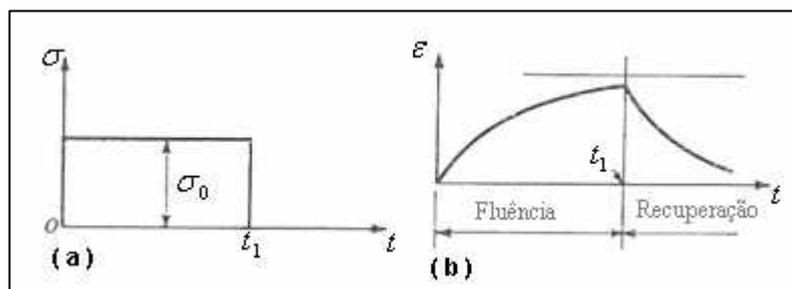


Figura 2.7 – Comportamento de fluência de um modelo de Voigt-Kelvin. (a) Esboço da tensão em função do tempo. (b) Esboço do comportamento de fluência e de recuperação do material. (Popov, 1978)

Segundo Popov (1978) este “comportamento assemelha-se com uma esponja elástica cheia de fluido viscoso, na qual a carga final corresponde à carga sendo suportada pelo núcleo elástico. Baseado na evidência experimental sabe-se que esse comportamento não é típico da maioria dos materiais”.

### 2.3.2 Modelo de Maxwell

O modelo de Maxwell é formado de uma associação em série de uma mola hookeana e um amortecedor newtoniano, como mostra a figura 2.8. Ao aplicar-se uma tensão no modelo de Maxwell haverá uma resposta instantânea, devido à presença da mola em série, este deslocamento será proporcional à tensão aplicada. Entretanto o amortecedor também sofrerá influência desta tensão e também será deformado. A velocidade desta deformação será proporcional à tensão aplicada, com um coeficiente de proporcionalidade igual ao coeficiente de amortecimento  $\eta$ .

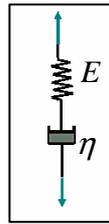


Figura 2.8 – Modelo de Maxwell

Como o sistema é em série, ao aplicar-se uma tensão  $\sigma$ , cada elemento contribui para deformação total, sendo igual à soma das deformações,  $\varepsilon_s$  e  $\varepsilon_d$ , e a tensão de ambos elementos,  $\sigma_s$  e  $\sigma_d$ , é a mesma que a tensão total  $\sigma$ , ou seja:

$$\sigma_s = \sigma_d = \sigma \quad (2.10)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_s + \varepsilon_d$$

como não faz sentido relacionar movimento do amortecedor em função da deformação é necessário utilizar uma relação em termos da velocidade:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_s}{dt} + \frac{d\varepsilon_d}{dt}, \quad (2.11)$$

dessa forma, substituindo equação 2.3 e a derivada da expressão 2.2 em 2.11, levando em consideração a 2.10, se obtém a equação do modelo de Maxwell:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (2.12)$$

Pela equação 2.12, se observar que quando a tensão aplicada for constante (variação de tensões nula) o modelo descreve o comportamento newtoniano.

Ao aplicar as condições de fluência no modelo de Maxwell (equação 2.12), ou seja, considerando que o sistema seja submetido a uma tensão constante ( $\sigma = \sigma_0$ ) até um determinado instante  $t_1$ , se obtém o comportamento do material em função do tempo:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma_0}{\eta}$$

$$d\varepsilon = \frac{\sigma_0}{\eta} dt \quad (2.13)$$

integrando a equação 2.13 e levando em consideração a deformação instantânea sofrida pela mola  $\varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E}$ , tem-se que:

$$\varepsilon = \sigma_0 \left( \frac{1}{\eta} + \frac{t}{\eta} \right) \quad (2.14)$$

onde, após um determinado tempo  $t_1$ , se obtém a deformação total desenvolvida no modelo. O que significa que o modelo de Maxwell sob tensão constante, se deformará com velocidade constante e linearmente proporcional a tensão. A figura 2.9b apresenta o esboço do comportamento de fluência deste modelo.

Em um segundo estágio, é fixado o estado de deformação ( $\varepsilon = \varepsilon_1$ ) do material, iniciando em um tempo  $t_1$ . Com isso, a taxa de deformação é nula ( $\dot{\varepsilon} = 0$ ), dessa forma:

$$\frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} = 0$$

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = -\frac{E}{\eta} dt \quad (2.15)$$

integrando a expressão 2.15, obtém-se o comportamento de recuperação do material:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\left(\frac{-E}{\eta}\right)t} \quad (2.16)$$

a expressão acima mostra uma variação exponencial, onde  $\frac{E}{\eta}$  tem a dimensão associada ao tempo, sendo dessa forma denominada por tempo de relaxação. Com isso, conclui-se que este modelo representa o fenômeno de relaxação.

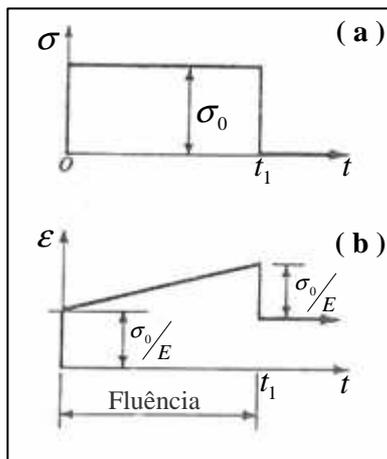


Figura 2.9 – Comportamento de fluência de um modelo de Maxwell. (a) Esboço da tensão em função do tempo. (b) Esboço do comportamento de fluência.(Popov, 1978)

Após analisar o comportamento dos modelos de Maxwell e de Voigt-Kelvin, conclui-se que o segundo representa de forma satisfatória o comportamento de fluência, porém não se mostrou adequado para o fenômeno de relaxação, ao contrário deste, o modelo de Maxwell representa satisfatoriamente o comportamento de relaxação, porém não o de fluência.

Dessa forma, o comportamento de um material viscoelástico pode ser representado pelo acoplamento destes dois modelos, já que juntos apresentam o comportamento de fluência e de relaxação, que são fenômenos característicos dos materiais viscoelásticos.

### 2.3.3 Modelo de Zener

O modelo de Zener é um modelo viscoelástico constituído por uma mola e um modelo de Maxwell em paralelo, como ilustra a figura 2.10. A seguir é feita a dedução da equação que descreve o comportamento deste sistema e, logo após, são apresentados alguns resultados adquiridos numericamente por Sias e Creus (2004).

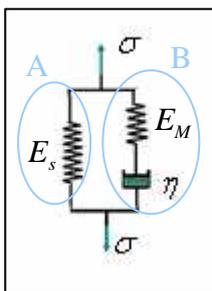


Figura 2.10 – Modelo de Zener.  
Indicado em A, a mola e em B, o modelo de Maxwell.

Observa-se na figura 2.10 que na parte A, tem-se o movimento da mola, expressa pela equação 2.2, e em B, o comportamento do modelo de Maxwell, representado pela equação 2.12. Ambas expressões foram reescritas levando em consideração os índices A e B, indicando as partes seleccionadas na figura acima:

$$\sigma_A = E_s \varepsilon_A \tag{2.17}$$

$$\frac{d\varepsilon_B}{dt} = \frac{1}{E_M} \frac{d\sigma_B}{dt} + \frac{\sigma_B}{\eta} \tag{2.18}$$

onde: os índices *s* e *M* referissem à mola (“spring”) e ao modelo de Maxwell, respectivamente.

A equação 2.18 pode ser escrita como:

$$\sigma_B = \eta \frac{d\varepsilon_B}{dt} - \frac{\eta}{E_M} \frac{d\sigma_B}{dt} \tag{2.19}$$

Como o modelo de Maxwell e a mola estão em paralelo, a deformação de ambos são iguais e a tensão externa  $\sigma$  é o somatório de  $\sigma_A$  e  $\sigma_B$ , ou seja:

$$\varepsilon_A = \varepsilon_B = \varepsilon \tag{2.20}$$

$$\sigma = \sigma_A + \sigma_B \tag{2.21}$$

então:

$$\frac{d\varepsilon_A}{dt} = \frac{d\varepsilon_B}{dt} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.22)$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{d\sigma_A}{dt} + \frac{d\sigma_B}{dt} \quad (2.23)$$

Substituindo as equações 2.17 e 2.19 na expressão 2.21; e levando em consideração 2.20 e 2.22, tem-se que:

$$\sigma = E_s \varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{\eta}{E_M} \frac{d\sigma_B}{dt} \quad (2.24)$$

derivando a equação 2.17 e substituindo em 2.23, obtém-se  $\frac{d\sigma_B}{dt}$ :

$$\frac{d\sigma_B}{dt} = \frac{d\sigma}{dt} - E_s \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.25)$$

Substituindo 2.25 em 2.24, obtém a equação que descreve o comportamento do modelo de Zener, a equação 2.26:

$$\begin{aligned} \sigma &= E_s \varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{\eta}{E_M} \left( \frac{d\sigma}{dt} - E_s \frac{d\varepsilon}{dt} \right) \\ \sigma &= E_s \varepsilon + \eta \left( 1 + \frac{E_s}{E_M} \right) \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{\eta}{E_M} \frac{d\sigma}{dt} \end{aligned} \quad (2.26)$$

Segundo Creus e Sias (2004) o modelo de Zener representa de forma satisfatória um material viscoelástico. Os próprios desenvolveram um método incremental para a simulação de materiais viscoelásticos, descrito no anexo A, com a finalidade de identificar diferenças entre os comportamentos representados pelo modelo de Voigt-Kelvin (figura 2.6) e pelo modelo de Zener (figura 2.10), cuja relação matemática é dada pela equação 2.26.

A tabela 2.1 apresenta os parâmetros adotados por Sias e Creus (2004) para resolução numérica dos modelos de Voigt-Kelvin e Zener.

Tabela 2.1 – Parâmetros utilizados nos modelos de Kelvin e Zener (SIAS E CREUS, 2004).

Modelo de Voigt-Kelvin	Modelo de Zener
$m = 10.0g$	$m = 10.0g$
$m = 100.0 N/m$	$k = 100.0 N/m$ ; $k_1 = 10.0 N/m$ e $1000.0 N/m$
$c = 5.0 N.s/m$	$c = 5.0 N.s/m$

Antes de analisar as diferenças entre os comportamentos de ambos modelos, Sias e Creus (2004) compararam cada um deles com respostas analíticas, utilizando os mesmos parâmetros da tabela 2.1. As figuras 2.11 e 2.12 mostram estas comparações. Segundo Sias e Creus (2004), a solução analítica do modelo de Zener foi obtida por Volterra (1965), dada pela equação abaixo, cuja dedução está no anexo B.

$$\varepsilon = C_1 e^{-\left(\xi \left(\frac{\omega_0^2}{\omega_1^2}\right)\right)t} + e^{-\left(\xi \frac{E_M}{2m\omega_1^2}\right)t} (C_2 \cos(\omega_1 t) + C_3 \text{sen}(\omega_1 t)) \tag{2.27}$$

onde:  $\omega$  é a frequência natural;  $\xi$  é o tempo de relaxação  $\left(\xi = \frac{E_M}{\eta}\right)$ ;

e por definição:  $\omega_0^2 = \frac{E_s}{m}$  e  $\omega_1^2 = \omega_0^2 + \frac{E_M}{m}$

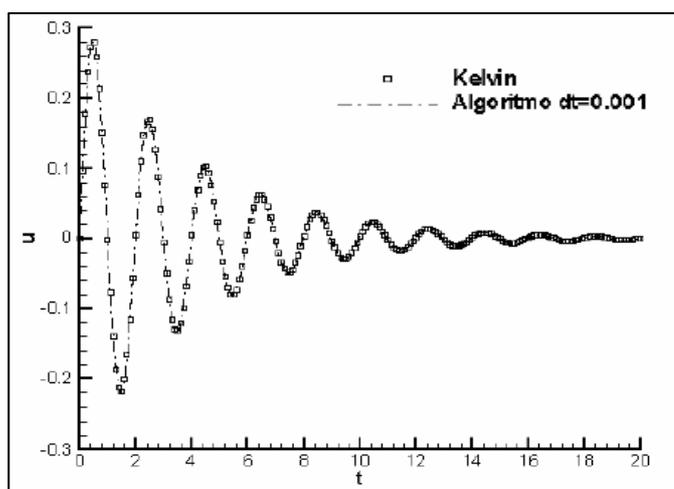


Figura 2.11 - Comparação entre a resposta analítica do modelo de Kelvin e a obtida pelo método incremental ( $\Delta t = 0,001$ ) de Sias e Creus (2004) (SIAS E CREUS, 2004).

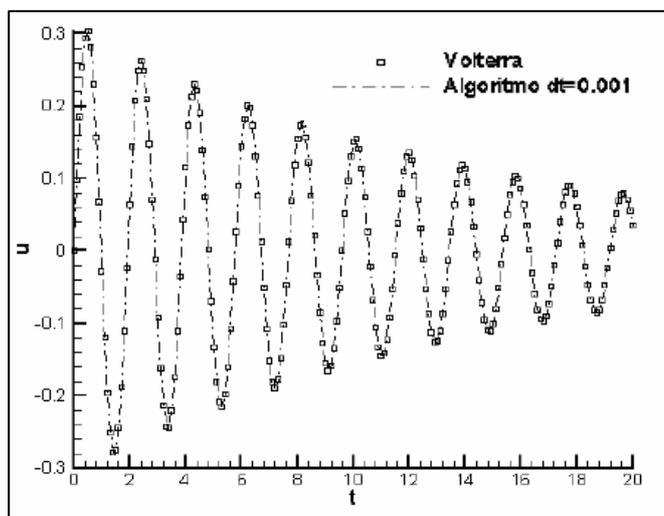


Figura 2.12 - Comparação da resposta analítica do modelo de Zener com a do método incremental ( $\Delta t = 0,001$ ) de Sias e Creus (2004) (SIAS E CREUS, 2004).

Creus e Sias (2004) concluíram, entre outras coisas, que o modelo de Zener, mesmo sendo o mais simples do tipo Maxwell, já mostra diferenças significativas em relação ao modelo de Voigt-Kelvin; e que é necessário o uso de modelos viscoelásticos mais elaborados para simular o comportamento de materiais que apresentam um comportamento mais complexo.

É conveniente salientar, que neste trabalho não é desenvolvido nenhum método numérico de solução de equações diferenciais, pois não é um dos objetivos deste estudo. O método incremental feito por Creus e Sias (2004) está no anexo A com a finalidade de incentivar estudos baseados na criação de novos métodos numéricos que apresente maior velocidade de solução e melhor estabilidade em termos de resolução.

A partir destes resultados foi possível fazer uma primeira avaliação do funcionamento do programa construído para realização neste trabalho. Validando-o para simulação do comportamento dinâmico de materiais viscoelásticos, sem apontar um material específico.

### **3. MATERIAL E METODOLOGIA**

Foi construído um programa de simulação numérica de cabos viscoelásticos submetido a esforços externos até que ocorra o rompimento. Considerou-se que o comportamento dos mesmos é uma sobreposição dos multifilamentos que os constituem. Tendo isto em vista, cada multifilamento do cabo teve seu comportamento representado por um modelo de Zener, escolhido por representar de forma satisfatória o comportamento destes materiais, de acordo com Sias e Creus (2003).

Inicialmente, os parâmetros do modelo de Zener assumiram os valores da tabela 2.1, sendo posteriormente determinados através de resultados obtidos por ensaios dinâmicos e de tração com multifilamentos de poliéster realizados no laboratório de Análises de Tensões – POLICAB, da Universidade do Rio Grande (FURG). Os resultados experimentais serviram posteriormente para validação do programa para a simulação do comportamento de um componente nas mesmas condições impostas nos ensaios, como especificado mais adiante neste capítulo.

Como o comportamento do material é descrito por equações diferenciais ordinárias, optou-se pelo método de Runge-Kutta para solução das mesmas até a iminência de ruptura.

Na modelagem adotada a ruptura do cabo é uma consequência do rompimento dos multifilamentos do qual é constituído. Contudo, é importante salientar que a finalidade deste trabalho é iniciar um estudo aprofundado sobre as fibras sintéticas destinadas para construção de cabos de ancoragem. Por isso a modelagem foi realizada, tendo como objetivo cabos sintéticos idealizados, conforme explicado na seção 3.1.

#### **3.1 MODELAGEM**

A proposta foi criar um programa numérico mais simples possível, apesar da complexidade do problema, por isso optou-se por equações diferenciais ordinárias e métodos já conhecidos como os de Runge-Kutta. O modelo denominado “*snap*”, que significa ruptura ou estouro, foi feito na linguagem de programação Fortran, sendo a sua construção dividida em etapas.

A primeira foi a construção propriamente dita do modelo, utilizando o método de Runge-Kutta e o modelo de Voigt-Kelvin (figura 2.6) pelo fato de apresentar uma relação viscoelástica mais simples que os demais, como mostra a equação 2.3. Admitiu-se nesta etapa, que a expressão dinâmica extraída do modelo de Voigt-Kelvin, expressão 3.2, representava o comportamento de uma fibra viscoelástica.

$$\sum F = \sigma_{Ext} - \sigma = m \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} \quad (3.1)$$

$$m \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} = \sigma_{Ext} - \left( E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \right) \quad (3.2)$$

onde:  $\sigma_{Ext}$  é a tensão externa aplicada no sistema e  $m$  a massa do equipamento.

Logo após, foi feita uma sub-rotina que simulasse o rompimento do multifilamento, baseado em uma função de probabilidade dependente somente da deformação axial do mesmo.

Considerou-se que para uma deformação de até 10% o componente permaneceria intacto como um novo e a partir desse valor, poderia romper a qualquer momento, tendo o limite máximo de 20%. Estabeleceu-se estes parâmetros de acordo com Smeets (2001) para um cabo de HMPE. A ruptura ou não do material foi feita pela comparação entre dois parâmetros: a deformação em percentagem e um valor selecionado aleatoriamente por uma sub-rotina pseudo-aleatória implementada no programa.

A segunda etapa foi aplicar os parâmetros da tabela 2.1 no modelo de Voigt-Kelvin e comparar com os obtidos por Sias e Creus (2004), apresentados na figura 2.11.

Após o uso do modelo de Voigt-Kelvin foi utilizado o modelo de Zener (figura 2.10) para um sistema dinâmico, cuja expressão é dada por:

$$m \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} = \sigma_{Ext} - \left[ E_s \varepsilon + \eta \left( 1 + \frac{E_s}{E_M} \right) \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{\eta}{E_M} \frac{d\sigma}{dt} \right] \quad (3.3)$$

utilizando novamente os parâmetros da tabela 2.1 para este modelo, cujos resultados foram comparados com os da figura 2.12 adquiridos também por Sias e Creus (2004).

Concluídas estas etapas iniciais, a seguinte foi estruturar o cabo viscoelástico no modelo, tendo em vista que o equipamento em estudo é um cabo de ancoragem, cuja arquitetura e características gerais estão expostas na seção 2.1.1, do segundo capítulo.

Para diminuir a complexidade do problema, considerou-se um cabo ideal, ou seja, o ângulo de hélice é nulo para todos os componentes do mesmo, sendo desta forma, constituído por um conjunto de multifilamentos distribuídos paralelamente ao seu eixo longitudinal, como ilustra a figura 3.1. Admitiu-se também que o mesmo está totalmente emerso, exposto na vertical e submetido a esforços axiais, desprezando qualquer interação com o meio externo.



Figura 3.1 - Cabo ideal. (a) Corte longitudinal do cabo. (b) Corte transversal do cabo ideal.

No programa construído, considerou-se que o comportamento de cada componente é representado por um modelo de Zener (figura 2.10). Sendo assim, o comportamento do cabo é uma sobreposição dos componentes, dado pelo somatório dos modelos de Zener, em outras palavras, o comportamento do cabo é dado pelo conjunto de vários modelos de Zener em paralelo (figura 3.2) onde a solução é obtida pelo método de Runge-Kutta utilizando um passo de integração fixo de  $h = 10^{-7}$  s.

O passo de integração foi determinado através da comparação de dois valores: a diferença entre duas iterações consecutivas e um erro de tolerância dado por  $\varphi = 10^{-3}$ , escolhido de acordo com a ordem de grandeza dos dados de deformação adquiridos através de ensaios experimentais. Quando a diferença entre duas iterações resulta em um valor menor que do que a tolerância considerada, então se pode dizer que essa diferença converge a um valor fixo, que é aproximadamente igual a zero. Isto significa que o passo de integração testado é satisfatório, pois indica que há continuidade no movimento do sistema.

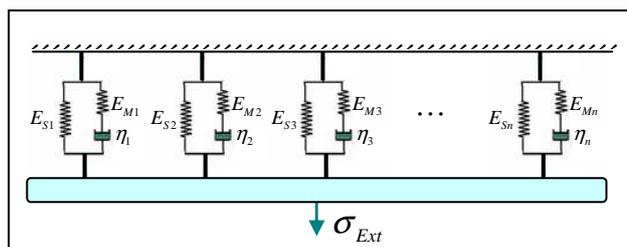


Figura 3.2 – Modelos de Zener em paralelo.

Para estimar o número de multifios existentes em um cabo foi feita a contagem do número de componentes em três pernas de uma alma de um cabo real de poliéster (figura 3.3) cedida pelo Laboratório de Análise de Tensões – POLICAB , cujos valores foram: 672, 657 e 660 multifilamentos. Destes resultados foi feito uma média aritmética, adotando assim 663 para cada perna. Sabendo que o cabo em questão possui sete sub-cabos com doze pernas cada uma, estabeleceu-se que o cabo apresenta aproximadamente 55.692 multifios.



Figura 3.3 – Alma de poliéster. (a) Alma de Poliéster cedida pelo POLICAB. (b) Contagem de multifilamentos existentes em uma perna.

A quarta etapa foi criar uma sub-rotina que selecionasse os parâmetros que caracterizam cada multifio do cabo. Permitindo, dessa forma, modelar, também, o comportamento de um cabo composto por multifilamentos de materiais diferentes. Para isso, a distribuição dos componentes foi baseada em uma progressão aritmética de razão seis, em virtude de que cada multifio está em contato com outros seis multifilamentos, a partir da

segunda camada do cabo, sendo a primeira, o multifio que se encontra no eixo central do mesmo, como ilustra a figura 3.4.

