

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais  
PPGEM

**Soquetagem de Cabos de Fibra Poliéster com Resina Epóxi**

Tiago de Medeiros Schmidt

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2005

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais  
PPGEM

**Soquetagem de Cabos de Fibra Poliéster com Resina Epóxi**

Tiago de Medeiros Schmidt  
Engenheiro de Materiais

Trabalho realizado no Laboratório de Materiais Poliméricos (LAPOL) do Departamento de Materiais da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre  
2005

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração de Ciência e Tecnologia dos Materiais e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria Madalena de Camargo Forte

Banca Examinadora:

Dr. Dellyo Ricardo Álvares – CENPES/PETROBRAS

Prof. Dr. Sandro Campos Amico – PPGEM/UFRGS

Prof<sup>a</sup>. Dra. Sônia Marli Bohrz Nachtigall – IQ/UFRGS

Prof. Dr. Antônio Cezar Faria Vilela

Coordenador do PPGEM

*“Se enxerguei mais longe do que outros,  
foi por estar sentado em ombros de gigantes.”*

(Isaac Newton 1643 – 1725)

*Aos meus pais Ronaldo e Lúcia  
e aos meus irmãos Graciane e Felipe*

## AGRADECIMENTOS

---

Primeiramente e acima de tudo a Deus que me concedeu a vida e permitiu que eu chegasse até aqui.

À minha família por estar ao meu lado em todos os momentos da minha vida, incentivando-me sempre a realização dos meus objetivos e fortalecendo-me na busca dos meus sonhos.

À grande orientadora, professora e amiga Madalena pela confiança depositada para a realização do projeto.

À Patrícia Hoff que com seu amor sempre soube me engrandecer, apoiar e opinar quando tudo parecia estar confuso e difícil.

Aos presentes e curiosos amigos, Marcelo Guimarães, Thiago Ferreira e Vinícius Simões, que se mostravam interessados em entender o projeto e que me empolgavam para a realização do mesmo.

Às bolsistas de IC Carla Bianchini e Renata Becker pela dedicação e vontade em aprender.

À equipe da Análise Térmica, Ana, Micheli e Anderson e aos colegas do Laboratório de Materiais Poliméricos (LAPOL) que contribuíram de alguma forma para que o meu objetivo fosse alcançado: Cristina, Flávia, Sandro, Franco, Bianca, Isadora, Alessandra, Diógenes, Sheila e Teresa.

Ao Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME), em especial aos bolsistas de IC Lucas Cauduro e Francisco que despenderam seus preciosos tempos com os ensaios mecânicos.

À banca examinadora pela participação e valiosa contribuição ao trabalho.

À PETROBRAS pelo financiamento do projeto.

À Cordoaria São Leopoldo (CSL) pelo suporte técnico.

À UFRGS, PPGEM, LAPOL e CAPES pelos suportes técnico e financeiro.

# SUMÁRIO

---

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>X</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIações</b> .....	<b>XV</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>XVIII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XIX</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVO</b> .....	<b>3</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>4</b>
3.1. CABOS DE ANCORAGEM E FIBRAS SINTÉTICAS .....	5
3.1.1. <i>Cabos de ancoragem</i> .....	5
3.1.2. <i>Fibras Sintéticas</i> .....	8
3.1.2.1. Polipropileno (PP) .....	12
3.1.2.2. Polietileno (PEAD e UHMWPE) .....	13
3.1.2.3. Poliéster (PET) .....	13
3.1.2.4. Poliamida (PA) .....	14
3.1.2.5. Aramida.....	14
3.2. TIPOS DE TERMINAÇÕES DE CABOS .....	14
3.2.1. <i>Terminação na forma de extremidade trançada</i> .....	15
3.2.2. <i>Terminação com extremidade soquetada</i> .....	16
3.3. RESINAS TERMORRÍGIDAS COM APLICAÇÃO EM COMPÓSITOS.....	17
3.3.1. <i>Tipos de resinas</i> .....	20
3.3.1.1. Epóxi .....	22
3.3.1.2. Poliésteres.....	28
3.3.2. <i>Resinas aplicadas na soquetagem de cabos</i> .....	31

---

<b>4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>34</b>
4.1. MATERIAIS .....	34
4.1.1. Cabos de fibra de poliéster (PET) .....	34
4.1.2. Soquetes .....	35
4.1.2.1. Soquetes para cabos de PET de 10 mm.....	35
4.1.2.2. Soquetes para cabos de PET de 48 mm.....	36
4.1.3. Resinas Termorrígidas .....	37
4.1.3.1. Resina Wirelock [37] .....	38
4.1.3.2. Resina Calcepóxi [59] .....	38
4.1.3.3. Resina Araldite .....	38
4.1.4. Agente Desmoldante .....	40
4.2. MÉTODOS .....	41
4.2.1. Preparação da terminação do cabo.....	41
4.2.2. Preparação das misturas das resinas termorrígidas comerciais .....	41
4.2.3. Caracterização da fibra de poliéster e das resinas.....	45
4.2.3.1. Espectroscopia de Infravermelho .....	45
4.2.3.2. Análise Termogravimétrica.....	45
4.2.3.3. Calorimetria Diferencial de Varredura .....	45
4.2.3.4. Análise Dinâmico-Mecânica .....	45
4.2.4. Avaliação da capilaridade da resina no cabo de PET .....	46
4.2.5. Soquetagem de cabos de fibra poliéster .....	46
4.2.6. Avaliação mecânica dos cabos soquetados.....	48
4.2.6.1. Ensaio de compressão.....	48
4.2.6.2. Ensaio de Dureza Barcol.....	48
4.2.6.3. Ensaio de tração dos cabos de PET .....	49
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>50</b>
5.1. FIBRA DE POLIÉSTER DE CABOS COMERCIAIS .....	50
5.2. AVALIAÇÃO DA CURA E COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS RESINAS TERMORRÍGIDAS ..	54
.....	
5.3. COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DAS RESINAS .....	65

---

5.4.	AVALIAÇÃO DO TEMPO GEL E CURA DAS RESINAS .....	73
5.5.	AVALIAÇÃO DA CAPILARIDADE DAS RESINAS NO CABO DE POLIÉSTER .....	75
5.6.	AVALIAÇÃO DA DUREZA E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS RESINAS CURADAS..	77
5.7.	SOQUETAGEM DOS CABOS DE PET DE 10 MM COM RESINA EPÓXI – ENSAIOS MECÂNICOS.....	81
5.8.	SOQUETAGEM DE CABO DE PET DE 48 MM COM RESINAS EPÓXI – ENSAIOS MECÂNICOS.....	87
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>91</b>
<b>7.</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>94</b>
<b>8.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>95</b>

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1: Cabo de aço e de fibra poliéster após utilização em aplicação marítima [17].	5
Figura 2: Desenho esquemático dos elementos constituintes de um cabo de aço [18,21].	6
Figura 3: Desenho esquemático dos elementos básicos de um cabo de fibra sintética [14].	6
Figura 4: Desenho esquemático de um cabo Ultraseven <sup>®</sup> [22].	8
Figura 5: Cabo de poliéster usado na ancoragem de plataforma petrolífera de águas profundas [23].	8
Figura 6: Esquema do processo de obtenção de fibra a partir de polímero no estado fundido [24].	9
Figura 7: Tipos de terminações de cabos: (a) extremidade trançada, (b) soquete convencional e (c) soquete e cone [23].	15
Figura 8: Terminação na forma de extremidade trançada (“olhal”) [14].	16
Figura 9: Passos para a soquetagem da extremidade de cabo de aço: (a) desentrelaçamento das pernas do cabo, (b) formação do “cabelo de bruxa”, (c) introdução do cabo no soquete, (d) e (e) vedação do soquete e (f) adição da resina no soquete [37].	17
Figura 10: Reação de síntese da resina epóxi do tipo epi-bis (DGEBA) [53].	22
Figura 11: Estrutura química da molécula de bisfenol F epoxidada [55].	23
Figura 12: Reação de cura por abertura de anel do grupo epóxido com amina [53].	24
Figura 13: Variação de viscosidade da resina epóxi em função do tempo de cura [39].	25
Figura 14: Variação das propriedades mecânicas da resina epóxi em função do tempo de cura [39].	25
Figura 15: Síntese de poliéster insaturado a partir do anidrido maleico maleico e etileno glicol [53].	29
Figura 16: Síntese de poliéster insaturado a partir do anidrido ftálico, anidrido maleico e dietileno glicol [50].	30
Figura 17: Reticulação com estireno do poliéster insaturado [50].	30

Figura 18: Típico exemplo de inchamento do cabo de aço inoxidável devido à corrosão por frestas [37]. .....	31
Figura 19: Fotografia dos cabos com diâmetro de (a) 10 mm e (b) 48 mm.....	34
Figura 20: Desenho esquemático do perfil cônico do soquete [37]. .....	35
Figura 21: Fotografia dos soquetes menor, intermediário e maior, respectivamente, utilizados na soquetagem de cabos de 10 mm. ....	36
Figura 22: Fotografia dos soquetes (a) menor (vista superior), (b) intermediário, (c) maior A e (d) maior B, utilizados na soquetagem de cabos de 48 mm. ....	37
Figura 23: Fotografia da extremidade do cabo de fibra poliéster nas formas: (a) normal e (b) “cabelo de bruxa”. .....	41
Figura 24: Termograma de DSC da fibra de poliéster do cabo de 10 mm. ....	51
Figura 25: Termograma de TGA da fibra de poliéster do cabo de 10 mm em atmosfera inerte. ....	52
Figura 26: Termograma de TGA da fibra de poliéster do cabo de 10 mm em atmosfera oxidante.....	52
Figura 27: Espectro de FTIR do <i>marine finish</i> removido por hexano. ....	53
Figura 28: Espectro de FTIR do componente líquido Wirelock. ....	55
Figura 29: Espectro de FTIR do componente granular Wirelock.....	56
Figura 30: Espectro de FTIR da carga do Peróxido de Benzoíla (BOP). ....	56
Figura 31: Termograma de TGA da resina curada Wirelock em atmosfera inerte. ...	57
Figura 32: Termograma de TGA da resina curada Wirelock em atmosfera oxidante. ....	58
Figura 33: Termograma de TGA da resina curada Calcepóxi em atmosfera inerte. .	58
Figura 34: Termograma de DSC da resina poliéster Wirelock. ....	61
Figura 35: Termograma de DSC da resina poliéster Calcepóxi. ....	62
Figura 36: Termograma de DSC da resina 260+2969.....	62
Figura 37: Propriedades da água do mar (densidade, temperatura e salinidade) de acordo com a profundidade [70].....	67
Figura 38: Termograma de DMA da resina (a) 1109+2969 e (b) Calcepóxi.....	69
Figura 39: Termograma de DMA da resina (a) 260+2969 e (b) Wirelock.....	70

---

Figura 40: Sobreposição de curvas de DMA das resinas Wirelock, Calcepóxi, 260+2969 e 1109+2969 do (a) módulo de armazenamento e (b) módulo de perda.....	71
Figura 41: Fotografia dos cp's usados para verificação do nível da capilaridade no cabo de PET para as resinas (a) 1109+830, (b) 1109+837 e (c) 1109+2969. ...	76
Figura 42: Fotografia dos cp's usados para medição de dureza das resinas (a)1109+830, (b)1109+837 e (c) 1109+2969. ....	77
Figura 43: Cp's para o teste de compressão da resina Wirelock. ....	79
Figura 44: Fotografias de cabos de PET de 10 mm soquetados com soquete intermediário. ....	82
Figura 45: Fotografias após ensaio mecânico de cabos de PET de 10 mm soquetados com resina (a) 1109+837, (b) Wirelock e (c) 1109+2969.....	83
Figura 46: Seção longitudinal da resina do interior do soquete intermediário após ensaio mecânico do cabo de PET de 10 mm soquetado: (a) Wirelock , (b) Calcepóxi e (c) 1457+850 .....	86
Figura 47: Seção longitudinal da resina do interior do soquete intermediário após ensaio mecânico do cabo de PET de 10 mm soquetado: (a) 260+2969 e (b) 1109+2969. ....	86
Figura 48: Ensaio mecânico na máquina MT3 na CSL do cabo de PET de 48 mm soquetado. ....	88
Figura 49: Seção longitudinal da resina 1457+850 do interior do soquete menor após ensaio mecânico do cabo de PET de 48 mm soquetado. ....	90
Figura 50: Seção longitudinal da resina 1109+2969 do interior do soquete (a) maior A e (b) maior B após ensaio mecânico do cabo de PET de 48 mm soquetado. ....	90

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 1: Propriedades típicas de fibras sintéticas usadas em cabos para a indústria naval [31].....	12
Tabela 2: Endurecedores para resina epóxi [48].....	27
Tabela 3: Propriedades físico-químicas da resina Wirelock [37].....	32
Tabela 4: Propriedades físico-químicas da resina Calcepóxi [59].....	32
Tabela 5: Dimensões dos soquetes para cabo de PET de 10 mm.....	36
Tabela 6: Dimensões dos soquetes para cabo de PET de 48 mm.....	37
Tabela 7: Propriedades físicas e químicas das resinas epóxi Araldite utilizadas fornecidas pela Vantico Ltda. ....	40
Tabela 8: Propriedades físicas e químicas dos agentes de cura utilizados na cura das resinas epóxi Araldite. ....	40
Tabela 9: Endurecedores utilizados na cura da resina epóxi Araldite GY-260 e características da mistura. ....	42
Tabela 10: Endurecedores utilizados na cura da resina epóxi Araldite GY-281 e características da mistura. ....	43
Tabela 11: Endurecedores utilizados na cura da resina epóxi Araldite GY-1109 e características da mistura. ....	43
Tabela 12: Formulações utilizadas na cura da resina epóxi Araldite XCW-1457.2. ...	44
Tabela 13: Temperaturas de decomposição, percentuais de perda de massa e resíduo das resinas curadas 260+830, 260+837, 260+2969, 281+837, 281+2969, 1109+830, 1109+837, 1109+2969, 1457+850 e 1457+3601+850. ...	60
Tabela 14: Temperaturas de transição vítrea antes ( $T_{g1}$ ) e após a reação de cura ( $T_{g2}$ ), temperaturas iniciais de flexibilização após a reação de cura ( $T_{gi}$ ), intervalos de cura ( $\Delta T_{cura}$ ) e temperaturas máximas de cura ( $T_{max}$ ) das resinas Wirelock, Calcepóxi e Araldite comerciais.....	63
Tabela 15: Temperaturas de transição vítrea antes ( $T_{g1}$ ) e após a reação de cura ( $T_{g2}$ ), temperaturas iniciais de flexibilização após a reação de cura ( $T_{gi}$ ), intervalos de cura ( $\Delta T_{cura}$ ) e temperaturas máximas de cura ( $T_{max}$ ) da resina GY-1109 com diferentes endurecedores e proporções. ....	64
Tabela 16: Módulo de armazenamento e de perda das resinas curadas nas temperaturas de 10, 20, 30 e 40°C. ....	72
Tabela 17: Tan $\delta$ das resinas curadas nas temperaturas de 10, 20, 30 e 40°C. ....	72

---

Tabela 18: Temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) das resinas curadas obtida pelas curvas do módulo de perda e da $\tan \delta$ . .....	73
Tabela 19: Tempo de gel, tempo de endurecimento e exotermia. ....	74
Tabela 20: Valores de dureza Barcol, média, desvio padrão, coeficiente de variação e valores máximo e mínimo de dureza da resina epóxi GY-1109 com diferentes propriedades e proporções. ....	78
Tabela 21: Valores de resistência à compressão das resinas termorrígidas. ....	80
Tabela 22: Carga de ruptura, média e desvio padrão dos cabos de PET não soquetados.....	81
Tabela 23: Carga de ruptura (kgf) e percentual de resistência de cabos de PET de 10 mm com extremidade normal e na forma cabelo de bruxa soquetados com resina epóxi e poliéster – Ensaio preliminares .....	82
Tabela 24: Carga de ruptura (kgf), percentual e média de resistência de cabos de PET de 10 mm com extremidade na forma de “cabelo de bruxa” soquetados com resina epóxi e poliéster.....	85
Tabela 25: Cargas de ruptura (kgf), média e desvio padrão de cabos de PET de 48 mm com terminação do tipo extremidade trançada. ....	87
Tabela 26: Carga de ruptura (kgf) e percentual de resistência de cabos de PET de 48 mm soquetados com resina epóxi.....	89

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

---

Aradur 2969 – Endurecedor à base de amina aromática Aradur 2969 CH  
Aradur 830 – Endurecedor à base de amina aromática Aradur 830 CH  
Aradur 837 – Endurecedor à base de amina alifática Aradur 837 BR  
Aradur 850 – Endurecedor à base de amina aromática Aradur 850 CH  
BOP – Peróxido de Benzoíla  
CP – Corpo-de-prova  
CSL – Cordoaria São Leopoldo  
CV – Coeficiente de Variação  
DETA – Dietilenotriamina  
DGEBA – Diglicidil Éter de Bisfenol A  
DGEBF – Diglicidil Éter de Bisfenol F  
DMA – Análise Dinâmico-Mecânica  
DP – Desvio Padrão  
DSC – Calorimetria Exploratória Diferencial  
DY-3601 – Resina epóxi à base de polipropileno glicol Araldite DY-3601  
EEW – Equivalente epóxi por peso  
Epi-Bis – Resina epóxi líquida à base de epicloridrina e bisfenol A  
FTIR – Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier  
GY-1109 – Resina epóxi à base de bisfenol A Araldite GY-1109  
GY-260 – Resina epóxi à base de bisfenol A Araldite GY-260  
GY-281 – Resina epóxi à base de bisfenol F Araldite GY-281  
IA – Índice de amina  
LAPOL – Laboratório de Materiais Poliméricos  
MDA – Metileno dianilina  
MPDA – Metafenilenodiamina  
 $P_1$  – Percentual de perda de massa 1 da amostra no termograma de TGA  
 $P_2$  – Percentual de perda de massa 2 da amostra no termograma de TGA  
 $P_3$  – Percentual de perda de massa 3 da amostra no termograma de TGA  
PA – Poliamida  
PE – Polietileno  
PEAD – Polietileno de alta densidade

PET – Poli(tereftalato de etileno) ou Poliéster

PP – Polipropileno

R – Percentual de resíduo da amostra no termograma de TGA

Resina 1109+2969 – Resina epóxi GY-1109 com o endurecedor Aradur 2969

Resina 1109+2969\_80 – Resina epóxi GY-1109 com 80 partes em peso do endurecedor Aradur 2969

Resina 1109+830 – Resina epóxi GY-1109 com o endurecedor Aradur 830

Resina 1109+830\_60 – Resina epóxi GY-1109 com 60 partes em peso do endurecedor Aradur 830

Resina 1109+837 – Resina epóxi GY-1109 com o endurecedor Aradur 837

Resina 1109+837\_50 – Resina epóxi GY-1109 com 50 partes em peso do endurecedor Aradur 837

Resina 1457+3601+850 – Resina epóxi XCW-1457.2 com a resina DY-3601 e com o endurecedor Aradur 850

Resina 1457+850 – Resina epóxi XCW-1457.2 com o endurecedor Aradur 850

Resina 260+2969 – Resina epóxi GY-260 com o endurecedor Aradur 2969

Resina 260+830 – Resina epóxi GY-260 com o endurecedor Aradur 830

Resina 260+837 – Resina epóxi GY-260 com o endurecedor Aradur 837

Resina 281+2969 – Resina epóxi GY-281 com o endurecedor Aradur 2969

Resina 281+837 – Resina epóxi GY-281 com o endurecedor Aradur 837

SiO<sub>2</sub> – Dióxido de silício ou sílica

t<sub>cura</sub> – Tempo de cura da resina termorrígida

TD<sub>1</sub> – Temperatura de decomposição 1 da amostra no termograma de TGA

TD<sub>2</sub> – Temperatura de decomposição 2 da amostra no termograma de TGA

TD<sub>3</sub> – Temperatura de decomposição 3 da amostra no termograma de TGA

t<sub>endurec</sub> – Tempo de endurecimento da resina termorrígida

T<sub>g</sub> – Temperatura de transição vítrea

T<sub>g1</sub> – Temperatura de transição vítrea antes da cura da resina no termograma de DSC

T<sub>g2</sub> – Temperatura de transição vítrea após a cura da resina no termograma de DSC

TGA – Análise Termogravimétrica

t<sub>gel</sub> – Tempo de gel da resina termorrígida

T<sub>gi</sub> – Temperatura inicial de flexibilização da resina curada no termograma de DSC

T<sub>max</sub> – Temperatura máxima atingida na cura da resina no termograma de DSC

U.R. – Umidade relativa

UHMWPE – Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular

UV – Radiação ultravioleta

$V_{\text{fibra}}$  – Volume ocupado pela fibra no interior do soquete

$V_{\text{resina}}$  – Volume ocupado pela resina na presença de fibra no interior do soquete

$V_{\text{resina}} / V_{\text{fibra}}$  – Razão do volume de resina sobre o volume de fibra

$V_{\text{soquete}}$  – Volume total interno do soquete (volume do tronco de cone)

WPE – Peso por epóxi

XCW-1457.2 – Resina epóxi à base de bisfenol A Araldite XCW-1457.2

$\Delta T_{\text{cura}}$  – Intervalo de cura da resina no termograma de DSC

## RESUMO

---

A soquetagem de cabos de fibra poliéster (PET) com resina termorrígida é uma técnica que vem sendo desenvolvida, visando à aplicação da mesma em cabos sintéticos de ancoragem de plataformas petrolíferas em águas profundas. O procedimento de soquetagem consiste em fixar a extremidade do cabo em um dispositivo metálico vazado em formato cônico, o soquete, no qual se adiciona uma resina polimérica que cura, tornando-se rígida. O trabalho visou determinar um procedimento e um tipo de resina termorrígida apropriados à soquetagem de cabos de fibra poliéster. A fibra de PET que compõe o cabo utilizado na soquetagem foi analisada termicamente por Termogravimetria (TGA) para avaliação da estabilidade térmica e por calorimetria exploratória diferencial (DSC) para avaliação da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) e da temperatura de fusão ( $T_m$ ). O lubrificante que recobre a fibra de PET foi analisado por Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR). As resinas bicomponentes comerciais selecionadas para o trabalho foram aquelas atualmente empregadas na soquetagem de cabos de aço, a resina Wirelock (poliéster) e a Calcepóxi (epóxi), e resinas epóxi Araldite. Os componentes da resina poliéster comercial foram caracterizados por FTIR. A estabilidade térmica das resinas após a cura foi avaliada por TGA, e o comportamento térmico das resinas antes e após a cura por DSC. A resposta viscoelástica das resinas curadas foi avaliada por Análise Dinâmico-Mecânica (DMA). Determinou-se a dureza de corpos-de-prova de resina epóxi com endurecedores nas proporções indicadas pelo fabricante e em proporções definidas neste trabalho. Algumas das resinas selecionadas foram testadas em ensaio de compressão. Cabos de 10 mm (escala laboratorial) e 48 mm (escala piloto) foram soquetados com resinas comerciais e avaliados por ensaio mecânico de tração. Verificou-se que o tipo de resina e sua viscosidade, a conicidade do soquete e a razão volumétrica resina/fibra são parâmetros relevantes para o bom desempenho mecânico do cabo de PET soquetado. A formação de uma camada contínua de resina na parede do soquete revestindo o cabo foi determinante para a obtenção de excelentes resultados.

## ABSTRACT

---

The socketing of polyester (PET) fiber ropes with thermoset resin has been developed aiming their application as mooring synthetic ropes for deep water oil platforms. The socketing procedure consists of fixing the ends of the rope in a hollow metallic device of conical shape, the socket, which receives the liquid polymeric resin that becomes hard after the cure. The specific aim of this work was to determine a procedure and a thermoset resin suitable for socketing PET fiber ropes. The PET fiber was analyzed by TGA and DSC. The lubricant that covers the PET fiber was analyzed by FTIR. Commercial bicomponent resins used for the socketing of steel cables, polyester resin (Wirelock) and epoxy resin (Calcepóxi), were comparatively evaluated with some selected epoxy resins (Araldite). Thermal stability of the cured resins was evaluated by TGA, and the cure and thermal behaviour of the resins were evaluated by DSC. The viscoelastic behaviour of the cured resins was evaluated by DMA. Ropes of 10 mm (lab scale) and 48 mm (pilot scale) were socketed with these resins and evaluated in tensile testing. It was verified that the resin type, the socket conicity and the resin/fiber volumetric ratio must be considered for optimum performance for the PET fiber rope. A continuous resin layer in the inner wall of the socket surrounding the rope is also very important for a successful socketing procedure.

# 1. INTRODUÇÃO

---

O uso de técnicas de ancoragem de plataformas e embarcações com cabos de fibra poliéster (PET) cresceu acentuadamente no final dos anos 90. Diversas aplicações de sistemas de ancoragem com cabos de fibras sintéticas evidenciam a substituição dos sistemas com cabos tradicionais de aço e amarras (corrente a qual recebe a conexão do cabo) em várias partes do mundo. A redução de tamanho, o baixo peso de instalação bem como os custos de instalação justificam as vantagens de utilização do novo sistema.

Uma ampla variedade de fibras sintéticas foi avaliada para uso em sistemas de ancoragem com o intuito de substituição dos cabos de aço. Geralmente, as fibras de náilon são mais usadas em cabos de maior diâmetro devido ao baixo módulo e alta deformação na ruptura cujas propriedades são requeridas por absorver o impacto gerado pelo movimento da estrutura. O poliéster, bastante usado como fibra comercial para reforço de pneus, tecidos e cabos, tem valores intermediários de módulo e tenacidade. As fibras de aramida possuem de 4 a 5 vezes a rigidez daquelas de poliéster e mais que o dobro de sua resistência mecânica. Fibras de polietileno de alta densidade (PEAD) têm tenacidade e módulo mais altos em relação às outras, sendo fortemente aplicados em cabos navais [1].

Com as fibras sintéticas sendo cada vez mais empregadas na indústria *offshore*, há interesse em tecnologias de terminações de cabos com esses tipos de fibras.

Atualmente, a extremidade trançada ou “olhal” constitui-se em um tipo de terminação tradicionalmente empregada em cabos sintéticos à base de fibras poliméricas para a ancoragem de embarcações e de plataformas petrolíferas em águas profundas. No entanto, o procedimento para a confecção da terminação do tipo extremidade trançada é pouco prático e demanda tempo e mão-de-obra especializada. A soquetagem da extremidade de cabos com uma resina polimérica tem sido uma técnica utilizada em cabos de aço e tem a vantagem de ser uma técnica mais simples e conveniente. Essa consiste de um dispositivo metálico vazado em formato cônico, denominado soquete, no qual se introduz a extremidade

do cabo de aço e adiciona-se uma resina termorrígida que, após a cura, fixa esta extremidade no dispositivo.

Neste trabalho, visando agilizar a tecnologia de confecção das terminações de cabos sintéticos à base de fibra poliéster, a técnica de soquetagem de cabos de aço foi avaliada na soquetagem de cabos de poliéster. Resinas termorrígidas comerciais, com diferentes características, foram avaliadas de maneira que os cabos de poliéster apresentassem propriedades mecânicas adequadas à aplicação.

Na Revisão Bibliográfica desta dissertação foi feita uma descrição dos cabos de ancoragem em geral, suas vantagens e desvantagens, tipos de construções e terminações, e uma descrição dos tipos de fibras sintéticas, destacando-se o processo de produção e as características destas.

Quanto aos tipos de resinas termorrígidas aplicadas como matriz de materiais compósitos procurou-se relacionar o efeito combinado dos componentes desses materiais com suas propriedades. Foi dado um enfoque especial às resinas epóxi e poliéster pela sua utilização no procedimento de soquetagem de cabos de aço.

No capítulo sobre Materiais e Métodos foram descritos os testes realizados para avaliação das resinas, curadas e não-curadas, selecionadas para a soquetagem de cabos de fibra poliéster, e para avaliação mecânica dos cabos soquetados.

No capítulo de Resultados e Discussão foram apresentados e discutidos os dados obtidos na avaliação das resinas antes e após a cura e também aqueles obtidos na avaliação dos cabos soquetados. O trabalho apresenta resultados comparativos de análises físicas, térmicas e mecânicas de diferentes tipos de resinas tomando-se como base aquelas utilizadas na soquetagem de cabos de aço, e os resultados obtidos em ensaios mecânicos de cabos de fibra poliéster soquetados com resinas termorrígidas comerciais.

Esta dissertação de mestrado teve apoio financeiro da Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS) e apoio técnico da Cordoaria São Leopoldo S.A. (CSL) e foi realizada do projeto de colaboração entre a PETROBRAS e o Laboratório de Materiais Poliméricos (LAPOL) do Departamento de Materiais da Escola de Engenharia da UFRGS.

## 2. OBJETIVO

---

O objetivo geral desta dissertação foi o desenvolvimento de um procedimento adequado para a soquetagem de cabos de fibra poliéster com resina termorrígida.

Para tanto este trabalho teve como objetivos específicos:

- Avaliar e definir resinas bicomponentes comerciais que apresentem cura à temperatura ambiente em tempo relativamente curto, viscosidade apropriada ao procedimento de soquetagem e propriedades mecânicas após a cura adequadas à aplicação;
- Avaliar o tipo de extremidade mais adequado ao procedimento de soquetagem do cabo de fibra poliéster;
- Avaliar e definir os parâmetros soquete-cabo relevantes para obtenção de terminações com resistência adequada.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

Em águas do Atlântico Sul da costa do Brasil existem várias reservas de petróleo, muitas destas localizadas em águas com profundidade entre 500 e 2000 m. o que faz dos campos petrolíferos brasileiros os mais profundos do mundo [2]. Tecnologias têm sido desenvolvidas em diversas áreas da indústria naval para aumentar a capacidade de extração e produção de petróleo em águas profundas. Uma das áreas, na qual a PETROBRAS concentra seus esforços, refere-se aos sistemas de ancoragem [3].

Por décadas cabos de aço têm sido utilizados na indústria marítima para ancoragem de embarcações e plataformas. A utilização de cabos de aço deve-se ao fato de ser um produto de alta tenacidade, baixo custo e boa durabilidade. Uma característica implícita desses cabos de aço é o alto nível de confiabilidade e de garantia de qualidade no processo de fabricação. Porém os cabos de aço possuem características que os desfavorecem, como a possibilidade de corrosão e de deterioração quando submetidos a esforços elevados, além da dificuldade de manuseio [4].

Nas últimas décadas, os cabos de aço têm sido substituídos por cabos de fibras sintéticas. Estudos realizados mostraram que as fibras sintéticas apresentam um grande potencial de aplicação na indústria naval, sendo inclusive aplicadas na confecção de cabos para ancoragem em águas profundas [5-15]. Segundo Pelegrin [7], mais de dezesseis estudos de sistemas de ancoragem com cabos sintéticos realizados na bacia de Campos (Rio de Janeiro, Brasil) foram aprovados, mostrando o potencial de uso de cabos sintéticos (poliéster, por exemplo) em aplicações *offshore*. Del Vecchio & Meniconi [16] relataram o modelamento de sistemas de ancoragem convencionais (cabos e amarras de aço) e sistemas usando cabos de fibra poliéster em três localidades (mar do Norte, bacia de Campos e Golfo do México) e em três profundidades (500, 1000 e 2000 m). A análise mostrou que materiais com menor rigidez (poliéster) induzem tensões dinâmicas menores para ondas do mar de altas frequências. Portanto, sistemas de ancoragem mais leves respondem mais rapidamente às cargas impostas sobre as plataformas petrolíferas.

Na Figura 1 pode-se verificar fisicamente a diferença entre um cabo de aço e um cabo de fibra poliéster após determinado tempo de uso.



Figura 1: Cabo de aço e de fibra poliéster após utilização em aplicação marítima [17].

### 3.1. CABOS DE ANCORAGEM E FIBRAS SINTÉTICAS

#### 3.1.1. Cabos de ancoragem

Os cabos de ancoragem na indústria naval podem ser feitos de fibras naturais ou sintéticas e de fibras metálicas.

Um cabo de aço trata-se de um componente composto de vários arames (fibras metálicas) reunidos e trançados, combinando resistência axial e rigidez com certa flexibilidade. Ele é usualmente constituído de seis ou mais elementos denominados de pernas as quais se envolvem helicoidalmente ao longo do núcleo central do cabo, denominado de alma. Cada perna consiste em um número de arames reunidos de forma helicoidal. O cabo moderno tem uma gama de construções com diferentes níveis de complexidade helicoidal, e fibras de diferentes diâmetros que são combinadas para se obter um desempenho aceitável em diversas aplicações e uma estrutura segura [18-20]. A Figura 2 mostra esquematicamente os elementos que constituem o cabo de aço.