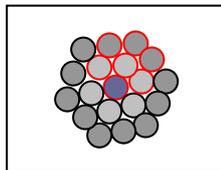


Figura 3.4 – Distribuição dos multifilamentos do cabo, da primeira à terceira camada. O multifilamento em azul localiza-se no eixo central do cabo. O contorno vermelho indica que cada componente é envolvido por outros seis.

O atrito entre os multifilamentos é levado em consideração somente quando em contato com outro rompido, pelo fato de ser muito pequeno durante a deformação dos componentes, que ocorre no mesmo sentido. A sub-rotina criada para selecionar os multifios do cabo, identifica também os que já foram rompidos e quais multifilamentos serão influenciados por esses, que serão eliminados do processo de modelagem contribuindo apenas com o atrito.

Considerou-se na modelagem que a ruptura dos multifilamentos depende apenas da deformação axial do cabo submetido a esforços externos, cujas condições de rompimento são as mesmas usadas na primeira etapa, até 10% da deformação o cabo permanece com as mesmas propriedades de um cabo novo e a partir de 20% os multifios podem romper a qualquer momento e, com isso, iniciando o processo de rompimento do cabo. É importante salientar, que estas condições de ruptura, também citadas anteriormente neste capítulo, podem ser igualmente aplicadas no cabo, pois todos os filamentos apresentam a mesma deformação axial, já que se encontram em paralelo. Dessa forma, rompimento do cabo se dá através da ruptura dos multifios que o constitui.

Após a montagem do programa, a quinta etapa foi caracterizada por implementar características de fibras reais. Para tanto foram realizados ensaios dinâmicos e de tração com multifilamentos de poliéster, permitindo assim encontrar novos valores para os parâmetros  $E_s$ ,  $E_M$  e  $\eta$  do modelo de Zener. A metodologia aplicada para realização dos ensaios experimentais é apresentada na seção 3.2.

Os resultados experimentais também permitiram estimar a chance de ruptura dos multifios de poliéster, já que nos ensaios de tração, os multifilamentos foram submetidos a esforços externos até a ocorrência do rompimento, dessa forma, foi possível estabelecer e

implementar no programa as novas condições de ruptura dos multifilamentos a cada passo de integração.

No programa construído (*snap*), a ruptura ou não do próprio é determinada pela comparação entre dois valores: o da função que descreve a chance de rompimento do multifio e um valor selecionado aleatoriamente (entre 0 e 100) por uma sub-rotina pseudo-randômica implementada no programa *snap*.

O programa *snap* permite a simulação tanto de multifilamentos viscoelásticos como de cabos sintéticos. Ele possibilita também ao usuário escolher o número de multifios dispostos em paralelo e se os parâmetros que descrevem as características do material serão fornecidos para cada multifilamento ou será utilizada uma média de cada parâmetro. Para realização das simulações numéricas foram usados parâmetros médios para o comportamento de multifilamentos de poliéster. O fluxograma do programa é apresentado no apêndice A.

### 3.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Com o programa em funcionamento, houve a necessidade de realizar ensaios com o objetivo de determinar os parâmetros  $E_s$ ,  $E_M$  e  $\eta$  e as novas condições de ruptura dos multifilamentos de forma a representar especificamente a fibra de poliéster.

Em ambos experimentos utilizou-se a máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL500 e multifios de poliéster cedidos pelo Laboratório de Análise de Tensões – POLICAB. O equipamento possui garras pneumáticas especiais para ensaios com filamentos ou multifilamentos de fibras sintéticas, apresentando um sistema de medição de deslocamento, tendo como variáveis de saída o tempo (s), a deformação do componente (mm) e a tensão (N), com a possibilidade de escolha da velocidade de ensaio, possuindo uma carga limite de 100kgf (1000N).

O multifilamento de poliéster utilizado foi o Diolen® 855 TN F210 2200 dtex. O comprimento inicial dos corpos de prova eram de  $300\text{mm} \pm 1\text{mm}$ , submetidos às seguintes condições ambientais: umidade relativa do ar de  $55 \pm 2\%$  e temperatura de  $24 \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ . A figura 3.5 ilustra um corpo de prova na máquina de ensaios.



Figura 3.5 – Corpo de prova.

Os gráficos obtidos nos ensaios dinâmicos e de tração encontram-se nos apêndices C e B, respectivamente. A partir destes resultados foi possível estimar as propriedades do material, como rigidez e amortecimento, e conseqüentemente os parâmetros do modelo viscoelástico. Os resultados permitiram também validar o programa para simulação do comportamento de um multifilamento de poliéster, submetido a esforços externos com velocidade de ensaio constante e considerando as mesmas condições ambientais e parâmetros de ensaio.

### 3.2.1. Ensaio de Tração e Determinação do Módulo de Elasticidade do Material

Foram feitos inicialmente 150 ensaios estáticos com uma velocidade de ensaio de 250 mm por minuto, até a ruptura dos multifilamentos. Após excluir os resultados notoriamente fora dos limites aceitáveis, os valores de ruptura foram analisados estatisticamente com o uso do programa Arena<sup>®</sup>, que possibilita a aplicação do teste de aderência nos dados, facilitando assim a análise.

Através dos resultados foi possível determinar o tamanho da amostra suficiente para representar a média de ruptura populacional:

$$T = \left[ \frac{\delta \cdot z_{\alpha/2}}{Er} \right]^2 \quad (3.4)$$

onde:  $z_{\alpha/2}$  é o valor crítico;  $\delta$ , o desvio padrão populacional e  $Er$  é o erro máximo permitido nas medições.

O tamanho da amostra foi determinado com 95% de confiança, sendo, dessa forma, o valor crítico  $z_{\alpha/2}$  igual a 1,96, de acordo com a tabela A.4 (ANEXO D) (TRIOLA, 1999) e foi considerado um erro ( $Er$ ) de 0,18mm. Segundo Triola (1999), quando o desvio padrão populacional  $\delta$  é desconhecido e o tamanho da amostra é maior do que trinta ( $T > 30$ ) é possível substituí-lo pelo desvio padrão amostral  $\Phi$ , estimado pela seguinte expressão:

$$\Phi = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})}{T}} \quad (3.5)$$

onde:  $x$  e  $\bar{x}$  representam a variável e a média da amostra, respectivamente; e  $T$ , o tamanho da amostra.

Como o tamanho da amostra se mostrou insuficiente para estimar a média de ruptura populacional foi necessário utilizar uma amostra com tamanho superior a 271 dados, para a estimativa de erro anteriormente citada. Com isso, foi realizado o mesmo número de ensaios anteriormente feitos, totalizando 300 ensaios.

Ao analisar graficamente os resultados (APÊNDICE B) observou-se que há relativamente consideráveis diferenças no comprimento de ruptura dos multifilamentos, porém os próprios apresentam um comportamento característico, possibilitando trabalhar com o comportamento médio dos multifilamentos de poliéster. A figura 3.6 mostra o comportamento característico de um multifilamento de poliéster.

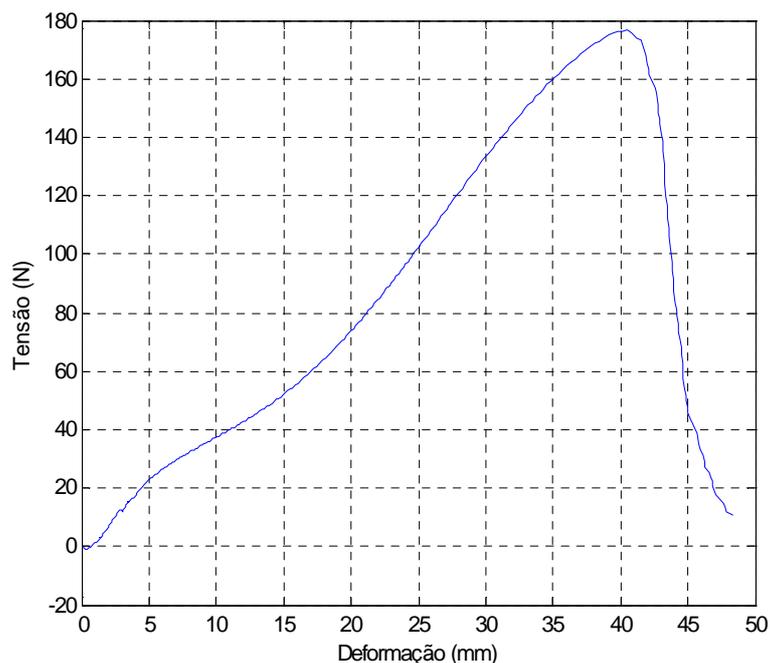


Figura 3.6 – Resposta do ensaio de tração com um multifilamento de poliéster de 300mm de comprimento. O multifilamento é submetido a esforços externos até a ruptura. Velocidade de ensaio: 250mm/min.

Tendo isto em vista, foi selecionado um grupo de curvas considerando apenas a probabilidade de ruptura dos multifios.

Dos resultados obtidos, cinquenta e cinco (55) curvas com diferentes níveis de ruptura foram selecionadas: seis (6) delas com baixa deformação, ou seja, rompimentos ocorridos com deformações menores que 38mm; quarenta e três (43), com deformações entre 38mm e 39mm; e seis (6) curvas com alta deformação de ruptura (maiores que 39mm). A tabela D.1 (APÊNDICE D) indica os arquivos e os respectivos corpos de prova utilizados para fazer o ajuste de curvas, cujos gráficos e as informações de ruptura encontram-se no apêndice B. Através do agrupamento das curvas em um único gráfico de tensão-deformação foi feito um ajuste de curvas usando o método de mínimos quadrados, com 95% de confiança.

O ajuste da função aos dados foi analisado pelo coeficiente múltiplo de determinação  $R^2$  e pelo coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$  ajustado). Segundo Triola (1997), aquele é uma medida da aderência da equação de regressão aos dados amostrais; que a contra partida apresenta uma séria falha: na medida em que se incluem mais variáveis,  $R^2$  aumenta (poderia se manter o mesmo, mas em geral aumenta). Conseqüentemente, é mais seguro usar o coeficiente de determinação ajustado, ao comparar diferentes equações de regressão múltipla

porque ele ajusta o valor de  $R^2$  com base no número de variáveis e no tamanho da amostra (TRIOLA, 1997). Quanto mais próximos do valor 1,0 estiverem estes coeficientes, e mais próximo de zero estiver o erro, melhor será o ajuste da função sobre os dados.

Como a rigidez do material pode ser obtida através da derivada de  $\sigma_{Ext}$  em relação à deformação (equação 3.6); a própria foi determinada pela derivada do polinômio obtido através do ajuste de curvas,

$$E = \frac{d\sigma_{Ext}}{d\varepsilon}, \quad (3.6)$$

representando, dessa forma, a rigidez média das curvas selecionadas.

Foi feito também um ajuste de curvas no gráfico tensão-tempo (utilizando o mesmo grupo de curvas), com a finalidade de simular numericamente o ensaio estático realizado no laboratório, validando, assim, o programa construído para esse caso.

### 3.2.2. Ensaio Dinâmico e Determinação do Módulo de Amortecimento do Material

Foram realizados treze ensaios dinâmicos com multifilamentos de poliéster aplicando diferentes ciclos com o objetivo de estimar o valor do amortecimento do material (APÊNDICE C).

Os resultados obtidos foram utilizados para determinar o amortecimento do material, chamado de *estrutural* ou *histerético*, que é causado pelo atrito entre fibras internas do multifilamento que deslizam entre si quando o material é deformado. Observa-se experimentalmente que se forma um ciclo de histerese na curva tensão-deformação, como mostra a figura 3.6.

De acordo com Popov (1978), a energia perdida é igual à área interna do ciclo de histerese:

$$\Delta W = \pi \omega \eta \varepsilon^2 \quad (3.7)$$

Desta forma, os ensaios de tração cíclicos permitem traçar as curvas de histerese para o material em estudo. A partir do cálculo da área gerada é possível determinar a constante de amortecimento equivalente.

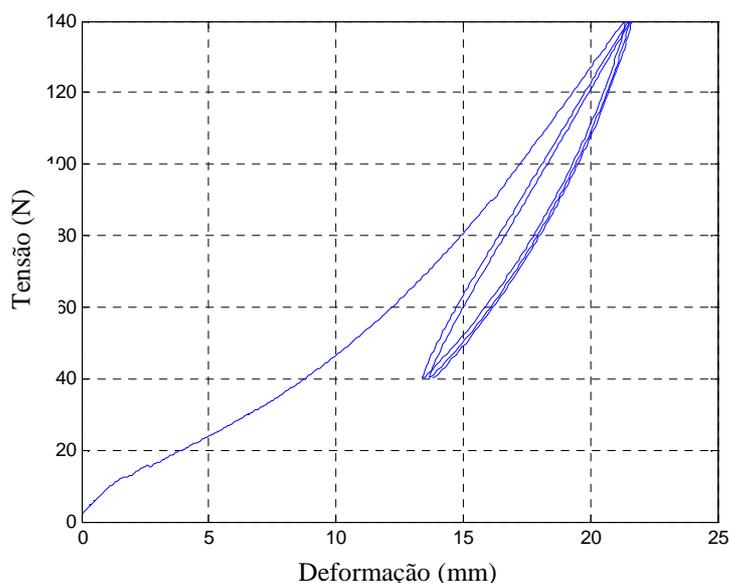


Figura 3.7– Resposta do ensaio dinâmico com um multifilamento de poliéster de 300mm de comprimento. O gráfico também mostra a histerese gerada pela extensão e contração do multifilamento em função da tensão aplicada. Velocidade de ensaio: 3N/s.

Para determinar a área interna do ciclo de histerese foram estimadas as áreas abaixo das curvas inferior e superior, pelo método de Simpson (SANTOS E SILVA, 2006); a diferença entre ambas, resultou no valor da área do ciclo de histerese, que foi substituído na equação 3.7, estimando assim, o amortecimento do material em estudo, ou seja, do multifilamento de poliéster.

### 3.2.3. Determinação dos Parâmetros $E_s$ , $E_M$ e $\eta$

Após a realização dos ensaios, feita a análise dos dados obtidos e determinado os valores de rigidez e de amortecimento do material, o próximo passo foi estimar os parâmetros  $E_s$ ,  $E_M$  e  $\eta$  do modelo de Zener.

Estes valores foram determinados através do método dos mínimos quadrados, com 95% de confiança.

Os parâmetros estimados foram inseridos no modelo de Zener e com o programa construído foi simulado o comportamento de um multifilamento de poliéster, considerando as mesmas condições impostas nos ensaios de tração, com a finalidade de comparar os

resultados numéricos com os experimentais e validar o modelo para a simulação de um multifilamento de poliéster. Outras simulações foram feitas aplicando situações diversas, bem como a variação do número de multifilamentos em paralelo.

### **3.2.4. Determinação das condições de rompimento do multifilamento**

Para determinar as condições de ruptura dos multifilamentos de poliéster foi necessário determinar uma função que descrevesse a chance de ruptura de cada multifio ao longo do tempo.

Admitiu-se neste programa inicial, que a chance de ruptura depende apenas da deformação axial do multifilamento em percentagem, possibilitando, dessa forma, modificar o comprimento inicial do próprio para diferentes situações.

Através da análise estatística dos resultados de tração foi possível estimar a chance de ruptura dos multifilamentos pelo método dos mínimos quadrados com 95% de confiança.

A função que determina a chance de rompimento dos multifilamentos foi implementada no programa *snap*, possibilitando estabelecer as condições de rompimento dos multifilamentos.

Como já foi escrito na seção 3.1 a condição de rompimento ou não do próprio é determinada pela comparação entre dois valores: a chance de rompimento do multifio e um valor selecionado aleatoriamente por uma sub-rotina pseudo-aleatória também implementada no programa. Como é feita esta comparação é apresentada no próximo capítulo, na seção 4.1.5.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Este capítulo apresenta as análises e discussões dos resultados provenientes dos ensaios experimentais e os valores estimados para os módulos de elasticidade e de amortecimento do multifilamento de poliéster. São apresentados também os valores dos parâmetros do modelo de Zener; e os resultados obtidos numericamente pelo programa construído, para as simulações com um multifilamento de poliéster, um conjunto de multifios e um cabo viscoelástico até sua ruptura. Além disso, mostra a comparação entre os resultados numéricos e os resultados experimentais para a simulação do comportamento de um multifilamento de poliéster, considerando os parâmetros de ensaio.

### **4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

Os resultados obtidos nos ensaios de tração foram analisados estatisticamente aplicando o teste de aderência para identificar qual função se ajusta melhor aos dados de ruptura. Dessa forma, foram definidos os parâmetros estatísticos a serem usados para estimar o tamanho da amostra necessária para determinar a média da deformação de ruptura populacional. A seguir são apresentados os resultados das análises da primeira mostra e da amostra representativa, respectivamente. Após a análise estatística, são discutidos os resultados dos ensaios dinâmicos e de tração, cujos relatórios de ensaio encontram-se nos apêndices C e B, respectivamente. Além disso, são mostrados os valores estimados para o módulo de elasticidade e de amortecimento do multifilamento de poliéster.

#### **4.1.1 Estimativa do tamanho da amostra**

Primeiramente foram feitos 150 ensaios, sendo este o tamanho da amostra 1. Após uma análise inicial, foram excluídos os resultados notoriamente fora dos limites aceitáveis, que somaram sete no total, com isso esta amostra passou a conter 143 dados. A tabela 4.1 apresenta algumas informações destes dados.

Tabela 4.1 – Informações da primeira amostra de dados. Para a análise da deformação de ruptura dos multifilamentos de poliéster

<b>Tamanho</b>	$V_{\min}$ (mm)	$V_{\max}$ (mm)	$\bar{x}$ (mm)	$\Phi$ (mm)
143	33,6	42,9	38	1,51

onde:  $\bar{x}$  é a média de ruptura da amostra e  $\Phi$ , o desvio padrão amostral.

Foi feito o teste de aderência utilizando várias distribuições, como mostra a tabela 4.2. A partir do valor do erro ao quadrado foi possível determinar qual função se ajusta melhor aos dados.

Tabela 4.2 – Teste de aderência para os dados da primeira amostra.

<b>Função</b>	<b>(Erro)<sup>2</sup></b>
<i>Normal</i>	0,00462
<i>Weibull</i>	0,00667
<i>Beta</i>	0,00793
<i>Erlang</i>	0,0169
<i>Gamma</i>	0,0181
<i>Triangular</i>	0,0216
<i>Lognormal</i>	0,0318
<i>Uniforme</i>	0,0808

Como pode ser visto na tabela 4.2 os dados se ajustam melhor à função normal com um erro quadrático de 0,00462. A figura 4.1 mostra o histograma para esta amostra.

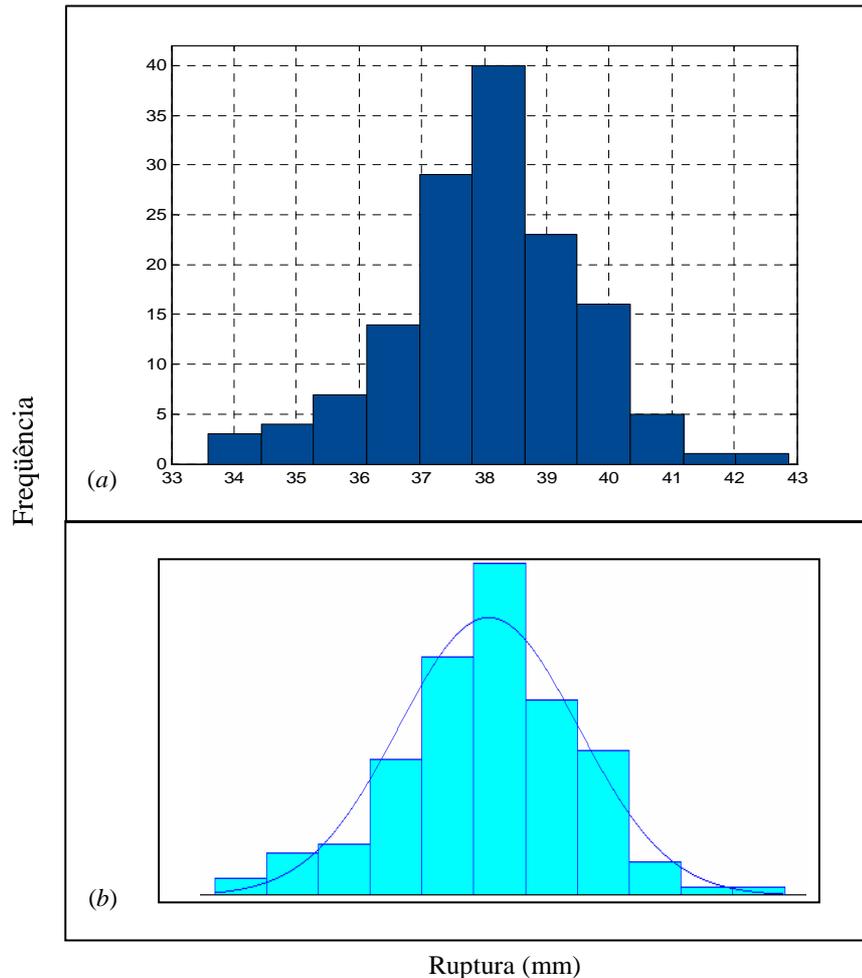


Figura 4.1 – Histograma dos dados de ruptura da primeira amostra. Com número de intervalo igual a 11. (a) indica os valores deformação versus frequência e (b), a função distribuição normal.

A aderência da função distribuição normal aos dados foi confirmada com a aplicação do teste Qui-quadrado e do teste de Kolmogorov-Smirnov. Aquele apresentou um valor estatístico  $\chi_0^2 = 2,79$  e  $p=0,439$ , com número de intervalo igual a seis e com três graus de liberdade, já o outro apresentou um valor estatístico igual a 0,0452 e  $p>0,15$ .

Para analisar o valor estatístico Qui-quadrado  $\chi_0^2$  adquirido no programa Arena<sup>®</sup> foi determinado o valor crítico  $\chi_c^2$ , extraído da tabela D.1 (ANEXO D), considerando três graus de liberdade e 95% de confiança ( $\alpha/2 = 0,025$ ). O valor crítico resultou em 9,348, sendo assim,  $\chi_0^2 < \chi_c^2$  (4,19 e 9,34, respectivamente), significando que a curva se ajusta aos dados obtidos. Como  $p$  é maior do que 0,05, também indica que os dados aderem à função normal.