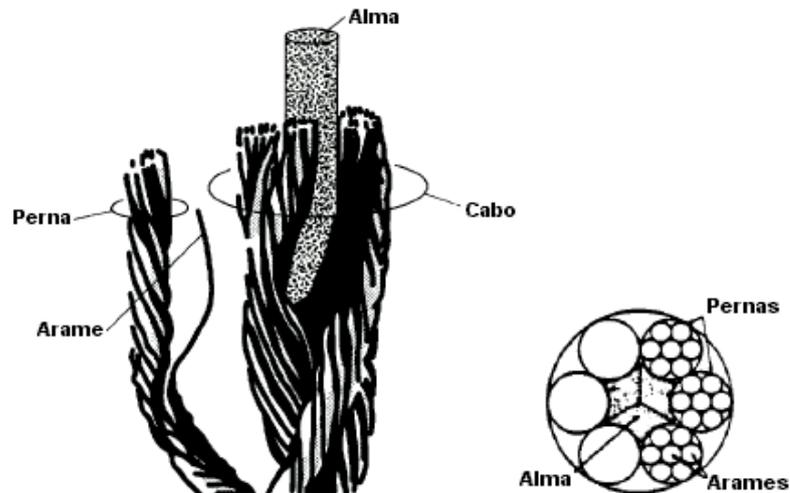


Figura 2: Desenho esquemático dos elementos constituintes de um cabo de aço [18,21].

Os elementos básicos que formam um cabo simples de fibra sintética são os monofilamentos, os *yarns* e as pernas. Centenas de monofilamentos (fibras) são reunidos para formar um *yarn*. Numerosos *yarns* são juntamente torcidos para compor os *yarns* torcidos, que são associados para constituir a “perninha” do cabo. Várias “perninhas” são torcidas para formar uma perna do cabo sintético. Por final, as pernas podem ser torcidas ou entrelaçadas para formar o cabo. O número de pernas dos cabos varia de acordo com a aplicação dos mesmos, sendo os mais usuais aqueles com 8 e 12 pernas [14]. A Figura 3 ilustra os elementos que constituem um cabo de fibra sintética simples.

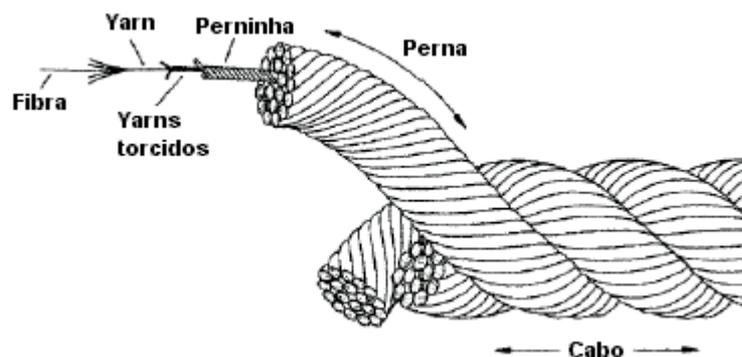


Figura 3: Desenho esquemático dos elementos básicos de um cabo de fibra sintética [14].

No início dos anos 90, a Cordoaria São Leopoldo (São Leopoldo, RS, Brasil) intensificou suas pesquisas tecnológicas para desenvolver e produzir um cabo para utilização em ancoragem de plataforma, de monobóia (terminal flutuante que recebe o petróleo descarregado de plataformas e navios), e de FPSO (*Floating, Production, Storage and Offloading*), uma embarcação com equipamentos e sistemas de uma plataforma de produção tradicional, em águas profundas: o cabo Ultraseven<sup>®</sup>. A estrutura desse cabo de poliéster para ancoragem comparada com a do sistema convencional traz uma série de vantagens tecnológicas, operacionais e também uma excelente relação custo/benefício. O cabo Ultraseven<sup>®</sup> é fabricado com fios de alta qualidade e acabamento especial para aplicação em água do mar, reduzindo a abrasão entre as fibras e prolongando tanto a vida útil quanto resistência à fadiga.

Normalmente, os cabos sintéticos podem ser confeccionados em diâmetros entre 80 e 264 mm, utilizando-se basicamente como matéria-prima as fibras de poliéster, poliamida (náilon) e polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE).

Os cabos Ultraseven<sup>®</sup> são compostos por almas trançadas (*braided core*) que são distribuídas paralelamente entre si (*parallel cores*) e envoltas por uma capa protetora (*heavy braided jacket*), conforme pode ser visto na Figura 4. O número de pernas da alma (*strand core*) varia de acordo com as dimensões do cabo. Originalmente ele é constituído por 7 almas paralelas, mas pode chegar a 9 ou 12 almas, dependendo do tipo de aplicação bem como da sua dimensão. A arquitetura do cabo Ultraseven<sup>®</sup>, com almas paralelas, propicia um torque balanceado e propriedades mecânicas adequadas às aplicações de ancoragem, tais como alto módulo elástico e resistência. De um total de 100% em massa, 80%, aproximadamente, corresponde ao peso das almas e 20% da capa e, por critério conservativo, as almas são responsáveis por 100% da capacidade de resistência à tração do cabo, cabendo à capa a função de resistência à abrasão. A associação entre a alma e o revestimento permite o fluxo contínuo de água, o que evita a retenção de material abrasivo, tais como lama, areia e corais [22].

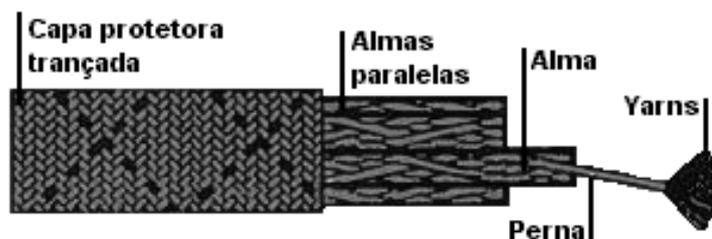


Figura 4: Desenho esquemático de um cabo Ultraseven® [22].

A Figura 5 ilustra a aplicação de cabos de fibra poliéster na ancoragem de plataforma petrolífera em águas profundas, os quais têm em suas extremidades amarras que os fixam na plataforma e no solo.

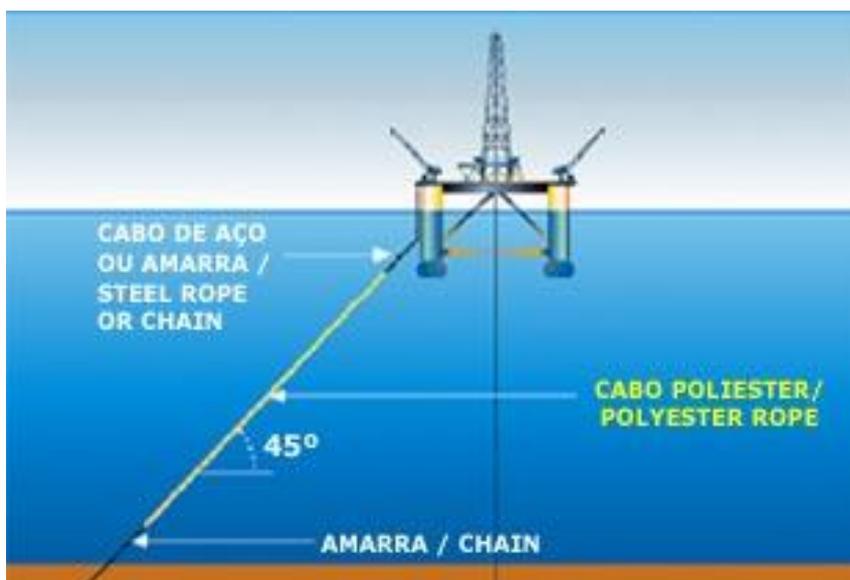


Figura 5: Cabo de poliéster usado na ancoragem de plataforma petrolífera de águas profundas [23].

### 3.1.2. Fibras Sintéticas

As fibras sintéticas têm sido produzidas por muitos anos, e sua importância no mundo atual destaca-se pelo seu amplo emprego em tecidos na indústria têxtil, em cabos na indústria naval, em compósitos na indústria aeroespacial, entre outros. Com o avanço da tecnologia na indústria *offshore*, a produção de fibras sintéticas destinadas à fabricação de cabos para ancoragem cresceu significativamente.

As fibras (monofilamentos) sintéticas podem ser produzidas através de duas técnicas principais: processamento do polímero a partir do estado fundido por extrusão (*melt processing*) ou processamento do polímero em solução (*solution processing*) [24].

Na fiação do polímero fundido por extrusão (*melt spinning*) os grânulos são alimentados por gravidade na extrusora e carregados pela rosca no cilindro, onde estão sujeitos ao calor e cisalhamento, ocorrendo o amolecimento ou fusão do polímero. A ação da rosca força o fluxo do polímero fundido, por pressão, através das fiandeiras, sendo em seguida estirado. A redução do diâmetro do filamento e a orientação molecular neste são feitas devido à velocidade de enrolamento da fibra em bobinas ser superior à velocidade da extrusão. Após as fibras solidificarem pelo resfriamento com fluxo de ar, estas são puxadas ou estiradas para maior orientação molecular na direção axial. As fibras de poliéster, utilizadas na produção de cabos, bem como a poliamida, o polietileno e o polipropileno são exemplos de fibras produzidas por este processo, sendo este o de menor custo [24]. Segundo a Patente [25] de produção de fibra poliéster foi proposto fabricar uma fibra com boa estabilidade dimensional ao calor e apropriada para alta produtividade na indústria. A Figura 6 mostra o processo de obtenção de fibra a partir do polímero no estado fundido.

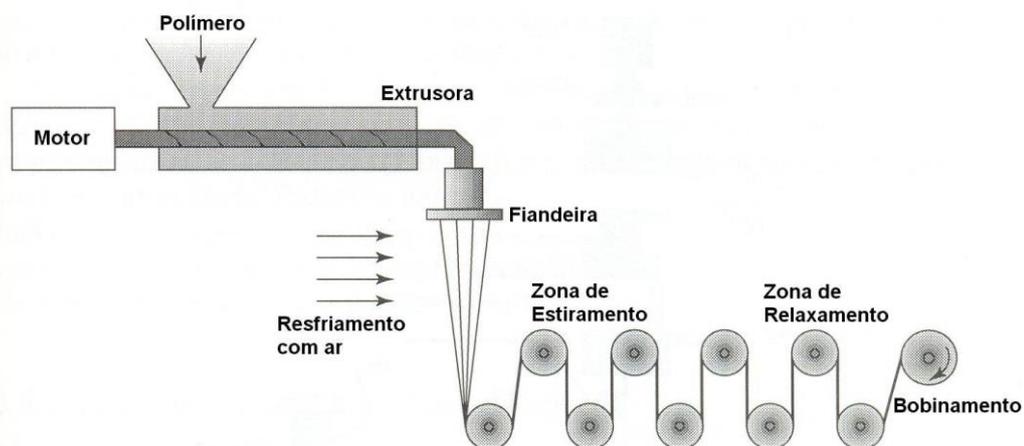


Figura 6: Esquema do processo de obtenção de fibra a partir de polímero no estado fundido [24].

Fabricantes de fibras sintéticas adicionam compostos orgânicos para auxiliar no seu processamento bem como para melhorar seu desempenho final. Alguns compostos atuam como lubrificantes enquanto outros fornecem propriedades antiestáticas e coesivas ao grupo de filamentos (*yarn*). Na indústria naval, o *marine finish* é usado para reduzir a abrasão e o desgaste entre as fibras dos cabos. Além disso atuam como barreira à água do mar, diminuindo a absorção de umidade [26].

A técnica de fiação em solução consiste resumidamente na dissolução de alta concentração de polímero em um solvente, sendo o polímero dissolvido passado por fiadeiras sobre pressão, ocorrendo a extrusão deste. Em uma etapa posterior se a fibra passar por uma zona de aquecimento para a evaporação do solvente este processo é denominado de fiação a quente (*dry spinning*); se passar por um banho de coagulação para que o polímero seja precipitado ou regenerado quimicamente, este é chamado de fiação úmida (*wet spinning*). A fibra acrílica corresponde a um tipo de fibra produzida pela técnica de fiação em solução [24,27].

Em paralelo a estas técnicas tradicionais, existe um método particular para a obtenção da fibra de polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) que é o processo de fiação a gel (*gel spinning* ou *semimelt spinning*). Neste processo, uma pequena quantidade de UHMWPE é dissolvida em um solvente adequado. A solução viscosa é fiada úmida, e, em seguida, o solvente da fiação é trocado por um não-solvente volátil, causando a gelificação do polietileno. O gel é estirado por volta dos 140°C sob condições que dão orientação ao polímero. A fibra resultante possui alta orientação, módulo e resistência [24].

As fibras poliméricas devem ser passíveis de estiramento na forma de longos filamentos com pelo menos uma relação comprimento-diâmetro de 100:1. Quando em uso, as fibras podem estar sujeitas a uma variedade de deformações mecânicas, por exemplo, estiramento, torção, cisalhamento e abrasão. Conseqüentemente, elas devem possuir um elevado limite de resistência à tração e um alto módulo de elasticidade, além de serem resistentes à abrasão. Essas propriedades são controladas pela química das cadeias dos polímeros e também pelo processo de estiramento da fibra. O peso molecular do polímero deve ser relativamente alto. Ainda, uma vez que o limite de resistência à tração aumenta com o grau de cristalinidade, a estrutura e a configuração das cadeias devem permitir a produção de um polímero altamente cristalino [28,29].

Em métodos tradicionais de produção de fibra sintética, os monofilamentos são obtidos de forma contínua. Quando vários monofilamentos são combinados e levemente torcidos para permanecerem unidos, o produto é chamado de *yarn*, podendo conter mais de 100 filamentos [27]. Para orientação em transações comerciais e objetivando a fabricação de determinados tipos de fibras ou para efetuar comparações entre si, houve a necessidade de classificá-las. Desta forma, criou-se uma forma de expressar o diâmetro do fio ou do grupo de monofilamentos (*yarn*), passando a ser conhecida como titulação dos fios ou numeração de produtos para fiação. Em outras palavras o título (densidade linear) de um fio ou de um *yarn* é representado por um número que expressa uma relação entre um determinado comprimento e sua massa correspondente como segue [30]:

- Título Tex: é a representação recomendada pelo Sistema Internacional de Unidades. Trata-se da massa, em gramas, correspondente a 1.000 metros de material. Desta forma, a amostra de um *yarn* com 210 monofilamentos de PET para aplicação *offshore*, por exemplo, pode apresentar massa de 220g e tal comprimento, tem como título 220 tex. Uma variação deste é o decitex (dtex) que correlaciona a massa em gramas dos fios poliméricos em 10.000 metros. Nesse caso, a mesma amostra exemplificada tem como título 2200 dtex.
- Título Denier: trata-se da massa correspondente a 9.000 metros de material. Portanto, a amostra de 2200 dtex citada anteriormente tem como título, em denier, 1980 den.

Dentre as fibras sintéticas produzidas atualmente, aquelas empregadas em cordoarias para a indústria *offshore* são as de: polipropileno (PP), polietileno (PEAD e UHMWPE), poliéster (PET), poliamida (náilon) e poliamida aromática (aramida), sendo estes polímeros termoplásticos [22]. A Tabela 1 destaca as características mais importantes das fibras sintéticas utilizadas para a fabricação de cabos para a indústria naval.

**Tabela 1: Propriedades típicas de fibras sintéticas usadas em cabos para a indústria naval [31].**

Propriedades	FIBRAS SINTÉTICAS					
	PP	PEAD	PET	Náilon	Aramida	Aço
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,89	0,97	1,38	1,14	1,44	7,86
Tenacidade (N/tex)	661,5	3501,5	758,5	710,9	2328,5	273,4
Módulo (MPa)	3,93	85,00	9,00	5,50	60,00	200,00
Elongação (%)	15,0	3,7	12,5	18,0	4,0	1,1
Resistência à abrasão da fibra seca	Boa	Boa	Boa	Regular	Pobre	Excelente
Resistência à abrasão da fibra úmida	Excelente	Excelente	Boa	Regular	Pobre	Excelente
Resistência à radiação UV	Regular	Regular	Boa	Excelente	Pobre	Excelente
Resistência ao calor	Regular	Pobre	Boa	Boa	Excelente	Excelente
Fluência	Pobre	Regular	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Resistência Química	Excelente	Excelente	Boa	Boa	Regular	Excelente
Flutuabilidade	Positiva	Positiva	Negativa	Negativa	Negativa	Negativa
Absorção de água	Zero	Zero	< 1% da massa do cabo	< 9% da massa do cabo	< 1% da massa do cabo	Zero

### 3.1.2.1. Polipropileno (PP)

A fibra de polipropileno é obtida sob forma de mono e multifilamentos e apresenta como propriedade principal o seu baixo peso específico (excelente fluutuabilidade). Além disso, possui alta resistência à tração. Os cabos fabricados com PP apresentam vantagens como: facilidade no deslocamento à bordo e no manuseio, não absorvem umidade, apresentam excelente performance, sendo resistentes à fadiga e à abrasão. O PP é muito versátil e absorve mais impacto do que a fibra poliéster, não apresentando igual recuperação quanto o náilon e o poliéster. A fibra de PP apresenta menor módulo que as outras fibras sintéticas. Uma excelente vantagem do PP em relação aos demais é o seu menor custo. É de extrema importância que o produto esteja ativado com protetor de radiação ultravioleta (UV) devido a sua baixa resistência a esta [14,22].

### 3.1.2.2. Polietileno (PEAD e UHMWPE)

A grande aceitação da fibra de polietileno de alta densidade no mercado deve-se as suas propriedades físicas e químicas, tais como permeabilidade, flutuabilidade, resistência ao fissuramento e produtos químicos (álcalis, ácidos, hidrocarbonetos e outros).

O UHMWPE é um polímero relativamente novo no mercado de fibras, tendo estas alto grau de eficiência e notável qualificação técnica. Segundo as patentes [32,33], é possível produzir uma fibra altamente orientada com altíssima tenacidade para produção de cabos. As fibras de UHMWPE são conhecidas comercialmente como *Spectra* e *Dyneema*. Entre suas principais características, podem-se destacar sua excelente resistência à ruptura e à abrasão, sua alta flexibilidade e seu elevado módulo dinâmico. Com uma tenacidade excepcionalmente alta, o cabo fabricado com UHMWPE apresenta maior resistência quando comparado com outro cabo sintético de construção idêntica. A relação resistência/peso é dez vezes a do aço e a fibra de UHMWPE é 40% mais resistente que a fibra de aramida [14,22].

### 3.1.2.3. Poliéster (PET)

A fibra de poliéster tem sido largamente utilizada onde é desejável baixa deformação. Embora a fibra de PET seja tão resistente quanto a de náilon, a sua tendência em estirar é menor. A fibra de PET apresenta boa resistência aos ácidos orgânicos, oxidantes, redutores, soluções salinas e aos solventes orgânicos. Possui boas características termoplásticas e alto ponto de fusão, aproximadamente 260°C, conservando sua rigidez mesmo acima de 150°C. Apresenta higroscopia (capacidade de absorção de umidade) praticamente nula. Os cabos construídos com estas fibras possuem excelente desempenho à fadiga, alta resistência mecânica, alto módulo elástico, boa capacidade de recuperação elástica e boa resistência contra radiação UV. Assim como as poliamidas, o poliéster pode ser tratado com lubrificantes especiais, no caso de cabos de ancoragem com aquele conhecido como *marine finish*. Esse aumenta a resistência à abrasão do cabo quando em trabalho cíclico. Desde a última década, os cabos de PET, confeccionados com fios de alta tenacidade, são desenvolvidos e amplamente utilizados como a melhor alternativa na ancoragem de plataformas e monobóias que trabalham na exploração e prospecção de óleo e gás em águas profundas [14,22].

#### 3.1.2.4. Poliamida (PA)

A poliamida tem sido o alicerce no desenvolvimento de fibras sintéticas. Esta apresenta auto-suficiência contra intempéries, excepcional resistência à fadiga e estiramentos com ótima recuperação elástica. Possui uma extraordinária resistência ao choque, garantindo o equilíbrio e a segurança desejada em aplicações de risco e alta exigência quanto à resistência de cabos. Exposição prolongada a altas temperaturas e à radiação UV pode causar redução da resistência mecânica da fibra. A fibra de poliamida possui resistência superior àqueles à base de resinas termoplásticas com propriedades similares, mas de composição química diferente, o que lhe confere uma vida útil superior às outras fibras sintéticas [14,22].

#### 3.1.2.5. Aramida

A fibra de Aramida (Kevlar) é uma das mais resistentes que existe, sendo cinco vezes mais resistente que o aço para uma mesma massa. Outra característica extraordinária é o seu altíssimo módulo. É resistente à chama, não apresenta fusão e opera em ampla faixa de temperatura (-196°C até 204°C), suportando contatos, por tempo limitado, com materiais a temperaturas superiores a 550°C. O aço tem sido substituído por aramida nos cabos para ancoragem marítima, nas amarrações e reboque de plataformas e nos navios de apoio às atividades navais. Os cabos à base de fibras de aramida possuem características como: resistência elevada, baixo peso específico, alta resistência a ataques químicos, e excelente estabilidade dimensional. Com a densidade equivalente a 1/5 do aço no ar e 1/20 na água, a fibra de aramida tem substituído a de aço onde o baixo peso, a alta resistência à fadiga e a resistência à corrosão sejam características preponderantes [14,22].

### 3.2. TIPOS DE TERMINAÇÕES DE CABOS

Três principais tipos de terminações podem ser considerados para os cabos de aço e/ou cabos de fibra sintética. As terminações compreendem a extremidade trançada ou “olhal” (*spliced eye*), o soquete convencional (*resin socket* ou *resin potted socket*), e o soquete e cone (*barrel-and-spike*). Os três tipos de terminações usadas em cabos de ancoragem podem ser vistos respectivamente na Figura 7. De

acordo com o enfoque do trabalho somente os dois primeiros são detalhados a seguir.

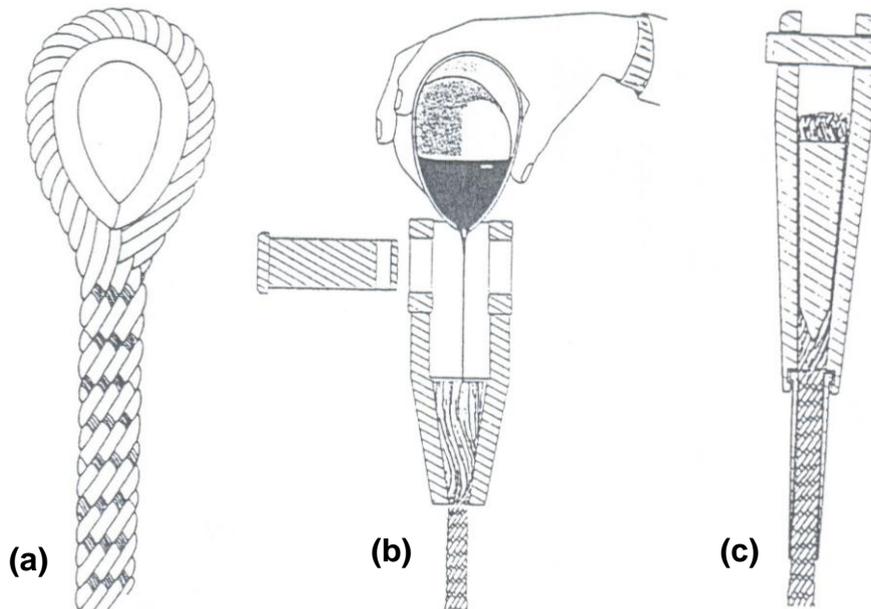


Figura 7: Tipos de terminações de cabos: (a) extremidade trançada, (b) soquete convencional e (c) soquete e cone [23].

### 3.2.1. Terminação na forma de extremidade trançada

Todos os cabos de fibras sintéticas podem ter suas extremidades confeccionadas satisfatoriamente pelo método convencional, de maneira que o “olhal” possa ser formado. No entanto, durante a confecção da terminação a perda de torção dos segmentos deve ser evitada para manter a forma e a direção dos fios [34].

A extremidade trançada é a forma mais comum de terminação para os cabos. O método consiste em destrançar e separar as pernas ou almas ao longo de uma parte da extremidade do cabo e entrelaçá-las novamente ao corpo do mesmo [14]. A Figura 8 mostra a formação típica de uma terminação do tipo extremidade trançada.



Figura 8: Terminação na forma de extremidade trançada (“olhal”) [14].

Em cabos de fibras sintéticas, após a construção do “olhal”, a terminação é recoberta com um elastômero, usualmente o poliuretano. O poliuretano que recobre a extremidade tem a função de proporcionar proteção à terminação sem afetar as características básicas das fibras sintéticas, a flexibilidade e a resistência do cabo. A camada de poliuretano externa oferece uma resistência à abrasão adicional e impede a penetração de materiais estranhos, areia, por exemplo, que aumenta o efeito abrasivo e desgaste das fibras sintéticas.

### 3.2.2. Terminação com extremidade soquetada

A soquetagem foi empregada em terminações de cabos de aço de ancoragem na indústria naval como um meio de substituição do método tradicional de extremidade trançada [21,35]. Terminações com extremidades soquetadas de cabos sintéticos com *yarns* paralelos foram testadas, porém ainda não se tem conhecimento real da eficiência do sistema de ancoragem [36].

Na soquetagem da extremidade de um cabo de aço, de uma forma geral, as pernas deste são desentrelaçadas, gerando arames desordenados na forma “cabelo de bruxa” (Figura 9a e b), sendo estes submetidos a uma limpeza com solvente adequado. A extremidade na forma de “cabelo de bruxa” é inserida e alinhada na cavidade do soquete (Figura 9c), e o espaço entre o cabo e base do soquete é vedado de tal forma que a resina se mantenha no mesmo (Figura 9d e 9e). Finalmente, o soquete contendo a extremidade do cabo de aço recebe a resina que após certo tempo cura (Figura 9f). Assim, a extremidade do cabo é fixada no soquete pela resina termorrígida [37].

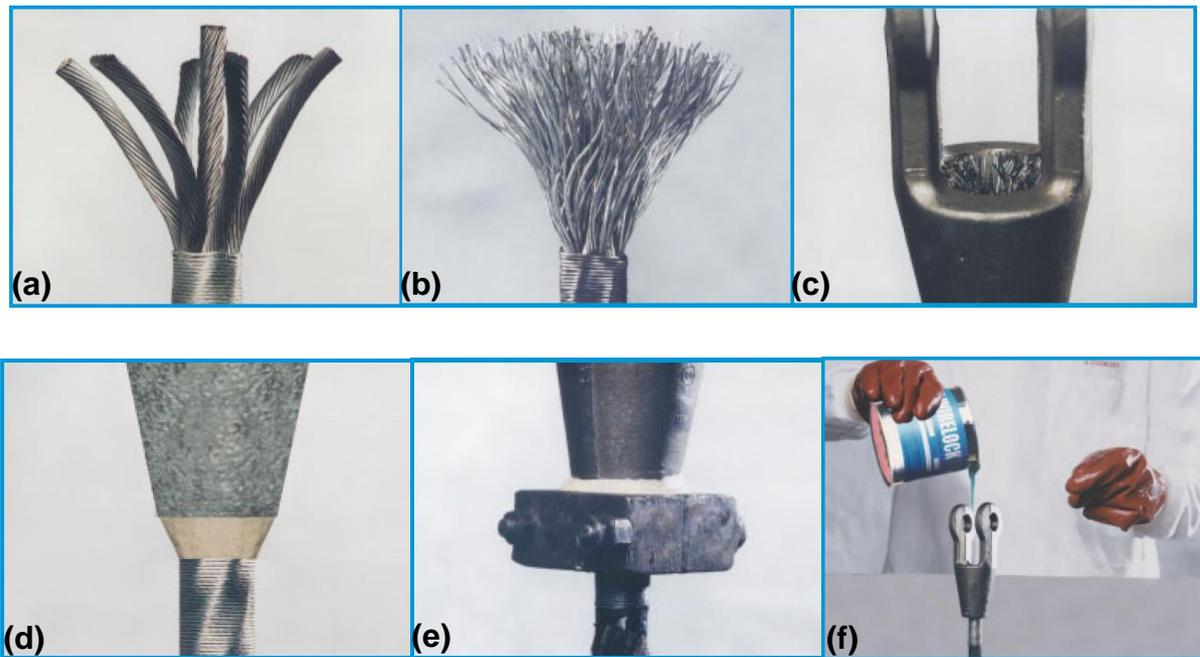


Figura 9: Passos para a soquetagem da extremidade de cabo de aço: (a) desentrelaçamento das pernas do cabo, (b) formação do “cabelo de bruxa”, (c) introdução do cabo no soquete, (d) e (e) vedação do soquete e (f) adição da resina no soquete [37].

### 3.3. RESINAS TERMORRÍGIDAS COM APLICAÇÃO EM COMPÓSITOS

A idéia de materiais compósitos não é nova ou recente. A natureza é repleta de ocorrências na qual essa idéia de compósito é empregada. Madeira é um compósito fibroso cujas fibras de celulose são envolvidas por lignina e hemicelulose que formam uma matriz. As fibras de celulose têm uma alta resistência à tensão, no entanto são muito flexíveis, enquanto que a matriz une as fibras e fornece rigidez [38,39].

Além dessas ocorrências naturais, existem muitos outros materiais de engenharia que são, em geral, compósitos e que têm sido usados por um longo tempo. A borracha com negro de fumo, o cimento Portland ou o asfalto misturado com areia, e fibras de vidro em resinas são os exemplos mais comuns [39].

Os compósitos constituem-se em uma classe de materiais heterogêneos, multifásicos em que um dos componentes, descontínuo, dá a principal resistência ao esforço (componente estrutural), e o outro, contínuo, é o meio de transferência desse esforço (componente matricial). Esses componentes não se dissolvem ou não se descaracterizam completamente; apesar disso, atuam simultaneamente, e as

propriedades do conjunto são superiores às de cada componente individual. A interface entre eles tem influência dominante sobre as suas características [40].

O desempenho de um material compósito é o resultado do comportamento combinado das seguintes entidades [39]:

- Matriz ou componente matricial
- Fibra ou elemento reforçador (componente estrutural)
- Interface fibra/matriz

A matriz é o constituinte presente em maior quantidade, que envolve o compósito e dá sua forma final. Ela cumpre duas importantes funções: (i) mantém a fase fibrosa no lugar, isto é, a orientação e o espaçamento das fibras são conservados; (ii) submetida a uma força aplicada ela deforma e distribui a tensão para o constituinte de maior módulo, as fibras [40,41].

Os componentes estruturais não precisam estar necessariamente na forma de longas fibras. Podem também estar dispostos na forma de partículas, flocos, *whiskers*, fibras cortadas, fibras contínuas, ou lâminas. O seu papel é suportar as cargas máximas e impedir que as deformações ultrapassem limites aceitáveis. Tecnicamente, os compósitos amplamente empregados são aqueles em que o componente estrutural encontra-se na forma de uma fibra. O resultado de um projeto de materiais compósitos reforçados com fibras apresenta, normalmente, resistência e/ou rigidez alta em relação ao seu peso [29,39,40].

A interface representa a região do espaço onde duas fases interagem. A interface em compósitos tem um papel decisivo na determinação das propriedades e desempenho desses materiais. Uma excelente interação na interface assegura a transmissão de tensões da matriz ao reforço e é um requisito mínimo e necessário para o uso das propriedades do reforço. A adesão entre a matriz resinosa e o agente reforçador é necessária para permitir que ocorra uma distribuição de carga uniforme entre as duas fases. Quando há pouca compatibilidade, a interface é a região de menor resistência e onde irá ocorrer a falha do material [40-42].

Keusch e colab. [43] estudaram a influência da adesão interfacial de fibras de vidro diferentemente tratadas em compósitos de resina epóxi através de análise dinâmico-mecânica. Compósitos sem tratamento superficial das fibras e com

tratamento com aminosilano alcançaram os maiores valores de adesão. Compósitos com fibras tratadas com polietileno apresentaram menores valores. Compósitos com fibras tratadas com poliálcool vinílico ofereceram níveis de adesão intermediários entre os anteriores.

Um procedimento foi avaliado por Rashkovan e colab. [44] para se verificar a eficiência dos tratamentos da fibra na resistência do reforço em compósitos. Os efeitos de tratamentos eletroquímicos, com ozônio e com criogenia foram observados para uma fibra de carbono de alta tenacidade. Concluíram que o tratamento da fibra de carbono com criogenia aumentou a resistência da fibra devido à remoção de depósitos superficiais.

Polímeros termoplásticos e termorrígidos são materiais comumente usados como matrizes de materiais compósitos modernos. A maioria dos compósitos de engenharia compreende a combinação de uma matriz de resina termorrígida com um reforço fibroso. Esses reforços incluem as fibras de vidro, de carbono e de poliamidas aromáticas (aramidas), por exemplo, as quais podem ser encontradas nas mais diferentes formas, ou seja, contínua, cortada, multiaxial e tecido [39,45].

Novos materiais reforçantes, resinas e técnicas de preparação são constantemente propostos e comercializados, ao passo que têm sido aprimorados os materiais já disponíveis no mercado. Uma gama de resinas pode ser formulada ou processada com uma ampla variedade de cargas, aditivos, extensores e produtos químicos, e a seleção adequada dos componentes e o ajuste das condições de processo permitem o desenvolvimento de compósito para uma dada aplicação com excelente desempenho [45,46].

Plásticos termorrígidos reforçados (*RTS – Reinforced Thermoset Plastics*) são resinas plásticas – tais como epóxi, poliéster, fenólica, silicone, entre outras – reforçadas tanto por fibras de vidro, grafite, carbono, e aramida, quanto por algodão, papel, flocos, partículas ou pós. A combinação do tipo de resina e de reforço resulta na versatilidade dos materiais compósitos com características incomuns.

Um plástico é reforçado pela saturação do material reforçador com uma resina líquida ou viscosa. O produto pode ser moldado ou laminado por diferentes processos e com vários tipos de moldes, prensas, e outros equipamentos.

Catalisadores incorporados ou adicionados às resinas induzem o endurecimento ou a cura em ciclos predeterminados. As propriedades projetadas pelos plásticos reforçados incluem excepcionalmente alta resistência e baixo peso; alta resistência ao impacto e estabilidade dimensional sob tensões e temperaturas extremas; resistência às condições ambientes, à decomposição, à água, a produtos químicos, a óleos, e a solventes; e a baixa condutividade térmica. Muitos plásticos reforçados são bons isolantes elétricos, com elevada resistência mecânica, resistência ao calor e à chama, e outras propriedades elétricas [47].

### 3.3.1. Tipos de resinas

Resinas termorrígidas são obtidas a partir de oligômeros de baixo peso molecular com viscosidade baixa a média, e que requer um catalisador e/ou um agente endurecedor ou condições de cura em temperaturas elevadas. Frequentemente a pós-cura também é necessária para se chegar ao máximo das propriedades mecânicas. O sistema rígido resultante é uma rede macromolecular altamente reticulada, infusível e insolúvel, exibindo alta resistência/rigidez mecânica com um mínimo de tenacidade e alta estabilidade térmica [42,48,49].

Durante o processo de cura ou reticulação, ligações cruzadas covalentes são formadas entre as cadeias moleculares adjacentes. Essas ligações químicas unem as cadeias entre si e aumentam a resistência destas aos movimentos vibracionais e rotacionais da cadeia mesmo em temperaturas elevadas. A reticulação geralmente é ampla de forma a englobar 10 a 50% dos meros da cadeia principal. Somente aquecendo-se o material a temperaturas excessivamente altas é que irá ocorrer o rompimento dessas ligações e a conseqüente degradação do polímero [29,50].

A seguir são destacadas as resinas termorrígidas mais comumente usadas em materiais compósitos bem como as suas principais características e limitações [48]:

- Resina Epóxi: excelentes propriedades em compósitos; excelente resistência química; boa estabilidade térmica, baixa retração durante a cura. Entretanto necessita de vários ciclos de cura e a melhora nas propriedades é obtida quando a sua cura ocorre a temperaturas elevadas.

- Resina Poliéster: trata-se de uma resina de fácil utilização, além de apresentar uma grande variedade de escolha; a cura pode ocorrer à temperatura ambiente ou a temperaturas elevadas; os compósitos de resina poliéster possuem boas propriedades químicas e elétricas. No entanto, há liberação de estireno, é inflamável e apresenta retração durante a cura.
- Resina Fenólica: compósitos com esse tipo de resina possuem excelentes propriedades térmicas e elétricas, além de serem resistentes à chama com a característica de auto-extinção. Por outro lado há limitação de cor, possuem baixa resistência aos álcalis, e inadequadas em aplicações que haja contato com alimentos.
- Resina Éster Vinílica: há boa resistência à fadiga, muito boa resistência química, boa tenacidade e as propriedades em compósitos são excelentes. Apresenta problemas com emissão de estireno, com retração durante a cura, além de ser inflamável.
- Poliimida e poliamida-imida: possui excelentes propriedades térmicas; boas propriedades elétricas; boas propriedades frente ao fogo; boas propriedades em compósitos. Além da restrição de escolha da cor, a resistência a ácidos e álcalis e a resistência elétrica são limitadas.
- Resina Poliuretana: possui boas propriedades em compósitos; resistência química muito boa; alta resistência ao impacto (tenacidade); e boa resistência à abrasão. Há restrição de cor, bem como da natureza do isocianato como endurecedor; a cura deve ser anidra.
- Silicone: as propriedades térmicas e elétricas são muito boas, possui excelente resistência química, boas propriedades frente ao fogo (chama auto-extinguível); possui resistência à hidrólise e à oxidação; é não-tóxico. Porém apresenta longos ciclos de cura, ocorrendo somente a temperaturas elevadas onde sofre perda de adesão.

Uma vez que na soquetagem de cabos de ancoragem duas resinas têm sido preferencialmente utilizadas, as resinas epóxi e poliéster, somente estas serão comentadas neste trabalho.

### 3.3.1.1. Epóxi

As resinas epóxi são sistemas versáteis, sendo um dos melhores polímeros termorrígidos para aplicação em compósitos poliméricos devido à excelente adesão em uma variedade de superfícies, estabilidade dimensional, baixa absorção de umidade, boas propriedades térmicas e elétricas, excelente resistência química e a intempéries com alta relação resistência/peso, resistência à fluência. Por outro lado são intrinsecamente frágeis como os demais plásticos termorrígidos. São aplicadas em diversos campos, tais como adesivos, revestimentos, materiais estruturais, e placas de circuito impresso. Devido às propriedades superiores das resinas epóxi, estas são freqüentemente usadas com fibras de alto desempenho, com fibra de carbono, por exemplo, e permite altas concentrações de fibra de vidro [48,51,52].

Uma resina epóxi contém um grupo epóxido – um átomo de oxigênio ligado de forma cíclica a dois átomos de carbono – na sua estrutura química. As resinas epóxi podem variar de epóxidos difuncionais a polifuncionais como monômeros ou pré-polímeros que reagem com agentes de cura [39,42].

Segundo Harper [49], as resinas epóxi mais utilizadas são aquelas à base de epícloridrina e bisfenol A, resinas cicloalifáticas, resinas à base de novolacas, resinas à base de bisfenol F, resinas bromadas ou cloradas, e resinas derivadas de fenóis e glicidil éter polinucleares. A maioria das resinas epóxi usada atualmente são produtos líquidos da reação entre epícloridrina (cloreto glicidil éter) e bisfenol A, como pode ser visto na Figura 10, e normalmente são chamadas de epóxidos Epi-Bis. São conhecidas também como resinas à base de diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA).

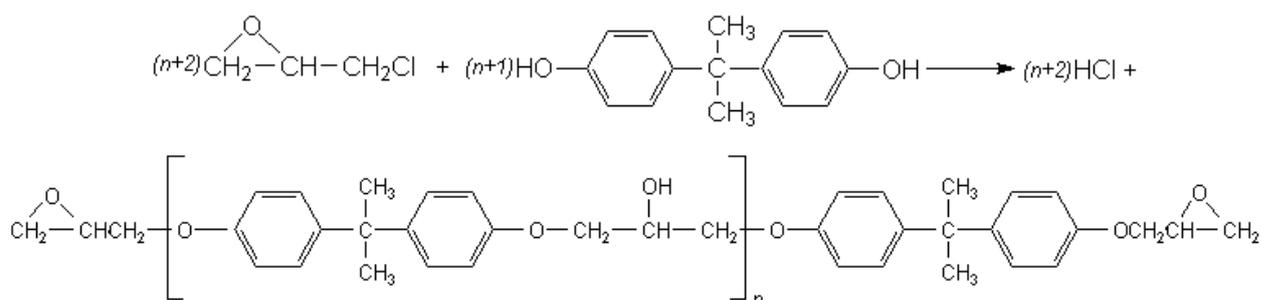


Figura 10: Reação de síntese da resina epóxi do tipo epi-bis (DGEBA) [53].

Resina à base de DGEBA é um tipo de resina epóxi difuncional (contém dois grupos epóxido), líquida e de baixo peso molecular mais comumente utilizada por apresentar boa fluidez, baixa retração durante a cura e fácil processamento. Os produtos curados têm boa resistência física e química, boa resistência a solventes, e excelente resistência à umidade. Sua baixa resistência à chama limita suas aplicações em diversas áreas, como, por exemplo, na indústria aeroespacial e eletrônica [39,54].

As temperaturas de reação entre a epícloridrina e o bisfenol A estão na faixa de 50–95°C. As reações paralelas (hidrólise da epícloridrina, reação da epícloridrina com grupos hidroxila do polímero ou impurezas) bem como a razão estequiométrica necessitam ser controladas para produzir um pré-polímero com dois grupos epóxido. Pré-polímeros líquidos ou sólidos são produzidos através do controle do peso molecular; tendo valores de meros menores que 1 e na faixa de 2–30, respectivamente [53].

As resinas epóxi à base de bisfenol F (DGEBF) apresentam uma baixa viscosidade, permitindo a incorporação de altos valores de cargas. Normalmente este tipo de resina epóxi é usado em sistemas com alto teor de sólidos e com alta resistência mecânica [55]. A estrutura química da molécula de resina epóxi à base de bisfenol F está mostrada na Figura 11.

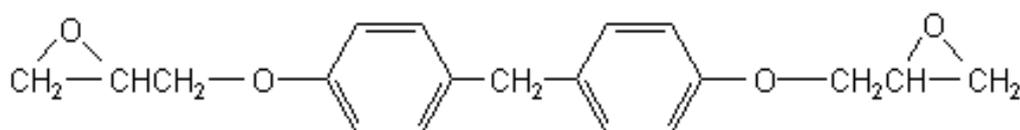
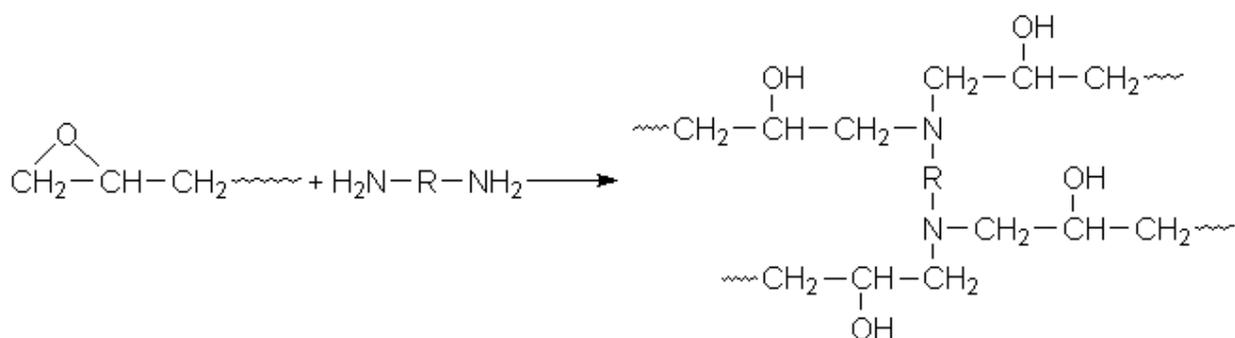


Figura 11: Estrutura química da molécula de bisfenol F epoxidada [55].

Freqüentemente, vários aditivos são usados para modificar as características das resinas epóxi. Os diluentes, por exemplo, são usados para reduzir a viscosidade. Agentes flexibilizantes são empregados para tornar a resina endurecida mais flexível. Outros agentes são utilizados para proteção contra radiação ultravioleta. Agentes de cura são compostos amino orgânicos ou ácidos, e a reticulação é obtida pela adição de produtos químicos que reagem com grupos

epóxido e hidroxila entre as cadeias adjacentes. O grau de reticulação é função da quantidade de agente de cura. Geralmente, entre 10 e 15% em peso de aminas ou anidridos ácidos é adicionado, tornando-se parte da estrutura epóxi. Um acelerador, se adicionado, pode acelerar o processo de cura. Em geral, características como rigidez, resistência e temperatura e temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) aumenta com o grau de reticulação, mas a tenacidade decresce [39].

Uma variedade de co-reagentes é usada na cura de resinas epóxi através de grupos epóxido e hidroxila. As poliaminas, por exemplo, são os agentes de cura mais comuns e a reação envolve a adição de amina com abertura de anel, como pode ser visualizado na Figura 12.



**Figura 12: Reação de cura por abertura de anel do grupo epóxido com amina [53].**

Outros mecanismos de cura podem levar a reticulação de resinas epóxi. Pode-se citar a cura através dos grupos hidroxila da unidade repetitiva que é utilizada para pré-polímeros com pequenas quantidades de grupo epóxido. Nessa, o agente de cura mais comum é o anidrido ftálico embora outros anidridos ácidos possam também ser utilizados. Uma outra maneira é obtida pela polimerização com abertura de anel dos grupos epóxido usando ácidos de Lewis ou bases de Lewis [53].

A reação de cura de uma resina epóxi pode se tornar mais lenta pela redução da temperatura de cura. A Figura 13 mostra esquematicamente a variação da viscosidade de uma resina termorrígida em função do tempo em duas temperaturas diferentes ( $T_1 > T_2$ ). Pode-se perceber um leve decréscimo na viscosidade no começo devido ao calor gerado pela reação exotérmica de cura. Com o progresso da

reticulação, a massa molecular do polímero aumenta; a viscosidade aumenta vagarosamente no início e depois muito rapidamente. O momento correspondente à mudança perceptível na viscosidade é chamado de tempo de gel ( $t_{gel}$ ). Em tempos maiores que o  $t_{gel}$ , a viscosidade tende ao infinito e a polímero termorrígido pode ser tratado como um sólido. A Figura 14 mostra a variação das propriedades mecânicas em função do tempo de cura ( $t_{cura}$ ). Após o  $t_{cura}$ , as propriedades mecânicas do termorrígido praticamente não variam com o tempo [39].

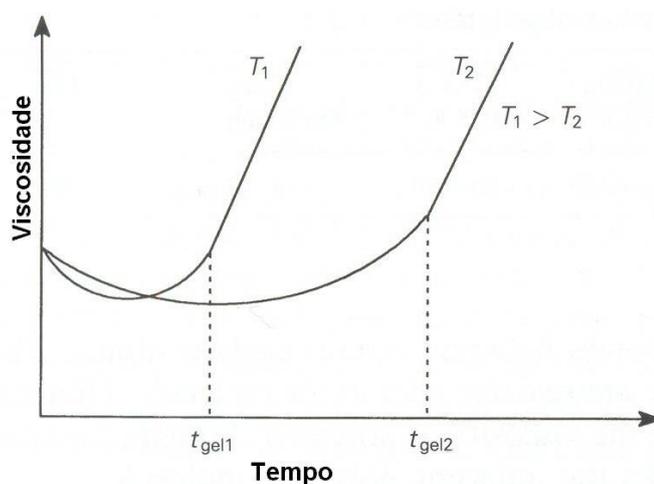


Figura 13: Variação de viscosidade da resina epóxi em função do tempo de cura [39].

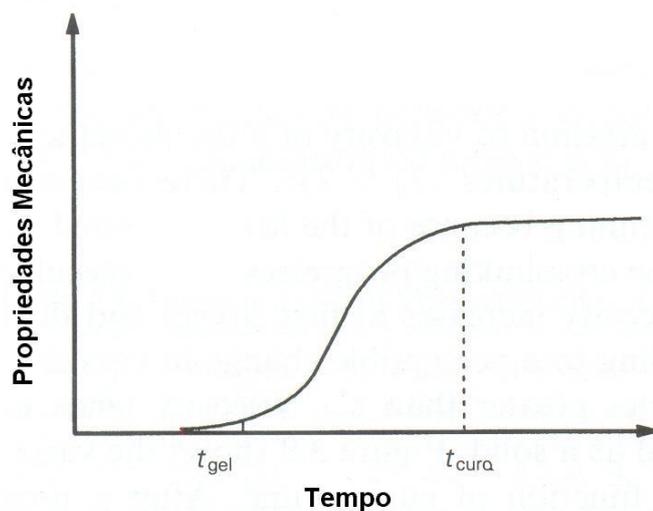


Figura 14: Variação das propriedades mecânicas da resina epóxi em função do tempo de cura [39].

O agente de cura usado na formulação é fundamental na determinação das propriedades de manuseio, comportamento de cura, e parte das propriedades finais. As maiores classes de endurecedores para resinas epóxi são aminas alifáticas, aminas aromáticas, anidridos, e endurecedores catalíticos (catalisadores). Misturas de endurecedores são usadas para modificar o comportamento da cura e as propriedades das resinas curadas. Os tipos de endurecedores usados para a resina epóxi estão relacionados a seguir [49]; e a Tabela 2 mostra comparativamente as vantagens e desvantagens destes.

- **Aminas Alifáticas:** estas como a dietilenotriamina (DETA) são amplamente usadas para cura de resinas epóxi à temperatura ambiente utilizando pequenas quantidades de resina ou filmes. Esse tipo de endurecedor proporciona reações extremamente exotérmicas, então grandes quantidades de mistura pode superaquecer durante a cura. As desvantagens desses materiais incluem o curto tempo de uso da mistura e a tendência de se combinar com a umidade do ar, o que inibe a cura. Agentes de cura mais lentos como a dimetilaminopropilamina e a dietilaminopropilamina são preferidas em aplicações onde se necessita usar uma maior quantidade de resina e frequentemente requerem calor para completar a cura. As resinas epóxi curadas com aminas alifáticas são úteis acima dos 80°C e têm boas propriedades elétricas, físicas e qualidades físico-químicas acima dos 70°C.
- **Aminas Aromáticas:** estas aminas como a metafenilenodiamina (MPDA) e a metileno dianilina (MDA) são sólidas e são usadas em temperaturas moderadas. Resinas epóxi contendo aminas aromáticas são tipicamente curadas por 2 horas à 80°C, seguidas por mais 2 horas a 150°C. Suas propriedades químicas e elétricas são boas e suas propriedades físicas estão entre as mais altas de qualquer sistema epóxi.
- **Ácidos e anidridos:** resinas epóxi curadas com ácidos e anidridos são geralmente úteis em temperaturas maiores do que aquelas curadas com outros endurecedores. A exotermia durante a cura é geralmente baixa. Muitas resinas epóxi cicloalifáticas são curadas com este tipo de endurecedor. A grande desvantagem está relacionada à necessidade de fundir os materiais que são

sólidos à temperatura ambiente e, também, os longos ciclos de cura em temperaturas elevadas. Aminas terciárias são normalmente utilizadas para encurtar o ciclo de cura. Como exemplo deste tipo de endurecedor tem-se o anidrido ftálico, anidrido metil nadico e dianidrido piromelítico, entre outros.

- Endurecedores catalíticos: aminas terciárias como a benzildimetilamina e tri-dimetilaminometil fenol são às vezes usados como agentes de cura exclusivos, mas geralmente eles são usados para acelerar a cura de misturas epóxi-anidrido. Piperidina possui um odor acentuado e permite produzir peças com estabilidade a altas temperaturas, embora a temperatura de deflexão térmica seja de apenas 75°C.

**Tabela 2: Endurecedores para resina epóxi [48].**

<b>Tipo</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>	<b>Aplicações</b>
<b>Aminas Alifáticas</b>	Baixa viscosidade, cura à temperatura ambiente, baixo custo da formulação.	Altamente irritante à pele, razão de mistura crítica, alta pressão de vapor.	Adesivos; moldes; encapsulamento elétrico; engenharia civil.
<b>Aminas Aromáticas</b>	Moderada resistência ao calor, boa resistência química.	Longos tempos de cura a temperaturas elevadas	Encapsulamento de peças, adesivos e tubos para enrolamento de fios.
<b>Anidridos</b>	Boa resistência ao calor, boa resistência química.	Longos tempos de cura a temperaturas elevadas, razões de mistura críticas.	Encapsulamento de peças, adesivos e tubos para enrolamento de fios.
<b>Catalíticos</b>	Longo tempo de uso, alta resistência ao calor.	Longos tempos de cura a temperaturas elevadas, baixa resistência à umidade.	Adesivos, encapsulamento elétrico, tintas em pó, laminados para aplicações elétricas.
<b>Amidoaminas</b>	Volatilidade reduzida, razões de mistura convenientes, boa tenacidade.	Fracos desempenho em altas temperaturas, alguma incompatibilidade com resina epóxi.	Adesivos para construção e ligante para concreto.

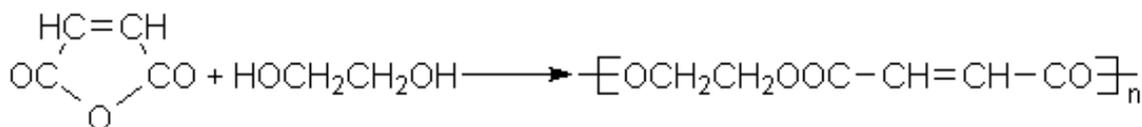
<b>Poliamidas</b>	Cura à temperatura ambiente, baixa toxicidade, flexibilidade, resiliência, boa tenacidade.	Alto custo da formulação, alta viscosidade, baixa resistência ao calor, baixa pressão de vapor.	Engenharia civil, adesivos e vernizes.
<b>Uréia/formaldeído</b>	Boa cor como filme, boa adesão.	Cura a temperaturas elevadas.	Esmaltes de secagem rápida, <i>primers</i> , tintas especiais.
<b>Fenol/formaldeído</b>	Boas propriedades em temperaturas elevadas, boa resistência química, boa dureza/flexibilidade.	Sólido, baixa resistência a intempéries.	Tintas em pó, moldagem de compostos.

### 3.3.1.2. Poliésteres

Resinas poliésteres insaturadas são resinas amplamente usadas como matrizes termorrígidas para plásticos reforçados, sendo utilizados desde processos básicos manuais a processos complexos de moldagem [48].

As resinas poliésteres insaturadas são aplicadas nas indústrias automotiva, aeronáutica e elétrica, como componentes para substituir materiais tradicionais. As vantagens dessas resinas sobre outras resinas termorrígidas englobam a estabilidade térmica, a boa atuação como isolante elétrico, as boas propriedades mecânicas, a boa resistência química, a baixa densidade, o baixo custo, a facilidade de manuseio, a possibilidade de pigmentação, e a capacidade de serem reforçadas com cargas e fibras quando na forma líquida [56,57].

Uma reação de condensação entre um glicol (etileno, propileno, ou dietileno glicol) e um ácido dibásico insaturado (maleico ou fumárico) resulta em um poliéster linear que contém duplas ligações entre certos átomos de carbono (Figura 15). O termo insaturado significa que as duplas ligações são sítios reativos na molécula [39].



**Figura 15: Síntese de poliéster insaturado a partir do anidrido maleico maleico e etileno glicol [53].**

Resinas poliésteres tornam-se insolúveis e infusíveis pela reticulação com um monômero, normalmente o estireno, porém outros monômeros podem ser utilizados, como o alfa metil estireno, metil metacrilato, vinil tolueno, dialil ftalato, trialil cianurato, divini benzeno e cloroestireno. O estireno atua como um diluente com a finalidade de reduzir a viscosidade do poliéster. Este monômero vinílico contém duplas ligações e reticula junto às moléculas adjacentes de poliéster nos pontos de insaturação, formando uma rede tridimensional pela conversão de um sistema líquido viscoso em um sistema enrijecido, um sólido termorrígido. As resinas comerciais contêm de 30 a 40% em massa de estireno. A miscibilidade da resina e do estireno depende da composição da resina. Geralmente, o aumento do peso molecular diminui a miscibilidade. As terminações de cadeias de resinas poliésteres insaturadas consistem em grupos hidroxila e carboxila cuja polaridade tem um efeito desfavorável na miscibilidade resina poliéster insaturada/estireno. A temperatura de transição vítrea da resina curada muda para temperaturas maiores com o aumento da concentração de estireno, aproximando-se do valor para o poliestireno puro [39,49,56,57].

Endurecedores, agentes de cura e absorventes de ultravioleta podem ser adicionados para promover a reticulação da resina poliéster. Frequentemente, um catalisador como um peróxido orgânico é acrescentado para iniciar a reação de cura. Pode-se acelerar o processo de cura aumentando-se a temperatura; em consequência, aumenta a taxa de decomposição do catalisador. Isso pode ser efetuado pelo uso de um acelerador como é o caso do naftalato de cobalto [39].

Tipicamente, a reticulação é iniciada com iniciadores de radicais livres, sendo, portanto, uma copolimerização entre o poliéster e o monômero do solvente utilizado. Se somente ácido insaturado e glicol são usados, o produto final é altamente reticulado e frágil. Por esta razão, copoliésteres são normalmente preparados, contendo tanto um ácido insaturado quanto um ácido não-reticulável [50]. A reação

da Figura 16 mostra a síntese de um poliéster insaturado a partir do anidrido ftálico e anidrido maleico (razão molar 1:1) e dietileno glicol. As unidades ftálica e maleica seriam randomicamente distribuídas. A reticulação com estireno é representada na reação da Figura 17.

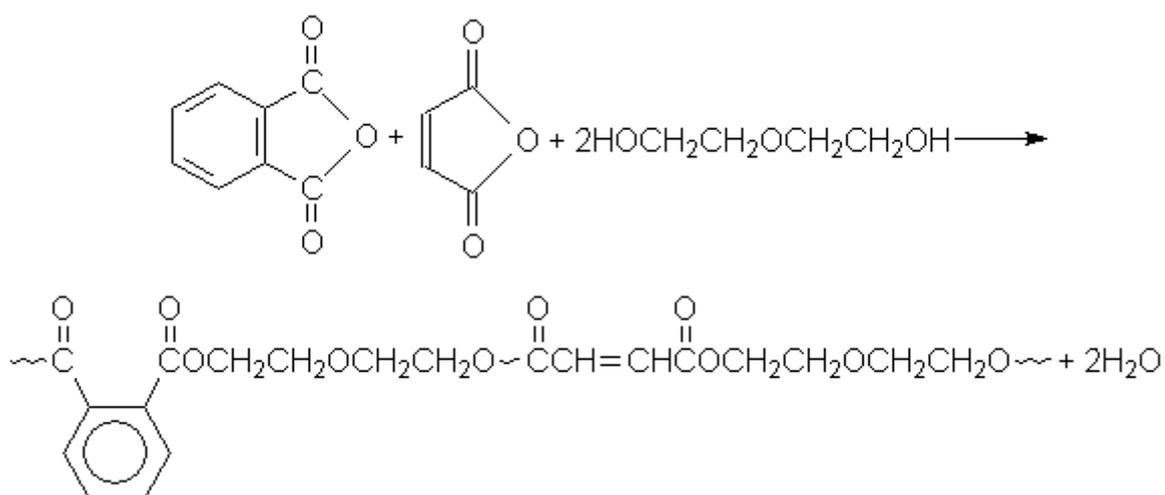


Figura 16: Síntese de poliéster insaturado a partir do anidrido ftálico, anidrido maleico e dietileno glicol [50].

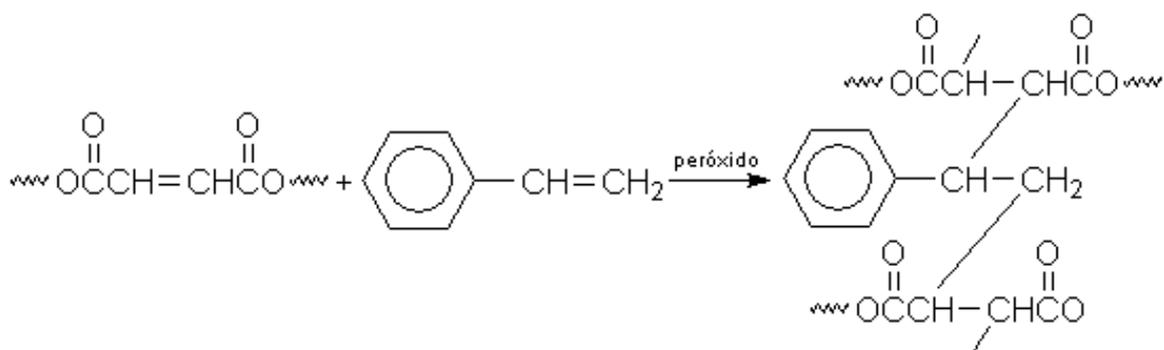


Figura 17: Reticulação com estireno do poliéster insaturado [50].

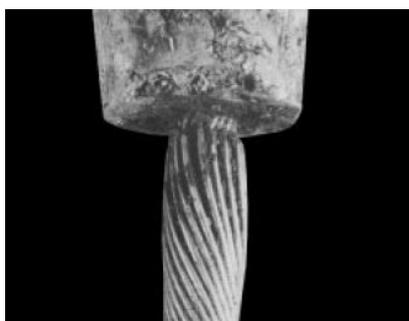
A cura da resina poliéster insaturada é acompanhada de um alto grau de retração (7-10%). Esta retração usualmente causa severos problemas na fabricação de componentes, que incluem falhas na superfície como a ondulação superficial, além de problemas no controle dimensional, resultando em uma pobre reprodutibilidade da moldagem [58].

### 3.3.2. Resinas aplicadas na soquetagem de cabos

Atualmente, na soquetagem de cabos de aço dois tipos de resinas podem ser utilizados: uma de natureza poliéster e outra, epóxi. Ambas consistem em resinas comerciais bicomponentes, sendo um dos componentes a resina polimérica propriamente dita e o outro, o agente a ser adicionado que promove a cura da mesma.

A primeira trata-se da resina Wirelock, composta por um componente líquido, a resina poliéster insaturada dissolvida em estireno, e por um sólido, o agente de cura, que contém o peróxido de benzoíla e a sílica. Durante a mistura dos componentes pode ocorrer a liberação de vapores tóxicos e ao longo da cura, à temperatura ambiente, a alta exotermia da reação é observada.

A soquetagem com resina Wirelock apresenta alta eficiência quando usada tanto para cabos de aço galvanizados como cabos de aço inoxidáveis. No entanto, a utilização de cabo de aço inoxidável em ambiente marinho pode ser prejudicial. Na presença de um eletrólito, isto é, água do mar, pode ocorrer a degradação eletrolítica do cabo de aço inoxidável. O fenômeno conhecido como corrosão por frestas prejudica a integridade do cabo na região perto da base do soquete, o qual pode ser visto na Figura 18. No entanto, outros tipos de cabos não exibem tal comportamento. Algumas propriedades da resina Wirelock podem ser vistas na Tabela 3 [37].



**Figura 18: Típico exemplo de inchamento do cabo de aço inoxidável devido à corrosão por frestas [37].**

A outra resina é conhecida por Calcepóxi a qual consiste em um composto epóxi de dois componentes para soquetagem de cabos de aço. Os dois componentes são líquidos, sendo um deles a resina epóxi à base de diglicidil éter de

bisfenol A (DGEBA) modificada com cargas minerais e o outro o endurecedor à base de amina alifática.

A resina pode ser usada à temperatura ambiente e quando curada apresenta alta resistência mecânica e química adequadas à aplicação. Também se caracteriza por liberar uma considerável quantidade de calor durante a cura [59]. As propriedades da resina Calcepóxi, de acordo com o fabricante, podem ser observadas na Tabela 4.