Como a distribuição normal adere aos dados foi possível estimar o tamanho da amostra através da equação 3.11, aplicando os valores da tabela 4.1, admitindo um erro máximo de medição de 0,18mm. Dessa forma, o tamanho da amostra necessária para representar a ruptura média populacional é de 271 dados. Tendo isto em vista, foram feitos mais 150 ensaios de tração.

Os resultados obtidos da segunda amostra, após analisados, foram agregados aos da primeira formando uma amostra representativa de 284 dados. A tabela 4.3 mostra algumas informações sobre esta amostra.

Tabela 4.3 – Informações sobre a amostra representativa dos dados de deformação de ruptura dos multifilamentos de poliéster

<b>Tamanho</b>	$V_{\min}$ (mm)	$V_{\max}$ (mm)	$\mu$ (mm)	$\delta$ (mm)
284	33,6	42,9	38,3	1,70

onde:  $\delta$  é o desvio padrão populacional e  $\mu$ , a média populacional.

A média e o desvio padrão destes dados (tabela 4.3) passam a representar os valores populacionais, já que é uma amostra de tamanho maior que 30. O teste de aderência foi aplicado utilizando a mesma metodologia aplicada nos dados da primeira amostra. A tabela 4.4 mostra estes resultados.

Tabela 4.4 – Teste de aderência para os dados da amostra representativa.

<b>Função</b>	<b>(Erro)<sup>2</sup></b>
<i>Normal</i>	0,00349
<i>Weibull</i>	0,00434
<i>Beta</i>	0,00706
<i>Triangular</i>	0,0166
<i>Erlang</i>	0,0167
<i>Gamma</i>	0,0177
<i>Lognormal</i>	0,0305
<i>Uniforme</i>	0,0958
<i>Exponencial</i>	0,161

Como pode ser visto na tabela 4.4 os dados se ajustam melhor à distribuição função normal com um erro quadrático de 0,00349. A figura 4.2 mostra o histograma.

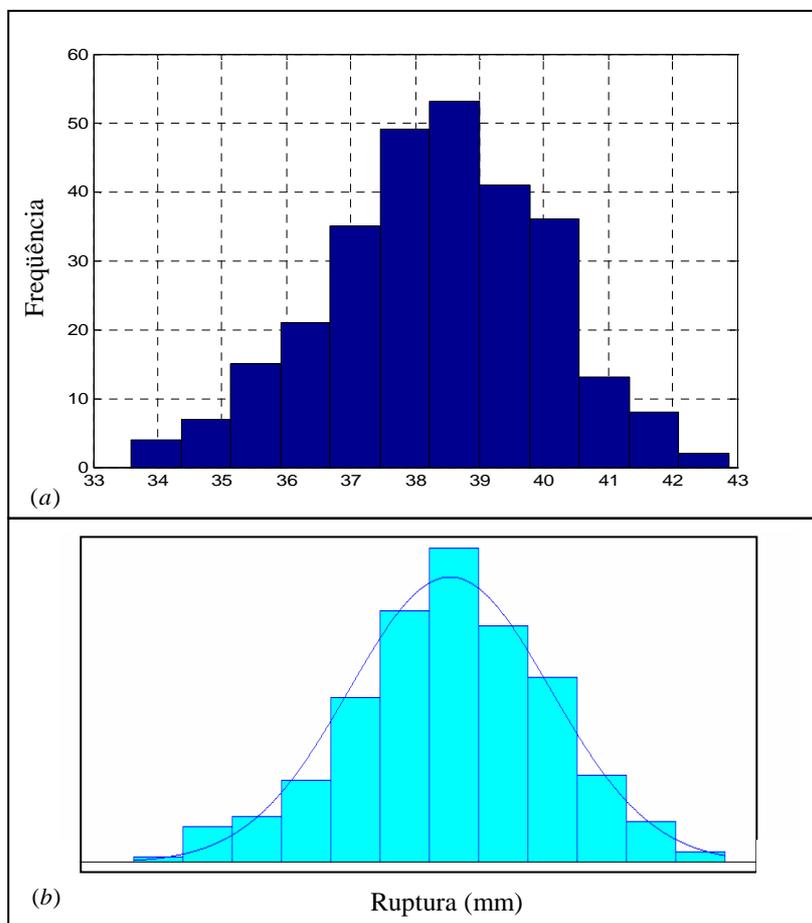


Figura 4.2 – Histograma dos dados de ruptura da amostra representativa. Com número de intervalo igual a nove. (a) indica os valores de deformação versus frequência e (b), a função distribuição normal.

A aderência da função distribuição normal aos dados foi confirmada com a aplicação do teste Qui-quadrado e do teste de Kolmogorov-Smirnov. O primeiro apresentou um valor estatístico  $\chi_0^2 = 3,49$  e  $p=0,745$ , com número de intervalo igual a nove e com seis graus de liberdade. Já o teste Kolmogorov-Smirnov, apresentou um valor igual a 0,0379 e  $p>0,15$ .

O valor crítico  $\chi_c^2$  foi extraído da tabela de distribuição Qui-quadrado (ANEXO D), considerando seis graus de liberdade e 95% de confiança ( $\alpha/2 = 0,025$ ), resultando em 14,449. Como  $\chi_0^2 < \chi_c^2$  (3,49 e 14,449, respectivamente), então significa que a curva se ajusta

aos dados obtidos. Como, no teste de Kolmogorov-Smirnov,  $p > 0,05$  também significa que os dados aderem à função normal.

#### 4.1.2 Resultados dos Ensaio Dinâmicos e do Amortecimento do Material

Dos resultados obtidos apenas uma curva foi selecionada para determinar o amortecimento do material a partir do cálculo da área de histerese, a figura 3.8 mostra o resultado experimental.

Aplicando a metodologia escrita na seção 3.2.2, do capítulo 3, para calcular a área da histerese, obteve-se como resultado  $1,4 \text{ mm}^2$ , dessa forma o amortecimento do multifilamento de poliéster é estimado em  $2,22 \text{ Ns/m}$ .

#### 4.1.3 Resultados dos Ensaio de Tração e da Rigidez do Material

Na tabela D.1 (APÊNDICE D) são indicadas as 55 curvas resultantes dos ensaios de tensão selecionadas para determinação da rigidez do material, bem como os respectivos arquivos das quais pertencem. Estas respostas foram agrupadas em um único gráfico possibilitando observar que o material apresenta um comportamento característico, principalmente na fase inicial do comportamento, sendo mais disperso na região de ruptura (figura 4.3).

Dessa forma, foi feito um ajuste de curvas utilizando o método dos mínimos quadrados com a finalidade de determinar a rigidez do material. A função que melhor se ajustou aos resultados foi um polinômio de 5ª ordem:

$$P_{TD} = p_1 \varepsilon^5 + p_2 \varepsilon^4 + p_3 \varepsilon^3 + p_4 \varepsilon^2 + p_5 \varepsilon + p_6 \quad (4.1)$$

onde: o índice  $TD$  significa Deformação versus Tensão;  $\varepsilon$  é a deformação do material e  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ ,  $p_4$ ,  $p_5$  e  $p_6$  os coeficientes do polinômio.

Os coeficientes da equação 4.1 são apresentados na tabela 4.5 e os resultados obtidos se encontram na figura 4.3.

Tabela 4.5 - Coeficientes do polinômio 4.1 (Tensão-deformação).  
Estimados com 95% de confiança.

	<b>Coeficientes</b>	<b>Intervalo de confiança</b>
$p_1$	$7,924 \cdot 10^{-6}$	$(7,632 \cdot 10^{-6}; 8,216 \cdot 10^{-6})$
$p_2$	-0,000994	$(-0,001022; -0,0009661)$
$p_3$	0,04173	$(0,04079; 0,04268)$
$p_4$	-0,6728	$(-0,6864; -0,6593)$
$p_5$	7,887	$(7,812; 7,963)$
$p_6$	0,8031	$(0,6796; 0,9265)$

Embora o coeficiente  $p_1$  (tabela 4.5) seja muito pequeno, a retirada do próprio causa uma grande diferença nos resultados, principalmente na região de ruptura dos multifilamentos como pode ser visto na figura E.1 (APÊNDICE E).

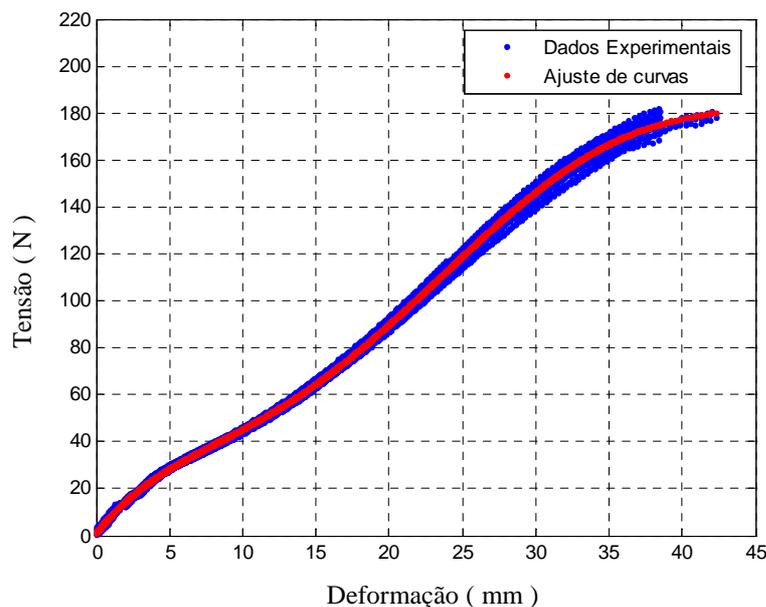


Figura 4.3 Ajuste de curvas do comportamento dos multifilamentos de poliéster.  
Comprimento inicial L de 300mm.

Neste ajuste, coeficiente múltiplo de determinação e o coeficiente ajustado de determinação são iguais a 0,9989, apresentando um erro de 1,632. O resultado do ajuste de curvas pode ser visto na figura 4.3.

Derivando a expressão 4.1, obteve-se a rigidez média do material, cujos coeficientes se encontram na tabela 4.5. O gráfico 4.4 mostra o resultado obtido.

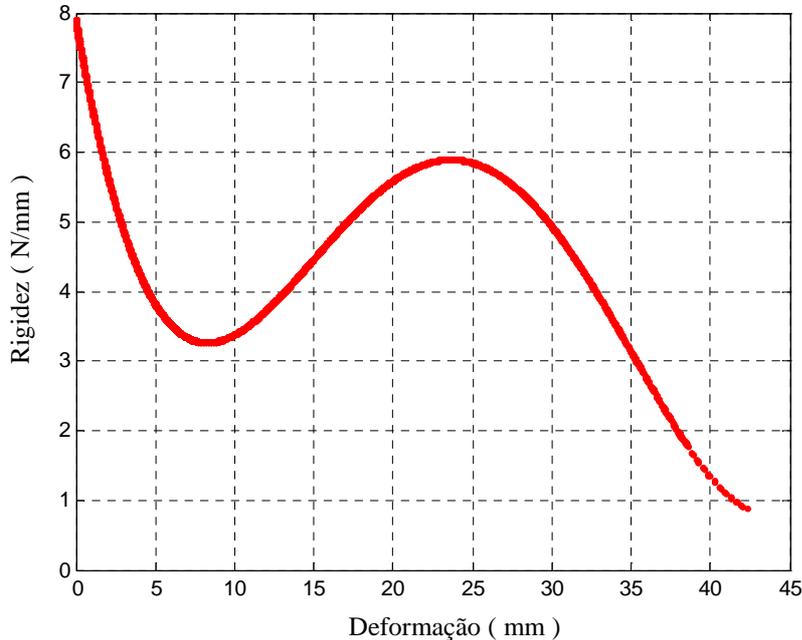


Figura 4.4 - Rigidez média do multifilamento de poliéster. Determinada a partir da derivação da função 4.1, que descreve o comportamento do material

Após a determinação da rigidez e do amortecimento do material, foram determinados os valores dos parâmetros de Zener.

#### 4.1.4 Determinação dos Parâmetros $\eta$ , $E_s$ e $E_M$

Para determinação dos parâmetros foram aplicadas as condições de ensaio e os dados das variáveis tensão e deformação na equação do modelo de Zener, equação 3.12, situada na seção 3.3.3 do capítulo 3.

Como os valores de tensão foram obtidos através dos ensaios experimentais foi possível determinar a taxa de variação desta variável  $\left(\frac{d\sigma}{dt}\right)$ , encontrada na equação de Zener. Para isso, foi necessário encontrar uma expressão que descrevesse a tensão em função do tempo.

O polinômio 4.2 se ajustou melhor aos resultados experimentais e seus coeficientes, que se encontram na tabela 4.6, foram determinados com 95% de confiança através do método dos mínimos quadrados,

$$P_{TT} = p_1t^5 + p_2t^4 + p_3t^3 + p_4t^2 + p_5t + p_6 \tag{4.2}$$

onde: o índice TT significa Tempo versus Tensão;  $t$ , o tempo e  $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5$  e  $p_6$  os coeficientes do polinômio.

Tabela 4.6 – Coeficientes do polinômio 4.2 (Tensão-Tempo).  
Estimados com 95% de confiança.

	<b>Coeficientes</b>	<b>Intervalo de confiança</b>
$p_1$	0,009951	(0,009585; 0,01032)
$p_2$	-0,2996	(-0,308; -0,2912)
$p_3$	3,019	(2,95; 3,087)
$p_4$	-11,68	(-11,92; -11,45)
$p_5$	32,86	(32,55; 33,18)
$p_6$	0,8031	(0,6796; 0,9265)

Neste caso, coeficiente múltiplo de determinação e o coeficiente ajustado de determinação são iguais a 0,9989, com um erro de 1,632. A figura 4.5 mostra o ajuste.

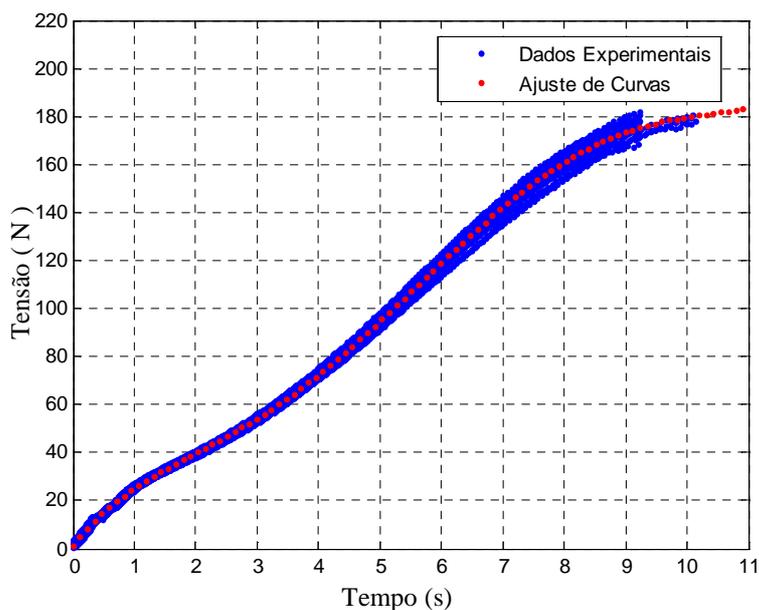


Figura 4.5 – Resultado do ajuste de curvas para Tensão-tempo (L=300mm).

Esta função permitiu estimar a taxa de variação de tensão  $\left(\frac{d\sigma}{dt}\right)$ , obtido através da derivada do polinômio 4.2, cujos coeficientes estão na tabela 4.6.

Obtido os valores da taxa de variação de tensão  $\left(\frac{d\sigma}{dt}\right)$  foi possível determinar os parâmetros do modelo de Zener  $\eta$ ,  $E_s$  e  $E_M$ . Estes parâmetros foram determinados utilizando o mesmo método, ajuste de curvas através do método mínimos quadrados. Porém, em vez de estimar qual função se ajusta melhor aos dados foi utilizada a equação do modelo de Zener, expressão 3.3, e as condições de ensaio apresentadas na seção 3.2 do capítulo 3. Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

Como a rigidez do material é variável optou-se por representar os parâmetros  $E_s$  e  $E_M$  através da derivada da expressão 4.2. Contudo, para um melhor ajuste de curvas, foram desprezados os dois primeiros parâmetros da equação 4.2 para o parâmetro  $E_M$  (equação 4.4), resultando em um polinômio de 2º grau:

$$E_s = 5p_1\varepsilon^4 + 4p_2\varepsilon^3 + 3p_3\varepsilon^2 + 2p_4\varepsilon + p_5 \quad (4.3)$$

$$E_M = 3p_3\varepsilon^2 + 2p_4\varepsilon + p_5 \quad (4.4)$$

cujos coeficientes estimados para  $E_s$  e  $E_M$  se encontram na tabela 4.7 e 4.8, respectivamente.

Tabela 4.7 – Coeficientes para determinação do parâmetro  $E_s$ .  
Estimados com 95% de confiança.

	<b>Coeficientes</b>	<b>Intervalo de confiança</b>
$p_1$	1,548e-006	(1,485.10 <sup>-6</sup> ; 1,612.10 <sup>-6</sup> )
$p_2$	-0,0002433	(-0,000251; -0,0002357)
$p_3$	0,01363	(0,01328; 0,01397)
$p_4$	-0,3286	(-0,3356; -0,3216)
$p_5$	7,771	(7,709; 7,832)

Tabela 4.8 – Coeficientes para determinação do parâmetro  $E_M$ .  
Estimados com 95% de confiança.

	<b>Coeficientes</b>	<b>Intervalo de confiança</b>
$p_3$	-0,2145	(-0,4792; 0,05021)
$p_4$	0,01238	(-0,4962; 0,521)
$p_5$	-0,2836	(-0,5348; -0,03237)

O parâmetro  $\eta$  também foi estimado, sendo igual a 0,004096, com intervalo de confiança entre 0,003484 e 0,004709. Para a obtenção de um bom ajuste de curvas, considerou-se  $m$  igual a 1,0. Para este ajuste o coeficiente múltiplo de determinação e o coeficiente ajustado de determinação são iguais a 0,9988, com um erro de 1,63. A figura 4.6 mostra o ajuste.

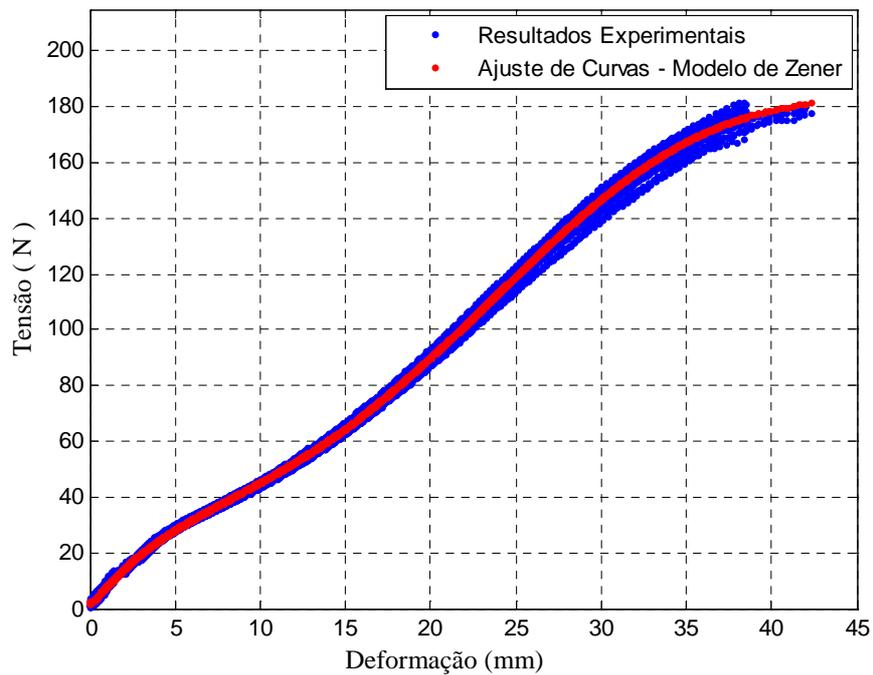


Figura 4.6 – Resultado do ajuste de curvas utilizando o modelo de Zener.  
Coeficientes estimados com 95% de confiança. (L=300mm)

Os parâmetros  $\eta$ ,  $E_s$  e  $E_M$  do modelo de Zener foram incluídos no modelo e através do programa construído foi realizada a simulação numérica para o comportamento de um multifilamento de poliéster, usando também as condições impostas nos ensaios. Além disso, foram feitas várias simulações numéricas para diferentes situações.

#### 4.1.5 Determinação das Condições de Rompimento dos Multifilamentos

Ao analisar os resultados experimentais pode se perceber que os multifilamentos de poliéster começam a romper com deformações superiores a 10% em relação ao comprimento inicial do multifilamento (no caso,  $L = 300\text{mm}$ ) e inferiores a 20%, como pode ser visto no histograma da figura 4.2 .

A tabela abaixo mostra algumas informações extraídas dos resultados experimentais. Especificamente, apresenta o número de multifilamentos rompidos e a respectiva faixa de deformação em que se encontravam no momento da ruptura, considerando uma amostra de 284 multifios.

Tabela 4.9 - Informações extraídas dos resultados de ruptura dos multifilamentos ( $T = 284$ )

FD (mm)	FD (%)	NMR	NMR (%)
36,68 a 37,44	12,226 e 12,48	35	12,32
37,45 a 38,19	12,483 e 12,73	49	17,25
38,20 a 39,00	12,733 e 13,00	53	18,66

onde: FD é a faixa de deformação em que se encontra o valor da deformação de ruptura dos multifilamentos e NMR é o numero de multifilamentos rompidos.

A partir destas informações acima se admitiu as seguintes condições de rompimento dos multifilamentos em função da deformação (%): quando o multifilamento está com deformação entre 0% e 10% o próprio permanece intacto, ou seja, não há rompimento; quando o multifio está com deformação de 12,35% admitiu-se que a chance de ruptura é de 12,3%; com 12,69% de deformação, tem chance de 17,2% de romper e; embora 100% dos multifilamentos de poliéster da amostra analisada romperam com deformações inferiores a

20%, admitiu-se nesse modelo inicial que com esta deformação o multifio tem 80% de chance de rompimento. Esta consideração foi feita para não desconsiderar a ruptura do multifilamento na simulação de um conjunto de multifios ou de um cabo ideal. Por este mesmo motivo considerou-se que com 30% de deformação o multifilamento tem 90% de chance de rompimento, aumentando gradativamente.

Com base em tais considerações foi possível estimar uma expressão que descreve a chance de ruptura para multifilamentos em função da deformação específica, ou seja, deformação em percentagem, cujos coeficientes foram determinados através do método dos mínimos quadrados com 95% de confiança (tabela 4.10),

$$CR = \frac{p_1 \varepsilon^3 + p_2 \varepsilon^2 + p_3 \varepsilon + p_4}{\varepsilon^2 + q_1 \varepsilon + q_2} \quad (4.5)$$

onde: CR é chance de ruptura e  $p$  e  $q$  são coeficientes.

Tabela 4.10 - Coeficientes da função de chance de ruptura dos multifilamentos. Estimados com 95% de confiança.

Coeficientes		Intervalo de confiança
$p_1$	0,08602	(-0,09485; 0,2669)
$p_2$	81,95	(59,03; 104,9)
$p_3$	-1742	(-2332; -1153)
$p_4$	9142	(5333; 1,295e+004)
$q_1$	-23,16	(-26,11; -20,2)
$q_2$	160,3	(97,39; 223,2)

Para este ajuste o coeficiente múltiplo de determinação e o coeficiente ajustado de determinação são iguais a 1 e 0,9999, respectivamente, com um erro de 0,4902. A figura 4.7 mostra o ajuste.

Dessa forma, considerou-se este modelo inicial que para deformações menores ou igual a 10% o multifilamento de poliéster permanece intacto e que a partir desse valor a chance de rompimento do próprio obedece a expressão 4.5 e ilustrada através da figura 4.7.

No programa *snap* o rompimento ou não do multifilamento depende da comparação entre o valor da chance de ruptura e um valor escolhido aleatoriamente por uma sub-rotina

pseudo-aleatória implementada no programa para esta finalidade. Estes valores são determinados a cada passo de integração, verificando a seguinte condição: se a chance de ruptura for maior que o valor escolhido aleatoriamente então o multifilamento rompe, se for menor ele permanece íntegro.

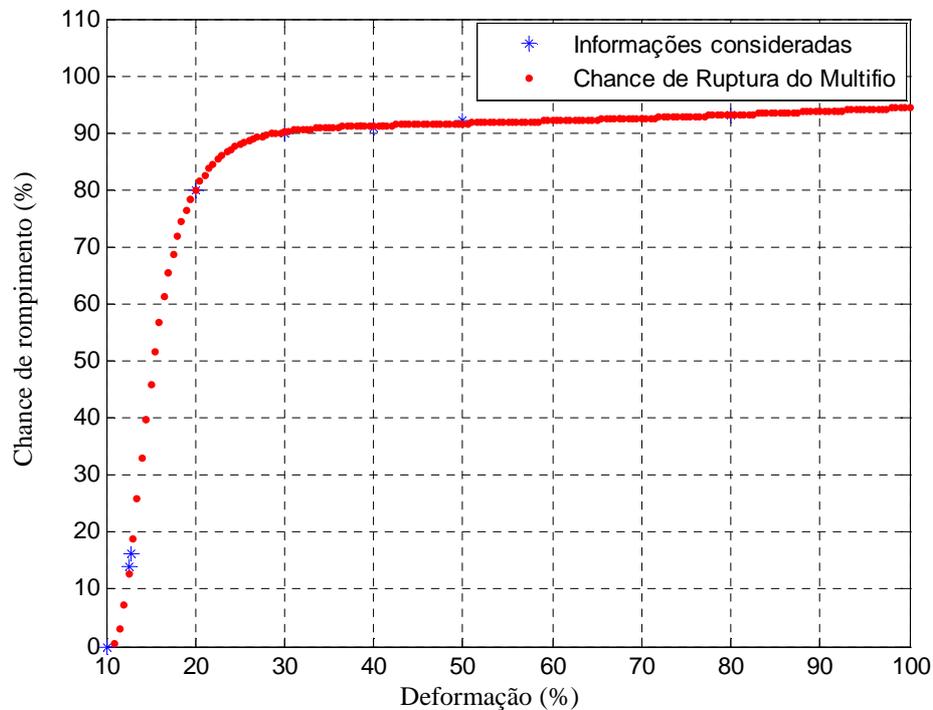


Figura 4.7 - Chance de rompimento do multifilamento no programa *snap*.

## 4.2 RESULTADOS NUMÉRICOS

A seguir são apresentados os resultados numéricos para a simulação do comportamento de um multifilamento de poliéster, três conjuntos de multifios (um conjunto com 30, outro com 600 e um com 55000 multifilamentos) e de um cabo ideal. Estas simulações foram feitas com um passo de integração igual a  $10^{-7}$ .

### 4.2.1 Simulação do Comportamento de um Multifilamento

Para a simulação do comportamento de um multifilamento de poliéster foram utilizados os parâmetros determinados na seção 4.1, deste capítulo, com um passo de

integração igual a  $10^{-7}$  e levando em consideração as condições de ensaio apresentadas no capítulo 3, seção 3.2.

A figura 4.8 mostra a comparação dos resultados experimentais com os obtidos através da simulação numérica para um multifilamento de poliéster até seu rompimento.

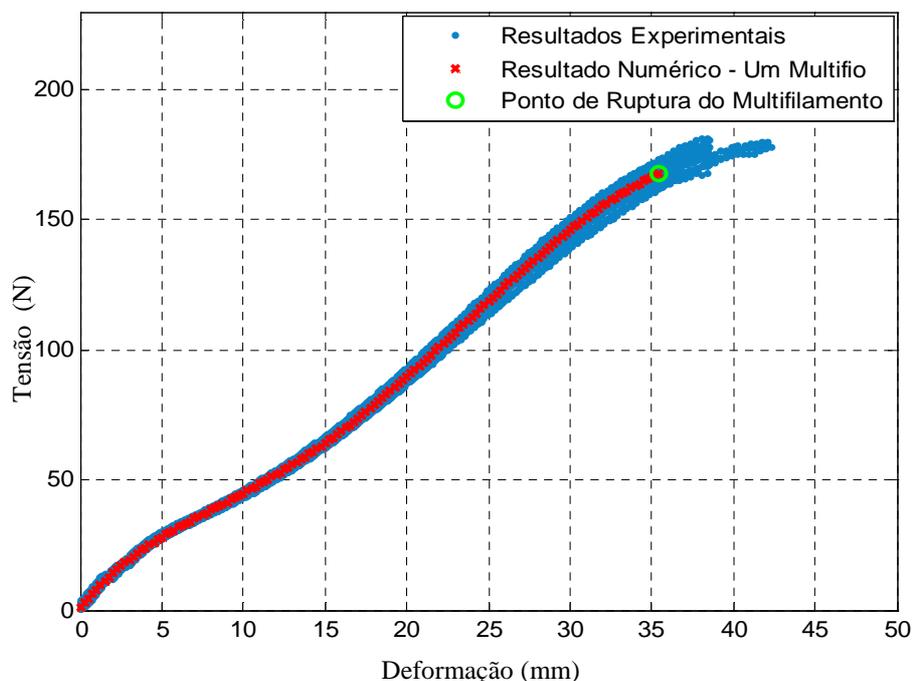


Figura 4.8 – Resultado da simulação numérica para um multifilamento de poliéster ( $L = 300\text{mm}$ ). Multifilamento rompido com de 35,48mm deformação submetido a uma tensão de 168,0N.

A tabela 4.11 informa as variáveis de saída do programa *snap* no momento de ruptura do multifilamento, que são: tempo ( $t_R$ ), deformação ( $\varepsilon_R$ ), tensão máxima aplicada ( $\sigma_M$ ) e a chance de ruptura (CR) do multifio no momento em que ocorreu o rompimento do próprio.

Tabela 4.11 – Valor das variáveis no momento do rompimento de um multifio ( $L = 300\text{mm}$ ).

$t_R$ (min)	$\varepsilon_R$ (mm)	$\varepsilon_R$ (%)	$\sigma_M$ (N)	CR (%)
0,1419	35,480	11,8267	168,001	5,50

#### 4.2.2 Simulação do Comportamento de um Conjunto de Multifios

A seguir são apresentados os resultados para a simulação numérica de três conjuntos de multifilamentos, utilizando as mesmas condições iniciais e de ensaio aplicadas para a simulação do comportamento de um multifilamento. Dessa forma, o comprimento inicial dos multifilamentos é de 300mm.

##### Conjunto de 30 multifilamentos:

A figura abaixo mostra os resultados numéricos para a simulação do comportamento de um conjunto de 30 multifilamentos, comparando com os resultados experimentais.

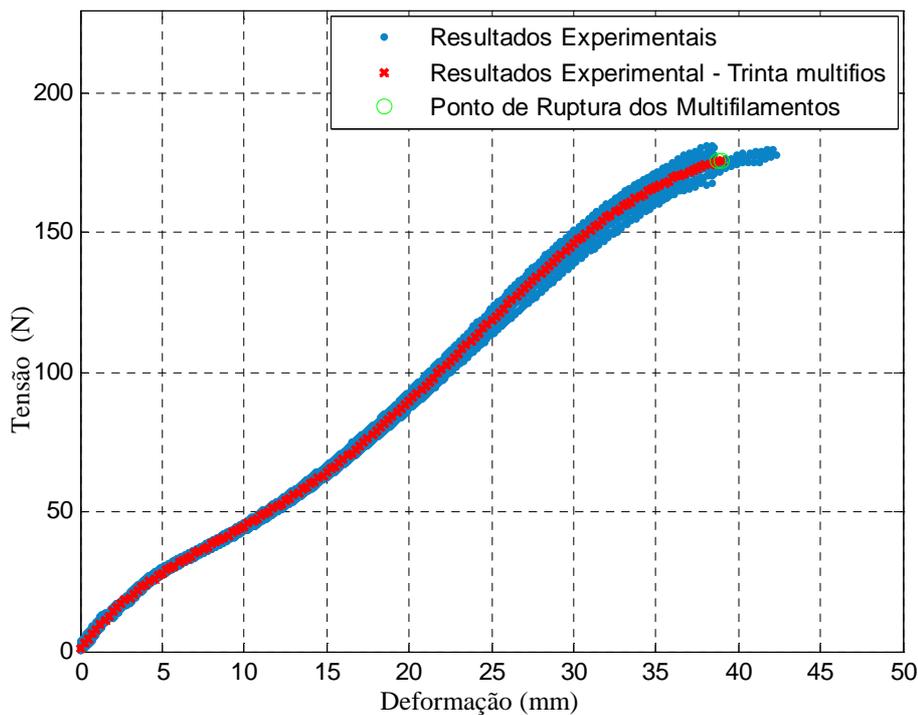


Figura 4.9 – Resultado da simulação numérica para um conjunto de 30 multifios (  $L = 300\text{mm}$  ).  
Termino do processo com ruptura de 39,03mm deformação e uma tensão de 176,04N.

A tabela 4.12 apresenta as variáveis de saída do programa snap, sendo NMI, o número de multifilamentos íntegros ao longo do processo.

Tabela 4.12 – Valores das variáveis no momento de ruptura do conjunto de 30 multifios (L = 30mm)

$t_R$ (s)	$\varepsilon_R$ (mm)	$\varepsilon_R$ (%)	$\sigma_M$ (N)	CR (%)	MNI
9,3594	38,997	12,9992	175,984	18,93	30
9,3600	39,000	13,0001	175,988	18,94	29
9,3606	39,002	13,0009	175,992	18,95	29
9,3612	39,005	13,0017	175,997	18,97	26
9,3618	39,007	13,0026	176,001	18,98	24
9,3624	39,010	13,0034	176,005	18,99	22
9,3630	39,012	13,0042	176,009	19,00	21
9,3636	39,015	13,0051	176,013	19,01	20
9,3642	39,017	13,0059	176,017	19,02	16
9,3648	39,020	13,0067	176,021	19,03	16
9,3654	39,022	13,0076	176,025	19,04	14
9,3660	39,025	13,0084	176,029	19,05	12
9,3666	39,027	13,0092	176,033	19,07	9
9,3672	39,030	13,0101	176,037	19,08	6
9,3678	39,032	13,0109	176,041	19,09	5
9,3684	39,035	13,0117	176,045	19,10	3
9,3688	39,036	13,0122	176,048	19,11	0

A tabela acima mostra que o conjunto de 30 multifilamentos rompe totalmente com uma deformação de 39,03mm, ou seja, com 13,01% de deformação em relação ao comprimento inicial (L = 300mm), submetido a uma tensão máxima de 176,04N e apresentando uma chance de ruptura igual a 19,10 %.

No apêndice F há uma tabela mais detalhada destes resultados apresentando o momento de rompimento de cada multifilamento ao decorrer do processo de ruptura.

### Conjunto com 600 multifilamentos:

A figura abaixo ilustra os resultados numéricos para um conjunto de 600 multifilamentos até a ruptura total dos próprios e compara os próprios com os resultados experimentais.

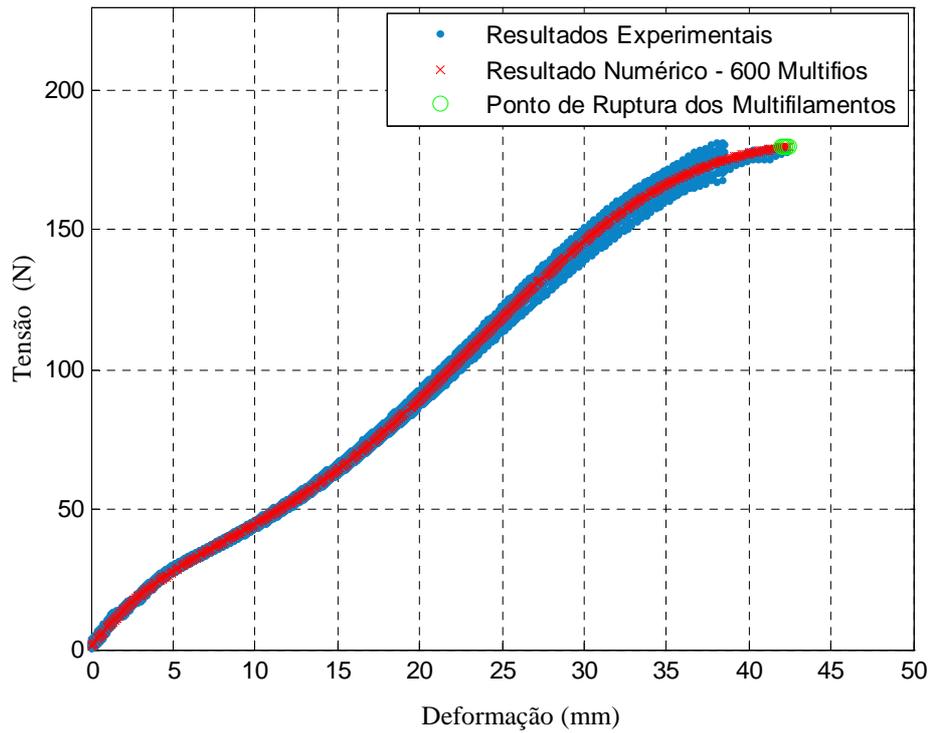


Figura 4.10 - Resultado da simulação numérica para 600 multifios ( L = 300mm ).  
 Termina o processo com ruptura de 42,44mm deformação e uma tensão de 180,08N.

A tabela 4.13 apresenta os valores das variáveis de saída do programa *snap* no momento em que o conjunto de 600 multifilamentos começa a se romper.

Tabela 4.13 – Valores das variáveis no momento de ruptura do conjunto de 600 multifios.

$t_R$ (s)	$\epsilon_R$ (mm)	$\epsilon_R$ (%)	$\sigma_M$ (N)	CR (%)	MNI
10,074	41,975	13,992	179,66	32,71	600
10,080	42,000	14,000	179,68	32,82	599
10,086	42,025	14,008	179,71	32,94	576
10,092	42,050	14,017	179,73	33,05	540
10,098	42,075	14,025	179,75	33,17	511
10,104	42,100	14,033	179,77	33,28	481
10,110	42,125	14,042	179,80	33,40	447
10,116	42,150	14,050	179,82	33,51	417
10,122	42,175	14,058	179,84	33,63	374
10,128	42,200	14,067	179,86	33,74	343
10,134	42,225	14,075	179,89	33,86	303

10,140	42,250	14,083	179,91	33,97	273
10,146	42,275	14,092	179,93	34,09	235
10,152	42,300	14,100	179,95	34,20	200
10,158	42,325	14,108	179,98	34,32	163
10,164	42,350	14,117	180,00	34,43	138
10,170	42,375	14,125	180,02	34,55	103
10,176	42,400	14,133	180,04	34,66	63
10,182	42,425	14,142	180,06	34,78	27
10,186	42,445	14,148	180,08	34,87	0

Esta tabela mostra que o conjunto de 600 multifilamentos rompe totalmente com uma deformação de 42,44mm, ou seja, com 14,14 % de deformação em relação ao comprimento inicial ( $L = 300\text{mm}$ ), submetido a uma tensão máxima de 180,0N e apresentando uma chance de ruptura igual a 34,86 %.

#### Conjunto de 55.000 multifilamentos:

A tabela a seguir apresenta os valores das variáveis de saída do programa *snap* no momento em que o conjunto de 55.000 multifilamentos começa a romper. Nesta simulação os multifilamentos apresentam comprimento inicial de 300mm.

Tabela 4.14 - Valores das variáveis no momento de ruptura do conjunto de 55.000 multifios.

$t_R$ (s)	$\varepsilon_R$ (mm)	$\varepsilon_R$ (%)	$\sigma_M$ (N)	CR (%)	MNI
7,80	32,50	10,83	157,46	0,10	55000
8,40	35,00	11,67	166,54	4,18	54820
9,00	37,50	12,50	173,15	12,56	54019
9,60	40,00	13,33	177,47	23,50	52288
10,20	42,50	14,17	180,13	35,12	49392
10,80	45,00	15,00	182,32	45,94	45382
11,40	47,50	15,83	185,87	55,23	40289
12,00	50,00	16,67	193,36	62,81	34371
12,60	52,50	17,50	208,20	68,82	27814
13,20	55,00	18,33	234,70	73,52	20675
13,80	57,50	19,17	278,23	77,18	13115

14,40	60,00	20,00	345,25	80,02	5227
14,78	61,61	20,54	404,51	81,52	0

Como mostra a tabela 4.14 o conjunto de 55.000 multifilamentos rompe totalmente com uma deformação de 61,61mm, ou seja, com 20,53 % de deformação em relação ao comprimento inicial ( $L=300\text{mm}$ ), submetido a uma tensão máxima de 404,5N e apresentando uma chance de ruptura igual a 81,5 %.

Ao analisar os resultados numéricos para um conjunto de 30 multifilamentos de poliéster observa-se que, ao romper um multifilamento, os demais rompem em feito cascata, ou seja, em um intervalo de tempo muito pequeno (na ordem de  $10^{-4}$  segundos).

#### 4.4.3 Simulação do Comportamento de um Cabo Viscoelástico

Para a simulação do comportamento do cabo ideal, onde os multifilamentos estão dispostos em paralelo entre si, foram aplicadas as mesmas condições ambientais e parâmetros de ensaio; e aplicados os mesmos parâmetros do modelo Zener e condições de ruptura utilizadas para simulação de um multifilamento e de um conjunto de multifios, alterando apenas o comprimento inicial e o número de multifilamentos.

Considerou-se para esta simulação que o comprimento inicial dos multifilamentos é de 850m, sendo este o comprimento inicial do cabo, já que os próprios se encontram em paralelo.

No capítulo três (seção 3.1) foi estimado o número de multifilamentos existentes em um cabo de poliéster destinado para ancoragem de plataformas, dessa forma, para esta simulação considerou-se este valor, que é de aproximadamente 55.692 multifilamentos.

Tabela 4.15 - Valores das variáveis no momento de ruptura do cabo ideal ( $L=820\text{m}$ ).

$t_R$ (h)	$\epsilon_R$ (m)	$\epsilon_R$ (%)	$\sigma_M$ ( $10^{+18}$ N)	CR (%)	MNI
8,69	130,00	15,29	293,897	49,42	55692
8,68	130,25	15,32	296,756	49,75	55000
8,70	130,50	15,35	299,615	50,08	54903
8,71	130,75	15,38	302,497	50,41	52497

8,73	131,00	15,41	305,400	50,74	46644
8,75	131,25	15,44	308,326	51,07	37598
8,76	131,50	15,47	311,274	51,39	25284
8,78	131,75	15,50	314,245	51,72	9920
8,79	131,89	15,52	315,904	51,89	0

A tabela acima mostra que o cabo ideal rompe totalmente com uma deformação de 131,89mm, ou seja, com 15,52% de deformação em relação ao comprimento inicial ( $L = 850\text{m}$ ), submetido a uma tensão máxima de  $315,9010^{18}\text{N}$  e apresentando uma chance de ruptura igual a 51,89 %.

Ao analisar os resultados numéricos para um cabo ideal de poliéster observa-se que, ao romper um multifilamento, os demais rompem em feito cascata, ou seja, em um intervalo de tempo muito pequeno (na ordem de  $10^{-4}$  segundos).

## 5. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados numéricos para simulação do comportamento de multifilamentos de poliéster se mostraram próximos dos resultados experimentais, como pode ser observado nas figuras 4.8, 4.9 e 4.10. Dessa forma, o modelo é válido para a simulação do comportamento de um multifilamento até seu rompimento, considerando as mesmas condições ambientais e parâmetros de ensaio.

Os resultados obtidos através da simulação numérica para um conjunto de multifios mostram que ao romper um multifilamento os demais rompem em feito cascata, ou seja, em um intervalo de tempo muito pequeno (na ordem de  $10^{-4}$  segundos). Talvez isto ocorra porque quando um multifilamento rompe a força aplicada, que é dividida pelo número de multifilamentos, é redistribuída para os demais, aumentando a probabilidade de rompimento dos próprios.