**Tabela 3: Propriedades físico-químicas da resina Wirelock [37].**

Viscosidade	3 – 4 poise
Ponto de distorção térmica	100°C a 115°C
Resistência à flexão	6900 MPa
Módulo de flexão	170 kg.m <sup>2</sup>
Tensão de ruptura	16,15 N/mm <sup>2</sup>
Temperatura para liberação de gases	32°C
Dureza Barcol	40 a 55
Tempo de gel à 8°C	30 minutos
Tempo de gel à 18°C	15 minutos
Tempo de gel à 28°C	7 minutos
Retração na cura	1,5 a 2,5%

**Tabela 4: Propriedades físico-químicas da resina Calcepóxi [59].**

Peso específico à 25°C	1,6 g/cm <sup>3</sup>
Tempo de gel a 25°C	40 minutos
Tempo de cura para operação dos equipamentos	15°C: 72 horas 25°C: 48 horas Acima de 30°C: 24 horas
Resistência à compressão	119 GPa
Módulo de elasticidade ASTM D-695	6320 GPa
Módulo de elasticidade ASTM D-638	9280 GPa
Resistência à flexão ASTM D-790	75 GPa
Dureza Barcol	44
Impacto Izod ASTM D-256 procedimento C	9,4 J/m

Neste trabalho a técnica de soquetagem de cabos de aço foi avaliada para cabos de fibra sintética, levando-se em consideração a adequabilidade da resina termorrígida para estes últimos, bem como o perfil ou tipo de soquete.

## 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

---

### 4.1. MATERIAIS

#### 4.1.1. Cabos de fibra de poliéster (PET)

Os cabos de fibra de PET foram fabricados pela Cordoaria São Leopoldo (CSL). Os cabos foram produzidos com diâmetro de 10 mm e com diâmetro de 48 mm. O primeiro era constituído por um corpo central único, formando uma alma única com pernas trançadas, revestido por uma capa de fios entrelaçados. O segundo era constituído de 7 almas paralelas com pernas trançadas, sendo as almas reunidas por uma capa com fios torcidos e entrelaçados, conforme o esquema mostrado para o cabo Ultraseven<sup>®</sup> na Figura 4. As fotografias dos cabos de 10 e 48 mm, respectivamente, podem ser vistos na Figura 19.

O cabo de PET com 10 mm de diâmetro foi usado em ensaios de bancada ou laboratório, e o de 48 mm em ensaios piloto.



Figura 19: Fotografia dos cabos com diâmetro de (a) 10 mm e (b) 48 mm.

## 4.1.2. Soquetes

### 4.1.2.1. Soquetes para cabos de PET de 10 mm

O soquete constitui-se em um dispositivo metálico em formato cônico (tronco de cone), que possui uma alça ou uma entrada para encaixar uma manilha para ancoragem. O soquete é vazado, onde são inseridas a extremidade do cabo e a resina para fixação deste no mesmo.

Os soquetes utilizados na soquetagem de cabos de fibra poliéster de 10 mm em ferro fundido foram de três tamanhos, tendo diferentes conicidades ( $\alpha$ ), diâmetros superior (D) e inferior (d) e altura (H), conforme perfil (tronco de cone) esquematizado na Figura 20, apresentando, conseqüentemente, diferentes volumes internos.

O volume interno do soquete ( $V_{\text{soquete}}$ ) foi determinado a partir do cálculo do volume do tronco de cone, tendo-se como base as suas dimensões D, d e H. O volume ocupado pela fibra no interior do soquete também foi determinado e representado por  $V_{\text{fibra}}$ . Logo, o volume de resina ( $V_{\text{resina}}$ ) estimado na presença de fibra no interior no soquete foi obtido através da diferença  $V_{\text{soquete}} - V_{\text{fibra}}$ . Dessa forma foi possível calcular a razão entre o volume de resina utilizado e o volume ocupado pelas fibras na extremidade do cabo ( $V_{\text{resina}}/V_{\text{fibra}}$ ), sendo um parâmetro importante para a soquetagem de cabos de fibra PET.

Desse modo, estes dispositivos foram identificados como soquete menor, soquete intermediário e soquete maior (Figura 21) em função da razão  $V_{\text{resina}}/V_{\text{fibra}}$ . A Tabela 5 mostra comparativamente as dimensões dos soquetes utilizados na soquetagem de cabos de PET com diâmetro igual a 10 mm.

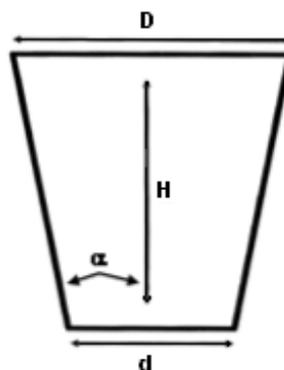


Figura 20: Desenho esquemático do perfil cônico do soquete [37].



**Figura 21: Fotografia dos soquetes menor, intermediário e maior, respectivamente, utilizados na soquetagem de cabos de 10 mm.**

**Tabela 5: Dimensões dos soquetes para cabo de PET de 10 mm.**

Soquete	MENOR	INTERMEDIÁRIO	MAIOR
Altura (H), [mm]	54	62	75
Diâmetros (D e d), [mm]	31 e 16	33 e 21	40 e 20
Conicidade, $\alpha$ [graus]	7,9	5,7	7,6
Volume Interno, [mL]	24	36	55
Razão $V_{resina} / V_{fibra}$	5	7	9
Número de pares	1	3	1

#### 4.1.2.2. Soquetes para cabos de PET de 48 mm

Os soquetes para cabos com 48 mm de diâmetro foram utilizados em escala piloto, sendo avaliado quatro tipos no procedimento de soquetagem. Estes foram identificados também segundo as suas dimensões, ou seja, menor, intermediário e maior (maior A e maior B) os quais estão apresentados na Figura 22. As dimensões destes soquetes estão apresentadas na Tabela 6.



Figura 22: Fotografia dos soquetes (a) menor (vista superior), (b) intermediário, (c) maior A e (d) maior B, utilizados na soquetagem de cabos de 48 mm.

Tabela 6: Dimensões dos soquetes para cabo de PET de 48 mm.

Soquete	MENOR	INTERMEDIÁRIO	MAIOR A	MAIOR B
Altura (H), [mm]	260	213	280	265
Diâmetros (D e d), [mm]	90 / 45	105 / 56	140 / 70	160 / 80
Conicidade, $\alpha$ [graus]	4,9	6,6	7,1	8,6
Volume Interno, [mL]	970	1130	2520	3110
Razão $V_{\text{resina}} / V_{\text{fibra}}$	1	2	4	6

#### 4.1.3. Resinas Termorrígidas

Todas as resinas utilizadas no desenvolvimento do trabalho foram de origem comercial. Caracterizam-se por serem bicomponentes, ou seja, constituídas de dois componentes, sendo um a resina propriamente dita, e o outro um agente de cura denominado endurecedor. As resinas (resina/endurecedor) utilizadas foram aquelas comercialmente conhecidas como: resina Araldite, resina Calcepóxi e resina Wirelock.

Esses conjuntos resina/endurecedor ou iniciador foram organizados da seguinte maneira: resina Wirelock, resina Calcepóxi e resina Araldite.

#### 4.1.3.1. Resina Wirelock [37]

A resina Wirelock é fabricada pela Millfield Enterprises Manufacturing Limited da Inglaterra, sendo representada pela Gunnebo do Brasil Ltda. Também é uma resina bicomponente já aplicada na soquetagem de cabos de aço. Com relação às resinas Araldite e Calcepóxi, esta se diferencia por ser à base de resina poliéster. O componente líquido é uma resina poliéster insaturada dissolvida em estireno com baixos níveis de inibidores. O segundo componente utilizado para promover a cura da resina é um iniciador do tipo radical livre, sendo um sólido pulverulento que contém cerca de 1% de peróxido de benzoíla.

#### 4.1.3.2. Resina Calcepóxi [59]

Esta resina foi fornecida pela Tubolit Indústria e Comércio Ltda. e é constituída de dois componentes, a resina epóxi e o agente de cura. Esta resina já é aplicada na soquetagem de cabos de aço. O primeiro componente é uma resina epóxi líquida à base de bisfenol A, de alta viscosidade, modificado com aditivos e cargas minerais. Esta apresenta cor vermelha e peso específico de  $1,6 \text{ g/cm}^3$  à  $25^\circ\text{C}$ . O segundo componente, com peso específico de  $0,98 \text{ g/cm}^3$ , é um agente de cura à base de amina alifática.

#### 4.1.3.3. Resina Araldite

As resinas epóxi Araldite bem como os seus endurecedores foram fornecidos pela Aralsul Produtos Químicos Ltda. representante no Brasil da Vantico Ltda.

As resinas selecionadas para o desenvolvimento do trabalho e suas especificações estão apresentadas na Tabela 7, sendo estas:

- ❖ Araldite GY-260 – resina epóxi líquida, não modificada, de alta viscosidade, formulada à base de bisfenol A [60].
- ❖ Araldite GY-281 – resina epóxi líquida de viscosidade moderada formulada à base de bisfenol F [60].

- ❖ Araldite GY-1109 – resina epóxi líquida formulada à base de bisfenol A, modificada a partir da resina GY-260, de baixa viscosidade [60].
- ❖ Araldite XCW-1457.2 – resina epóxi líquida à base de bisfenol A, modificada a partir da resina GY-260 com aditivos e cargas minerais, com alta viscosidade [60].
- ❖ Araldite DY-3601 - resina epóxi líquida à base de polipropileno glicol, difuncional, de baixa viscosidade, usada como diluente reativo da resina XCW-1457.2 [61].

Nas resinas epóxi, a concentração total dos grupos epóxi baseada no peso molecular é expresso por parâmetros conhecidos como “peso por epóxi” (*weight per epoxy* – WPE) ou peso equivalente em epóxi (*epoxy equivalent weight* – EEW). Estes são utilizados pelo fabricante para cálculo estequiométrico de proporção entre resina e endurecedor.

Os endurecedores ou agentes de cura utilizados na reação de cura das resinas epóxi Araldite foram listados abaixo [62].

- ❖ Aradur 830 - endurecedor líquido à base de amina aromática com baixo índice de amina (IA)
- ❖ Aradur 837 - endurecedor líquido à base de amina alifática com alto IA
- ❖ Aradur 850 - endurecedor líquido à base de amina aromática com baixo IA
- ❖ Aradur 2969 - endurecedor líquido à base de amina aromática com alto IA

As especificações comerciais dos endurecedores quanto suas características físicas e químicas estão apresentadas na Tabela 8.

Para melhor entendimento, a mistura de uma dada resina epóxi Araldite com respectivo agente de cura (endurecedor) será referida na discussão somente como resina “código da resina”+“código do endurecedor”, por exemplo, resina 260+830.

**Tabela 7: Propriedades físicas e químicas das resinas epóxi Araldite utilizadas fornecidas pela Vantico Ltda.**

Resina	GY-260	GY-281	GY-1109	XCW-1457.2	DY-3601
Estado Físico	Líquido	Líquido	Líquido	Líquido	Líquido
Viscosidade a 25°C [mPa.s]	12000–16000	5000–7000	1200–1600	25000	42–52
Equivalente Epóxi [g/Eq]	185–196	158–172	200–213	-----	385–405
Teor Epóxi [Eq/kg]	5,10–5,40	5,80–6,30	4,70–5,00	-----	2,47–2,60
Peso Específico a 20°C [g/cm <sup>3</sup> ]	1,20	1,20	1,11	1,65–1,69	1,03

**Tabela 8: Propriedades físicas e químicas dos agentes de cura utilizados na cura das resinas epóxi Araldite.**

Endurecedor	830	837	850	2969
Estado Físico	Líquido	Líquido	Líquido	Líquido
Viscosidade a 25°C [mPa.s]	3800–5800	2900–3600	15000–21000	700–900
Quantidade recomendada de endurecedor por Equivalente Epóxi [g/Eq]	110–130	65–70	100–120	115
Índice de Amina [mg KOH/g]	4,63–5,08	398–415	4,37–4,81	264–281
Peso Específico a 20°C [g/cm <sup>3</sup> ]	1,12	0,99	1,13	1,11

#### 4.1.4. Agente Desmoldante

O agente desmoldante usado para revestir internamente as paredes do soquete previamente à soquetagem do cabo de PET foi fornecido também pela Aralsul Produtos Químicos Ltda. Trata-se do desmoldante QZ-5100 à base de hidrocarboneto alifático, sendo líquido à temperatura ambiente.

## 4.2. MÉTODOS

### 4.2.1. Preparação da terminação do cabo

Primeiramente, os soquetes foram lixados internamente para limpeza da superfície ou a retirada do óxido superficial e, posteriormente, desengraxados com um solvente adequado. Após a limpeza da superfície interna, esta foi tratada com o agente desmoldante QZ-5100 para facilitar a retirada da resina endurecida, para que o soquete pudesse ser reutilizado. Na preparação dos cabos de PET, as extremidades foram soquetadas na sua forma normal (Figura 23a), ou seja, como recebida, ou na forma desentrelaçada denominada “cabelo de bruxa” (Figura 23b).

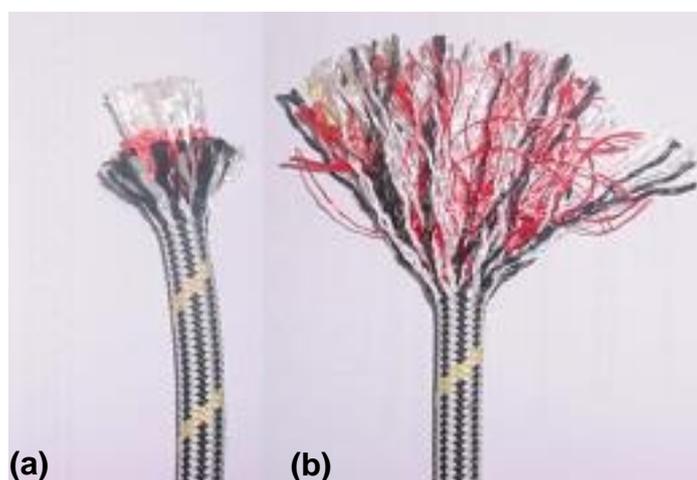


Figura 23: Fotografia da extremidade do cabo de fibra poliéster nas formas: (a) normal e (b) “cabelo de bruxa”.

### 4.2.2. Preparação das misturas das resinas termorrígidas comerciais

As resinas selecionadas para o desenvolvimento do trabalho foram usadas como recebidas, e utilizadas conforme as instruções do fabricante. Cada resina foi misturada com seu respectivo endurecedor e/ou iniciador, sendo adicionado um diluente reativo à resina base quando necessário.

As resinas com cargas em sua composição foram previamente homogeneizadas nas embalagens originais. Assim, procurou-se garantir a qualidade dessas resinas a fim de que, após a mistura com o agente de reticulação, a cura

ocorresse no tempo previsto pelo fabricante, garantindo as características finas do produto.

Com relação ao método de mistura, os componentes das resinas Araldite e Wirelock foram misturados manualmente com um bastão de vidro durante cinco minutos, enquanto que a resina Calcepóxi foi misturada mecanicamente durante dois minutos com velocidade controlada. Após o tempo decorrido, as misturas devidamente homogeneizadas foram analisadas ou utilizadas na soquetagem dos cabos.

A resina epóxi GY-260 foi misturada com três diferentes endurecedores, o Aradur 830, o Aradur 837 e o Aradur 2969, observando-se o comportamento de cura para cada sistema. As proporções indicadas pelo fabricante de resina e de endurecedor, em partes por peso, podem ser observadas na Tabela 9 bem como as características das misturas, tais como viscosidade à 25°C e o tempo de gel à 20°C e 65% de umidade relativa.

**Tabela 9: Endurecedores utilizados na cura da resina epóxi Araldite GY-260 e características da mistura.**

Componentes	Proporções em partes por peso		
	ARALDITE GY-260	100	100
ARADUR 830	45	-----	-----
ARADUR 837	-----	35	-----
ARADUR 2969	-----	-----	60
Viscosidade da mistura 25°C [mPa.s]	10000	10300	3200
Tempo de gel (aparelho TECAM), 100mL, à 20°C, a 65% de U.R. [min]	145	18	150

A mistura da resina epóxi GY-281 foi feita com dois dos endurecedores utilizados para a resina GY-260: o Aradur 837 e o Aradur 2969. A Tabela 10 indica as quantidades de resina e de endurecedor para a reação de cura e as características das misturas.

**Tabela 10: Endurecedores utilizados na cura da resina epóxi Araldite GY-281 e características da mistura.**

Componentes	Proporções em partes por peso	
ARALDITE GY-281	100	100
ARADUR 837	40	-----
ARADUR 2969	-----	66
Viscosidade da mistura 25°C [mPa.s]	4100	1700
Tempo de gel (aparelho TECAM), 100mL, à 20°C, a 65% de U.R. [min]	15	150

Da mesma forma que a resina GY-260, a GY-1109 foi misturada com os mesmos endurecedores nas mesmas proporções resina/endurecedor. Entretanto, estas diferenciam-se entre si pelo comportamento de cura e pela viscosidade da mistura. A Tabela 11 evidencia as quantidades dos componentes e as características da mistura.

**Tabela 11: Endurecedores utilizados na cura da resina epóxi Araldite GY-1109 e características da mistura.**

Componentes	Proporções em partes por peso		
ARALDITE GY-1109	100	100	100
ARADUR 830	45	-----	-----
ARADUR 837	-----	35	-----
ARADUR 2969	-----	-----	60
Viscosidade da mistura 25°C [mPa.s]	1950	1950	950
Tempo de gel (aparelho TECAM), 100mL, à 20°C, a 65% de U.R. [min]	250	25	235

Para a resina epóxi XCW-1457.2, a qual possui aditivos na sua formulação, o endurecedor utilizado foi o Aradur 850. Um diluente 100% reativo, DY-3601, foi adicionado de forma que a viscosidade da mistura fosse reduzida e apresentasse maior resistência ao impacto quando curado.

A Tabela 12 mostra duas formulações da resina XCW-1457.2 composta pelo endurecedor Aradur 850 e com e sem o diluente reativo DY-3601.

**Tabela 12: Formulações utilizadas na cura da resina epóxi Araldite XCW-1457.2.**

Componentes	Proporções em partes por peso	
	Formulação 1	Formulação 2
ARALDITE XCW-1457.2	100	100
ARADUR 850	22	22
DILUENTE DY-3601	5	0

A resina poliéster Wirelock foi misturada usando-se a proporção de 67 partes em peso do componente líquido para cada 100 partes em peso do componente sólido. A resina poliéster é muito sensível à temperatura, e de acordo com os dados do fabricante, passa do estado líquido a gel em aproximadamente 15 minutos entre 18°C e 23°C. Um aumento na temperatura em 10°C encurta o tempo de gel em torno de 50%. Um decréscimo de 10°C na temperatura estende o tempo de gel em cerca de 100%.

A preparação da mistura da resina Calcepóxi deve ser ainda mais cautelosa, devendo também ser homogeneizada com pequenos movimentos circulares, percorrendo toda a periferia da embalagem. Segundo o fabricante, devem ser misturados 100 partes do componente epóxi para 10 partes do endurecedor com baixa rotação (aproximadamente 200 rpm). O uso do misturador garante uma boa dispersão do endurecedor no componente principal, resultando numa resina termorrígida com boas propriedades. O tempo de cura à 25°C é de 40 minutos. O tempo de cura em função da temperatura é de 72 horas à 15°C, de 48 horas à 25°C e de 24 horas acima de 30°C.

### 4.2.3. Caracterização da fibra de poliéster e das resinas

#### 4.2.3.1. Espectroscopia de Infravermelho

Os espectros de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foram obtidos num espectrômetro Perkin Elmer modelo Spectrum 1000. O composto superficial da fibra de PET do cabo de 10 mm bem como os componentes da resina Wirelock foram analisados. As amostras líquidas foram analisadas sob forma de filme em pastilha de KBr e a sólida foi analisada depois de incorporada à pastilha.

#### 4.2.3.2. Análise Termogravimétrica

O equipamento usado foi o analisador termogravimétrico modelo 2050 da TA Instruments. As análises por termogravimetria (TGA) da fibra de PET do cabo de 10 mm e das resinas selecionadas após a cura foram realizadas com velocidade de aquecimento de 20°C/min até 1000°C para se avaliar a estabilidade térmica das mesmas em atmosfera inerte. A fibra de PET e a resina Wirelock foram analisadas também em atmosfera oxidante.

#### 4.2.3.3. Calorimetria Diferencial de Varredura

O equipamento usado foi um calorímetro diferencial de varredura modelo 2010 da TA Instruments. As fibras de PET foram submetidas a análise por calorimetria diferencial de varredura (DSC) com o objetivo de se avaliar as características térmicas destas tal qual. Para a avaliação do comportamento de cura das resinas, o programa térmico a que as amostras foram submetidas constou das seguintes etapas: (1º) resfriamento térmico até -100°C; (2º) aquecimento térmico linear até 250°C; (3º) resfriamento até -100°C; (4º) reaquecimento até 250°C. As análises foram feitas com velocidades de aquecimento de 10°C/min.

#### 4.2.3.4. Análise Dinâmico-Mecânica

O analisador dinâmico-mecânico usado foi o modelo 2980 da TA Instruments. Amostras das resinas curadas foram analisadas em um *clamp* do tipo *dual cantilever* sob velocidade de aquecimento de 5°C/min e frequência de 1Hz na faixa de temperatura de 0 a 200°C.

#### 4.2.4. Avaliação da capilaridade da resina no cabo de PET

Corpos-de-prova (cp's) contendo a resina, endurecedor e cabo de PET foram moldados para verificar a existência de capilaridade da resina no cabo, ou seja, a migração da resina ainda líquida ao longo do cabo, e a interação entre estes após a resina estar curada. Os cp's na forma cilíndrica foram produzidos com dimensões de 40 mm de diâmetro por 50 mm de altura, enquanto o cabo de PET possuía 80 mm de comprimento.

#### 4.2.5. Soquetagem de cabos de fibra poliéster

A soquetagem de cabos de fibra poliéster foi realizada com cabos de 10 mm no Laboratório de Materiais Poliméricos (LAPOL) e com cabos de 48 mm na Cordoaria São Leopoldo (CSL).

Na primeira parte do trabalho, as extremidades dos cabos foram soquetadas na forma normal e na forma de “cabelo de bruxa”. Na segunda parte, soquetou-se somente os cabos com as extremidades na forma de “cabelo de bruxa”.

O procedimento da soquetagem do cabo de PET de 10 mm consistiu na realização das seguintes etapas:

- 1) Limpeza (retirada de óxido e desengraxe) da superfície interna do soquete;
- 2) Aplicação de agente desmoldante na superfície interna do soquete;
- 3) Preparação da extremidade na forma normal ou “cabelo de bruxa”, tendo esta o mesmo comprimento interno dos soquetes utilizados;
- 4) Recobrimento do corpo do cabo de PET de 10 mm com filme plástico entre as extremidades para evitar o derramamento de resina neste;
- 5) Posicionamento da extremidade do cabo no soquete;
- 6) Fixação do cabo e vedação da base do soquete com fita isolante;
- 7) Mistura da resina com o agente de cura;
- 8) Preenchimento do soquete com a resina;

- 9) Verificação do nível da resina até o limite do soquete, sendo necessário completá-lo com a resina até não se observar mais o abaixamento do nível;
- 10) Colocação dos cabos soquetados em um suporte para aguardar a cura da resina.

O procedimento da soquetagem do cabo de PET de 48 mm com os soquetes menor e intermediário consistiu na realização das seguintes etapas:

- 1) Limpeza (retirada de óxido e desengraxe) da superfície interna do soquete;
- 2) Aplicação de agente desmoldante na superfície interna do soquete;
- 3) Retirada da capa do cabo de forma que a borracha silicone seja colocada em volta das almas do mesmo nas duas extremidades do cabo;
- 4) Recolocação da capa do cabo após a cura da borracha silicone
- 5) Colocação de uma cinta sobre a capa do cabo logo abaixo da base do soquete;
- 6) Recobrimento do cabo com filme plástico entre as extremidades para evitar o derramamento de resina neste;
- 7) Posicionamento do cabo no soquete (a borracha silicone deve estar localizada junto à base do soquete);
- 8) Fixação do cabo e vedação da base do soquete;
- 9) Preparação da extremidade na forma “cabelo de bruxa”, tendo esta o mesmo comprimento interno do soquete;
- 10) Mistura dos componentes;
- 11) Preenchimento do soquete com a resina;

- 12) Verificação do nível da resina no soquete, sendo necessário completá-lo com a resina até não se observar mais o abaixamento do nível;
- 13) Espera da cura da resina com os soquetes no suporte.

O procedimento da soquetagem do cabo de PET de 48 mm com os soquetes maior A e maior B consistiu na realização das mesmas etapas para os soquetes menor e intermediário, exceto o 3 e 4, pois a borracha silicone não foi utilizada ao redor das almas do cabo.

#### **4.2.6. Avaliação mecânica dos cabos soquetados**

##### 4.2.6.1. Ensaio de compressão

Através da norma ASTM D 695-96 [63], é possível determinar as propriedades mecânicas de plásticos rígidos reforçados e não-reforçados, incluindo compósitos de alto módulo. Os espécimes produzidos na forma de um cilindro reto tinham comprimento igual a duas vezes o seu diâmetro. Foram confeccionados cinco cp's para cada resina com 40 mm de diâmetro por 80 mm de comprimento. Estes cp's tiveram as suas bases planificadas em um torno antes de serem submetidos ao ensaio mecânico.

O ensaio de compressão foi realizado em uma máquina universal Shimadzu AG-100KNG com a velocidade de teste de 1,3 mm/min no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) do Departamento de Engenharia Civil da UFRGS.

##### 4.2.6.2. Ensaio de Dureza Barcol

Para o ensaio de dureza utilizou-se o durômetro Barcol modelo GYZJ 934-1 analógico, adequado para testes em plásticos rígidos. Os cp's foram preparados com formato de discos, sendo avaliada a dureza na superfície destes. As leituras foram feitas segundo a norma ASTM D 2583 [64].

#### 4.2.6.3. Ensaio de tração dos cabos de PET

O ensaio de tração do cabo de PET de 10 mm não-soquetado foi realizado na máquina de teste MT4 modelo CSL do tipo hidráulica horizontal na Cordoaria São Leopoldo, apropriada para avaliação da carga de ruptura. O ensaio mecânico foi feito utilizando-se célula de carga de 10.000 kgf. Cada amostra do cabo usado no teste possuía 4 m de comprimento. Nos testes mecânicos destes cabos aplicou-se uma pré-carga de 7 kgf.

Os cabos de 48 mm com extremidade na forma de extremidade trançada foram testados na máquina de teste MT3 modelo CSL do tipo hidráulica horizontal com capacidade de até 100.000 kgf.

Cabos de PET com 1 m de comprimento foram soquetados com os três tipos de soquetes (menor, intermediário e maior) e, posteriormente, ensaiados após 48 horas da soquetagem. O teste mecânico dos cabos soquetados foi realizado no LEME da UFRGS em uma Máquina Universal Shimadzu UH-2000KNA. A velocidade de ensaio foi de 400 Kgf/min.

Cabos de PET de 48 mm com 5 m de comprimento foram soquetados com os soquetes de aço e de ferro fundido. Os cabos foram ensaiados na máquina hidráulica da CSL segundo o guia da ABS [65]. O teste compreende submeter o cabo a 10 ciclos entre 1% e 50% da carga de ruptura final estimada e, em seguida, aplicar carga até a ruptura total do cabo.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

Nesta parte do trabalho estão apresentados os dados e resultados da avaliação da fibra de poliéster do cabo de 10 mm, das resinas termorrígidas selecionadas e dos cabos soquetados com as resinas. Procurou-se analisar comparativamente os diferentes tipos de resinas tomando-se como referência aquelas já utilizadas na soquetagem de cabos de aço, bem como os resultados obtidos dos ensaios mecânicos dos cabos de fibra poliéster soquetados com resinas termorrígidas comerciais de forma que se possa avaliar o potencial de aplicação destas no procedimento de soquetagem.

Diversas resinas com diferentes propriedades físicas e químicas foram selecionadas a fim de que fossem avaliados o comportamento de cura ideal ao procedimento de soquetagem e a resistência mecânica dos cabos soquetados com as resinas termorrígidas.

A soquetagem de cabos de fibra poliéster compreendeu duas escalas, uma em escala laboratorial onde foram utilizados dois lotes de cabos de PET de 10 mm, e a outra em escala piloto onde foi utilizado somente um lote do cabo de PET de 48 mm.

### 5.1. FIBRA DE POLIÉSTER DE CABOS COMERCIAIS

Como as extremidades dos cabos de PET estarão sujeitos ao calor desenvolvido durante a reação de cura, e por este tratar-se de um polímero semicristalino, amostras das fibras que compõem estes cabos foram avaliadas quanto ao seu comportamento térmico. Assim, amostra de fibras que compõem a alma do cabo de 10 mm fabricado pela CSL foi submetida à análise de DSC e de TGA.

A Figura 24 mostra o termograma de DSC da fibra de PET do cabo de 10 mm. Verifica-se que a temperatura de fusão da fibra ocorre a 261°C, temperatura esta características do poliéster, com um “ombro” em torno de 251°C, provavelmente

devido à fusão de cristalitos menores formados quando do estiramento da fibra. Observa-se que a  $T_g$  do polímero ocorre em torno de  $75^\circ\text{C}$ .

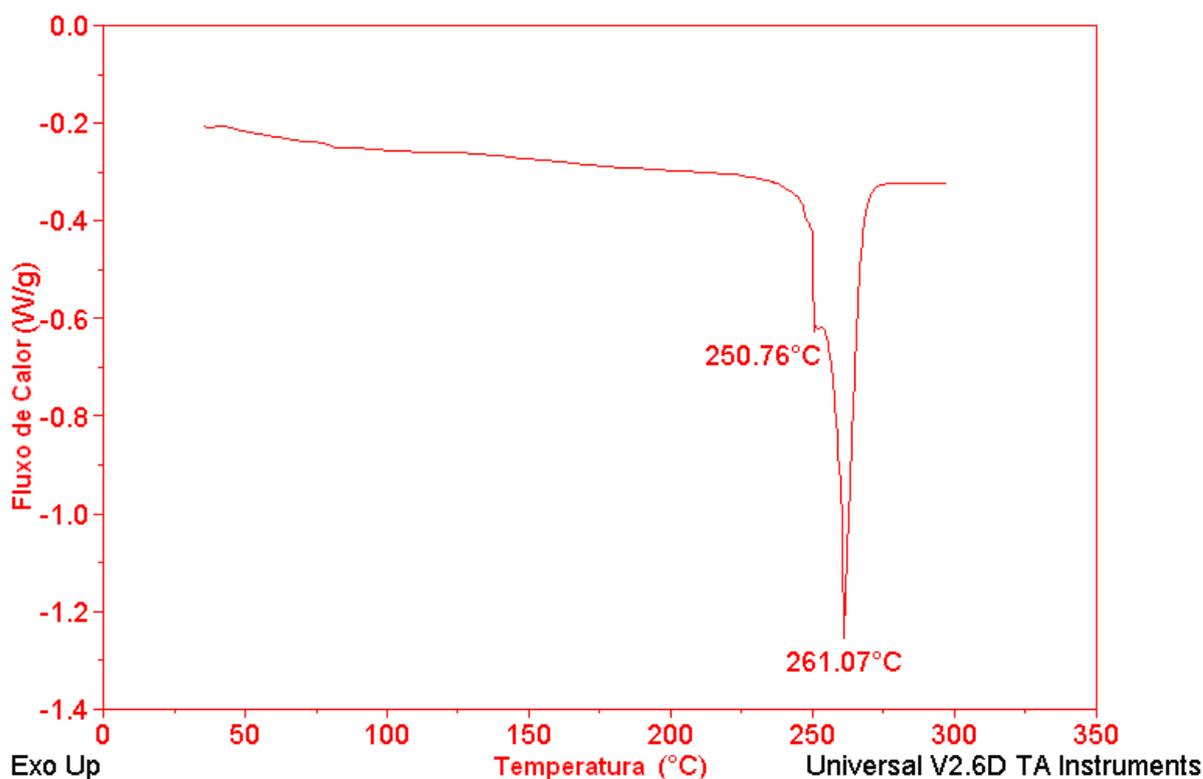


Figura 24: Termograma de DSC da fibra de poliéster do cabo de 10 mm.

A Figura 25 mostra o termograma de TGA da fibra de PET do cabo de 10 mm em atmosfera inerte. Observou-se que ocorreu uma perda de massa de 91% na região próxima a  $449^\circ\text{C}$  referente à degradação do polímero. Verificou-se uma alta porcentagem de resíduo, cerca de 9%, que pode ser atribuído fibra de PET carbonizada.