Para a simulação do comportamento de um cabo é necessário uma análise mais minuciosa proveniente de ensaios experimentais com cabos de ancoragem de poliéster, o que não foi possível por falta de equipamento e por ser inviável financeiramente no momento. Os ensaios não destrutivos, como o método de emissão acústica (EA), são mais indicados, pois apresentam melhor precisão nos resultados e mantêm integridade do cabo durante o estudo.

Os ensaios experimentais se mostraram fundamentais para determinar os parâmetros ( $E_s$ ,  $E_M$  e  $\eta$ ) do modelo de Zener devido às variações das propriedades do material (rigidez e amortecimento) à medida que sofre deformações. Além disso, foi possível também estabelecer uma função de ruptura para multifilamentos de poliéster.

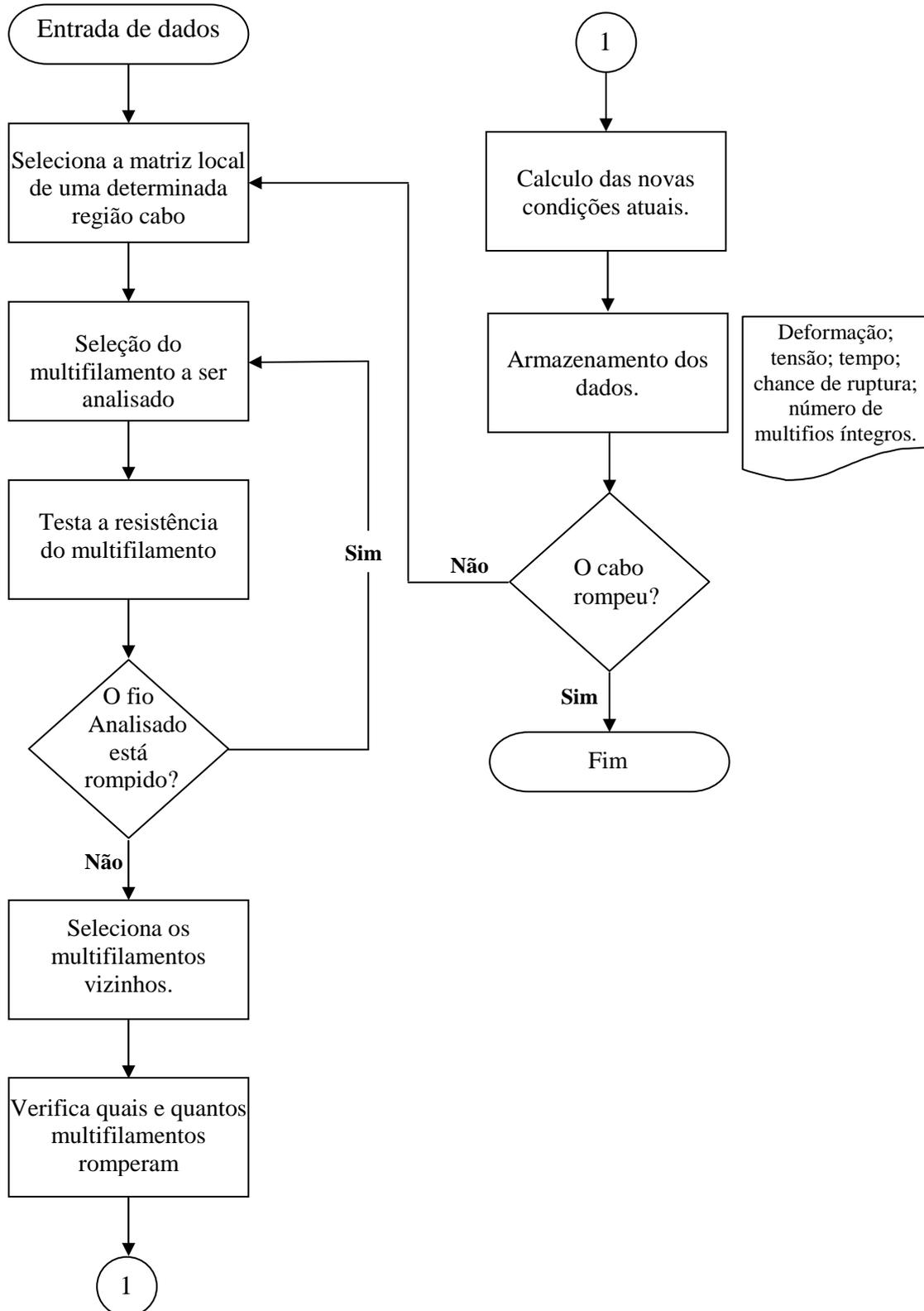
Como o material apresenta um comportamento muito complicado, outros modelos mais elaborados devem ser testados para este caso. Segundo Sias e Creus (2004) pequenas diferenças na montagem dos modelos viscoelásticos, geram grandes diferenças nos resultados.

Este trabalho ajudou a entender melhor o comportamento do multifilamento de poliéster. Contudo trabalhos futuros com o mesmo propósito e a aplicação de outras metodologias só vêm a acrescentar a este trabalho.



# APÊNDICES

## APÊNDICE A – FLUXOGRAMA DO PROGRAMA SNAP



# APÊNDICE B – RELATÓRIOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO

## FURG - DMC

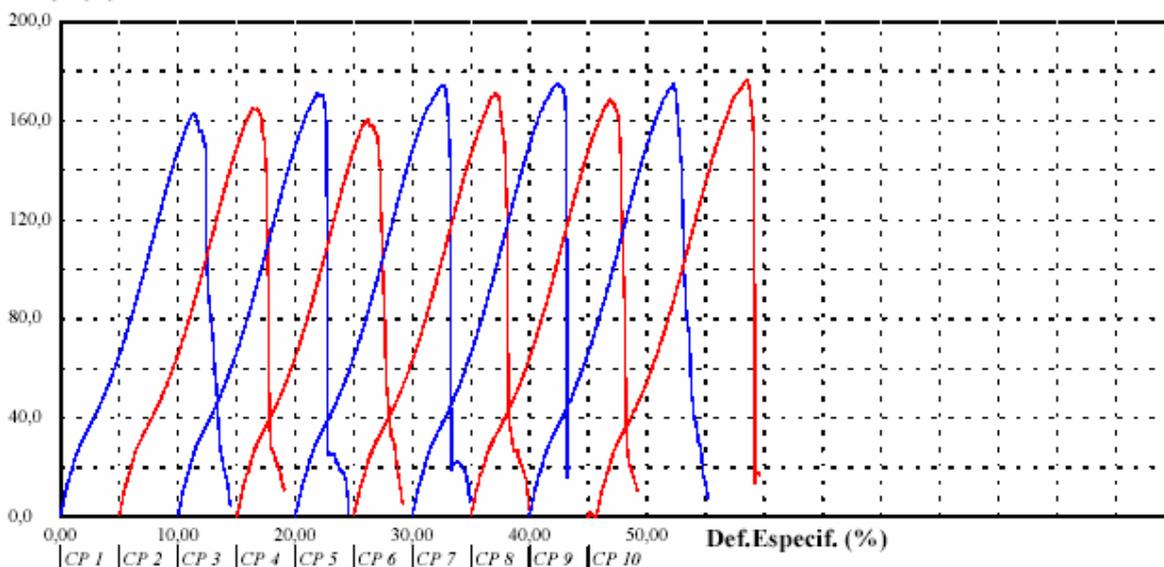
POLICAB - Laboratório de Análise de Tensões

### Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL2000** Célula: **Trd 21** Extensômetro: - Data: **18/01/2008** Hora: **08:44:18** Trabalho nº **2887**  
 Programa: **Tesc versão 1.10** Método de Ensaio: **ENSAIO DE TRAÇÃO\_500N**  
 Ident. Amostra: > Tipo: **Multifilamento de Poliêste** Material: **DIOLEN 855-TN 2200 F210 DTE** Cliente: **Dissertação-Luciana**

Corpo de Prova	Força Máxima (N)	Deformação Específica (%)	Alongamento (mm)
CP 1	163,01	11,4	34,12
CP 2	165,04	11,8	35,29
CP 3	171,07	11,9	35,72
CP 4	161,01	11,2	33,59
CP 5	174,43	12,8	38,26
CP 6	171,17	12,1	36,42
CP 7	175,18	12,4	37,06
CP 8	168,80	11,9	35,63
CP 9	175,26	12,3	36,85
CP 10	176,73	13,5	40,62
Número CPs	10	10	10
Média	170,2	12,12	36,36
Desv.Padrão	5,551	0,6779	2,034
Mínimo	161,0	11,20	33,59
Máximo	176,7	13,54	40,62

Força (N)



**Observação:**

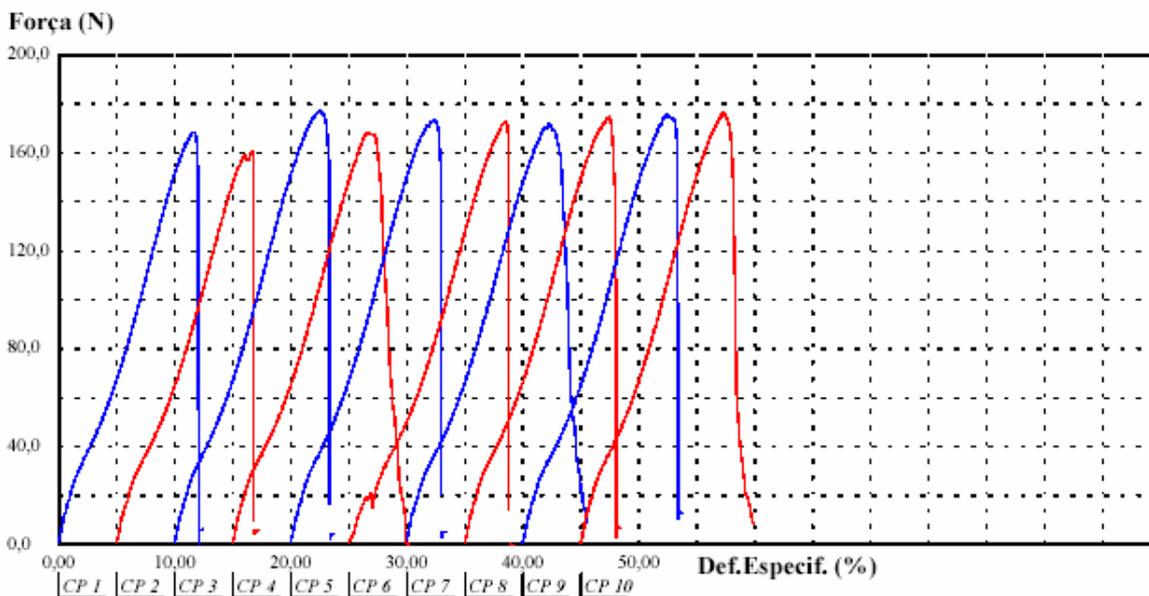
Parâmetros de ensaio: Velocidade = 250mm/min; Comprimento inicial de medição = 300 ± 1mm; Sem Torção;  
 Condições ambientais: UR= 55 ± 2%; T= 24 ± 1°C.

**FURG - DMC**  
 POLICAB - Laboratório de Análise de Tensões

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL2000** Célula: **Trd 21** Extensômetro: - Data: **18/01/2008** Hora: **08:55:27** Trabalho n° **2889**  
 Programa: **Tesc versão 1.10** Método de Ensaio: **ENSAIO DE TRACÇÃO\_500N**  
 Ident. Amostra: > Tipo: **Multifilamento de Poliéster** Material: **DIOLEN 855-TN 2200 F210 DTE** Cliente: **Dissertação-Luciana**

Corpo de Prova	Força Máxima (N)	Deformação Específica (%)	Alongamento (mm)
CP 1	168,69	11,6	34,82
CP 2	160,34	11,7	35,24
CP 3	177,47	12,5	37,56
CP 4	168,21	11,6	34,66
CP 5	173,60	12,5	37,41
CP 6	173,20	13,5	40,62
CP 7	171,81	12,3	36,95
CP 8	174,69	12,5	37,41
CP 9	176,19	12,5	37,37
CP 10	176,48	12,4	37,18
Número CPs	10	10	10
Média	172,1	12,31	36,92
Desv.Padrão	5,165	0,5792	1,738
Mínimo	160,3	11,55	34,66
Máximo	177,5	13,54	40,62



**Observação:**  
 Parâmetros de ensaio: Velocidade = 250mm/min; Comprimento inicial de medição = 300 ± 1mm; Sem Torção;  
 Condições ambientais: UR= 55 ± 2%; T= 24 ± 1°C.

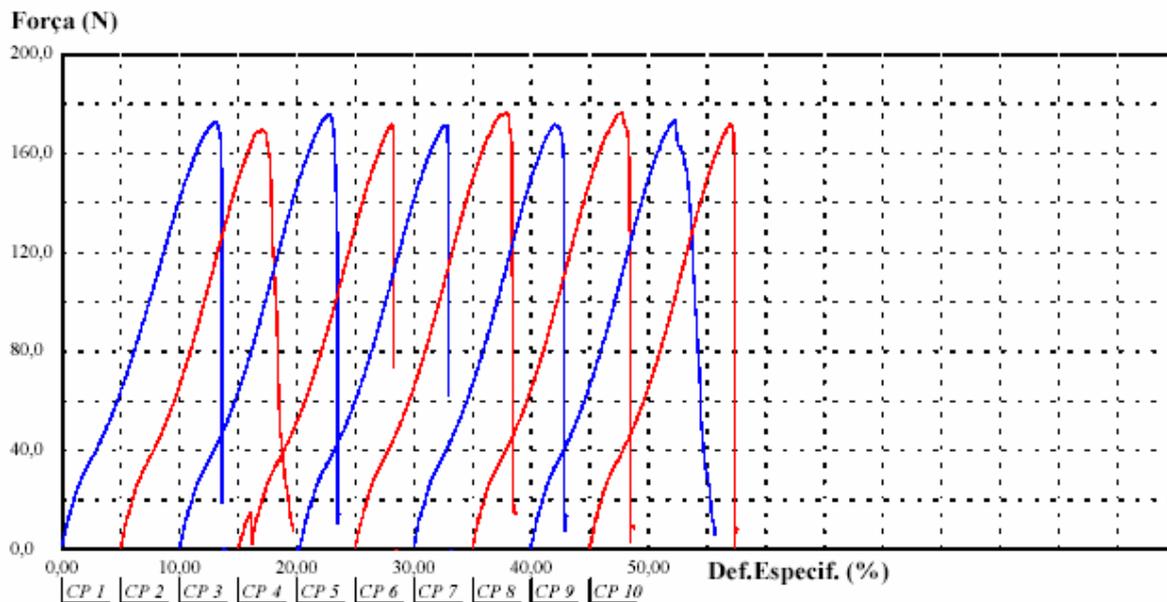
## FURG - DMC

POLICAB - Laboratório de Análise de Tensões

### Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL2000**    Célula: **Trd 21**    Extensômetro: -    Data: **18/01/2008**    Hora: **08:59:39**    Trabalho nº **2890**  
 Programa: **Tesc versão 1.10**    Método de Ensaio: **ENSAIO DE TRAÇÃO\_500N**  
 Ident. Amostra: >>> Tipo: **Multifilamento de Poliéster**    Material: **DIOLEN 855-TN 2200 F210 DTEX**

Corpo de Prova	Força Máxima (N)	Deformação Específica (%)	Alongamento (mm)
CP 1	173,15	13,1	39,40
CP 2	169,58	12,1	36,31
CP 3	176,12	12,9	38,69
CP 4	172,00	13,1	39,21
CP 5	171,64	12,9	38,57
CP 6	176,60	12,9	38,59
CP 7	171,86	12,0	36,07
CP 8	176,61	12,7	38,24
CP 9	173,72	12,2	36,73
CP 10	172,29	12,0	36,00
<b>Número CPs</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>
<b>Média</b>	<b>173,4</b>	<b>12,59</b>	<b>37,78</b>
<b>Desv.Padrão</b>	<b>2,388</b>	<b>0,4493</b>	<b>1,348</b>
<b>Mínimo</b>	<b>169,6</b>	<b>12,00</b>	<b>36,00</b>
<b>Máximo</b>	<b>176,6</b>	<b>13,13</b>	<b>39,40</b>



**Observação:**  
 Parâmetros de ensaio: Velocidade = 250mm/min; Comprimento inicial de medição = 300 ± 1mm; Sem Torção;  
 Condições ambientais: UR= 55 ± 2%; T= 24 ± 1°C.

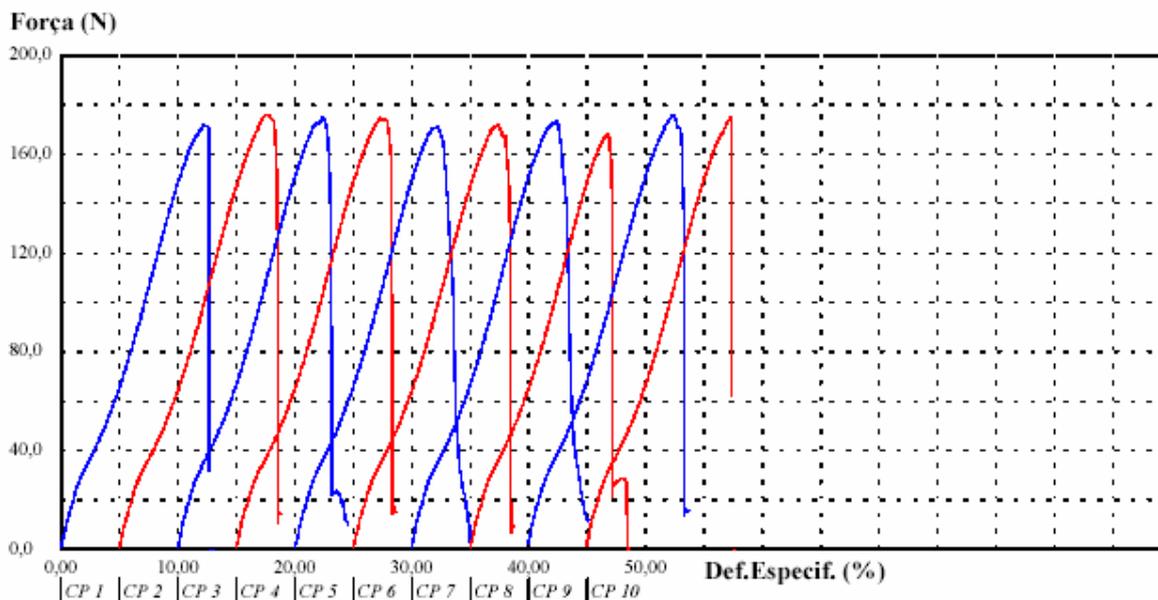
## FURG - DMC

POLICAB - Laboratório de Análise de Tensões

### Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL2000**    Célula: **Trd 21**    Extensômetro: -    Data: **18/01/2008**    Hora: **09:05:16**    Trabalho n° **2891**  
 Programa: **Tesc versão 1.10**    Método de Ensaio: **ENSAIO DE TRACÇÃO\_500N**  
 Ident. Amostra: > Tipo: **Multifilamento de Poliéster** Material: **DIOLEN 855-TN 2200 F210 DTE** Cliente: **Dissertação-Luciana**

Corpo de Prova	Força Máxima (N)	Deformação Específica (%)	Alongamento (mm)
CP 1	171,90	12,2	36,64
CP 2	176,12	12,6	37,82
CP 3	174,91	12,4	37,09
CP 4	174,82	12,3	36,97
CP 5	171,34	12,2	36,50
CP 6	172,05	12,5	37,44
CP 7	173,60	12,4	37,11
CP 8	168,74	11,9	35,62
CP 9	175,97	12,4	37,06
CP 10	174,91	12,3	36,83
<b>Número CPs</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>
<b>Média</b>	<b>173,4</b>	<b>12,30</b>	<b>36,91</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>2,373</b>	<b>0,1965</b>	<b>0,5895</b>
<b>Mínimo</b>	<b>168,7</b>	<b>11,87</b>	<b>35,62</b>
<b>Máximo</b>	<b>176,1</b>	<b>12,61</b>	<b>37,82</b>



**Observação:**  
**Parâmetros de ensaio:** Velocidade = 250mm/min; Comprimento inicial de medição = 300 ± 1mm; Sem Torção;  
**Condições ambientais:** UR= 55 ± 2%; T= 24 ± 1°C.