A Figura 26 mostra o termograma de TGA da fibra de PET em atmosfera oxidante, observando-se nesse caso perdas de massa em  $440^\circ\text{C}$  e  $454^\circ\text{C}$  referente à decomposição do polímero com diferentes pesos moleculares, totalizando 84%. Uma terceira perda de massa de 15% em  $598^\circ\text{C}$  é atribuída à continuação do processo de decomposição do sólido remanescente. Neste caso o resíduo resultante é significativamente menor, em torno de 1%.

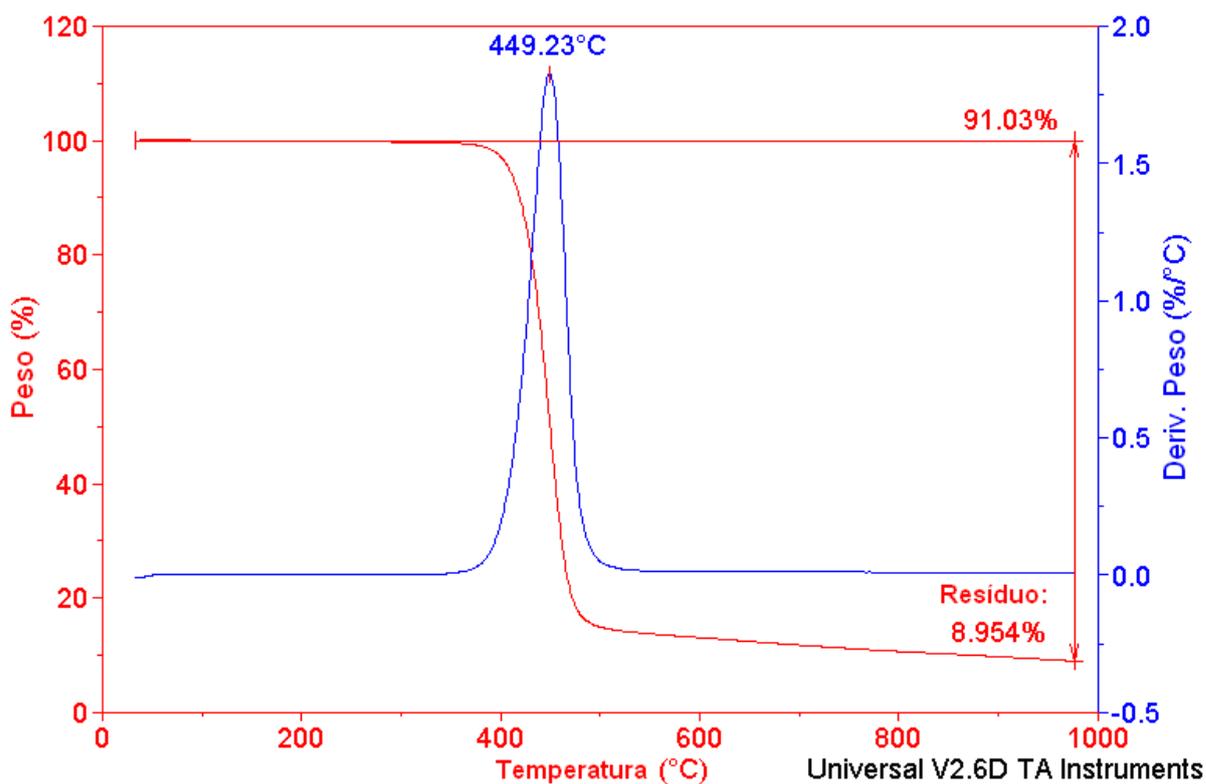


Figura 25: Termograma de TGA da fibra de poliéster do cabo de 10 mm em atmosfera inerte.

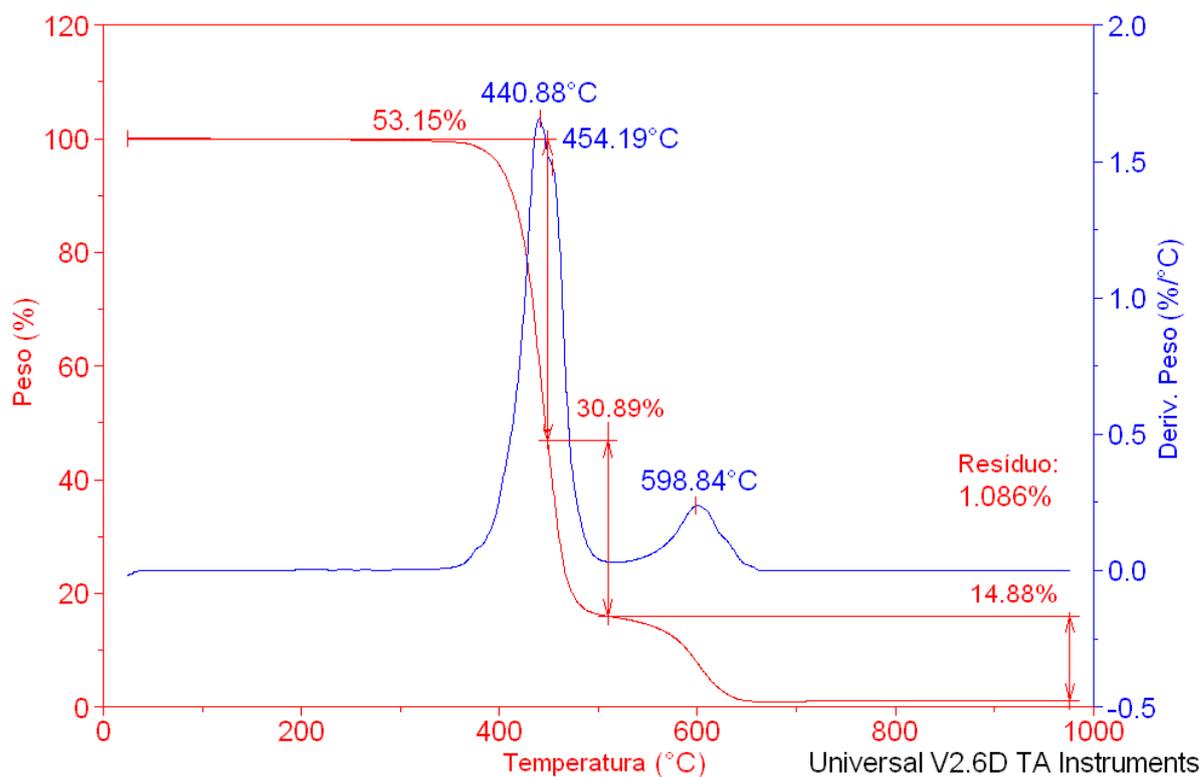


Figura 26: Termograma de TGA da fibra de poliéster do cabo de 10 mm em atmosfera oxidante.

Uma vez que as fibras de PET sofrem tratamento superficial para aplicação em cabos navais, fibras de cabos comerciais foram tratadas com hexano e este analisado por FTIR para detecção da presença de *marine finish*. O *marine finish* é um composto químico que segundo informações dos fabricantes de fibras de PET garante um melhor acabamento destas no sentido de evitar a deterioração deste quer seja por gessgaste ou impurezas diversas.

Para a detecção do *marine finish*, diversos *yarns* de fibra de poliéster foram imersos em hexano. Após as fibras permanecerem imersas no solvente por 48 horas, este se tornou turvo, indicando a presença de algum componente extraído da fibra. As fibras foram então removidas e a solução concentrada para análise por infravermelho. A Figura 27 mostra a análise de FTIR do composto removido das fibras de PET, o *marine finish*. Pelo espectro apresentado, é possível dizer que o *marine finish* contém grupamentos éster e longa cadeia de hidrocarbonetos alifáticos saturados semelhantes a óleos ou ácidos graxos vegetais. A partir disso, infere-se que o composto pode ser derivado do óleo de coco com certas modificações ou mistura de ésteres segundo literaturas [66,67] ou conforme já descrito em patentes [68,69].

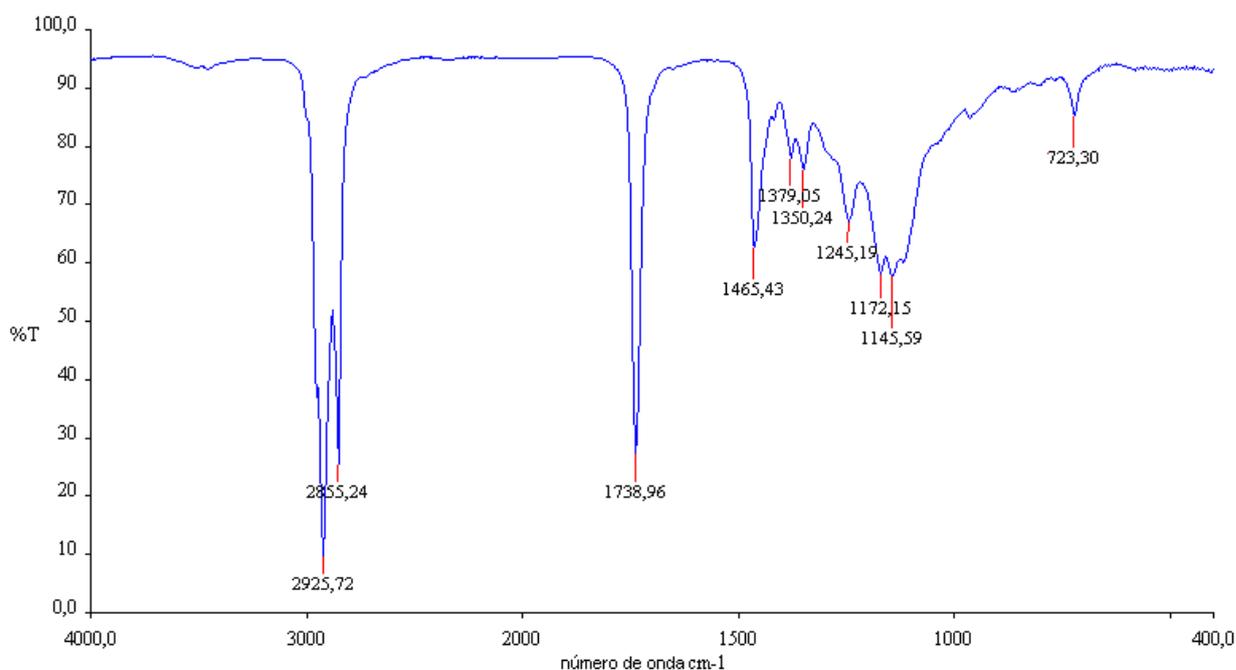


Figura 27: Espectro de FTIR do *marine finish* removido por hexano.

## 5.2. AVALIAÇÃO DA CURA E COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS RESINAS TERMORRÍGIDAS

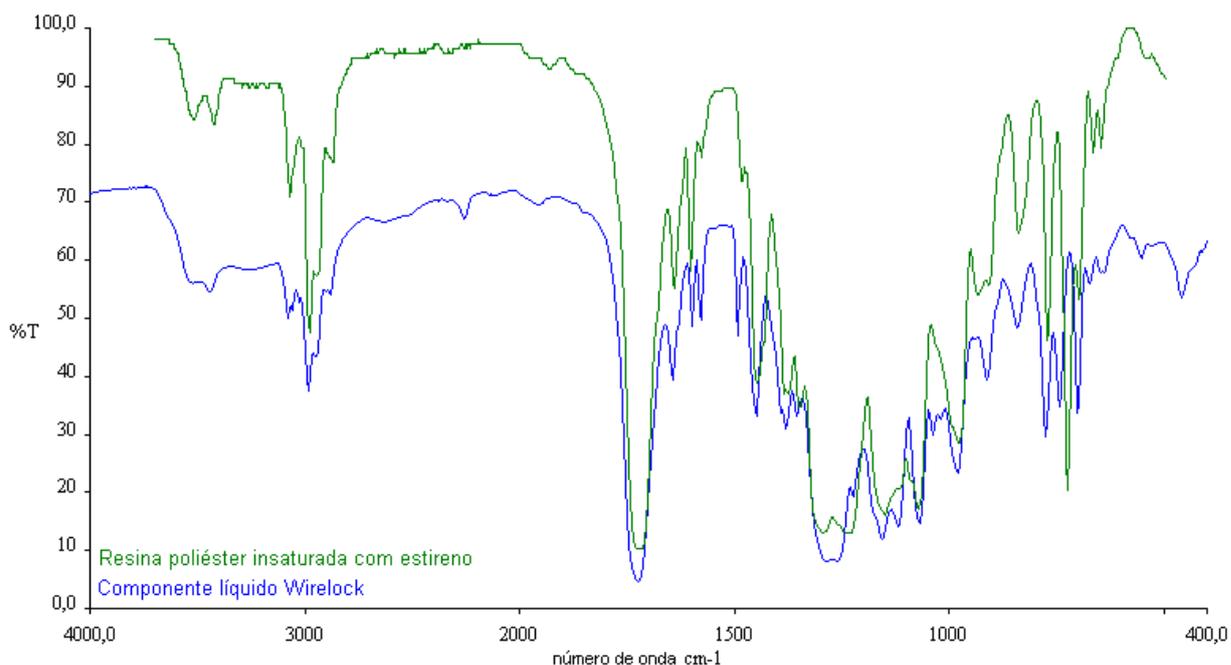
A avaliação do comportamento térmico das resinas permitiu verificar a viabilidade do uso destas na soquetagem de cabos de fibra poliéster tanto com relação à temperatura e tempo de cura quanto ao calor liberado, levando-se em consideração as características térmicas da fibra de poliéster, as condições inerentes e necessárias à soquetagem de cabos.

A escolha inicial das resinas se baseou no conhecimento prévio das características das resinas termorrígidas comerciais disponíveis para a soquetagem de cabos de aço. As resinas Wirelock e Calcepóxi, por exemplo, são atualmente empregadas na soquetagem de cabos de aço, sendo, portanto, usadas neste trabalho como referência ao estudo das resinas termorrígidas selecionadas para a soquetagem de cabos de fibra poliéster, sendo estas do tipo epóxi. As resinas epóxi Araldite e os endurecedores foram escolhidos levando-se em consideração o seu estado físico, sua viscosidade a 25°C e tempo de gel a 20°C, características estas importantes para a aplicação final.

Levando-se em consideração que os cabos devem ser soquetados “in locu” ou em condições fora daquelas possíveis de se ter em laboratório, e considerando também a dimensão de alguns e que o calor liberado na cura da resina não deve comprometer a integridade da fibra ou superaquecer o soquete, procurou-se definir num segundo momento as resinas possíveis de ser avaliadas em ensaios mecânicos.

Assim, foi feita uma análise da possibilidade de utilização destas resinas, avaliando-as comparativamente quanto às características térmica e mecânica.

A resina Wirelock, utilizada na soquetagem de cabos de aço, é composta de resina poliéster insaturada dissolvida em estireno (componente líquido) conforme pode ser observado pelo espectro de FTIR mostrado na Figura 28. O segundo componente (polverulento) trata-se do iniciador da reação de cura, o peróxido de benzoíla (BOP), como pode ser observado pelo espectro de FTIR mostrado na Figura 29, disperso em uma carga inorgânica (Figura 30).

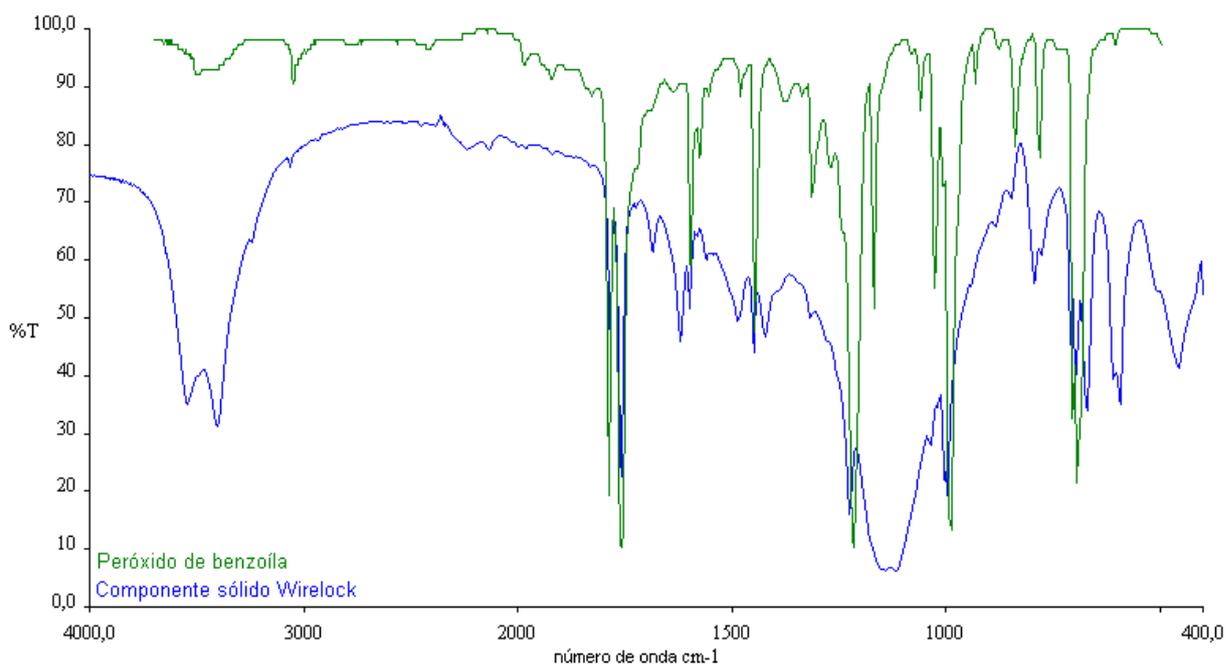


**Figura 28: Espectro de FTIR do componente líquido Wirelock.**

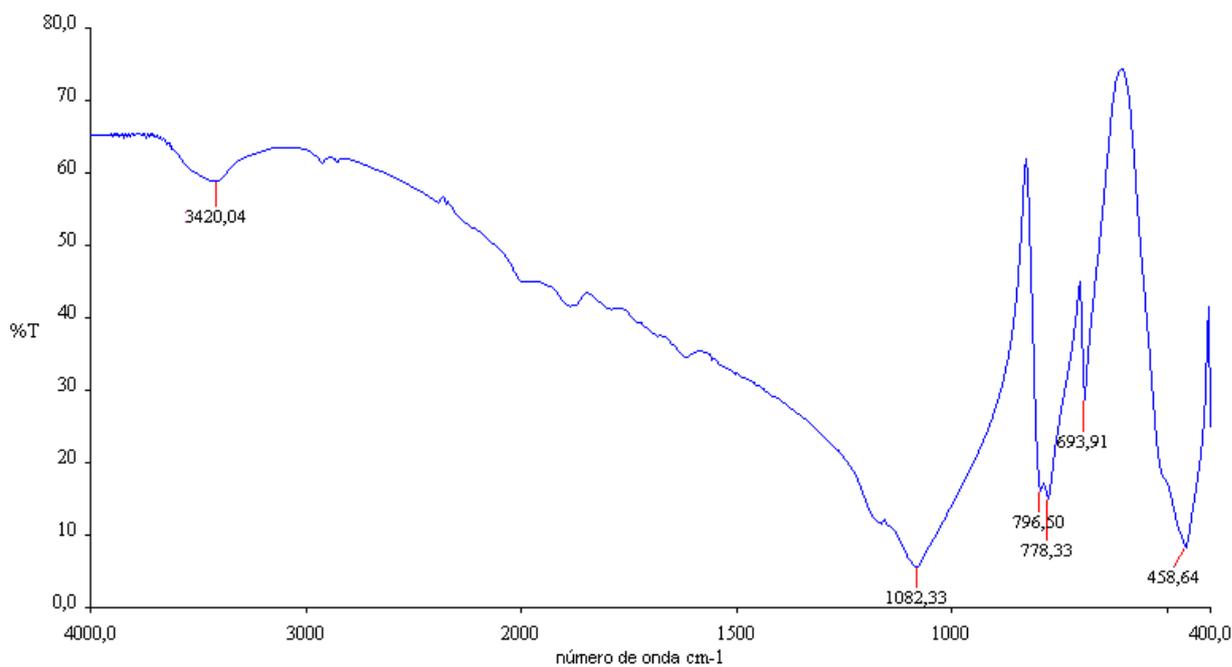
Pela análise do componente granular verifica-se que este além do BOP contém mais um elemento inorgânico devido à grande diminuição de transmitância na região entre 1500 e 1000  $\text{cm}^{-1}$ , tratando-se muito provavelmente de uma sílica utilizada como veículo facilitador da mistura do iniciador sólido na resina líquida, uma vez que o BOP é um pó muito fino e a sílica melhora a incorporação deste na resina bem como aumenta a resistência mecânica da resina curada por atuar como uma carga.

Para identificar o elemento inorgânico (carga), o componente pulverulento foi dissolvido em hexano, obtendo-se um precipitado, o qual foi removido e seco para eliminação do solvente. Segundo a literatura sobre cargas e pigmentos inorgânicos [67], foi verificado que a carga analisada trata-se do dióxido de silício ou sílica ( $\text{SiO}_2$ ).

O estireno no componente líquido é o agente de reticulação ou responsável pelo endurecimento da resina. Este, no entanto, por ser monômero polimeriza com alta velocidade de reação com liberação de uma quantidade considerável de calor o qual pode aquecer as fibras de PET e prejudicar sua integridade. Por outro lado, por ser um solvente da resina poliéster insaturada migra mais facilmente ao longo da fibra.



**Figura 29: Espectro de FTIR do componente granular Wirelock.**



**Figura 30: Espectro de FTIR da carga do Peroxido de Benzoila (BOP).**

As Figuras 31 e 32 mostram os termogramas de TGA da resina Wirelock em atmosfera inerte e oxidante. Sob atmosfera inerte foram observadas duas perdas de

massa, uma de 2,69% em torno de 210°C, provavelmente devido à presença de oligômeros, e outra de 31% a 400°C devido ao PET com resíduo de 66,28%. Sob atmosfera oxidante, observaram-se perdas de massa de 5% devido à presença de oligômeros e de 45% por volta de 400°C referente à decomposição do poliéster. Neste caso há uma perda de 3,2%, próxima de 530°C provavelmente de uma fração carbonizada previamente com resíduo de 46%, devido à carga (SiO<sub>2</sub>) adicionada nesta.

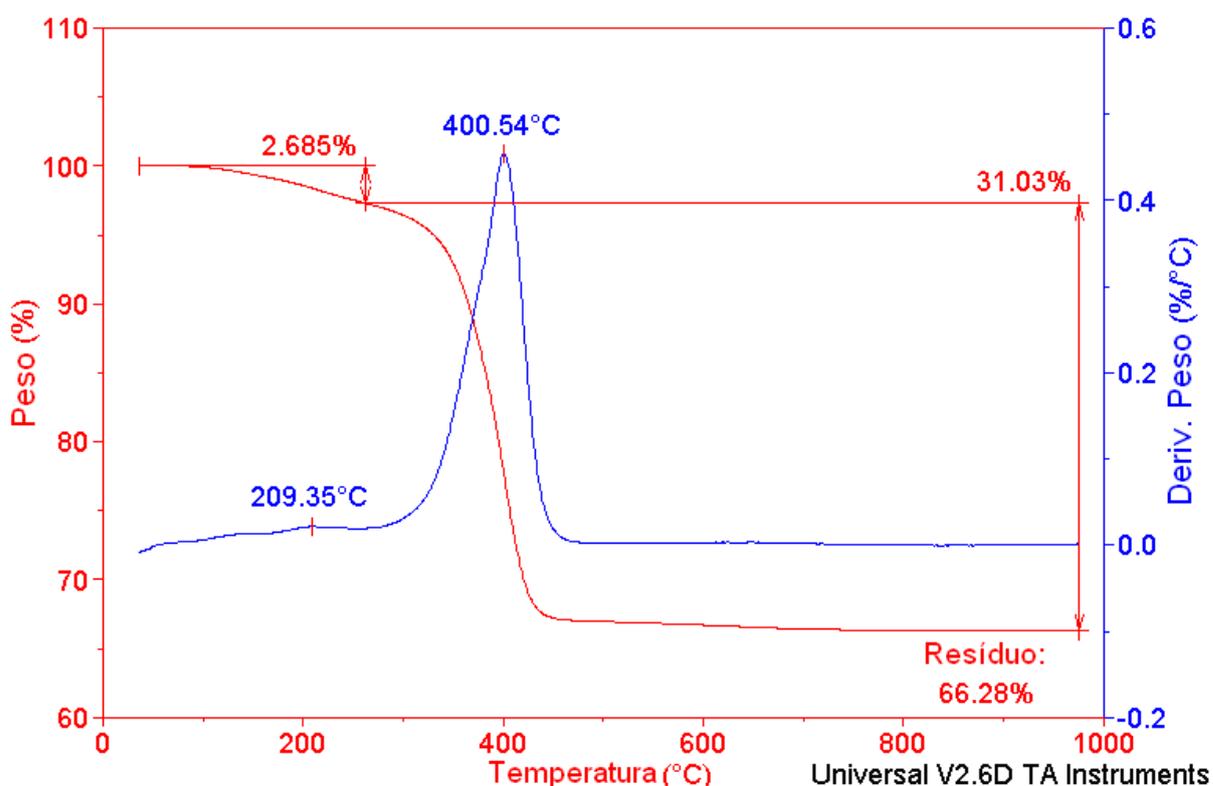


Figura 31: Termograma de TGA da resina curada Wirelock em atmosfera inerte.

A Figura 33 mostra o termograma de TGA da resina Calcepóxi em atmosfera inerte. Verificou-se que a primeira perda de massa devido à degradação do polímero, de 33%, ocorreu somente a 368°C. Duas outras perdas foram observadas, uma de 12% logo a 417°C, e outra de 10% em uma faixa de 545 e 779°C, aproximadamente. Os 44% de resíduo gerado deveu-se provavelmente a grande quantidade de carga mineral presente na resina.

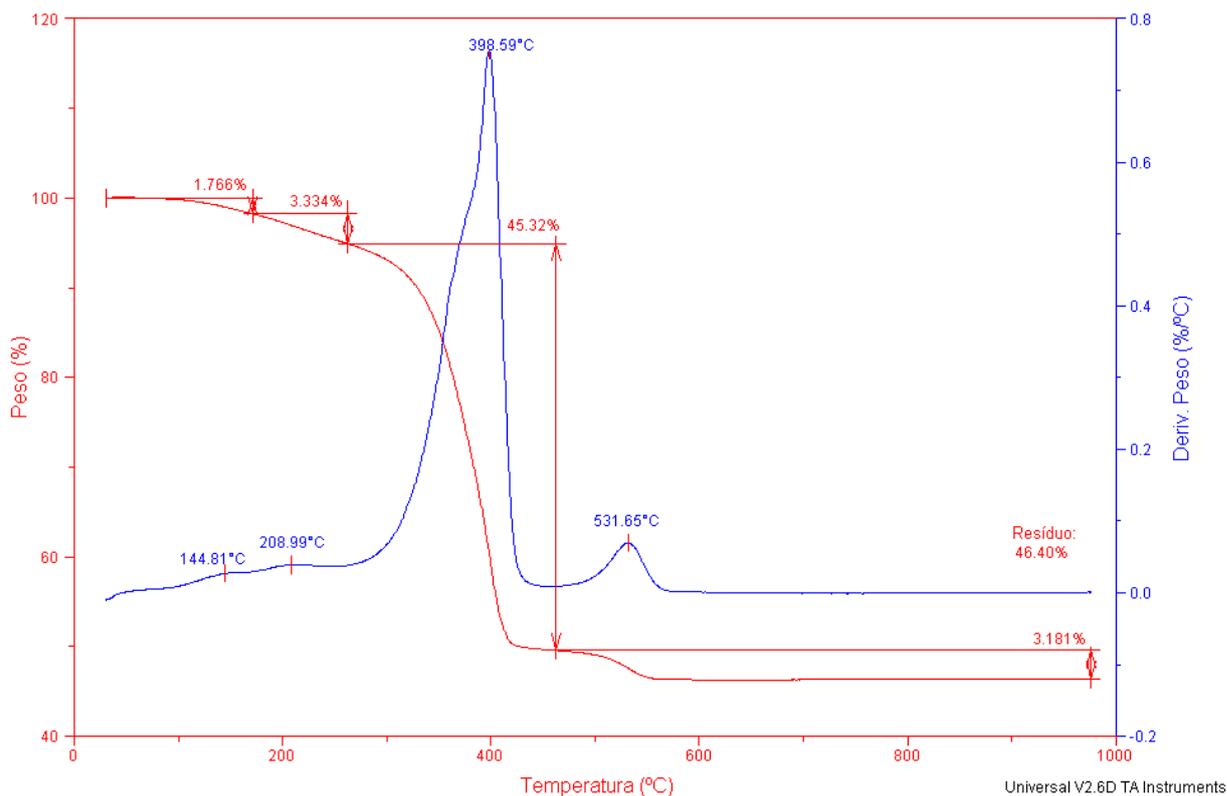


Figura 32: Termograma de TGA da resina curada Wirelock em atmosfera oxidante.

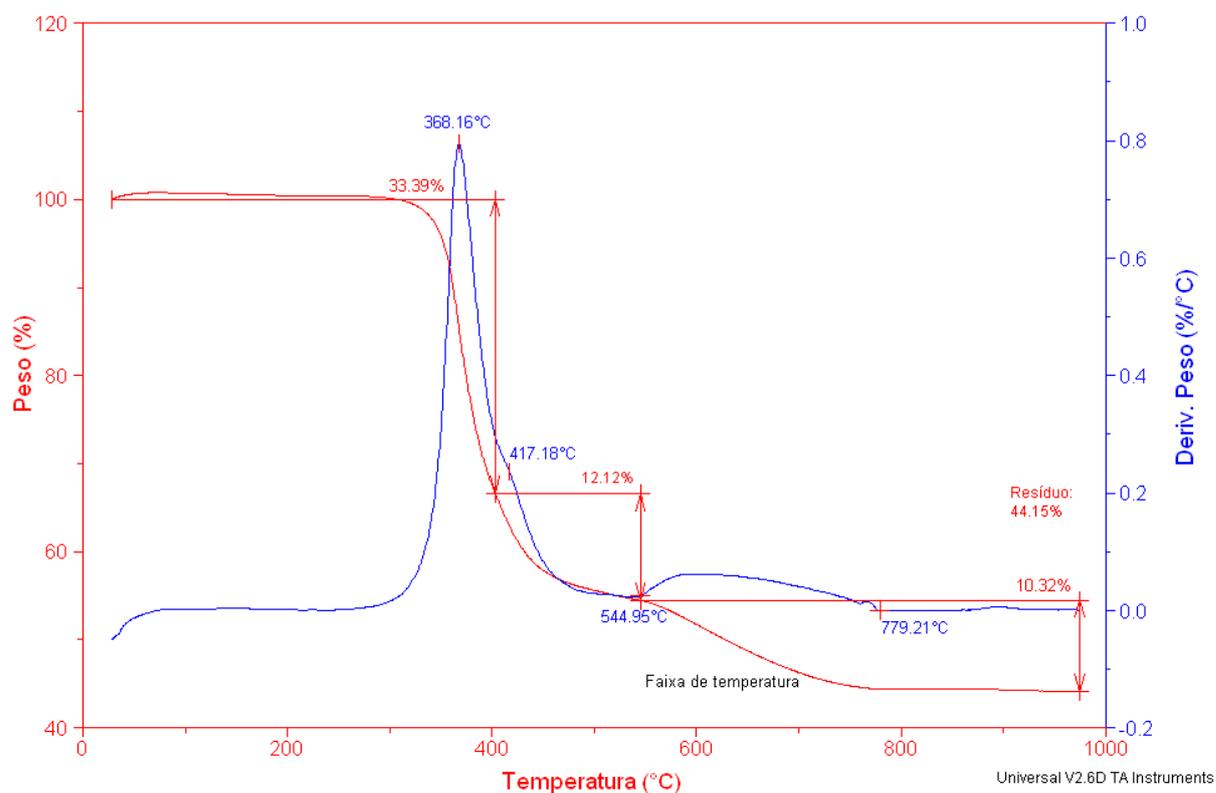


Figura 33: Termograma de TGA da resina curada Calcepóxi em atmosfera inerte.

A Tabela 13 mostra as temperaturas de decomposição e perdas de massa e o resíduo das resinas epóxi com diferentes agentes de cura (Araldite) selecionadas previamente. Observou-se que estas apresentam comportamento ou estabilidade diferenciados também dependente do tipo de agente de cura empregado.