# FURG - DMC

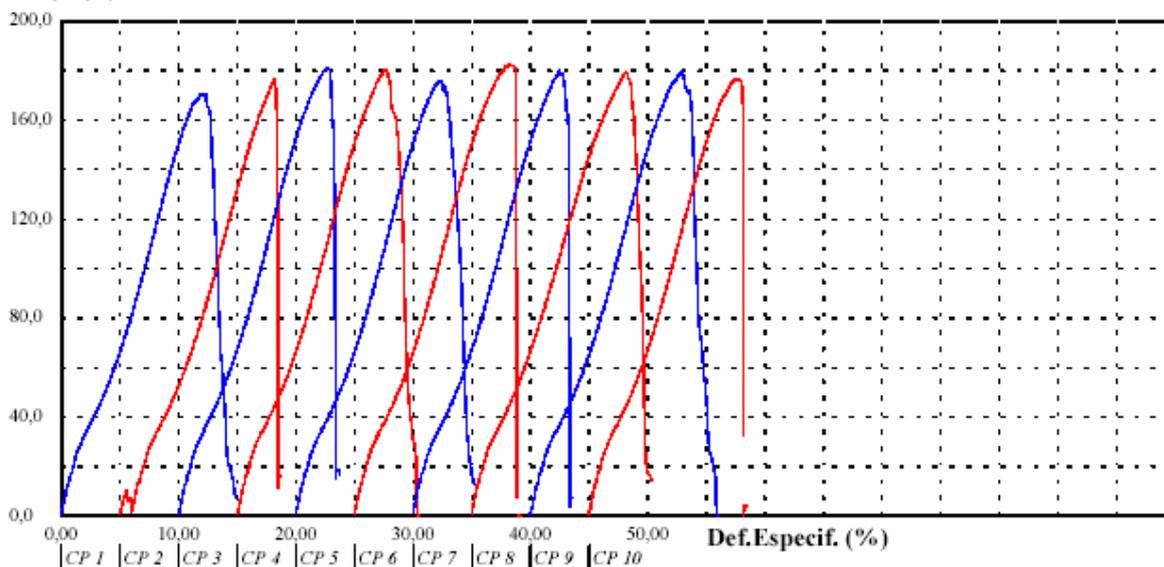
## POLICAB - Laboratório de Análise de Tensões

### Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL2000**    Célula: **Trd 21**    Extensômetro: -    Data: **18/01/2008**    Hora: **09:10:14**    Trabalho n° **2892**  
 Programa: **Tesc versão 1.10**    Método de Ensaio: **ENSAIO DE TRAÇÃO\_500N**  
 Ident. Amostra: > Tipo: **Multifilamento de Poliêste** Material: **DIOLEN 855-TN 2200 F210 DTE** Cliente: **Dissertação-Luciana**

Corpo de Prova	Força Máxima (N)	Deformação Específica (%)	Alongamento (mm)
CP 1	170,88	12,2	36,66
CP 2	176,68	13,2	39,71
CP 3	181,31	12,6	37,87
CP 4	180,57	12,6	37,68
CP 5	175,92	12,2	36,52
CP 6	182,46	13,2	39,75
CP 7	180,06	12,5	37,35
CP 8	179,43	13,2	39,45
CP 9	179,59	12,9	38,79
CP 10	176,87	12,8	38,39
<b>Número CPs</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>
<b>Média</b>	<b>178,4</b>	<b>12,74</b>	<b>38,22</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>3,381</b>	<b>0,3997</b>	<b>1,199</b>
<b>Mínimo</b>	<b>170,9</b>	<b>12,17</b>	<b>36,52</b>
<b>Máximo</b>	<b>182,5</b>	<b>13,25</b>	<b>39,75</b>

**Força (N)**



**Observação:**

Parâmetros de ensaio: Velocidade = 250mm/min; Comprimento inicial de medição = 300 ± 1mm; Sem Torção;  
 Condições ambientais: UR= 55 ± 2%; T= 24 ± 1°C.

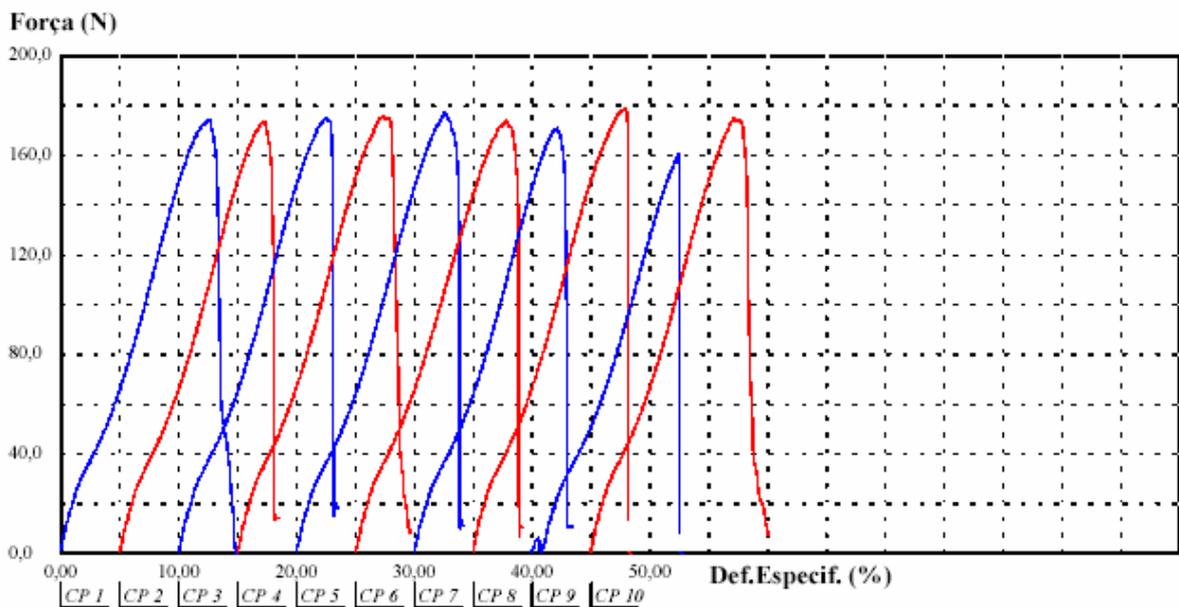
# FURG - DMC

## POLICAB - Laboratório de Análise de Tensões

### Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL2000**    Célula: **Trd 21**    Extensômetro: -    Data: **18/01/2008**    Hora: **09:14:51**    Trabalho nº **2893**  
 Programa: **Tesc versão 1.10**    Método de Ensaio: **ENSAIO DE TRAÇÃO\_500N**  
 Ident. Amostra: > Tipo: **Multifilamento de Poliéster** Material: **DIOLEN 855-TN 2200 F210 DTE** Cliente: **Dissertação-Luciana**

Corpo de Prova	Força Máxima (N)	Deformação Específica (%)	Alongamento (mm)
CP 1	174,26	12,7	38,03
CP 2	173,52	12,2	36,64
CP 3	175,33	12,5	37,42
CP 4	175,83	12,4	37,11
CP 5	177,31	12,6	37,91
CP 6	173,99	12,8	38,48
CP 7	171,15	12,2	36,49
CP 8	178,79	12,9	38,81
CP 9	160,69	12,5	37,37
CP 10	175,28	12,2	36,49
Número CPs	10	10	10
Média	173,6	12,49	37,47
Desv. Padrão	4,997	0,2744	0,8231
Mínimo	160,7	12,16	36,49
Máximo	178,8	12,94	38,81



**Observação:**  
 Parâmetros de ensaio: Velocidade = 250mm/min; Comprimento inicial de medição = 300 ± 1mm; Sem Torção;  
 Condições ambientais: UR= 55 ± 2%; T= 24 ± 1°C.

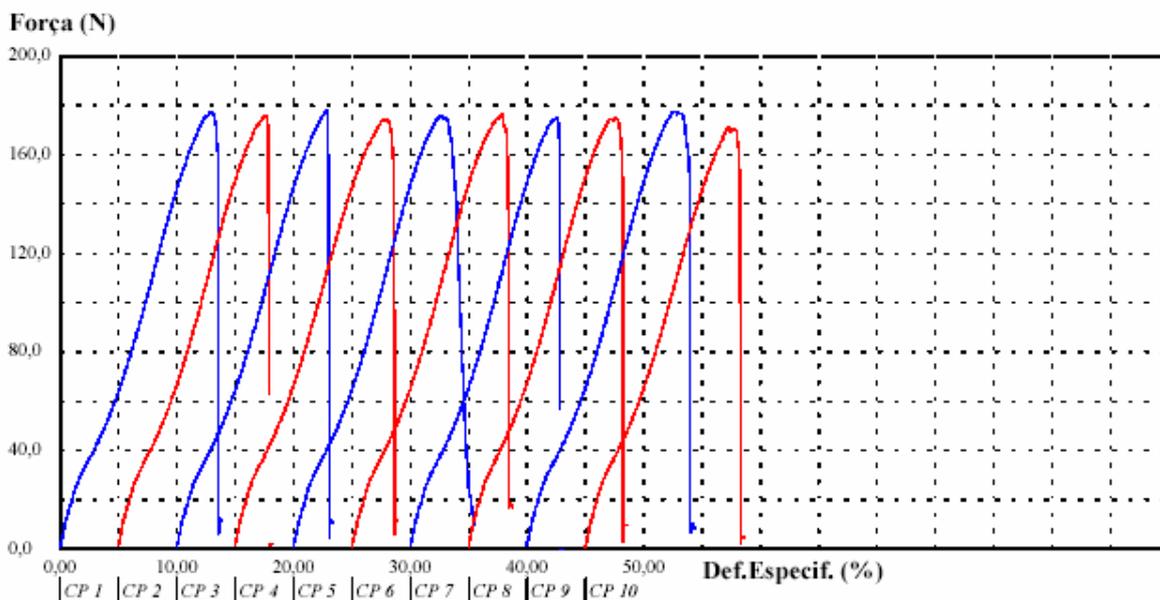
# FURG - DMC

## POLICAB - Laboratório de Análise de Tensões

### Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL2000**    Célula: **Trd 21**    Extensômetro: -    Data: **18/01/2008**    Hora: **09:20:01**    Trabalho n° **2894**  
 Programa: **Tesc versão 1.10**    Método de Ensaio: **ENSAIO DE TRACÇÃO\_500N**  
 Ident. Amostra: > Tipo: **Multifilamento de Poliêste** Material: **DIOLEN 855-TN 2200 F210 DTE** Cliente: **Dissertação-Luciana**

Corpo de Prova	Força Máxima (N)	Deformação Específica (%)	Alongamento (mm)
CP 1	177,46	12,9	38,85
CP 2	175,99	12,6	37,75
CP 3	178,05	12,8	38,48
CP 4	174,65	12,8	38,41
CP 5	175,95	12,7	38,12
CP 6	176,44	12,8	38,41
CP 7	175,04	12,7	38,05
CP 8	174,69	12,5	37,51
CP 9	177,81	12,8	38,34
CP 10	170,98	12,3	36,97
Número CPs	10	10	10
Média	175,7	12,70	38,09
Desv. Padrão	2,070	0,1826	0,5479
Mínimo	171,0	12,32	36,97
Máximo	178,0	12,95	38,85



**Observação:**  
 Parâmetros de ensaio: Velocidade = 250mm/min; Comprimento inicial de medição = 300 ± 1mm; Sem Torção;  
 Condições ambientais: UR= 55 ± 2%; T= 24 ± 1°C.

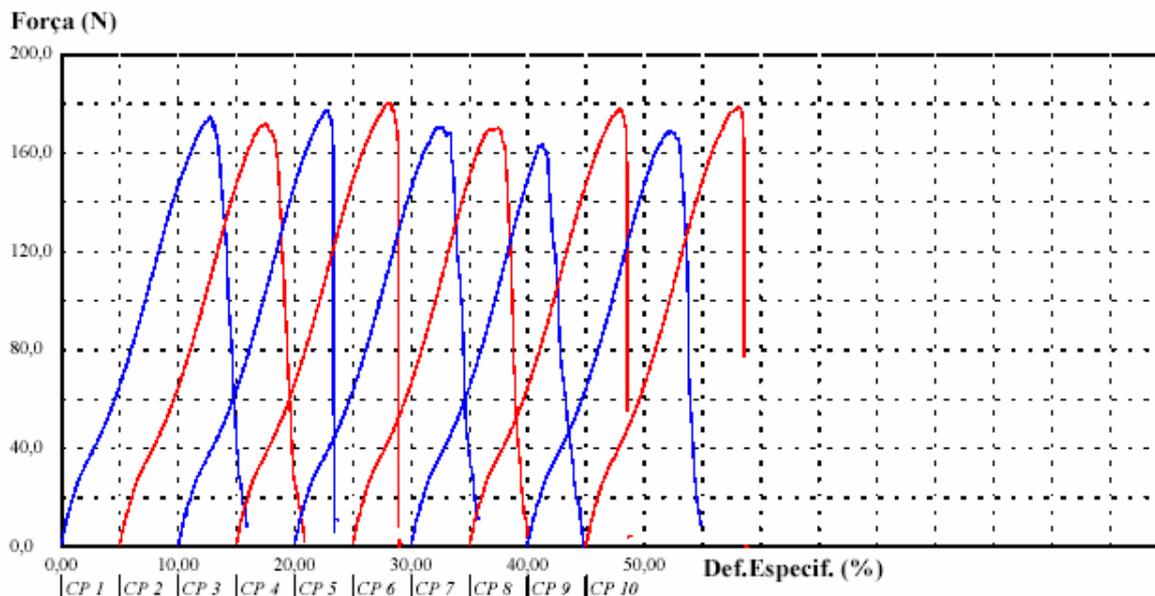
## FURG - DMC

POLICAB - Laboratório de Análise de Tensões

### Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL2000**    Célula: **Trd 21**    Extensômetro: -    Data: **18/01/2008**    Hora: **09:25:49**    Trabalho n° **2895**  
 Programa: **Tesc versão 1.10**    Método de Ensaio: **ENSAIO DE TRACÇÃO\_500N**  
 Ident. Amostra: > Tipo: **Multifilamento de Poliéster** Material: **DIOLEN 855-TN 2200 F210 DTE** Cliente: **Dissertação-Luciana**

Corpo de Prova	Força Máxima (N)	Deformação Específica (%)	Alongamento (mm)
CP 1	174,69	12,7	38,20
CP 2	172,24	12,6	37,79
CP 3	177,39	12,7	38,24
CP 4	180,74	13,2	39,65
CP 5	170,76	12,5	37,37
CP 6	170,29	12,6	37,67
CP 7	163,94	11,3	33,90
CP 8	178,25	13,0	38,92
CP 9	169,23	12,1	36,17
CP 10	178,83	13,1	39,38
<b>Número CPs</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>
<b>Média</b>	<b>173,6</b>	<b>12,58</b>	<b>37,73</b>
<b>Desv.Padrão</b>	<b>5,257</b>	<b>0,5615</b>	<b>1,684</b>
<b>Mínimo</b>	<b>163,9</b>	<b>11,30</b>	<b>33,90</b>
<b>Máximo</b>	<b>180,7</b>	<b>13,22</b>	<b>39,65</b>



**Observação:**  
 Parâmetros de ensaio: **Velocidade = 250mm/min; Comprimento inicial de medição = 300 ± 1mm; Sem Torção;**  
 Condições ambientais: **UR= 55 ± 2%; T= 24 ± 1°C.**

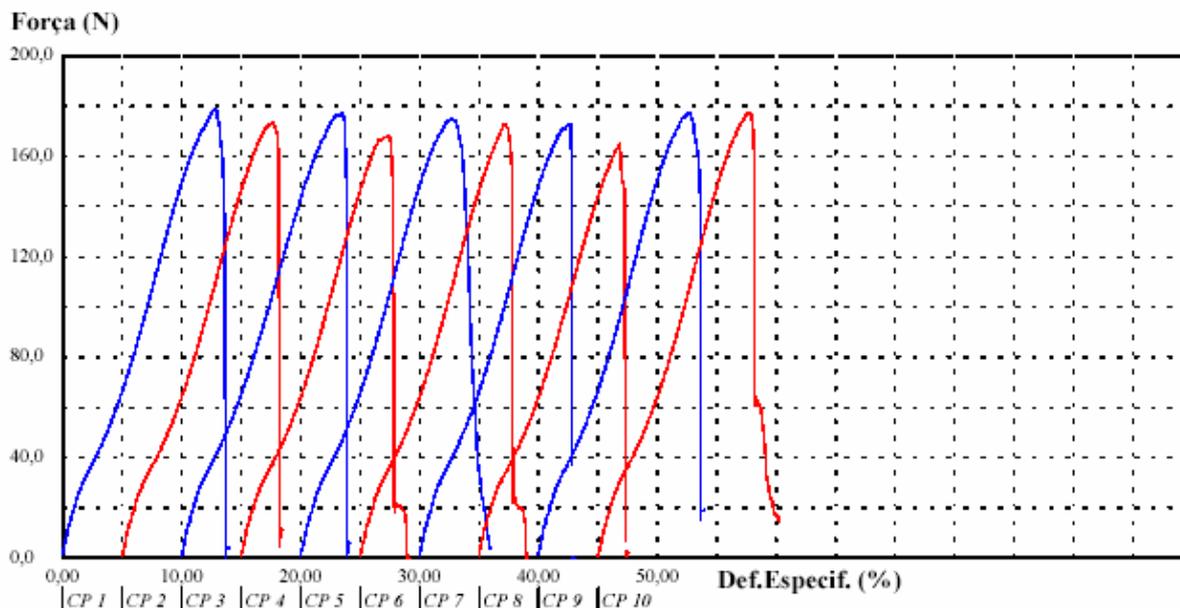
## FURG - DMC

### POLICAB - Laboratório de Análise de Tensões

### Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL2000** Célula: **Trd 21** Extensômetro: - Data: **18/01/2008** Hora: **09:30:01** Trabalho nº **2896**  
 Programa: **Tesc versão 1.10** Método de Ensaio: **ENSAIO DE TRAÇÃO\_500N**  
 Ident. Amostra: > Tipo: **Multifilamento de Poliéster** Material: **DIOLEN 855-TN 2200 F210 DTE** Cliente: **Dissertação-Luciana**

Corpo de Prova	Força Máxima (N)	Deformação Específica (%)	Alongamento (mm)
CP 1	178,89	12,9	38,60
CP 2	173,60	12,7	38,15
CP 3	177,15	13,4	40,32
CP 4	168,16	12,4	37,32
CP 5	174,91	12,6	37,91
CP 6	172,81	12,1	36,42
CP 7	172,98	12,6	37,86
CP 8	165,02	11,8	35,51
CP 9	177,32	12,7	38,00
CP 10	177,53	12,8	38,39
Número CPs	10	10	10
Média	173,8	12,62	37,85
Desv. Padrão	4,413	0,4288	1,286
Mínimo	165,0	11,84	35,51
Máximo	178,9	13,44	40,32



**Observação:**  
**Parâmetros de ensaio:** Velocidade = 250mm/min; Comprimento inicial de medição = 300 ± 1mm; Sem Torção;  
**Condições ambientais:** UR= 55 ± 2%; T= 24 ± 1°C.

# FURG - DMC

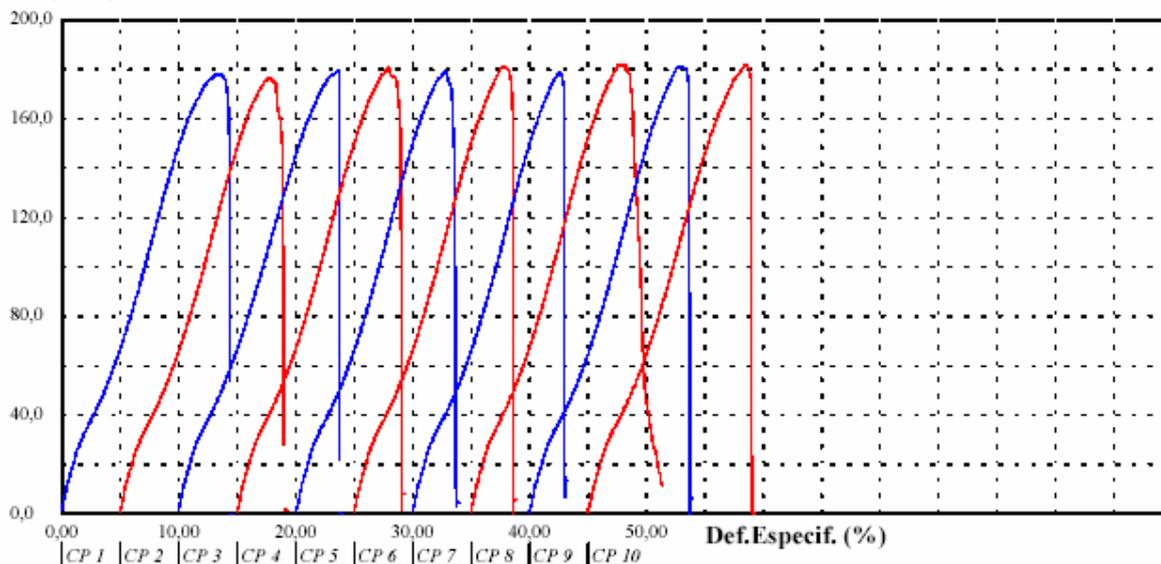
POLICAB - Laboratório de Análise de Tensões

## Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL2000** Célula: **Trd 21** Extensômetro: - Data: **18/01/2008** Hora: **09:58:15** Trabalho nº **2898**  
 Programa: **Tesc versão 1.10** Método de Ensaio: **ENSAIO DE TRAÇÃO\_500N**  
 Ident. Amostra: > Tipo: **Multifilamento de Poliêste** Material: **DIOLEN 855-TN 2200 F210 DTE** Cliente: **Dissertação-Luciana**

Corpo de Prova	Força Máxima (N)	Deformação Específica (%)	Alongamento (mm)
CP 1	178,47	13,5	40,55
CP 2	176,63	12,9	38,85
CP 3	179,72	13,6	40,81
CP 4	181,26	13,0	38,92
CP 5	179,67	12,8	38,38
CP 6	181,48	12,8	38,46
CP 7	178,79	12,6	37,75
CP 8	182,38	12,7	38,17
CP 9	181,31	13,1	39,16
CP 10	182,29	13,5	40,55
Número CPs	10	10	10
Média	180,2	13,05	39,16
Desv.Padrão	1,866	0,3649	1,095
Mínimo	176,6	12,58	37,75
Máximo	182,4	13,60	40,81

Força (N)



**Observação:**

Parâmetros de ensaio: Velocidade = 250mm/min; Comprimento inicial de medição = 300 ± 1mm; Sem Torção;  
 Condições ambientais: UR= 55 ± 2%; T= 24 ± 1°C.