A resina epóxi GY-260 com o endurecedor Aradur 830, simbolizado como resina 260+830, e com o endurecedor Aradur 2969 (resina 260+2969) apresentam degradação do polímero em torno dos 410°C, com perdas de massa de 78 e 85%, respectivamente, e em temperaturas inferiores a 274°C perdas de massa de 11 e 14%, respectivamente. Estas diferenças demonstram que uma mesma resina tem grau de cura diferenciado em função do agente de cura utilizado. Para a resina 260+837 foram observadas três perdas de massa consecutivas de 42, 32 e 22% entre 389 e 442°C. O teor de resíduo variou significativamente de acordo com o agente de cura utilizado.

As amostras 281+837 e 281+2969 apresentaram perdas de massas diferenciadas, sendo de 67 e 21% para a resina 281+837 a 388 e 445°C, respectivamente, e para a resina 281+2969 houve uma perda de 12% em 222°C e outra de 70% por volta dos 410°C. As análises indicaram, respectivamente, uma porcentagem de resíduo de 12 e 19%.

Para as amostras 1109+830, 1109+837 e 1109+2969, verificou-se a existência de um pico característico de degradação do polímero em torno de 400°C, representando perdas de massa entre 70 e 85%. Os picos de menor perda de massa, entre 10 e 20%, podem ser visualizados em temperaturas próximas de 160°C e 200°C.

Para as amostras 1457+850 e 1457+3601+850 foram identificadas três perdas de massa. A alta porcentagem de resíduo remanescente refere-se à carga presente na resina. Observou-se que não houve influência significativa do diluente DY-3601 nas perdas de massa.

Através dos resultados de TGA, conclui-se que as resinas curadas possuem estabilidade térmica suficiente para suportar temperaturas relativamente altas de até 200°C.

**Tabela 13: Temperaturas de decomposição, percentuais de perda de massa e resíduo das resinas curadas 260+830, 260+837, 260+2969, 281+837, 281+2969, 1109+830, 1109+837, 1109+2969, 1457+850 e 1457+3601+850.**

Resinas	1º Evento		2º Evento		3º Evento		R (%)
	TD <sub>1</sub> (°C)	P <sub>1</sub> (%)	TD <sub>2</sub> (°C)	P <sub>2</sub> (%)	TD <sub>3</sub> (°C)	P <sub>3</sub> (%)	
260+830	274	11	411	78	-----	-----	11
260+837	390	42	402	32	442	22	5
260+2969	239	14	413	85	-----	-----	1
281+837	390	67	445	21	-----	-----	12
281+2969	208	12	411	69	-----	-----	19
1109+830	219	19	408	73	-----	-----	8
1109+837	210	10	392	86	-----	-----	4
1109+2969	162	19	414	70	-----	-----	11
1457+850	202	8	408	40	777	14	38
1457+3601+850	210	9	407	43	767	13	35

TD<sub>1</sub>=Temperatura de Decomposição 1; TD<sub>2</sub>=Temperatura de Decomposição 2; TD<sub>3</sub>=Temperatura de Decomposição 3; P<sub>1</sub>=Perda de Massa 1; P<sub>2</sub>=Perda de Massa 2; P<sub>3</sub>=Perda de Massa 3; e R=Resíduo.

As resinas e respectivos agentes de cura recém-misturados foram submetidos à análise de DSC, sendo avaliados os parâmetros de cura das resinas no primeiro e segundo aquecimento do programa térmico a que foram submetidas as amostras.

Neste procedimento térmico foram avaliados no primeiro aquecimento a T<sub>g</sub>, o intervalo de cura da resina e a temperatura máxima da reação de cura. No segundo aquecimento foi avaliada a T<sub>g</sub> da resina curada, ou seja, a temperatura de flexibilização da resina reticulada.

A Figura 34 apresenta o termograma de DSC relativo aos dois aquecimentos da resina Wirelock no qual se observa no primeiro aquecimento um pico relativo à fusão da resina (pico endotérmico entre -50 e -25°C), seguido pelo pico de cura entre 25 e 150°C. Segundo a ficha de informação de produto químico da Innova [71] o ponto de fusão do estireno é em torno de -30,6°C. A temperatura de cura máxima observada foi em torno de 70°C. A T<sub>g</sub> da resina curada não foi detectada para esta resina devido à sensibilidade do equipamento.

A Figura 35 mostra o termograma de DSC da resina Calcepóxi. Neste, observou-se que a  $T_g$  da resina não-curada está em torno de  $-25^\circ\text{C}$  e o da resina curada, em  $123^\circ\text{C}$  aproximadamente. A cura da resina Calcepóxi está compreendida entre  $15$  e  $170^\circ\text{C}$ , observando-se a temperatura de cura máxima em torno de  $99^\circ\text{C}$ .

A Figura 36 mostra o termograma de DSC relativo à análise da resina 260+2969. No primeiro aquecimento, à  $-28^\circ\text{C}$  foi observada a  $T_g$  da resina não curada e a temperatura máxima de cura à  $122^\circ\text{C}$  no intervalo de cura entre  $25$  e  $240^\circ\text{C}$ . No segundo aquecimento, a  $T_g$  da resina curada foi à  $104^\circ\text{C}$ . Assim, verifica-se que a resina 260+2969 não cura rapidamente à temperatura ambiente e que em temperaturas próximas a esta terá longos tempos de cura. Além disso, após curada apresenta alto valor de  $T_g$ , bem acima da temperatura ambiente, o que a torna extremamente rígida, apresentando conseqüentemente alto módulo.

A Tabela 14 apresenta a temperatura de transição vítrea antes ( $T_{g1}$ ) e após a cura ( $T_{g2}$ ) das resinas Wirelock, Calcepóxi e epóxi (Araldite), a temperatura onde a resina curada começa a flexibilizar ( $T_{gi}$ ), o intervalo de cura da resina ( $\Delta T_{cura}$ ) e a temperatura máxima ( $T_{max}$ ) de cura.

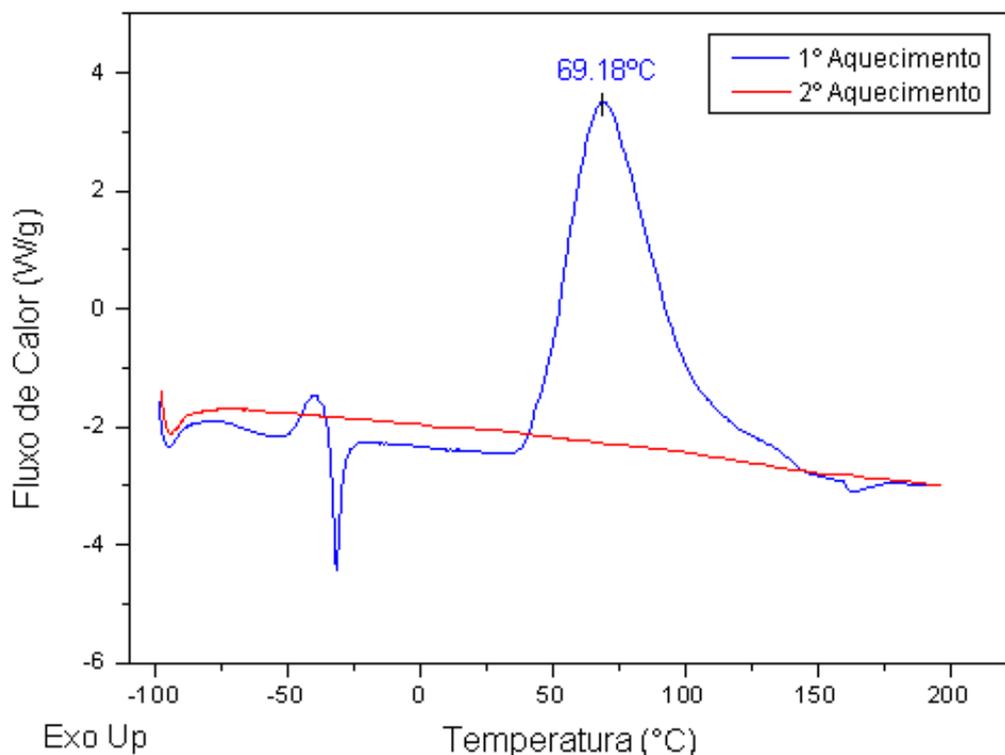


Figura 34: Termograma de DSC da resina poliéster Wirelock.

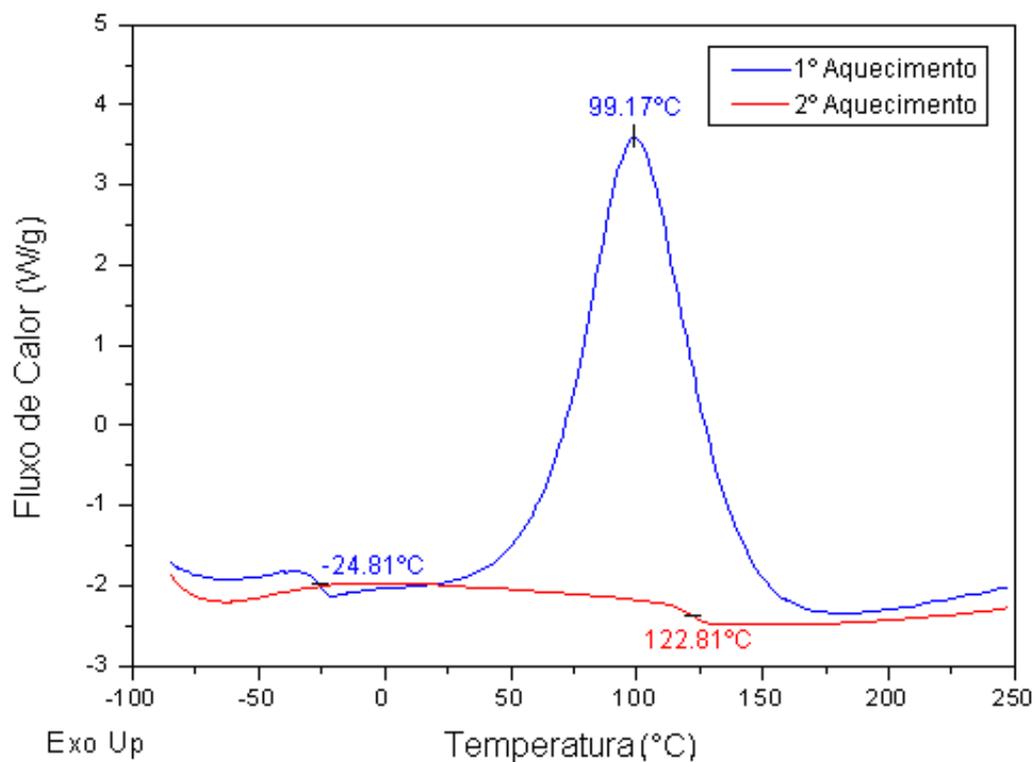


Figura 35: Termograma de DSC da resina poliéster Calcepóxi.

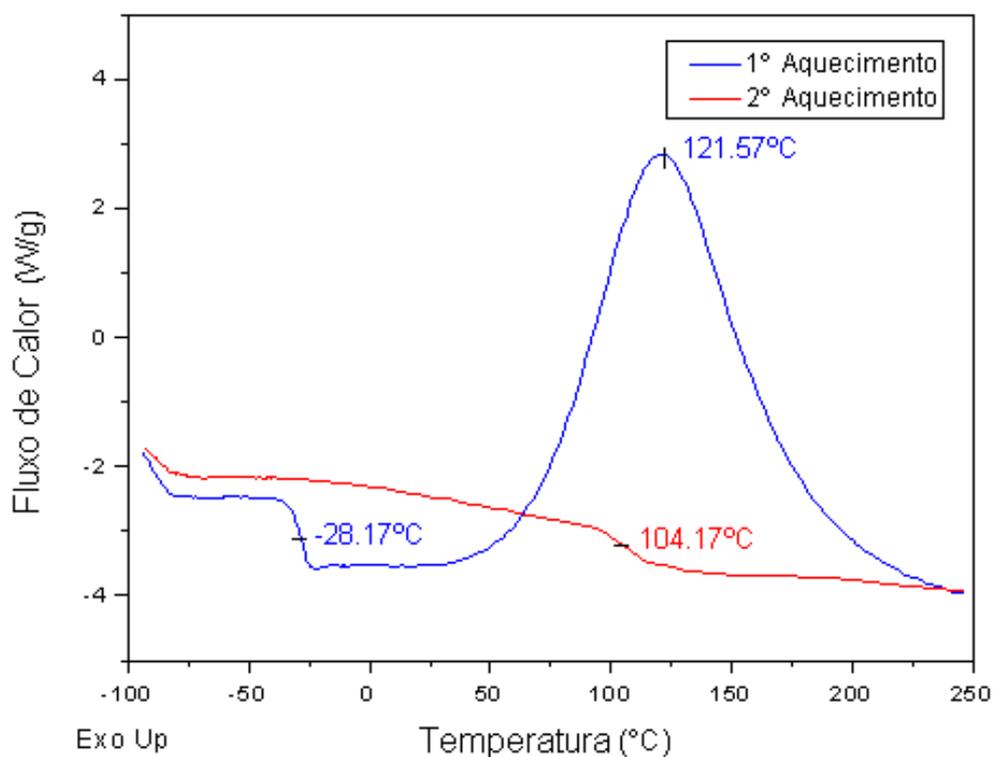


Figura 36: Termograma de DSC da resina 260+2969.

**Tabela 14: Temperaturas de transição vítrea antes ( $T_{g1}$ ) e após a reação de cura ( $T_{g2}$ ), temperaturas iniciais de flexibilização após a reação de cura ( $T_{gi}$ ), intervalos de cura ( $\Delta T_{cura}$ ) e temperaturas máximas de cura ( $T_{max}$ ) das resinas Wirelock, Calcepóxi e Araldite comerciais.**

	$T_{g1}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_{gi}$ (°C)	$\Delta T_{cura}$ (°C)	$T_{max}$ (°C)
Wirelock	-----	-----	-----	30–150	69
Calcepóxi	-25	123	115	15–170	99
260+830	-21	72	63	50–250	172
260+837	-23	90	84	10–240	91
260+2969	-28	104	97	25–240	122
281+837	-24	82	76	15–250	89
281+2969	-31	98	88	20–230	120
1109+830	-37	87	66	50–250	178
1109+837	-27	61	51	10–175	93
1109+2969	-41	93	82	40–200	125
1457+850	-32	67	50	25–250	106
1457+3601+850	-35	50	30	30–250	109

$T_{g1}$  = temperatura de transição vítrea antes da cura;  $T_{g2}$  = temperatura de transição vítrea da resina curada;  $T_{gi}$  = temperatura inicial de flexibilização da resina curada;  $\Delta T_{cura}$  = intervalo de cura da resina;  $T_{max}$  = temperatura de cura máxima.

Avaliando-se os resultados obtidos, pode-se verificar que:

- As  $T_{g1}$ 's das resinas são bem semelhantes entre si, ficando entre -21 e -41°C;
- As  $T_{g2}$ 's das resinas ocorreram em temperaturas bem superiores à temperatura ambiente ou de aplicação, sendo, portanto, nesta temperatura materiais rígidos;
- As resinas 1109+830 e 260+830 são as únicas que iniciam a reação de cura em temperaturas superiores à temperatura ambiente, ou seja, no intervalo de 50 a 250°C;
- A resina 1457+3601+850 flexibiliza-se numa temperatura próxima dos 30°C, ficando restrito o seu uso uma vez que está dentro da faixa considerada de uso do dispositivo.

Novas proporções de endurecedores foram utilizadas a fim de se verificar alguma alteração existente no comportamento de cura da resina GY-1109. Para cada 100 partes em peso de resina GY-1109 misturou-se 60 partes em peso do endurecedor Aradur 830 (resina 1109+830\_60), 50 partes em peso do Aradur 837 (resina 1109+837\_50) e 80 partes em peso do Aradur 2969 (resina 1109+2969\_80). Convém lembrar que o fabricante propõe o uso de 45, 35 e 60 partes em peso de Aradur 830, 837 e 2969, respectivamente, para cada 100 partes em peso da resina GY-1109. Na Tabela 15 verifica-se comparativamente a influência da quantidade de endurecedor no comportamento de cura das resinas.

**Tabela 15: Temperaturas de transição vítrea antes ( $T_{g1}$ ) e após a reação de cura ( $T_{g2}$ ), temperaturas iniciais de flexibilização após a reação de cura ( $T_{gi}$ ), intervalos de cura ( $\Delta T_{cura}$ ) e temperaturas máximas de cura ( $T_{max}$ ) da resina GY-1109 com diferentes endurecedores e proporções.**

	$T_{g1}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_{gi}$ (°C)	$\Delta T_{cura}$ (°C)	$T_{max}$ (°C)
1109+830	-37	87	66	50–250	178
1109+830_60	-36	74	58	90–250	173
1109+837	-27	61	51	10–175	93
1109+837_50	-30	54	46	25–135	91
1109+2969	-41	93	82	40–200	125
1109+2969_80	-43	89	75	50–175	121

$T_{g1}$  = temperatura de transição vítrea antes da cura;  $T_{g2}$  = temperatura de transição vítrea da resina curada;  $T_{gi}$  = temperatura inicial de flexibilização da resina curada;  $\Delta T_{cura}$  = intervalo de cura da resina;  $T_{max}$  = temperatura de cura máxima.

Comparando-se a cura por análise térmica das resinas epóxi GY-1109 com os endurecedores Aradur 830, 837 e 2969 nas proporções indicadas pelo fabricante e nas proporções alteradas, pode-se concluir que:

- A  $T_{g1}$  das resinas com as novas proporções de endurecedores permaneceu muito próxima da  $T_{g1}$  das resinas com a proporção indicada pelo fabricante;
- A  $T_{g2}$  das resinas com as novas proporções foi deslocada para temperaturas menores;

- A  $T_{gi}$  das resinas com as novas proporções também foi deslocada para temperaturas maiores;
- A temperatura inicial de cura para as resinas com as novas proporções foi deslocada para temperaturas superiores;
- A temperatura final de cura para as resinas com as novas proporções foi deslocada para temperaturas menores com exceção da resina 1109+830\_60 que permaneceu inalterada;
- A  $T_{max}$  variou entre as resinas.

Baseado no comportamento térmico das resinas, conclui-se que as resinas 1109+830 e 260+830 não são indicadas para o procedimento de soquetagem, porque apresentaram temperaturas iniciais de cura em 50°C, não favorecendo a cura dessas à temperatura ambiente. Nem mesmo o aumento da proporção de endurecedor favoreceu o comportamento de cura da resina GY-1109 com seus respectivos agentes de cura uma vez que as temperaturas iniciais de cura foram deslocadas para temperaturas superiores enquanto as outras propriedades não tiveram maiores modificações.

### 5.3. COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DAS RESINAS

Para os materiais com ligações cruzadas tais como polímeros termorrígidos obtêm-se resultados de DMA intrínsecos ao tipo de matriz polimérica e dependentes da temperatura. Entretanto, em geral, esses materiais possuem regiões de  $T_g$  bem definidas que estão associadas à diminuição do módulo de armazenamento coincidindo com o aumento do módulo de perda e da  $\tan \delta$ .

Visto que esses polímeros termorrígidos têm ligações cruzadas, a resposta viscoelástica destes é uma função do seu grau de reticulação. Devido às ligações cruzadas, o módulo do platô elástico acima da região da transição vítrea não declina, permanecendo constante. Nota-se também que nesses sistemas os valores de  $\tan \delta$  acima da  $T_g$  retornam para os mesmo valores anteriores à região da  $T_g$ .

Sabe-se que a temperatura tem efeito significativo sobre as propriedades dos polímeros devido ao fato destes serem materiais viscoelásticos e serem flexíveis ou não, dependendo do valor da  $T_g$ .

A Figura 37 mostra algumas propriedades da água do mar através da qual é possível se extrapolar valores de densidade, de temperatura e de salinidade em função da profundidade e da latitude. Com base nisso, destacou-se na Figura 37a a faixa de temperatura a que o cabo soquetado estará submetido, ou seja, entre 2 e 40°C.

A Figura 38a mostra o termograma de DMA da resina 1109+2969. Nele pode-se observar a variação do módulo de armazenamento, do módulo de perda e da  $\tan \delta$  versus temperatura.

As curvas de módulo de armazenamento ( $E'$ ) e de módulo de perda ( $E''$ ) versus temperatura permitem a comparação direta de uma variedade de materiais que podem ser candidatos a uma determinada aplicação. O módulo de armazenamento refere-se à parte elástica do material, ou seja, é a resistência do material à deformação. Então, quanto maior o módulo de armazenamento a uma dada temperatura, maior deverá ser a tensão aplicada para gerar uma pequena deformação. A energia armazenada com a deformação permite que o material retorne às condições originais quando a tensão é removida (recuperação). Entretanto, com o módulo de perda é o oposto uma vez que está relacionado à parte viscosa do material, ou seja, é a capacidade de se deformar ou escoar. Portanto, quanto maior o módulo de perda a uma dada temperatura, mais suscetível é o material à deformação. A energia dissipada durante a deformação do material não permite que o material retorne às condições originais. Através do módulo de perda é possível inferir a fluência (*creep*) do material. O amortecimento mecânico (*damping*) ou a perda de energia por ciclo no material pode ser medida pela  $\tan \delta$ , sendo a razão entre  $E''$  e  $E'$ . Quando a energia armazenada tende a zero ( $E' \rightarrow 0$ ), a  $\tan \delta$  tende a um máximo e um pico é observado, o qual é tratado por muitos autores como o pico da  $T_g$ . Outros autores consideram a  $T_g$  onde a energia dissipada é máxima, isto é, no pico do módulo de perda ( $E''$ ).

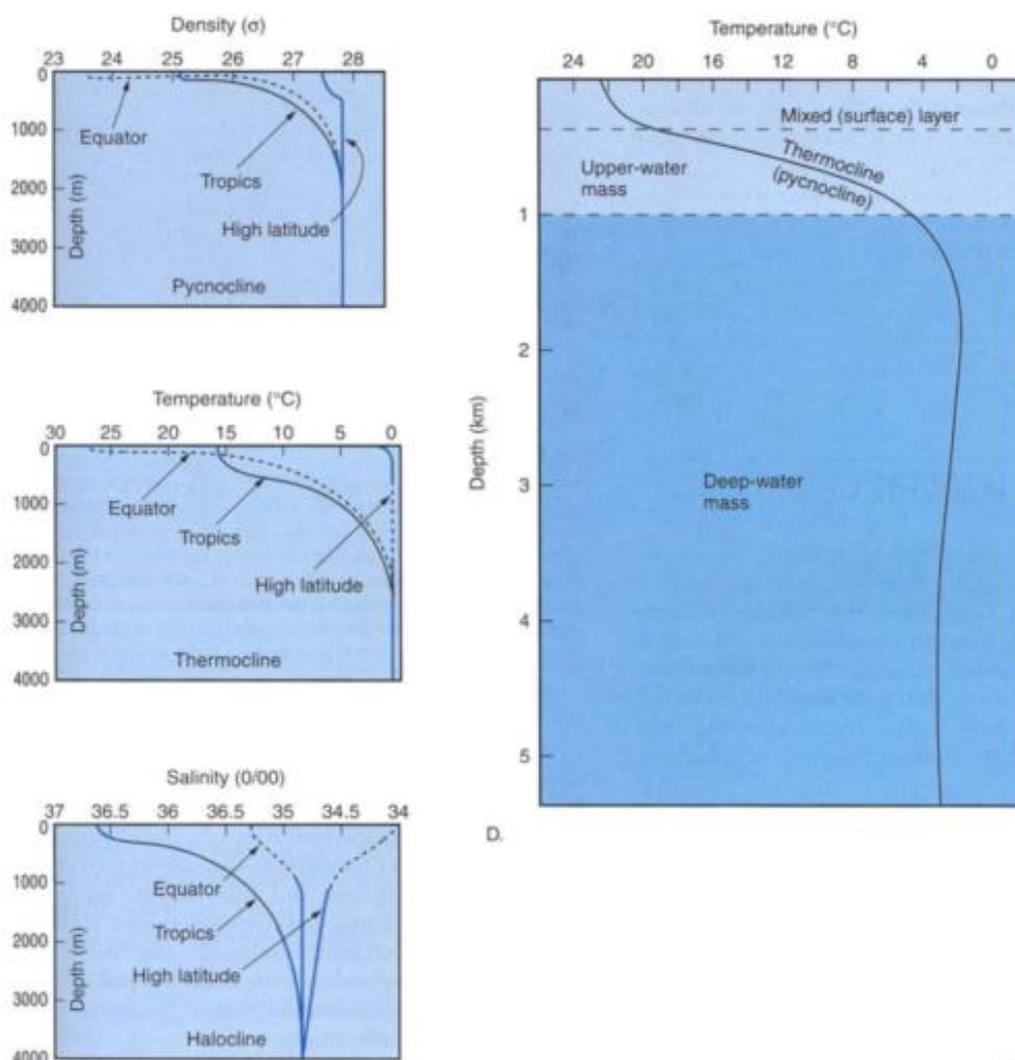


Figura 37: Propriedades da água do mar (densidade, temperatura e salinidade) de acordo com a profundidade [70].

A Figura 38a e b correspondem aos termogramas das resinas Araldite 1109+2969 e Calcepóxi, respectivamente. Comparando-se as duas resinas epóxi, a 1109+2969 e a Calcepóxi, verificou-se que o módulo de armazenamento da segunda a temperatura ambiente é significativamente maior devido ao fato desta possuir carga mineral na sua formulação. Foi observado pelo módulo de perda que a resina Calcepóxi tende a dissipar menos energia que a 1109+2969, e apresenta a região de  $T_g$  superior a  $80^\circ\text{C}$ , enquanto que a 1109+2969 apresenta região de  $T_g$  entre  $40$  e  $80^\circ\text{C}$ .

Na Figura 39a e b estão apresentados os termogramas de DMA das resinas 260+2969 e Wirelock. Comparando-se a resina epóxi e a resina poliéster, 260+2969

e Wirelock, verificou-se que o módulo de armazenamento da segunda a temperatura ambiente é superior, salientando-se que esta também possui carga mineral na sua formulação. No entanto, observou-se pelo módulo de perda que a resina 260+2969 tende a dissipar menos energia que a Wirelock. Devido ao fato da resina poliéster sofrer cura pela reticulação com estireno, esta apresenta dois máximos na curva de  $\tan \delta$ , um correspondente à resina poliéster e o outro ao poliestireno.

Comparando-se os módulos de armazenamento das resinas Wirelock, Calcepóxi, 260+2969 e 1109+2969, cujas curvas podem ser vistas na Figura 40a, observou-se que os módulos decrescem gradualmente com o aumento da temperatura e de maneira diferenciada. Na faixa de temperatura de 0 a 40°C a resina Calcepóxi é a que possui o maior módulo de armazenamento (rigidez), sendo a mais resistente à deformação. Já a resina 1109+2969 tende a se deformar mais facilmente que as outras. Comparando-se os módulos de perda para as mesmas resinas a partir das curvas da Figura 40b, notou-se que a resina Wirelock é a que apresenta a maior capacidade de dissipar energia entre 0 e 40°C.

A Tabela 16 apresenta os valores de módulo de armazenamento e de perda das resinas avaliadas nas temperaturas de 10, 20, 30 e 40°C. Das resinas testadas, observou-se que a Wirelock, a Calcepóxi, a 1457+850, a 1457+3601+850 após a cura apresentaram os maiores módulos de armazenamento na temperatura de 10°C cujos valores ultrapassam a 3700 MPa. Isso se deve ao fato dessas resinas apresentarem cargas em suas composições, tornando-as mais rígidas. As outras resinas apresentaram valores inferiores, variando entre 2200 e 3500 MPa. Como o módulo de armazenamento está ligado à rigidez do material, as resinas carregadas são capazes de suportar maiores tensões no processo de tracionamento do cabo soquetado. A resistência da resina deve ser no mínimo igual àquela do cabo de PET.

Na Tabela 17 estão apresentados os valores de  $\tan \delta$  das resinas avaliadas nas temperaturas de 10, 20, 30 e 40°C. Nas temperaturas correspondentes, observou-se que o maior e o menor amortecimento mecânico ocorrem, respectivamente, para as resinas 1457+3601+850, devido à presença do diluente que age como um flexibilizador, e Calcepóxi, devido à grande quantidade de carga presente que fornece alta rigidez.

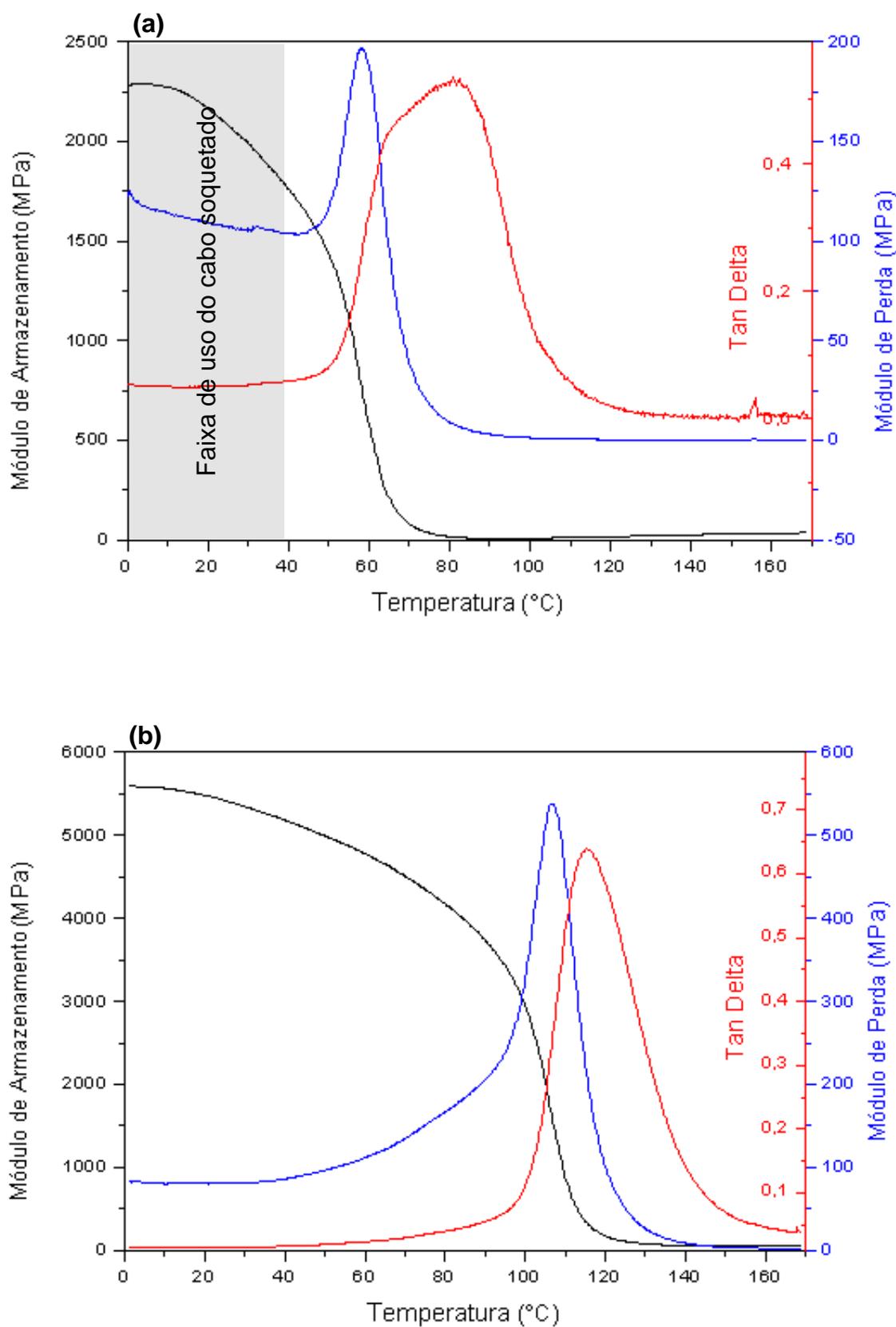


Figura 38: Termograma de DMA da resina (a) 1109+2969 e (b) Calcepóxi.

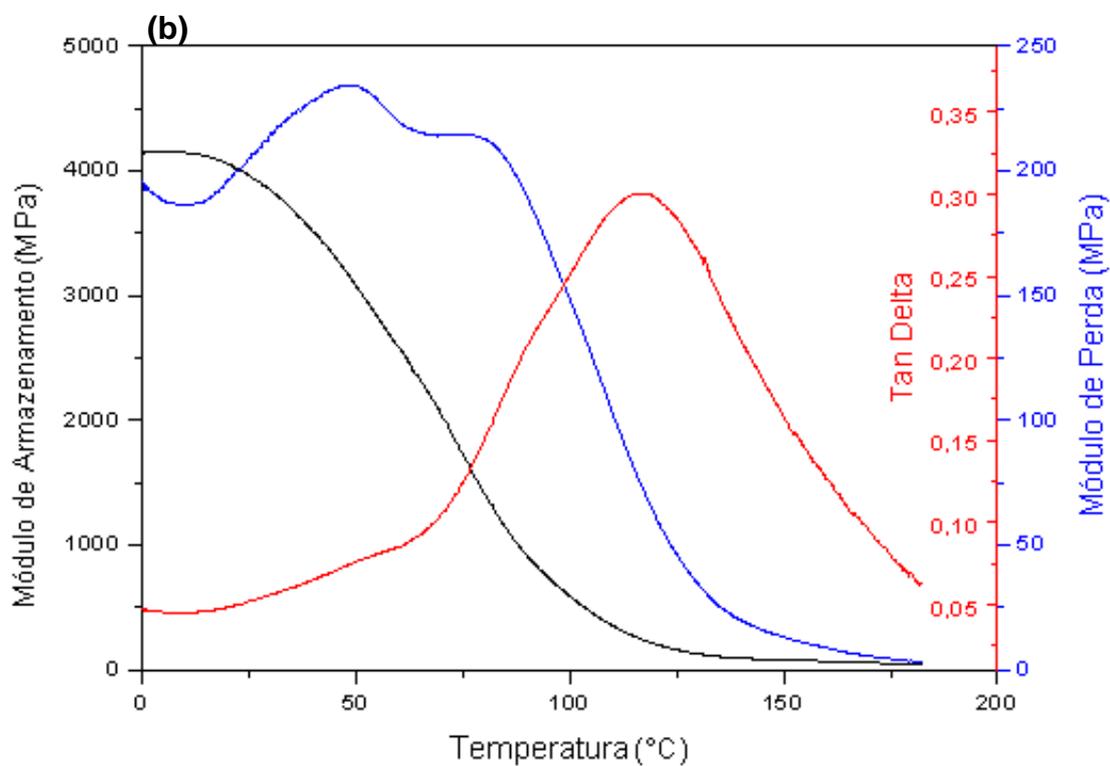
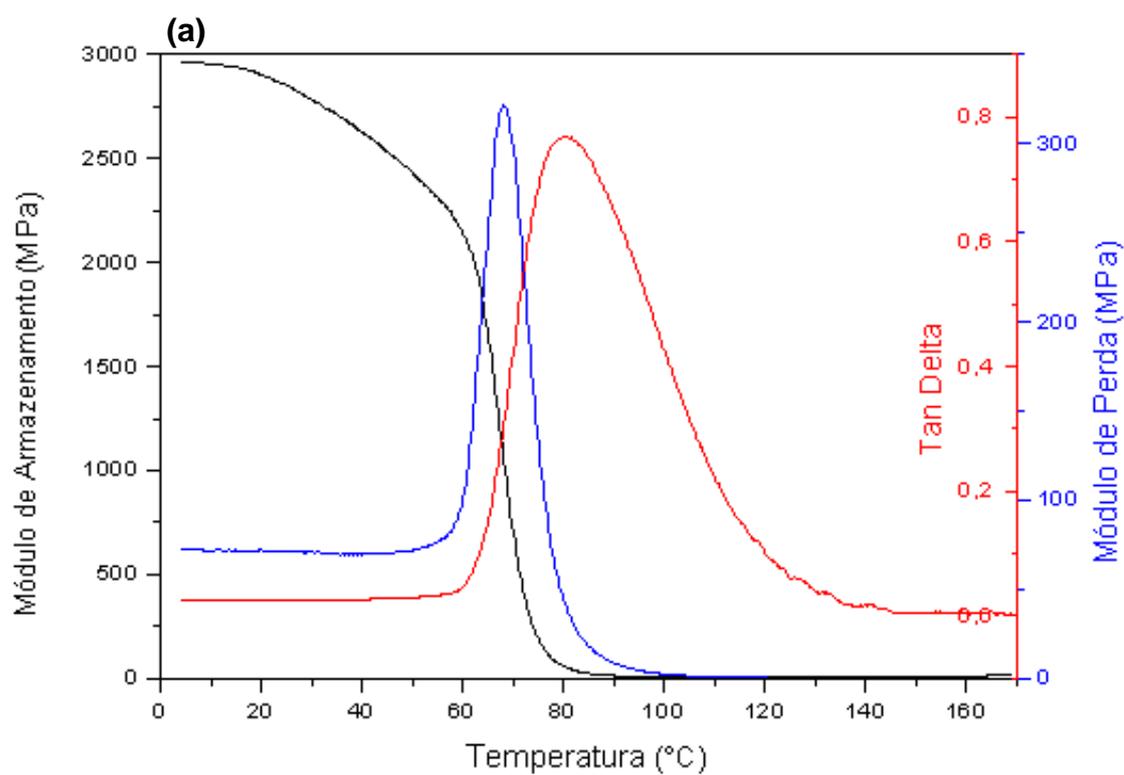


Figura 39: Termograma de DMA da resina (a) 260+2969 e (b) Wirelock.

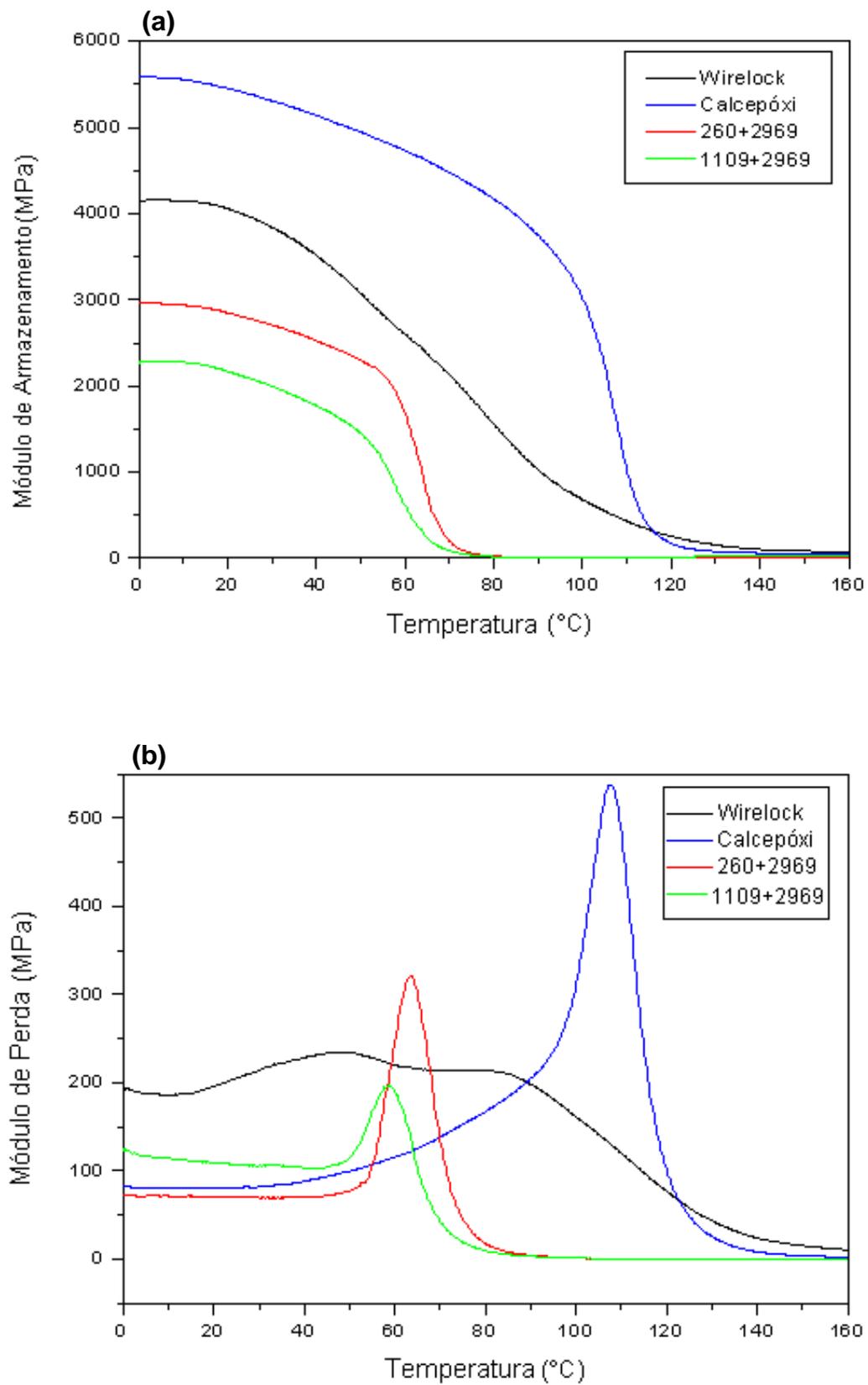


Figura 40: Sobreposição de curvas de DMA das resinas Wirelock, Calcepóxi, 260+2969 e 1109+2969 do (a) módulo de armazenamento e (b) módulo de perda.

**Tabela 16: Módulo de armazenamento e de perda das resinas curadas nas temperaturas de 10, 20, 30 e 40°C.**

Resina	Módulo de Armazenamento (E'), [MPa]				Módulo de Perda (E''), [MPa]			
	10°C	20°C	30°C	40°C	10°C	20°C	30°C	40°C
Wirelock	4147	4055	3842	3516	186	196	215	228
Calcepóxi	5568	5480	5345	5183	80	81	81	86
260+837	3435	3361	3205	2983	72	78	88	102
260+2969	2956	2906	2782	2628	72	72	71	70
281+837	2771	2668	2494	2262	70	75	85	98
281+2969	2468	2345	2181	1973	72	72	72	73
1109+837	2862	2780	2610	2400	126	125	133	150
1109+2969	2275	2169	1993	1765	114	109	106	104
1457+850	5086	4965	4659	4208	268	268	271	272
1457+3601+850	3735	3374	2737	1852	377	383	396	401

**Tabela 17: Tan  $\delta$  das resinas curadas nas temperaturas de 10, 20, 30 e 40°C.**

Resina	Tan $\delta$			
	10°C	20°C	30°C	40°C
Wirelock	0,045	0,048	0,056	0,065
Calcepóxi	0,014	0,015	0,015	0,017
260+837	0,021	0,023	0,028	0,034
260+2969	0,024	0,025	0,026	0,027
281+837	0,025	0,028	0,034	0,043
281+2969	0,029	0,031	0,033	0,037
1109+837	0,044	0,045	0,051	0,063
1109+2969	0,050	0,050	0,053	0,059
1457+850	0,053	0,054	0,058	0,065
1457+3601+850	0,101	0,114	0,145	0,217

A Tabela 18 apresenta os valores de  $T_g$  das resinas obtidos tanto a partir das curvas do módulo de perda quanto pela curva da  $\tan \delta$ . As resinas epóxi avaliadas apresentaram  $T_g$  na faixa entre 60 a 68°C, com exceção daquelas com carga (Calcepóxi) e com agente de flexibilização (1457+3601+850).

**Tabela 18: Temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) das resinas curadas obtida pelas curvas do módulo de perda e da  $\tan \delta$ .**

Resina	$T_g$ (°C): Módulo de Perda	$T_g$ (°C): $\tan \delta$
Wirelock	48 e 88	117
Calcepóxi	107	115
260+837	66	78
260+2969	68	80
281+837	64	74
281+2969	63	76
1109+837	58	68
1109+2969	58	81
1457+850	64	78
1457+3601+850	38	65

#### 5.4. AVALIAÇÃO DO TEMPO GEL E CURA DAS RESINAS

Os componentes da resina Calcepóxi foram misturados sob agitação mecânica por dois minutos e os componentes das resinas Wirelock e epóxi Araldite foram misturados manualmente por cerca de cinco minutos levando-se em consideração as proporções indicadas pelo fabricante. Os testes foram realizados a 25°C, aproximadamente, e possibilitaram verificar visualmente o comportamento de cura e comparar com as informações das resinas.

Após a mistura dos componentes, foram observados os tempos de gel ( $t_{gel}$ ) e de endurecimento ( $t_{endurec}$ ) bem como a presença de exotermia (liberação de calor) durante a reação de cura das resinas. O comportamento das resinas durante a cura foi mostrado na Tabela 19.

Tabela 19: Tempo de gel, tempo de endurecimento e exotermia.

Resina	$t_{gel}$ (h)	$t_{endurec}$ (h)	Exotermia
Wirelock	1/4	1	Sim
Calcepóxi	1/3	2/3	Sim
260+830	2-3	48	Não
260+837	1/3	1	Sim
260+2969	2-3	24	Não
281+837	1/4	1/2	Sim
281+2969	2-4	12	Não
1109+830	4-5	48	Não
1109+837	1/3	2	Sim
1109+2969	3-4	24	Não
1457+850	1	12	Não
1457+3601+850	2	12	Não

Seguindo as especificações para a mistura dos componentes da resina Wirelock, estes na forma líquida e pulverulenta foram misturados na mesma proporção em volume. Após a agitação dos componentes, a mistura adquiriu uma cor azulada e aspecto de um fluido viscoso com areia. Também foi possível visualizar o desprendimento de gases da reação. À medida que a cura avançava, a cor da mistura mudava até atingir a cor esverdeada, alcançando o estado rígido.

Nos primeiros testes realizados com os componentes da resina Calcepóxi, pôde-se constatar que a cura da resina apresentou uma elevada exotermia.

As amostras das resinas epóxi Araldite curadas apresentaram microbolhas internamente e/ou superficialmente devido à liberação de voláteis da reação de cura. As resinas com curto tempo de gel apresentaram grande quantidade de microbolhas confinadas na resina curada. Da mesma forma, as resinas com longo tempo de gel também apresentaram microbolhas, porém em menor quantidade.

Das resinas epóxi avaliadas, pode-se verificar que as resinas 260+830 e 1109+830 como tal não seriam convenientes para serem usados no procedimento de soquetagem de cabos de fibra poliéster por apresentarem tempos de cura muito longos, corroborando com o que já havia sido mostrado nos comportamentos de cura via DSC (item 5.2). As resinas 260+837, 281+837 e 1109+837 não devem ser usadas visto que apresentam tempos de gel muito curtos, podendo dificultar a manipulação desses durante a soquetagem. Essas resinas também apresentaram reação de cura altamente exotérmica, fator que pode contribuir para a modificação de propriedades da fibra visto que esta possui  $T_g$  por volta dos 75°C (conforme foi mostarda na Figura 24).

As resinas que curaram liberando uma grande quantidade de calor podem vir a provocar alterações nas propriedades da fibra poliéster que apresenta  $T_g$  em torno de 75°C. Dessa forma, as resinas Wirelock, Calcepóxi, 260+837, 281+837 e 1109+837 podem ser descartadas com relação ao seu uso no procedimento de soquetagem de cabos de fibra poliéster.

## 5.5. AVALIAÇÃO DA CAPILARIDADE DAS RESINAS NO CABO DE POLIÉSTER

A capilaridade é entendida como a capacidade de ascenso ou descenso de um líquido em contato com um sólido, em pequenos espaços, causado pela força resultante da ação entre a atração das moléculas de líquido entre si (coesão) e entre líquido e sólido (adesão) e pelo peso desta coluna de líquido.

CP's compostos por um segmento de cabo de PET de 10 mm parcialmente envolvido na resina foram produzidos de forma que pudesse ser verificada a difusão da resina ao longo do cabo. Os sistemas (cabo + resina) foram avaliados para todas as resinas. A Figura 41 mostra o nível ascendido (indicado pela seta) no cabo pelas resinas 1109+830, 1109+837 e 1109+2969.

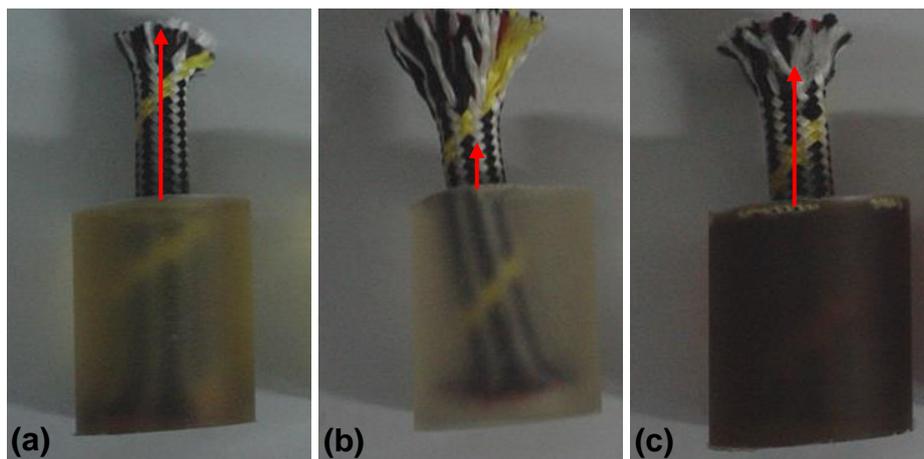


Figura 41: Fotografia dos cp's usados para verificação do nível da capilaridade no cabo de PET para as resinas (a) 1109+830, (b) 1109+837 e (c) 1109+2969.

Observou-se que em todos os cp's houve boa interação entre a resina curada e o cabo de PET uma vez que houve permeação da resina para o interior do mesmo em maior ou menor grau, verificado visualmente após corte transversal do cp.

Avaliando-se a capilaridade da resina no cabo de PET, pode-se dizer que nos cp's onde praticamente não se verificou o fenômeno foram aqueles em que a resina atingiu o estado gel em um curto espaço de tempo e/ou por apresentar carga na formulação, com exceção da resina Wirelock que, devido ao solvente da resina poliéster, apresentou o fenômeno. Portanto, a capilaridade não foi observada para as seguintes resinas:

- Calcepóxi: devido ao curto tempo de gel e à alta viscosidade da resina pré-carregada
- 260+837: devido ao curto tempo de gel
- 281+837: idem
- 1109+837: idem
- 1457+850: devido à alta viscosidade da resina pré-carregada
- 1450+3601+850: idem

De outro modo, houve capilaridade para os sistemas com as resinas Wirelock, 260+830, 260+2969, 281+2969, 1109+830, 1109+2969, sendo este fenômeno mais ou menos intenso de acordo com o  $t_{gel}$  das misturas. A capilaridade ocorre durante um determinado intervalo de tempo durante a cura da resina, e quando esta se encontra endurecida deixa o cabo com alta rigidez. Isso pode tornar o cabo frágil quando submetido ao carregamento.

## 5.6. AVALIAÇÃO DA DUREZA E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS RESINAS CURADAS

O durômetro Barcol é adequado para medidas de dureza em materiais homogêneos. Para testar uma superfície, coloca-se a base de apoio do medidor no mesmo nível da mesma. Exerce-se uma leve pressão contra o instrumento para dirigir a ponta de penetração para dentro do material, e a leitura da medida é feita.

A resina poliéster Wirelock é especificada para a dureza de 40 a 55 Barcol, enquanto que a dureza especificada para a Calcepóxi é em torno de 44 Barcol.

A Figura 42 mostra corpos-de-prova em formato de disco usados para as medidas de dureza Barcol. A Tabela 20 mostra os valores de dureza determinados para a resina epóxi GY-1109 misturadas segundo as proporções indicadas pelo fabricante (1109+830, 1109+837, 1109+2969) e em proporções variadas utilizadas (1109+830\_60, 1109+837\_50, 1109+2969\_80) neste trabalho.

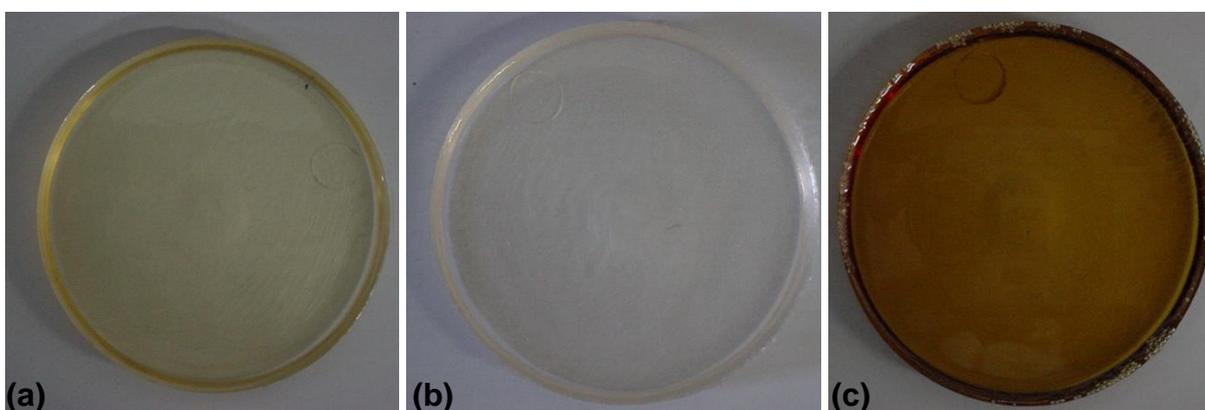


Figura 42: Fotografia dos cp's usados para medição de dureza das resinas (a)1109+830, (b)1109+837 e (c) 1109+2969.

**Tabela 20: Valores de dureza Barcol, média, desvio padrão, coeficiente de variação e valores máximo e mínimo de dureza da resina epóxi GY-1109 com diferentes propriedades e proporções.**

Medida nº	1109+830	1109+837	1109+2969	1109+830_60	1109+837_50	1109+2969_80
1	4	11	2	4	11	2
2	6	15	3	3	10	1
3	5	14	3	4	12	2
4	4	20	9	5	13	3
5	6	13	3	6	9	1
6	6	14	3	4	8	1
7	5	16	1	4	9	2
8	5	8	4	3	8	1
9	5	22	4	3	10	2
10	4	13	4	2	14	2
11	4	19	4	7	13	3
12	3	13	5	5	11	1
13	4	21	2	8	9	2
14	4	14	4	4	10	1
15	4	17	5	3	9	1
16	4	9	4	4	10	2
17	4	20	6	4	8	1
18	3	12	3	3	9	2
19	3	15	6	5	10	3
20	4	18	1	6	9	1
Média	4,35	15,20	3,80	4,35	10,10	1,70
DP	0,93	3,90	1,85	1,50	1,74	0,73
CV	21%	26%	49%	34%	17%	43%
Máximo	6	22	9	8	14	3
Mínimo	3	8	1	2	8	1

DP=Desvio Padrão; CV=Coeficiente de Variação; Máximo=Valor máximo medido; Mínimo=Valor mínimo medido

Pode-se verificar que os valores de dureza para a resina 1109+837 foram superiores àqueles das resinas 1109+830 e 1109+2969. O aumento da proporção dos endurecedores (1109+830\_60, 1109+837\_50; 1109+2969\_80) não foi significativo para o aumento da dureza dos materiais.

O alto valor de dureza da resina Calcepóxi pode ser atribuído à presença de carga mineral presente na formulação desta resina. Por outro lado, o alto valor de dureza da resina Wirelock curada pode estar relacionado, além da carga, à presença de estireno livre no componente líquido que ao reagir devido ao peróxido de benzoíla presente no componente pulverulento, forma blocos de poliestireno que apresenta alta  $T_g$ .

A resistência das resinas curadas com relação à força de compressão foi avaliada segundo a norma ASTM D 695-96. Determina-se para propriedades mecânicas de plásticos rígidos reforçados e não-reforçados, incluindo compósitos de alto módulo sob taxas uniformes relativamente baixas de deformação ou carga. Os cp's produzidos na forma de um cilindro reto tinham comprimento duas vezes maior que o seu diâmetro. Foram fabricados cinco cp's para cada tipo de resina, tendo 40 mm de diâmetro por 80 mm de comprimento, conforme mostrado na Figura 43.



Figura 43: Cp's para o teste de compressão da resina Wirelock.

As extremidades dos cp's foram planificadas em um torno antes de serem submetidos ao ensaio de compressão propriamente dito. A planificação garante que a força aplicada no cp seja a mesma em todos os pontos da superfície.

As resinas 1109+830 e 260+830 não foram testadas, pois não cumprem os requisitos básicos de comportamento de cura, conforme foi mostrado na cura via

DSC (item 5.2) e na avaliação do tempo gel e cura das resinas (item 5.4). Para todos os outros cp's, os valores da força compressiva nominal máxima estão apresentados na Tabela 21. Não se observou quebra ou ruptura dos cp's com as resinas epóxi Araldite uma vez que estes se deformaram plasticamente durante o ensaio. A resina 1109+2969 foi a que apresentou a média mais baixa de força compressiva e também a que mais se deformou plasticamente. Já a resina 281+837 resistiu à força máxima da célula de carga utilizada, não havendo a possibilidade no laboratório de se estender o ensaio. As resinas Wirelock e Calcepóxi também suportaram a força máxima da célula de carga, porém não apresentaram deformação plástica notável.

**Tabela 21: Valores de resistência à compressão das resinas termorrígidas.**

Resina	cp 1 (KN)	cp 2 (KN)	cp 3 (KN)	cp 4 (KN)	cp 5 (KN)	Média (KN)	Desvio Padrão
Wirelock	>100	>100	>100	>100	>100	>100	-----
Calcepóxi	>100	>100	>100	>100	>100	>100	-----
260+837	96,95	99,85	97,00	96,60	96,75	97,43	1,36
260+2969	89,00	89,25	88,45	88,25	88,15	88,62	0,48
281+837	>100	>100	>100	>100	>100	>100	-----
281+2969	85,95	85,60	85,65	87,30	88,05	86,51	1,10
1109+837	85,65	84,35	84,00	84,70	85,00	84,74	0,63
1109+2969	58,35	58,05	58,00	57,65	56,20	57,65	0,85
1457+850	67,15	66,35	66,40	66,05	66,80	66,55	0,43
1457+3601+850	76,05	75,10	76,65	76,20	73,95	75,59	1,08

## 5.7. SOQUETAGEM DOS CABOS DE PET DE 10 MM COM RESINA EPÓXI – ENSAIOS MECÂNICOS

Amostras de dois lotes de cabos não soquetados foram tracionados mecanicamente na CSL. A Tabela 22 mostra os valores correspondentes às cargas de ruptura, a média e o desvio padrão das amostras de cabo de PET de 10 mm ensaiadas. Estes valores foram referências para se avaliar a presença do soquete nas extremidades dos cabos.

**Tabela 22: Carga de ruptura, média e desvio padrão dos cabos de PET não soquetados.**

Lote	Corpo-de-prova	Carga de Ruptura (kgf)	Média	Desvio Padrão
Cabo de PET 1	1	2539	2478 kgf	78 kgf
	2	2454		
	3	2542		
	4	2378		
Cabo de PET 2	1	2244	2175 kgf	67 kgf
	2	2110		
	3	2171		

Os ensaios mecânicos dos cabos de PET de 10 mm soquetados foram realizados em condições distintas quanto a sua extremidade, sendo dividido em três etapas:

1º) Ensaio do cabo com a extremidade na forma normal, sendo usada a resina 1109+2969 no soquete menor, a resina 1109+837 no soquete intermediário, e a resina Wirelock no soquete maior (Ensaio 1 da Tabela 22).

2º) Dois ensaios do cabo com a extremidade na forma de “cabelo de bruxa”, utilizando-se as resinas e soquetes como na etapa anterior (Ensaio 2 e 3 da Tabela 22).

3º) Ensaio do cabo com a extremidade na forma de “cabelo de bruxa”, utilizando-se uma única resina em todos os soquetes de forma a se avaliar a reprodutibilidade do procedimento (Tabela 23).

Na Figura 44 estão mostradas fotografias de cabo de 10 mm soquetado com soquete intermediário. Na Tabela 23 estão mostrados os valores de resistência mecânica dos cabos de PET 1 soquetados com extremidade na forma normal e “cabelo de bruxa”. O percentual de resistência indicado na tabela está relacionado à razão entre a resistência do cabo soquetado e a resistência média do cabo não soquetado.



Figura 44: Fotografias de cabos de PET de 10 mm soquetados com soquete intermediário.

Tabela 23: Carga de ruptura (kgf) e percentual de resistência de cabos de PET de 10 mm com extremidade normal e na forma cabelo de bruxa soquetados com resina epóxi e poliéster – Ensaio preliminares

	Carga de Ruptura (kgf)			OBS
<b>Cabo de PET 1</b>	<b>2478 ± 78</b>			Não soquetado
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	
Resina + agente de cura	Extremidade normal	Extremidade na forma de “cabelo de bruxa”		Soquete
<b>1109 + 837</b>	<b>2120</b> <b>86%</b>	<b>2456</b> <b>99%</b>	<b>2194</b> <b>89%</b>	<b>Intermediário</b>
<b>1109 + 2969</b>	<b>2763</b> <b>112%</b>	<b>2426</b> <b>98%</b>	<b>2469</b> <b>99%</b>	<b>Menor</b>
<b>Wirelock</b>	<b>1320</b> <b>53%</b>	<b>1682</b> <b>68%</b>	<b>2128</b> <b>86%</b>	<b>Maior</b>

No ensaio 1, a carga de ruptura medida foi de 2120 kgf para o cabo soquetado com a resina 1109+837 e o soquete intermediário, representando uma porcentagem de 86% em relação à carga de ruptura média do cabo de PET não soquetado. Nesse ensaio, a extremidade do cabo na forma normal deslizou do interior do soquete, como pode ser observada na Figura 45a. Esse mesmo tipo de falha ocorreu no cabo soquetado com a resina Wirelock (Figura 45b), apresentando uma resistência ainda menor, 1320 kgf, ou seja, 53% da carga média do cabo não soquetado. O cabo soquetado com a resina 1109+2969 apresentou a maior resistência mecânica (2763 kgf), comparativamente superior à resistência do cabo não soquetado. A falha deste ocorreu na parte do cabo onde houve capilaridade da resina (Figura 45c).



**Figura 45: Fotografias após ensaio mecânico de cabos de PET de 10 mm soquetados com resina (a) 1109+837, (b) Wirelock e (c) 1109+2969.**

No ensaio 2, os cabos soquetados com a extremidade na forma de “cabelo de bruxa” com a resina Wirelock e a 1109+837 apresentaram melhor desempenho, sendo a resistência à tração 2456 (99%) e 1682 kgf (68%), respectivamente. Essa melhora pode estar relacionada à estrutura “cabelo de bruxa” nas extremidades dos cabos. No entanto, o cabo com a resina 1109+2969 não apresentou variação significativa com relação à carga de ruptura do ensaio 1, sendo em torno dos 2400 kgf (98%). Nos três casos houve ruptura do cabo dentro da resina, evidenciando a melhor interação das fibras de PET com a resina devido ao “cabelo de bruxa” uma vez que aumentou a área de adesão interfacial.

No ensaio 3 repetiu-se o mesmo procedimento do ensaio 2, ou seja, as fibras no interior do soquete foram dispostas novamente no formato “cabelo de bruxa”. A resistência do cabo soquetado com a resina 1109+837 foi levemente inferior em

relação ao segundo ensaio, mas o valor da carga manteve-se superior àquela do cabo com a extremidade normal, chegando próximo a 2200 kgf (89%). A carga de ruptura do cabo soquetado com a resina 1109+2969 permaneceu na faixa dos 2400 kgf (99%). Já a resina wirelock apresentou melhor resistência em relação aos ensaios anteriores e a carga ultrapassou o valor de 2100 kgf (86%). Da mesma forma do que ocorreu no ensaio 2, em todos os cabos houve fratura do cabo no interior do soquete e não o desprendimento do cabo da resina como observado no ensaio do cabo com a extremidade normal. Isso mostra que houve maior adesão interfacial entre a resina e as fibras dispostas na forma “cabelo de bruxa”.

Na terceira etapa do ensaio, seis pares de soquetes foram utilizados, sendo um par de soquete menor, quatro pares de soquete intermediário e um par de soquete maior. Para que fosse possível avaliar a reprodutibilidade da soquetagem, os seis pares de soquetes foram preenchidos com a mesma resina. As resinas testadas foram: Wirelock, Calcepóxi, 260+2969, 281+2969, 1109+837, 1109+2969 e 1457+850. Os valores de carga de ruptura dos cabos soquetados bem como os percentuais relativos aos cabos de PET 1 e 2 não soquetados encontram-se na Tabela 24.