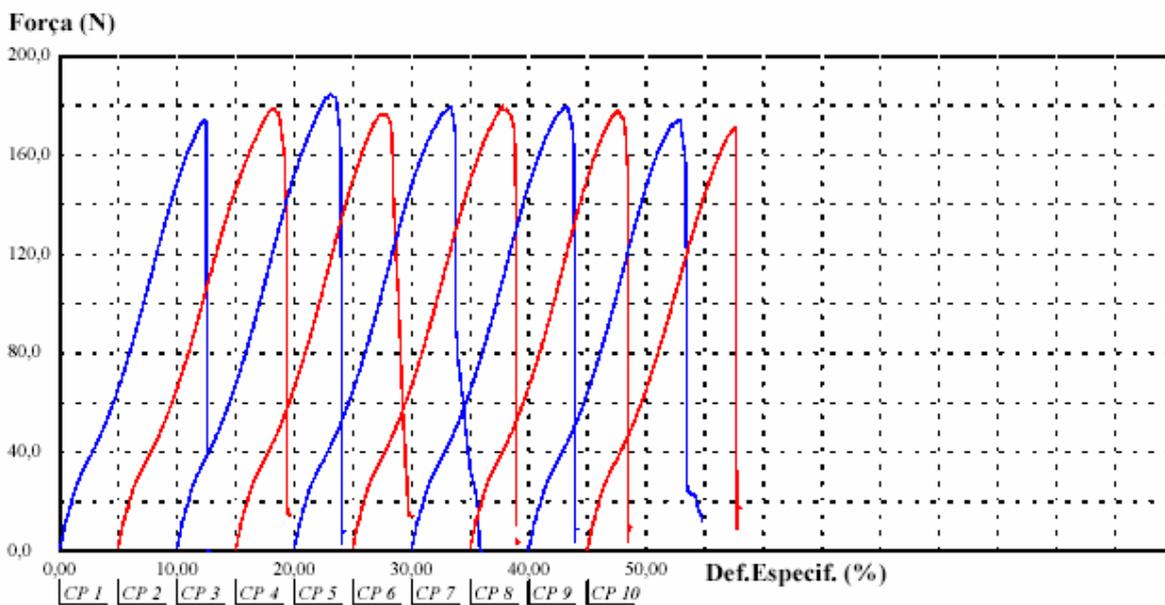
# FURG - DMC

## POLICAB - Laboratório de Análise de Tensões

### Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL2000**    Célula: **Trd 21**    Extensômetro: -    Data: **18/01/2008**    Hora: **10:15:23**    Trabalho n° **2900**  
 Programa: **Tesc versão 1.10**    Método de Ensaio: **ENSAIO DE TRACÇÃO\_500N**  
 Ident. Amostra: > Tipo: **Multifilamento de Poliéster** Material: **DIOLEN 855-TN 2200 F210 DTE** Cliente: **Dissertação-Luciana**

Corpo de Prova	Força Máxima (N)	Deformação Específica (%)	Alongamento (mm)
CP 1	174,53	12,4	37,25
CP 2	179,18	13,3	39,85
CP 3	185,01	13,1	39,33
CP 4	176,88	12,7	38,13
CP 5	179,38	13,4	40,15
CP 6	180,09	12,7	38,20
CP 7	179,84	13,2	39,63
CP 8	177,96	12,6	37,89
CP 9	174,55	12,9	38,57
CP 10	171,10	12,7	38,05
Número CPs	10	10	10
Média	177,9	12,90	38,71
Desv.Padrão	3,841	0,3231	0,9693
Mínimo	171,1	12,42	37,25
Máximo	185,0	13,38	40,15



**Observação:**  
 Parâmetros de ensaio: Velocidade = 250mm/min; Comprimento inicial de medição = 300 ± 1mm; Sem Torção;  
 Condições ambientais: UR= 55 ± 2%; T= 24 ± 1°C.

# FURG - DMC

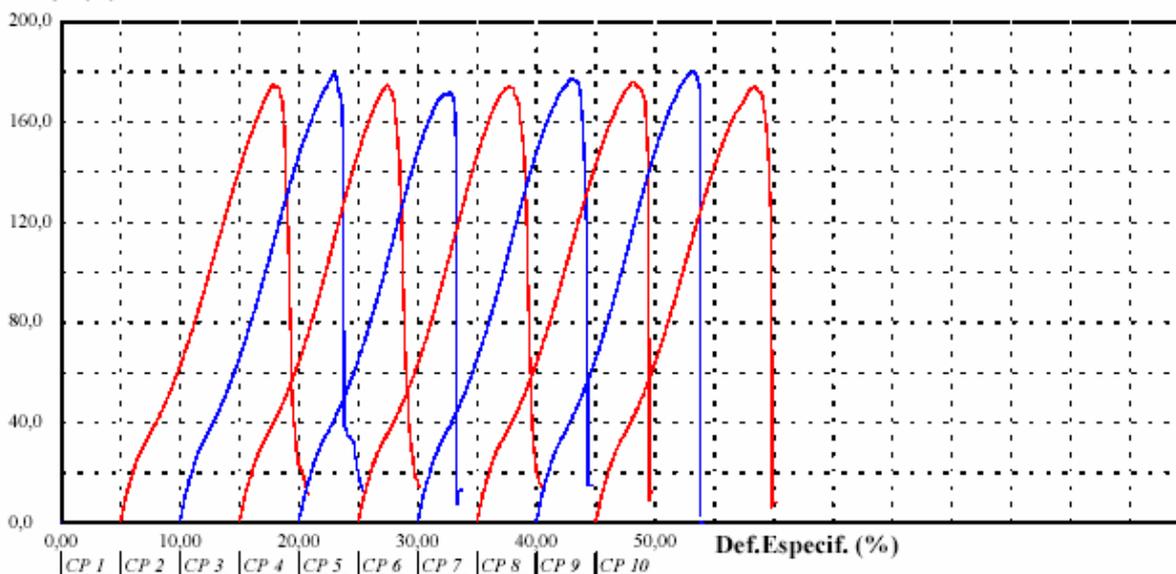
## POLICAB - Laboratório de Análise de Tensões

### Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL2000**    Célula: **Trd 21**    Extensômetro: **-**    Data: **18/01/2008**    Hora: **11:15:08**    Trabalho nº **2901**  
 Programa: **Tesc versão 1.10**    Método de Ensaio: **ENSAIO DE TRACÇÃO\_500N**  
 Ident. Amostra: > Tipo: **Multifilamento de Poliéster** Material: **DIOLEN 855-TN 2200 F210 DTE** Cliente: **Dissertação-Luciana**

Corpo de Prova	Força Máxima (N)	Deformação Específica (%)	Alongamento (mm)
CP 1	0,68	0,0	0,00
CP 2	175,23	12,8	38,52
CP 3	179,77	13,1	39,25
CP 4	175,19	12,5	37,46
CP 5	172,37	12,8	38,26
CP 6	174,13	12,6	37,87
CP 7	177,41	12,9	38,74
CP 8	176,22	13,3	39,78
CP 9	180,35	13,2	39,56
CP 10	174,52	13,4	40,34
<b>Número CPs</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>
<b>Média</b>	<b>158,6</b>	<b>11,66</b>	<b>34,98</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>55,54</b>	<b>4,107</b>	<b>12,32</b>
<b>Mínimo</b>	<b>0,6760</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>
<b>Máximo</b>	<b>180,3</b>	<b>13,45</b>	<b>40,34</b>

**Força (N)**



**Observação:**

**Parâmetros de ensaio:** Velocidade = 250mm/min; Comprimento inicial de medição = 300 ± 1mm; Sem Torção;  
**Condições ambientais:** UR= 55 ± 2%; T= 24 ± 1°C.

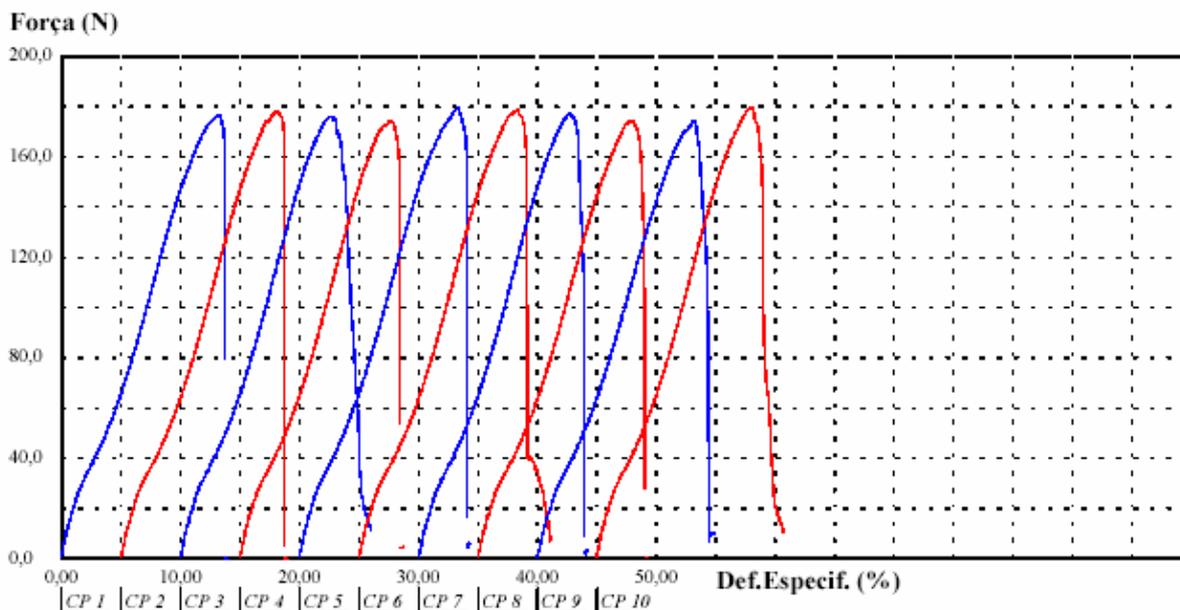
# FURG - DMC

## POLICAB - Laboratório de Análise de Tensões

### Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL2000**    Célula: **Trd 21**    Extensômetro: -    Data: **18/01/2008**    Hora: **11:21:43**    Trabalho nº **2902**  
 Programa: **Tesc versão 1.10**    Método de Ensaio: **ENSAIO DE TRAÇÃO\_500N**  
 Ident. Amostra: > Tipo: **Multifilamento de Poliéster** Material: **DIOLEN 855-TN 2200 F210 DTE** Cliente: **Dissertação-Luciana**

Corpo de Prova	Força Máxima (N)	Deformação Específica (%)	Alongamento (mm)
CP 1	176,83	13,2	39,66
CP 2	178,23	13,2	39,59
CP 3	176,16	12,6	37,89
CP 4	174,60	12,6	37,86
CP 5	179,47	13,4	40,11
CP 6	179,05	13,4	40,20
CP 7	177,46	12,7	38,08
CP 8	174,40	12,9	38,79
CP 9	174,42	13,2	39,59
CP 10	179,52	13,0	38,86
<b>Número CPs</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>
<b>Média</b>	<b>177,0</b>	<b>13,02</b>	<b>39,07</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>2,063</b>	<b>0,2985</b>	<b>0,8956</b>
<b>Mínimo</b>	<b>174,4</b>	<b>12,62</b>	<b>37,86</b>
<b>Máximo</b>	<b>179,5</b>	<b>13,40</b>	<b>40,20</b>



**Observação:**  
**Parâmetros de ensaio:** Velocidade = 250mm/min; Comprimento inicial de medição = 300 ± 1mm; Sem Torção;  
**Condições ambientais:** UR= 55 ± 2%; T= 24 ± 1°C.

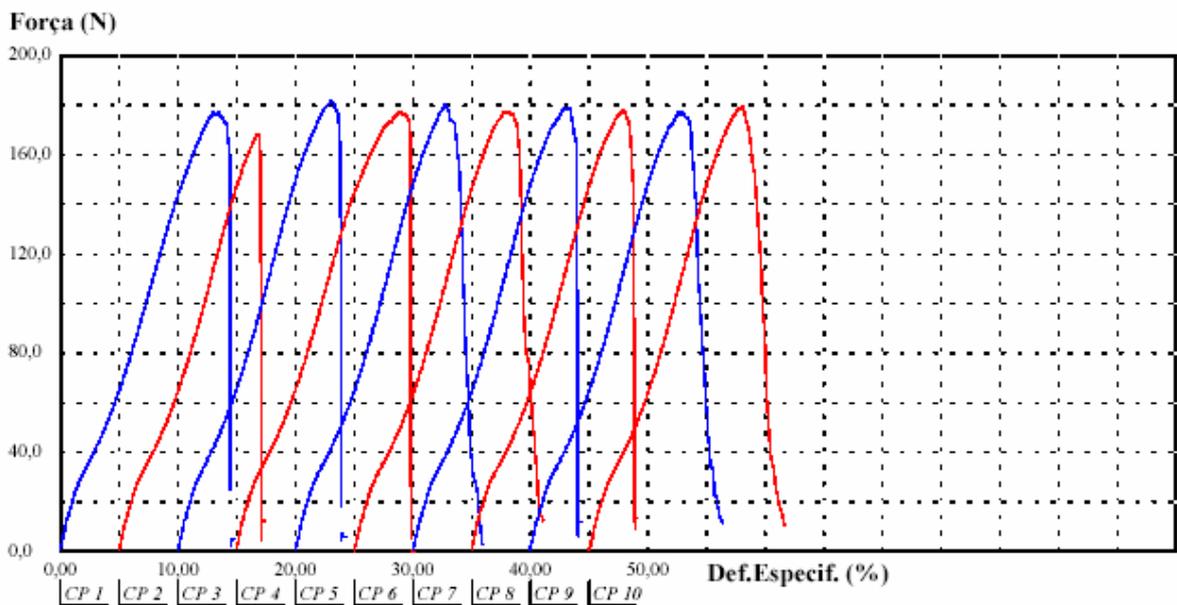
# FURG - DMC

## POLICAB - Laboratório de Análise de Tensões

### Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL2000**    Célula: **Trd 21**    Extensômetro: -    Data: **18/01/2008**    Hora: **11:27:40**    Trabalho nº **2903**  
 Programa: **Tesc versão 1.10**    Método de Ensaio: **ENSAIO DE TRAÇÃO\_500N**  
 Ident. Amostra: > Tipo: **Multifilamento de Poliéster** Material: **DIOLEN 855-TN 2200 F210 DTE** Cliente: **Dissertação - Luciana**

Corpo de Prova	Força Máxima (N)	Deformação Específica (%)	Alongamento (mm)
CP 1	177,54	13,5	40,55
CP 2	168,28	11,7	35,20
CP 3	181,62	13,1	39,32
CP 4	177,76	13,9	41,83
CP 5	180,67	12,8	38,48
CP 6	177,54	12,9	38,57
CP 7	178,96	13,1	39,30
CP 8	178,39	12,9	38,78
CP 9	177,53	12,6	37,91
CP 10	179,77	13,0	39,11
Número CPs	10	10	10
Média	177,8	12,97	38,90
Desv. Padrão	3,639	0,5737	1,721
Mínimo	168,3	11,73	35,20
Máximo	181,6	13,94	41,83



**Observação:**  
 Parâmetros de ensaio: Velocidade = 250mm/min; Comprimento inicial de medição = 300 ± 1mm; Sem Torção;  
 Condições ambientais: UR= 55 ± 2%; T= 24 ± 1°C.

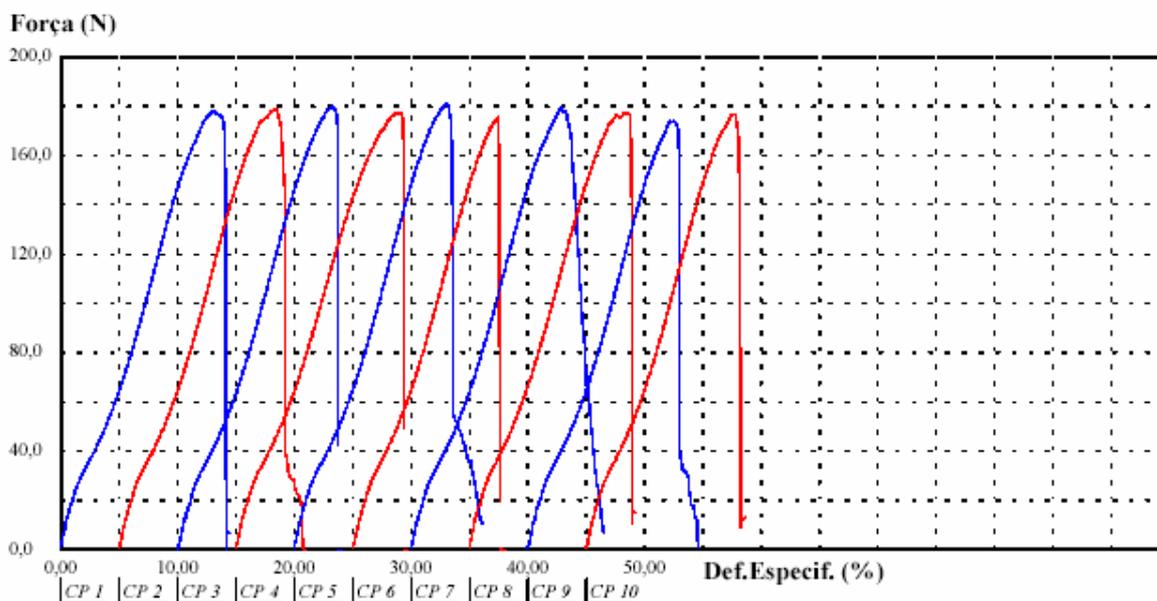
# FURG - DMC

## POLICAB - Laboratório de Análise de Tensões

### Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL2000**    Célula: **Trd 21**    Extensômetro: -    Data: **18/01/2008**    Hora: **11:32:37**    Trabalho n° **2904**  
 Programa: **Tesc versão 1.10**    Método de Ensaio: **ENSAIO DE TRACÇÃO\_500N**  
 Ident. Amostra: > Tipo: **Multifilamento de Poliêste** Material: **DIOLEN 855-TN 2200 F210 DTE** Cliente: **Dissertação-Luciana**

Corpo de Prova	Força Máxima (N)	Deformação Específica (%)	Alongamento (mm)
CP 1	178,08	13,1	39,21
CP 2	179,11	13,4	40,11
CP 3	180,09	13,3	39,78
CP 4	177,80	14,3	42,87
CP 5	180,87	13,1	39,21
CP 6	175,65	12,5	37,44
CP 7	179,32	12,9	38,78
CP 8	177,73	13,3	39,92
CP 9	174,01	12,5	37,51
CP 10	176,90	12,6	37,75
Número CPs	10	10	10
Média	178,0	13,09	39,26
Desv. Padrão	2,065	0,5374	1,612
Mínimo	174,0	12,48	37,44
Máximo	180,9	14,29	42,87



**Observação:**  
 Parâmetros de ensaio: Velocidade = 250mm/min; Comprimento inicial de medição = 300 ± 1mm; Sem Torção;  
 Condições ambientais: UR= 55 ± 2%; T= 24 ± 1°C.

# APÊNDICE C – RELATÓRIOS DOS ENSAIOS DINÂMICOS

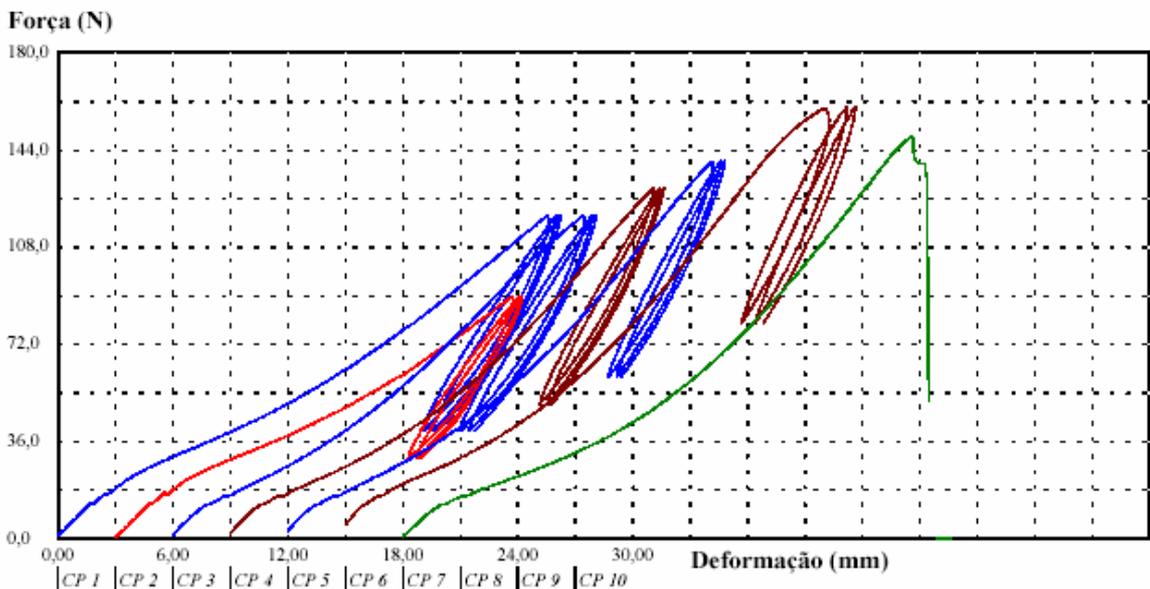
## POLICAB

Laboratório de Análise de Tensões

### Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL2000** Célula: **Trd 21** Extensômetro: - Data: **22/10/2007** Hora: **16:47:34** Trabalho n° **2877**  
 Programa: **Tesc versão 1.10** Método de Ensaio: **Cíclico-não leva a ruptura-max-med-min**  
 Ident. Amostra: > Tipo: **Fio de poli** Características: **DIOLEN 855 TN-5-F100 - 2200dtex**

Corpo de Prova	DEFOR. EM 100N (%)	Força Máxima (N)	Def.Espec. Na Força Máx (%)	Tenacidade (N/dtex)	Along. Na Força Máx (mm)	T (C)	UR (%)
CP 1	7,4	119,93	8,8	0,05	26,26	22	55
CP 2	*	89,98	7,1	0,04	21,25	22	55
CP 3	6,1	119,94	7,3	0,05	21,91	22	55
CP 4	6,1	129,97	7,5	0,06	22,64	22	55
CP 5	5,8	139,95	7,5	0,06	22,59	22	55
CP 6	5,8	159,95	8,9	0,07	26,65	22	55
CP 7	6,9	149,37	8,9	0,07	26,62	22	55
Média	6,360	129,9	7,996	0,05903	23,99	22,00	55,00
Desv.Padrão	0,6436	23,00	0,8027	0,01046	2,408	0,0000	0,0000
Mínimo	5,821	89,98	7,083	0,04090	21,25	22,00	55,00
Máximo	7,377	159,9	8,883	0,07270	26,65	22,00	55,00



Observação: Velocidade de ensaio 1N/s; Comprimento base do corpo dos corpos de prova 300mm; Fio sem torção.

## APÊNDICE D – CURVAS SELECIONADAS PARA A DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS: $E_S$ ; $E_M$ ; $\eta$

Tabela D.1 – Arquivos com as respectivas curvas selecionadas para o ajuste de curvas.

<i>Arquivo</i>	<i>Corpo de Prova</i>
2887	1, 4 e 5
2890	8
2892	10
2893	6
2894	3, 4, 6 e 9
2895	1 e 7
2896	1, 2 e 10
2898	5 e 6
2900	4, 6, 9 e 10
2901	2, 5 e 7
2902	8
2903	5, 6, 8 e 9
2904	7
2907	4
2939	2, 4, 7, 8 e 9
2940	4 e 7
2941	3 e 5
2942	5 e 7
2943	3 e 9
2945	1
2946	5
2947	4, 6, 8 e 9
2948	4
2949	9
2952	4 e 9
2953	2

## APÊNDICE E – RESULTADO COM A RETIRADA DO COEFICIENTE $p_1$

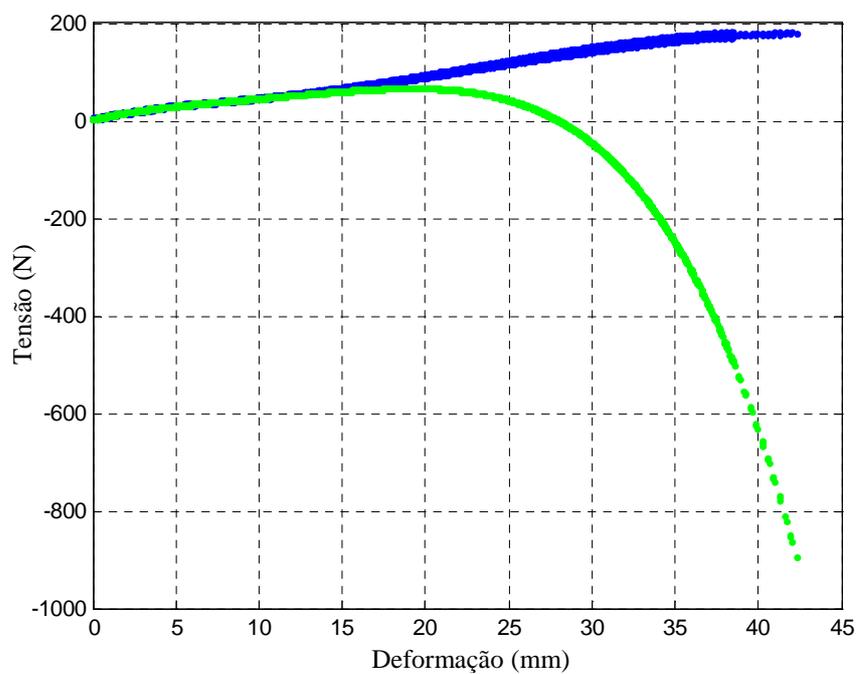


Figura E.1 – Resultado com a retirada do coeficiente  $p_1$  (  $p_1 = 7,924 \cdot 10^{-6}$  )

## APÊNDICE F – VALORES DAS VARIÁVEIS DE SAÍDA NO MOMENTO DE RUPTURA DE CADA MULTIFILAMENTO

Tabela F.1 - Resultado da simulação numérica para um conjunto de 30 multifios com 300mm de comprimento. Término do processo com ruptura de 39,03mm deformação e uma tensão de 176,04N.

$t_R$ (s)	$\varepsilon_R$ (mm)	$\varepsilon_R$ (%)	$\sigma_M$ (N)	CR (%)	MNI
9,3000	38,7503	12,9167	175,5694	17,832	30
9,3600	39,0003	13,0001	175,9883	18,943	29
9,3608	39,0035	13,0012	175,9937	18,957	28
9,3608	39,0037	13,0012	175,9941	18,959	27
9,3609	39,0040	13,0013	175,9945	18,960	26
9,3613	39,0057	13,0019	175,9973	18,967	25
9,3614	39,0062	13,0021	175,9981	18,970	24
9,3619	39,0083	13,0027	176,0014	18,979	23
9,3622	39,0093	13,0031	176,0030	18,983	22
9,3626	39,0110	13,0037	176,0059	18,991	21
9,3634	39,0145	13,0048	176,0116	19,007	20
9,3638	39,0163	13,0054	176,0145	19,014	19
9,3640	39,0168	13,0056	176,0153	19,017	18
9,3640	39,0170	13,0057	176,0157	19,018	17
9,3641	39,0175	13,0058	176,0165	19,020	16
9,3651	39,0215	13,0072	176,0230	19,038	15
9,3653	39,0225	13,0075	176,0246	19,042	14
9,3656	39,0235	13,0078	176,0263	19,047	13
9,3658	39,0243	13,0081	176,0275	19,050	12
9,3661	39,0255	13,0085	176,0295	19,056	11
9,3663	39,0265	13,0088	176,0312	19,060	10
9,3664	39,0267	13,0089	176,0316	19,061	9
9,3668	39,0288	13,0096	176,0348	19,070	8
9,3669	39,0290	13,0097	176,0352	19,071	7
9,3670	39,0295	13,0098	176,0360	19,074	6
9,3675	39,0315	13,0105	176,0393	19,083	5
9,3682	39,0345	13,0115	176,0442	19,096	4

9,3684	39,0353	13,0117	176,0454	19,099	3
9,3685	39,0355	13,0118	176,0458	19,101	2
9,3687	39,0365	13,0122	176,0474	19,105	1
9,3688	39,0368	13,0122	176,0478	19,106	0



## ANEXOS

### ANEXO A: MÉTODO INCREMENTAL PARA SOLUÇÃO DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS ORDINÁRIAS, FEITA POR SIAS E CREUS

#### 4. Modelagem Numérica do Comportamento Dinâmico com Amortecimento Viscoelástico Generalizado

Nesta seção será mostrada, em detalhe, a solução para um sistema dinâmico com modelo Zener, como o estudado analiticamente na seção 2, usando integração numérica. O procedimento pode ser facilmente generalizado para sistemas mais complexos.

##### *Formulação e Montagem do Algoritmo*

Considerando a equação diferencial do modelo Zener dada na equação [12] escreve-se a equação (24)

$$\frac{\dot{F}}{kk_1} = \frac{u}{c} + \frac{(k+k_1)\dot{u}}{kk_1} - \frac{F}{kc} \quad (24)$$

É possível escrever  $\dot{F} = \frac{\Delta F}{\Delta t}$  e, assim, por integração direta tipo Euler,

$$\Delta F = \frac{kk_1}{c} u \Delta t + (k+k_1)\dot{u} \Delta t - \frac{k_1}{c} F \Delta t \quad (25)$$

A expressão que define o sistema dinâmico pode ser escrita da seguinte forma:

$$m\ddot{u} + F = P \quad (26)$$

Para uma formulação incremental utilizando o método da Aceleração Linear, apresentada por Paz [13], pode-se definir

$$\begin{aligned} \Delta \ddot{u} &= \ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i \\ \Delta F &= F_{i+1} - F_i \\ \Delta P &= P_{i+1} - P_i \end{aligned} \quad (27)$$

Então, numa formulação incremental, a equação (26) é escrita como segue:

$$m\Delta \ddot{u} + \Delta F = \Delta P \quad (28)$$

Assumindo a equação  $\ddot{u}_{i+1} = \ddot{u}_i + \frac{\Delta \ddot{u}}{\Delta t}(t-t_i)$  para a aceleração, integrando-a duas vezes com respeito ao tempo, entre os limites  $t_i$  e  $t$ , é possível obter a variação da velocidade para o sistema. Esta variação é definida da seguinte forma:

$$\Delta \dot{u} = \dot{u}_i(t-t_i) + \frac{1}{2} \frac{\Delta \ddot{u}}{\Delta t} (t-t_i)^2 \quad (29a)$$

$$\Delta u = \dot{u}_i(t-t_i) + \frac{1}{2} \dot{u}_i(t-t_i)^2 + \frac{1}{6} \frac{\Delta \ddot{u}}{\Delta t} (t-t_i)^3 \quad (29b)$$

Assumindo equilíbrio em  $t = t_i + \Delta t$  para as equações (29a) e (29b) escreve-se:

$$\Delta \dot{u} = \left[ \ddot{u}_i + \frac{1}{2} \Delta \ddot{u} \right] \Delta t \quad (30a)$$

$$\Delta u = \dot{u}_i \Delta t + \left[ \frac{1}{2} \ddot{u}_i + \frac{1}{6} \Delta \ddot{u} \right] \Delta t^2 \quad (30b)$$

Isolando  $\Delta \ddot{u}$  da equação (30b) obtém-se

$$\Delta \ddot{u} = \frac{6}{\Delta t^2} \Delta u - \frac{6}{\Delta t} \dot{u}_i - 3\ddot{u}_i \quad (31)$$

Substituindo a equação (31) na equação (30a) tem-se

$$\Delta \dot{u} = \frac{3}{\Delta t} \Delta u - 3\dot{u}_i - \frac{\Delta t}{2} \ddot{u}_i \quad (32)$$

Escrevendo  $\dot{u} = \frac{\Delta u}{\Delta t}$  e substituindo as equações (25), (30a) e (30b) na (28), a equação do sistema dinâmico é reescrita do seguinte modo:

$$m \left[ \frac{6}{\Delta t^2} \Delta u - \frac{6}{\Delta t} \dot{u}_i - 3\ddot{u}_i \right] + \frac{kk_1}{c} u_i \Delta t + (k + k_1) \Delta u - \frac{k_1}{c} F_i \Delta t = \Delta P \quad (33)$$

Portanto, da equação (33), é possível separar as parcelas referentes à rigidez efetiva e à carga efetiva para resolver o sistema  $\bar{K} \Delta u = \Delta \bar{P}$ .

Sendo assim, define-se

$$\bar{K} = \frac{6}{\Delta t^2} m + k + k_1 \quad (34a)$$

$$\Delta \bar{P} = \Delta P + m \left[ \frac{6}{\Delta t} \dot{u}_i + 3\ddot{u}_i \right] - \frac{kk_1}{c} u_i \Delta t + \frac{k_1}{c} F_i \Delta t \quad (34b)$$

Portanto, o algoritmo para resolver o sistema no tempo  $t$ , com passo  $\Delta t$  é:

1º) Calcular a rigidez e a carga efetiva do sistema no instante  $t$

$$\bar{K} = \frac{6}{\Delta t^2} m + k + k_1$$

$$\Delta \bar{P} = \Delta P + m \left[ \frac{6}{\Delta t} \dot{u}_i + 3\ddot{u}_i \right] - \frac{kk_1}{c} u_i \Delta t + \frac{k_1}{c} F_i \Delta t$$

2º) Calcular o valor  $\Delta u$

$$\Delta u = \frac{\Delta \bar{P}}{\bar{K}}$$

3º) Calcular o valor  $\Delta F$

$$\Delta F = \frac{kk_1}{c} u \Delta t + (k + k_1) \dot{u} \Delta t - \frac{k_1}{c} F \Delta t$$

4º) Atualizar os vetores  $F$  e  $u$  no instantes  $i+1$

$$F_{i+1} = F_i + \Delta F$$

$$u_{i+1} = u_i + \Delta u$$

5º) Calcular o valor  $\Delta \dot{u}$  com a equação (32) e atualizar o vetor  $\dot{u}$  no instante  $i+1$

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \Delta \dot{u}$$

6º) Atualizar o vetor  $\ddot{u}$  no instante  $i+1$  a partir da equação (26)

$$\ddot{u}_{i+1} = \frac{1}{m}(P_{i+1} - F_{i+1})$$

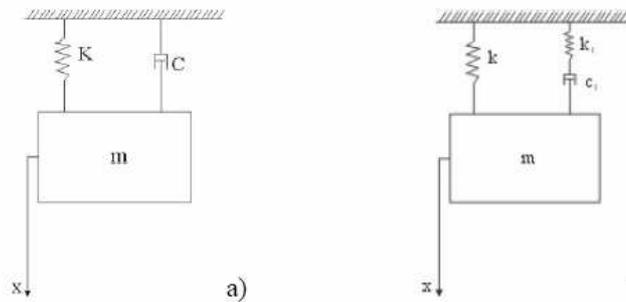
Após o 6º passo deve-se voltar ao passo inicial até que o tempo final  $t$  desejado seja alcançado. A formulação de Euler é sensível à variação de  $\Delta t$ . Para este problema, é importante lembrar que, quando a constante  $k_1 \rightarrow +\infty$ , a constante  $\Delta t$  deve tender zero.

Fonte: Creus, Guillermo e Sias, Daniel. **Amortecimento viscoelástico em materiais compósitos**. CEMACOM-PPGEC/UFR.GS. Brasil. *Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.* 2004.

## ANEXO B: SOLUÇÃO ANALÍTICA DO MODELO DE ZENER OBTIDA POR VOLTERRA (1965)

### 2. Sistema Dinâmico com Modelo Zener

A generalização óbvia é substituir o modelo Kelvin por um modelo Standard ou Zener, figura. 1. O modelo Kelvin é formado por uma mola em paralelo com um amortecedor, enquanto que o modelo Zener é composto por uma mola em paralelo com um elemento Maxwell - sendo o caso mais simples do modelo Maxwell generalizado.



**Figura 1** – a) Modelo Viscoelástico Kelvin; b) Modelo Viscoelástico Zener (usado por Volterra, 1965)

Este problema foi analisado, em 1965, por Volterra [11]. A equação de equilíbrio é escrita como mostra a equação (3)

$$m\ddot{x} + kx + Ae^{-\rho t} \int_{-\infty}^t e^{\rho\tau} \frac{dx(\tau)}{d\tau} d\tau = 0 \tag{3}$$

onde  $\rho = \frac{k_1}{c_1}$  e  $A = k_1$ . A equação (3) pode ser transformada na equação diferencial (4) através de alguns algebrismos simples, obtendo-se

$$m\ddot{x} + \rho m\dot{x} + (k + A)x = 0 \tag{4}$$

Definindo

$$\begin{aligned} \omega_0^2 &= k/m \\ \omega_1^2 &= \omega_0^2 + A/m \end{aligned} \tag{5}$$

Volterra obteve a solução da equação (4) na forma

$$x(t) = C_1 e^{-\left(\frac{\rho}{2}\right)t} \cos(\omega_1 t) + e^{-\left(\frac{\rho}{2}\right)t} (C_2 \cos(\omega_1 t) + C_3 \text{sen}(\omega_1 t)) \tag{6}$$

onde ,

$$\begin{aligned}
 \lambda_1 &= -\rho \frac{\omega_0^2}{\omega_1^2} \\
 \lambda_2 &= -\rho \frac{A}{2m\omega_1^2} + i\omega_1 \\
 \lambda_3 &= -\rho \frac{A}{2m\omega_1^2} - i\omega_1
 \end{aligned} \tag{7}$$

As constantes  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  são determinadas pelas condições iniciais. Para obter uma solução analítica, Volterra fez suposições adicionais onde os valores de  $\rho_i$  e  $A_i$  são positivos e estes

pequenos tal que  $\left(\frac{A_i}{m\omega_0^2}\right)^2$  e  $\rho_i^2$  podem ser desprezados em comparação com a unidade e  $\omega_0^2$ , respectivamente; nestas condições pode ser mostrado que a parte real das raízes de equação característica são todas negativas.

O comportamento do sistema dinâmico com o modelo Zener é consideravelmente diferente do comportamento com o modelo Kelvin. Por exemplo, as figuras (2-4) indicam o fator de amplificação em função da frequência, onde observam-se vários picos. Para valores altos do parâmetro  $\theta$  - ( $\theta = \rho/\omega_0$ ), o comportamento do modelo Zener aproxima-se do comportamento do modelo Kelvin e a mesma coisa acontece com a relação de amplificação, que assume a forma característica, como mostram as figuras (2-4).

## ANEXO C – CABO DE POLIÉSTER COM SUB-CABOS HELICOIDAIS

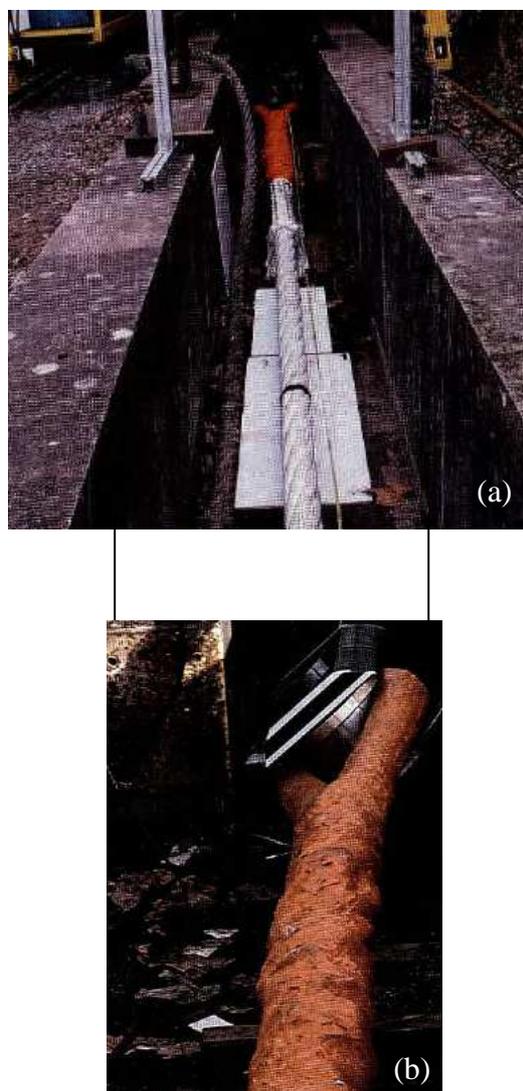


Figura C.1 – Cabo de Poliéster com sub-cabos helicoidais. C1(a) – Cabo torcido com seis sub-cabos helicoidais. C1(b) - Cabo de poliéster em uma polia (DAVIES; FOREST; LACOTE, 2007).

## **ANEXO D – TABELA QUI-QUADRADO**



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**AUGUSTO, OSCAR B.; ANDRADE, BERNARDO LUÍS R.; ROSSI, RONALDO R.** (2002). Otimização de recursos para a operação de instalação de âncoras de equipamentos offshore. Disponível em:

[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0101-74382002000300002&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0101-74382002000300002&script=sci_arttext)

**CARBONO, AFONSO J. J.** (2005). Otimização de Linhas de Ancoragem utilizando Algoritmos Genéricos. Pontifícia Unoiversidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Certificação Digital N° 0312541/CA.

**CARNEIRO, F.L.L.B.** et al. (1997). *Offshore Engineering. Computational Mechanics Publications.*

**COTESI** - Companhia de Têxteis Sintéticos, AS. *Jornal Oficial nº L 230 de 31/08/1999 p. 0009 – 0012.* 1999/598/CE: Decisão da Comissão de 4 de Maio de 1999 relativa ao auxílio estatal que Portugal tenciona conceder a favor da Cotesi - Companhia de Têxteis Sintéticos, SA [notificada com o número C(1999) 1268]. Texto relevante para efeitos do EEE (Espaço Económico Europeu). Acesso em: 23 nov. 2005. Disponível em:

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31999D0598:PT:NOT>

**CREUS, GUILHERMO; SIAS, DANIEL** (2004). Amortecimento viscoelástico em materiais compósitos. CEMACOM-PPGEC/UFR.GS. Brasil. *Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.*

**DAVIES, PETER; FOREST, BERTRAND; LACOTE, NICOLAS** (2007). *Large Synthetic Fiber Ropes for Marine Applications.* Disponível em: Portal CAPES

[http://vnweb.hwwilsonweb.com/hww/results/getResults.jhtml?\\_DARGS=/hww/results/results\\_common.jhtml.7](http://vnweb.hwwilsonweb.com/hww/results/getResults.jhtml?_DARGS=/hww/results/results_common.jhtml.7)

**DEL, BACCHIO; MENICONI, LUÍZ CLÁUDIO** (1999). *Deep Water Moorings Systems Using Fiber Rope. Composite Materials for Offshore Operations - 2*, S. S. Wang, J. G. Williams, and K. H. Lo, Eds., American Bureau of Shipping, 255-264.

Disponível em: <http://www.mms.gov/tarprojects/268/AbstractReport.pdf>

**GONÇALVES, RICARDO CÉLIO F.; COSTA, LUÍS CLÁUDIO S.** (2002). Inspecção em Linhas de Ancoragem de Unidades de Produção. Petróleo Brasileiro SA – PETROBRÁS. Trabalho apresentado no XXI Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivo, Salvador, agosto. Acesso em: 20 fev. 2006. Disponível em:

<http://www.aende.org.ar/sitio/biblioteca/material/PDF/COTE232.PDF>

**MCKENNA, H.A.; HEARLE, J.W.S; O’HEAR, N.** (2004). *Handbook of fibre rope technology*. The Textile Institute. Cambridge England. Disponível em:

[http://books.google.com/books?id=hSjBPCvfKkYC&printsec=titlepage&dq=rope+polyester+offshore&lr=&hl=pt-BR&source=gbs\\_toc\\_s&cad=1#PPR3,M1](http://books.google.com/books?id=hSjBPCvfKkYC&printsec=titlepage&dq=rope+polyester+offshore&lr=&hl=pt-BR&source=gbs_toc_s&cad=1#PPR3,M1)

**POPOV, EGOR PAUL** (1978). *Introdução à Mecânica dos sólidos*. Tradução: Mauro O. C. Amorelli; revisão técnica Arno Blass. São Paulo: Edgard Blücher.

**SANTOS, JOSÉ D.; SILVA, ZANONI C.** (2006). *Métodos Numéricos*. Editora Universitária/ UFPE. Disponível em:

[http://books.google.com.br/books?id=BxeQiS\\_M2d0C&pg=PA165&dq=metodo+simpson&ei=8St4SoDfKZqUygT0m72RAw#v=onepage&q=&f=false](http://books.google.com.br/books?id=BxeQiS_M2d0C&pg=PA165&dq=metodo+simpson&ei=8St4SoDfKZqUygT0m72RAw#v=onepage&q=&f=false)

**SILVA, MAURICIO G.** (2005). *Comportamento Reológico de Emulsões de água em óleo na Indústria Petrolífera*.

**SMEETS, P.; JACOBS, M.; MERTENS, M.** (2001). *Creep as a Design Tool for HMPE Ropes in Long Term Marine and Offshore Application*. MTS Oceans, 6p

**STANTON, RALPH** (1967). *Numerical Methods for Science and Engineering*. Prentice-Hall of India Private Limited. New Delhi.

**TRIOLA, MARIO F.** (1999). *Introdução à Estatística*. Sétima Edição. JC Editora.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)