Dos resultados obtidos, pode-se concluir que as resinas comercialmente utilizadas para a soquetagem de cabos de aço (Wirelock e Calcepóxi) não são recomendadas para utilização de cabos de fibra poliéster uma vez que os valores de cargas de ruptura ficaram bem abaixo da carga de ruptura do cabo não-soquetado. Isso se deve ao deficiente envolvimento das resinas pré-carregadas com as fibras do cabo (Figuras 46a e b), mostrando que a viscosidade é uma variável importante para uma boa soquetagem. O mesmo comportamento foi observado para a resina 1457+850 (Figura 46c) cuja resina, como as anteriores, apresenta alta viscosidade devido à presença de carga na formulação. Para as resinas 281+2969 e 1109+837 não se conseguiu uma boa soquetagem devido provavelmente ao tipo de resina (bisfenol F) e à cura da resina ocorrer em um tempo muito curto, respectivamente.

Por outro lado, as resinas 260+2969 e 1109+2969 alcançaram a resistência nominal do cabo não soquetado além de apresentarem valores de resistência praticamente constantes. Nas Figuras 47a e b, pode-se verificar a completa impregnação das fibras pela resina. A figura permite verificar também que houve neste caso a formação de uma camada contínua de resina de 2 a 3 mm de

espessura, depositada ao longo da superfície do soquete o que permite uma transferência uniforme de forças do cabo para o soquete.

Tabela 24: Carga de ruptura (kgf), percentual e média de resistência de cabos de PET de 10 mm com extremidade na forma de “cabelo de bruxa” soquetados com resina epóxi e poliéster.

Resinas	Soquete Menor	Soquete Intermediário				Soquete Maior
<b>Cabo PET 1</b>	<b>2478 ± 78 kgf</b>	Não soquetado				
<b>Cabo PET 2</b>	<b>2175 ± 67 kgf</b>	Não soquetado				
<b>Resina Wirelock* (*com carga)</b>	<b>1360 63%</b>	<b>1865 86%</b>	<b>2006 92%</b>	<b>1792 82%</b>	<b>1515 70%</b>	<b>1790 82%</b>
		<b>Média: 1795 (83%)</b>				
<b>Resina Calcepóxi* (*com carga)</b>	<b>1715 79%</b>	<b>1721 79%</b>	<b>1870 86%</b>	<b>1560 72%</b>	<b>1721 79%</b>	<b>1770 81%</b>
		<b>Média: 1718 (79%)</b>				
<b>Resina 260+2969</b>	<b>2420 98%</b>	<b>2577 104%</b>	<b>2544 103%</b>	<b>2512 101%</b>	<b>2640 107%</b>	<b>2714 110%</b>
		<b>Média: 2568 (104%)</b>				
<b>Resina 281+2969</b>	<b>1778 82%</b>	<b>1849 85%</b>	<b>2330 107%</b>	<b>2196 101%</b>	<b>2424 111%</b>	<b>2267 104%</b>
		<b>Média: 2200 (101%)</b>				
<b>Resina 1109+837</b>	<b>1957 79%</b>	<b>2088 84%</b>				<b>2324 94%</b>
	<b>2184 100%</b>	<b>2096 96%</b>	<b>2031 93%</b>	<b>1751 81%</b>	<b>1733 80%</b>	<b>1894 87%</b>
		<b>Média: 1903 (88%)</b>				
<b>Resina 1109+2969</b>	<b>2340 94%</b>	<b>2932 118%</b>				<b>2924 118%</b>
	<b>2408 111%</b>	<b>2253 104%</b>	<b>2312 106%</b>	<b>2184 100%</b>	<b>2245 103%</b>	<b>2447 112%</b>
		<b>Média: 2249 (103%)</b>				
<b>Resina 1457+850 (*com carga)</b>	<b>1350 62%</b>	<b>1623 75%</b>	<b>1874 86%</b>	<b>1600 74%</b>	<b>1700 78%</b>	<b>1698 78%</b>
		<b>Média: 1699 (78%)</b>				

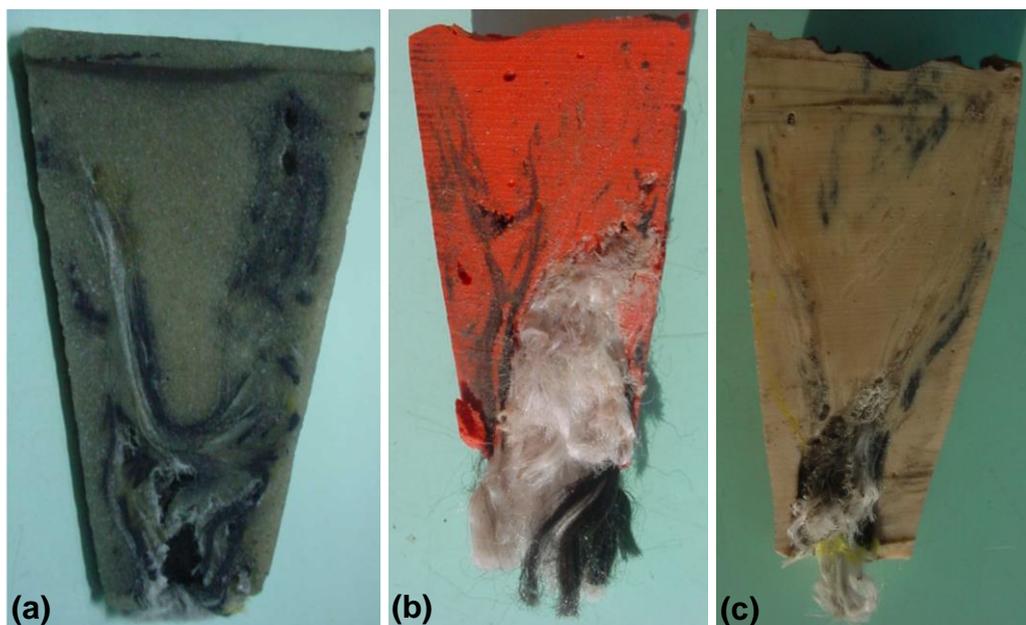


Figura 46: Seção longitudinal da resina do interior do soquete intermediário após ensaio mecânico do cabo de PET de 10 mm soquetado: (a) Wirelock , (b) Calcepóxi e (c) 1457+850

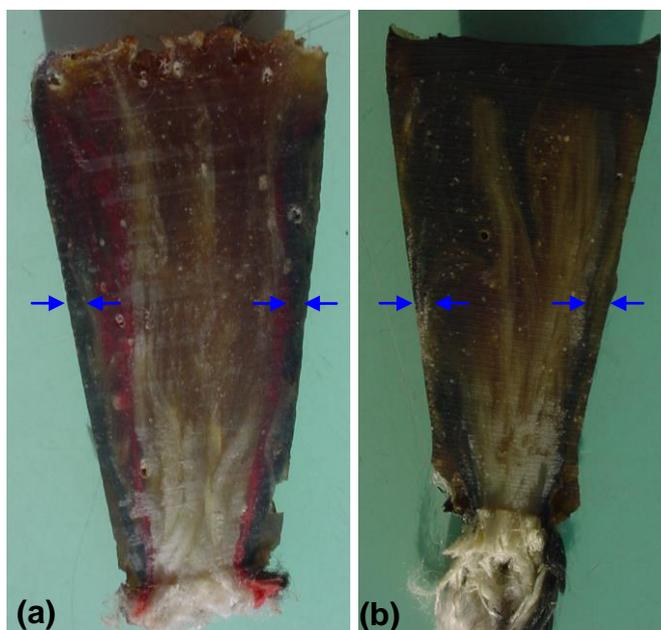


Figura 47: Seção longitudinal da resina do interior do soquete intermediário após ensaio mecânico do cabo de PET de 10 mm soquetado: (a) 260+2969 e (b) 1109+2969.

## 5.8. SOQUETAGEM DE CABO DE PET DE 48 MM COM RESINAS EPÓXI – ENSAIOS MECÂNICOS

Quatro cabos de fibra de poliéster (PET) de 48 mm com terminação do tipo extremidade trançada (“olhal”) foram ensaiados mecanicamente na máquina de tração hidráulica MT3 da Cordoaria São Leopoldo (CSL). Na Tabela 25 estão apresentados os valores de resistência mecânica dos cabos de PET de 48 mm com terminação do tipo extremidade trançada bem como o valor médio e o desvio padrão.

**Tabela 25: Cargas de ruptura (kgf), média e desvio padrão de cabos de PET de 48 mm com terminação do tipo extremidade trançada.**

Terminação Trançada	
CABO 1	44.238 kgf
CABO 2	41.534 kgf
CABO 3	44.117 kgf
CABO 4	45.904 kgf
MÉDIA ( $\bar{M}$ )	43.948 kgf
DESVIO PADRÃO ( $\sigma$ )	1.804 kgf

A soquetagem de cabos de PET de 48 mm foi realizada na CSL conforme o procedimento já descrito no item 4.2.5. Foram soquetados e ensaiados cabos com quatro pares diferentes de soquetes, cujas dimensões já foram citadas na Tabela 6, para avaliação do procedimento. A soquetagem dos cabos de 48 mm foi realizada com os soquetes assim dispostos: soquete menor nas extremidades do cabo, soquete intermediário nas extremidades do cabo, e soquete maior A em uma das extremidades e maior B na outra. Na Tabela 26 consta o valor de resistência média obtido para o cabo de PET de 48 mm com terminação trançada, valores de resistência de cabos soquetados e os respectivos percentuais de resistência. O percentual de resistência refere-se à relação entre a resistência do cabo de 48 mm soquetado e a resistência média do cabo de 48 mm com terminação trançada.

A Figura 48 mostra a máquina hidráulica MT3 da CSL na qual foram realizados os ensaios dos cabos de PET de 48 mm soquetados.



Figura 48: Ensaio mecânico na máquina MT3 na CSL do cabo de PET de 48 mm soquetado.

Com relação às fraturas dos cabos soquetados, observou-se que todos falharam no interior do soquete próximo a sua base, parte na qual não houve penetração efetiva da resina nem o completo envolvimento por esta.

Devido à baixa razão volumétrica  $V_{\text{resina}}/V_{\text{fibra}}$  dos soquetes menor e intermediário, a extremidade do cabo de PET não foi totalmente envolvida pela resina de maneira a se ter uma matriz rígida que suporte as tensões desenvolvidas no teste de tração. Neste caso, ocorre apenas um leve molhamento por capilaridade das fibras próximo à base do soquete, fragilizando essa parte do cabo.

As conicidades dos soquetes menor e intermediário para o cabo de 48 mm além das baixas razões volumétricas  $V_{\text{resina}}/V_{\text{fibra}}$  não permitiram que a mesma eficiência de resistência para os cabos de 10 mm soquetados fosse alcançada. Isso

porque não há espaço suficiente para que extremidade do cabo na forma de “cabelo de bruxa” seja envolvida pela matriz polimérica na parte mais inferior do soquete. A viscosidade também se revela como um importante fator, pois, através da Figura 49, observou-se que a resina 1457+850 (alta viscosidade devido à presença de carga) não permeou entre as fibras na forma “cabelo de bruxa”.

Por outro lado, os cabos de 48 mm soquetados com a resina 1109+2969 e os soquetes maior A e maior B alcançaram a resistência nominal do cabo com terminação trançada, sendo as eficiências de 97 e 101%. Nas Figuras 50a e b, verificou-se a completa impregnação das fibras pela resina e a formação da camada contínua de resina ao longo da superfície do soquete, melhorando a transferência uniforme de forças do cabo para o soquete, devido às altas conicidades e razões volumétricas  $V_{\text{resina}}/V_{\text{fibra}}$  dos soquetes.

**Tabela 26: Carga de ruptura (kgf) e percentual de resistência de cabos de PET de 48 mm soquetados com resina epóxi.**

Sistema	Carga de ruptura (kgf)
Cabo de PET	43.948
<b>Soquete Menor</b>	
Resina 1109+2969	37.429 85%
Resina 1457+850	23.374 53%
<b>Soquete Intermediário</b>	
Resina 1109+2969	34.169 78%
<b>Soquete Maior A com Maior B</b>	
Resina 1109+2969	44.286 101%
Resina 1109+2969	42.669 97%



Figura 49: Seção longitudinal da resina 1457+850 do interior do soquete menor após ensaio mecânico do cabo de PET de 48 mm soquetado.

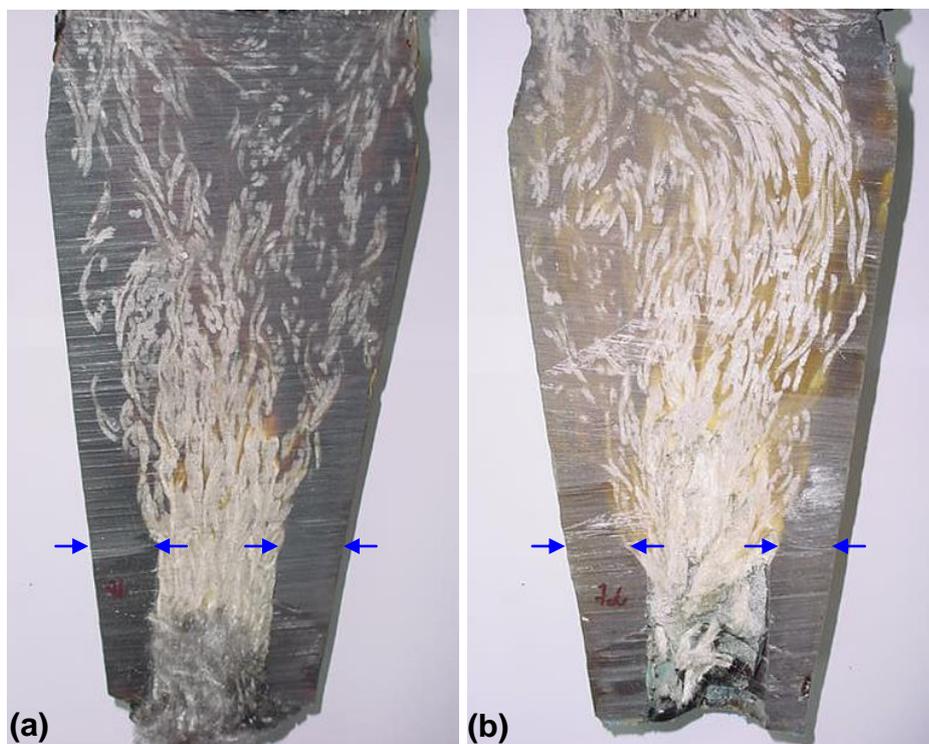


Figura 50: Seção longitudinal da resina 1109+2969 do interior do soquete (a) maior A e (b) maior B após ensaio mecânico do cabo de PET de 48 mm soquetado.

## 6. CONCLUSÕES

---

No que se refere à soquetagem de cabos de fibra de poliéster com resina termorrígida, verificou-se que é possível se aplicar este procedimento em substituição à terminação de cabos de PET na forma de extremidade trançada.

Os cabos de PET soquetados com as resinas 1109+2969 e 260+2969 além de apresentarem os maiores valores de resistência, tiveram boa reprodutibilidade de resultados, tendo alto potencial de aplicação na soquetagem de cabos de fibra PET.

Com relação ao tipo de extremidade utilizada, conclui-se que a extremidade na forma de “cabelo de bruxa” foi a mais apropriada para o procedimento de soquetagem visto que permitiu uma grande interação da resina curada com as fibras, resultando em uma maior resistência mecânica. A disposição das extremidades do cabo de PET no formato “cabelo de bruxa” teve influência significativa na melhora da resistência do cabo nos testes de tração dos cabos soquetados.

Observou-se que os parâmetros relevantes para uma boa soquetagem dos cabos de PET, além do tipo de resina e extremidade do cabo, foram a viscosidade, a razão volume de resina/volume de fibra ( $V_{\text{resina}}/V_{\text{fibra}}$ ) e a conicidade do soquete.

A razão  $V_{\text{resina}}/V_{\text{fibra}}$  no soquete mostrou ter influência significativa nos resultados uma vez que é determinante para o envolvimento total das fibras pela resina.

Para uma melhor resistência das extremidades soquetadas nos cabos de PET deverá haver uma razão  $V_{\text{resina}}/V_{\text{fibra}}$  mínima que permita o total envolvimento das fibras pela resina na parte inferior do soquete. A matriz rígida e contínua deve ser capaz de absorver e transmitir a energia gerada uniformemente para as paredes do soquete.

O perfil ou a conicidade do soquete deverá ser tal que a extremidade do cabo possa ser disposta na forma de “cabelo de bruxa” o que permite um melhor envolvimento da fibras pela resina, promovendo uma melhor interação matriz/fibra

ao longo de todo o soquete, e evita-se o simples molhamento da fibra pela resina por capilaridade no interior deste.

A adequação do procedimento de soquetagem dos cabos de PET de 10 e 48 mm de diâmetro para os cabos de diâmetros superiores deverá passar obrigatoriamente pela definição de um perfil de soquete (design) mais adequado.

Para um melhor procedimento de soquetagem das extremidades dos cabos de PET e reutilização dos soquetes em novas soquetagens, é ideal que estes tenham a parte superior aberta, facilitando a disposição da extremidade do cabo em forma de “cabelo de bruxa”, a adição da resina no soquete e a remoção da extremidade soquetada após fratura do cabo.

A alta temperatura desenvolvida durante a cura da resina Calcepóxi, 260+837, 281+837 e 1109+837 desfavorece a utilização destas na soquetagem de cabos de poliéster uma vez que liberam grande quantidade de calor durante a cura, atingindo valores de temperatura superiores à  $T_g$  da fibra de poliéster.

Baseado no comportamento de cura verificou-se que as resinas 1109+830 e 260+830 apresentaram faixas de temperatura de cura superiores a temperatura ambiente, não sendo, portanto, indicadas para o procedimento de soquetagem já que a cura não é favorecida à temperatura ambiente. As demais podem ser curadas à temperatura ambiente, com a ressalva de que a resina 1457+3601+850 flexibiliza-se numa temperatura próxima dos 30°C, restringindo seu uso por esta temperatura estar dentro da faixa considerada de uso do dispositivo (2–40°C) .

O aumento da proporção de endurecedor não favoreceu o comportamento de cura da resina GY-1109 com seus respectivos agentes de cura uma vez que as temperaturas iniciais de cura foram deslocadas para temperaturas superiores e grande parte das outras propriedades não teve maiores modificações.

Com relação à avaliação da capilaridade das resinas no cabo de PET de 10 mm, verificou-se que este fenômeno foi mais acentuado para as resinas com um longo tempo de gel.

As resinas 1109+830, 1109+837 e 1109+2969 apresentaram valores de dureza Barcol bem inferiores às resinas Wirelock e Calcepóxi devido à presença de

carga nestas últimas. O aumento das proporções dos endurecedores na resina GY-1109 (1109+830\_60, 1109+837\_50 e 1109+2969\_80) não alterou os valores de dureza desta.

## 7. TRABALHOS FUTUROS

---

O desenvolvimento deste trabalho permitiu verificar que o procedimento de soquetagem de cabos de aço é possível de ser estendido à soquetagem de cabos de PET com resina epóxi. Para a utilização deste procedimento de soquetagem para cabos de PET com maiores diâmetros com aplicação tecnológica, no entanto, deve-se avaliar:

- A cura das resinas de maneira a se ter sistemas que curem a baixas temperaturas em tempos relativamente curtos.
- O design do soquete ou os parâmetros  $V_{\text{resina}}/V_{\text{fibra}}$  e conicidade através de modelagem computacional de forma a se projetar o melhor perfil.
- A determinação da espessura de camada mínima de resina ao longo do soquete de forma a se ter transferência de tensões do cabo para o soquete.
- O desenvolvimento de soquetes em compósito para uso na soquetagem de cabos de PET com diâmetros iguais e superiores a 48 mm, reduzindo, assim, o peso da estrutura metálica atual.
- A possibilidade de soquetagem de cabos de PET usados ou a possibilidade de limpeza das fibras de poliéster dos cabos para garantir melhor adesão destas na resina curada.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

1. SLOAN, F.; TEIN, D.; ZIMMERMAN, E. **Synthetic Fiber mooring Systems for a Semisubmersible Mobile Drilling Unit Operating in 5000 to 10000 ft. of Water in the Gulf of Mexico**. Joint Meeting. Texas A&M University. Texas. USA. March 1999.
2. CHAPLIN, C. R. **Torsional Failure of a Wire Rope Mooring Line During Installation in Deep Water**. Engineering Failure Analysis, v. 6, p. 67-82, 1998.
3. MELLO, M. C. **Estudo e Modelagem de Cabos Sintéticos Utilizados em Plataformas Oceânicas**. Projeto de Graduação. FURG. Rio Grande. Dezembro de 2000.
4. WALTON, J. M. **Development in Steel Cables**. Journal of Constructional Steel Research, v. 39, p. 3-29, 1996.
5. EVANS, R. K. **Selecting and Testing Heavy-duty Synthetic Ropes**. Materials & Design, v. 4, p. 885-888, October/November 1983.
6. BANFIELD, S.; CASEY, N. **Evaluation of Fibre Rope Properties for Offshore Mooring**. Ocean Engineering, v. 25, p. 861-879, 1998.
7. PELLEGRIN, I. **Manmade Fiber Ropes in Deepwater Mooring Applications**. Offshore Technology Conference - OTC 10907. USA. 1999.
8. DEL VECCHIO, C.; MENICONI, L. C.; WANG, S. S.; WILLIAMS, J. G; LO, K. H. **Deep Water Mooring Systems Using Fiber Ropes**. Composite Materials for Offshore Operations – 2. p. 255-264. 1999.
9. SLOAN, F. **Synthetics – The Future for Offshore Platform Moorings**. Sea Technology Magazine, v. 40, nº 4, p. 49-53, April 1999.
10. BANFIELD, S.; VERSAVEL, T.; SNELL, R. O.; AHILAN, R. V. **Fatigue Curves of Polyester Moorings – A State-of-the-Art Review**. Offshore Technology Conference - OTC 12175. USA. 2000.

11. HOOKER, J. G. **Synthetic Fibre Ropes for Ultradeep Water Moorings in Drilling and Production Applications**. Technical Paper Marlow Ropes. OMT Singapore. November 2000.
12. REBEL, G.; CHAPLIN, C. R.; GROVES-KIRKBY, C.; RIDGE, I. M. L. **Condition Monitoring Techniques for Fibre Mooring Ropes**. Journal of the British Institute of Non-Destructive Testing, v. 42, nº 6, 2000.
13. SMITH, D. B.; WILLIAMS, J. G. **Direct Measurement of Large Strains in Synthetic Fiber mooring Ropes Using Polymeric Optical Fibers**. Offshore Technology Conference - OTC 14242. USA. 2002.
14. PEARSON, N. J. **Experimental Snap Loading of Synthetic Fiber Ropes**. Thesis of the Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia. USA. December 2002.
15. PETRUSKA, D.; GEYER, J.; MACON, R.; CRAIG, M.; RAN, A.; SCHULZ, N. **Polyester Mooring for the Mad Dog Spar – Design Issues and Other Considerations**. Ocean Engineering, v. 32, p. 767-782, 2005.
16. DEL VECCHIO, C. J. M.; MENICONI, L. C. M. **Análise de Comportamento de Cabos de Amarração de Kevlar e Poliéster**. Petrobras/CENPES. 1990.
17. Driving Leadership in Offshore Oil Exploration and Production Strategic Alliance in Synthetic Fiber Rope Technology. Disponível no portal: [http://www.performancefibers.com/industry/rope/fr\\_lit.html](http://www.performancefibers.com/industry/rope/fr_lit.html). Acessado em 27/03/2004.
18. LAURA, P. A. A. **Evaluating the Structural Condition of Synthetic and Metallic Cables**. Ocean Engineering, v. 22, p. 551-562, 1995.
19. CHAPLIN, C. R. **Failure Mechanisms in Wire Ropes**. Engineering Failure Analysis, v. 2, p. 45-57, 1995.
20. SILVA, A. R. T.; FONG, L. W. **Effect of Abrasive Wear on the Tensile Strength of Steel Wire Rope**. Engineering Failure Analysis, v. 9, p. 349-358, 2002.
21. Naval Ship's Technical Manual. **NSTM Chapter 613: Wire and Fiber Rope and Rigging**. USA. 1999.

22. Cordoaria São Leopoldo. **Cabo Ultraseven®**. Disponível no portal: <http://www.csl.com.br/principal.htm>. Acessado em: 20/05/2005.
23. **Engineers' Design Guide – Deepwater Fibre Moorings**. 1<sup>st</sup> ed. Oilfield Publications Limited (OPL). England. 1999.
24. WARNER, Steven B. **Fiber Science**. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1995. 316p.
25. MURASE, U. S.; YOKOYAMA, J. H.; NISHIKAWA, U. K. Polyester Fiber and Process for Manufacture. **US Patent 5.137.670**, 1992.
26. RICHARD, S. M.; ARCHIE, W. A.; SLOAN, F. E. **The Evaluation of Long-Term Marine Overfinish Stability on Mooring Ropes**. USA.
27. Encyclopedia of polymer science and engineering. 2nd.ed. New York: Wiley, 1985, v. 6.
28. COWIE, Jan M. G. **Polymers: Chemistry and Physics of Modern Materials**. 2nd.ed. London: Chapman & Hall, 1991. 436p.
29. CALLISTER, W. D. Jr. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 5th ed. New York: John Wiley, 2000. 871p.
30. MONCRIEFF, R. W. **Man-made Fibres**. 4<sup>th</sup> ed. London: Heywood, 1963. 742p.
31. **Fibers for the World – People, Products and Technologies for the Rope and Cordage Industry**. Disponível no portal: [http://www.performancefibers.com/fibers/fr\\_literature.html](http://www.performancefibers.com/fibers/fr_literature.html). Acessado em 02/07/2005.
32. SIMMELINK, J. A. P. M. Process of Making Highly Oriented Polyolefin Fiber. **US Patent 6.723.267**, 2004.
33. COOK; R. B. Braided or Twisted Line. **US Patent 5.749.214**, 1998.
34. Apostila Técnica Cordoaria São Leopoldo S.A. **Teoria e Prática em Estruturas Tênsis**. 64 p. 1998.
35. COSTA, L. C. S.; MUSSI, S. R.; PINTO, P. H. L. **Procedimento para Soquetagem do Cabo Spiral Strand**. CENPES/SUSEP/DIPILOT/SEMEC. 1999.

36. FRANÇOIS, M.; PEREIRA, M. A.; RAPOSO, C. **Classification of Fibre Rope Moorings for Floating Production Units**. 10<sup>th</sup> International Symposium on Offshore Engineering. Rio de Janeiro. Brazil. p. 155-165. 1997.
37. Relatório Técnico *Millfield Enterprises Manufacturing Limited*. **Wirelock Technical Data Manual**. New Castle. England. 2001.
38. ASHBY, M. F. **Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures, Processing and Design**. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998. 381p.
39. CHAWLA, K. K. **Composite Materials : Science and Engineering**. 2nd ed. New York: Springer, 1998. 483 p.
40. MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1991. 197p.
41. SCHWARTZ, M. M. **Composite Materials Handbook**. New York: McGraw-Hill, 1984.
42. PILATO, L. A. **Advanced composite materials**. Berlin: Springer-Verlag, 1994. 208 p.
43. KEUSCH, S.; HAESSLER, R. **Influence of Surface Treatment of Glass Fibres on the Dynamic Mechanical Properties of Epoxy Resin Composites**. Composites: Part A, v. 30, p. 997-1002, 1999.
44. RASHKOVAN, I. A.; KORABEL'NIKOV, YU. G. **The Effect of Fiber Surface Treatment on Its Strength and Adhesion to the Matrix**. Composites Science and Technology, v. 57, p. 1017-1022, 1997.
45. Composites Australia – Promoting and Connecting the Composites Industry. Disponível no portal: <http://www.compositesaustralia.com.au/industry.html>. Acessado em 06/06/2005.
46. Society of the Plastics Industry. **Plastics Engineering Handbook**. 5th ed. New York: Chapman & Hall, 1991. 869p.
47. Encyclopedia of polymer science and engineering. 2nd.ed. New York: Wiley, 1985, v. 14.

48. MURPHY, J. **The Reinforced Plastics Handbook**. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 1998. 674 p.
49. HARPER, C. A. **Handbook of plastics, elastomer, and composites**. 2nd ed. New York: Mcgraw-Hill, 1992.
50. STEVENS, M. P. **Polymer Chemistry: An Introduction**. 3rd ed. New York, N.Y.: Oxford University, 1999. 551 p.
51. LAKSHMI, M. S.; SRIVIDHYA, M.; REDDY, B. S. R. **New Epoxy Resins Containing Hard-soft Segments: Synthesis, Characterization and Modification Studies for High Performance Applications**. Journal of Polymer Research, v. 10, p. 259-266, 2003.
52. FRIGIONE, M. E.; MASCIA, L.; ACIERNO, D. **Oligomeric and Polymeric Modifiers for Toughening of Epoxy Resins**. European Polymer Journal, v. 31, p 1021-1029, 1995.
53. ODIAN, G. G. **Principles of polymerization**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: John Wiley, 1991. 768 p.
54. PREETI, J.; CHOUDHARY, V.; VARMA, I.K. **Effect of Structure on Thermal Behaviour of Epoxy Resins**. European Polymer Journal, 39, 181–187. 2003.
55. KIRK, R. E. **Encyclopedia of Chemical Technology**. 3<sup>rd</sup> ed. v. 9. Wiley – Interscience. New York. 1978-1984.
56. SANCHEZ, E. M. S.; ZAVAGLIA, C. A. C.; FELISBERTI, M. I. **Unsaturated polyester resins: influence of the styrene concentration on the miscibility and mechanical properties**. Polymer, v. 41, p. 765-769, 2000.
57. CAO, X.; LEE, L. J. **Control of Shrinkage and Residual Styrene of Unsaturated Polyester Resins Cured at Low Temperatures: I. Effect of Curing Agents**. Polymer, v. 44, p. 1893-1902, 2002.
58. LI, W.; LEE, L. J. **Low Temperature Cure of Unsaturated Polyester Resins with Thermoplastic Additives: I. Dilatometry and Morphology Study**. Polymer, v. 41, p. 685-696, 2000.

59. Relatório Técnico Tubolit Ltda. **Composto Epóxi de dois componentes para soquetagem de cabo de aço**. Rio de Janeiro. 2002.
60. Relatórios Técnicos Vantico Ltda. **Resinas Epóxi Araldite GY-260; Araldite GY-281; Araldite GY-1109; Araldite XCW-1457.2**. São Paulo. Brasil. 2003.
61. Relatório Técnico Vantico Ltda. **Resina Araldite DY-3601**. São Paulo. Brasil. 2003.
62. Relatórios Técnicos Vantico Ltda. **Endurecedores Aradur 830; Aradur 837; Aradur 850; Aradur 2969**. São Paulo. Brasil. 2003.
63. ASTM Method D 695-96, **Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics**, ASTM. USA. p. 77-83. 1996.
64. ASTM D 2583, **Standard Test Method for Indentation Hardness of Rigid Plastics by Means of a Barcol Impressor**, ASTM. USA. p. 77 – 80. 1995.
65. American Bureau of Shipping (ABS), **Guidance Notes on the Application of Synthetic Ropes for Offshore Mooring**, ABS. USA. 37. 1999.
66. HUMMEL, D. O.; SCHOLL, F. **Atlas of Polymer and Plastics Analysis**. 2<sup>nd</sup> ed. rev. Munich: Carl Hanser Verlag. v. 1. 1978-1988.
67. HUMMEL, D. O.; SCHOLL, F. **Atlas of Polymer and Plastics Analysis**. 2<sup>nd</sup> ed. rev. Munich: Carl Hanser Verlag. v. 3. 1978-1988.
68. WILMINGTON, A. A. Fiber Lubricating Composition and Method. **US Patent 3.575.856**. 1971.
69. YODICE, R.; LENTZ, G. A. Spin Fiber Lubricant Compositions. **US Patent 4.957.648**. 1990.
70. Faculdade de Letras da Universidade do Porto – Departamento de Geografia. Disponível no portal: <http://www.letras.up.pt/geograf/seminario/Aula2.htm>. Acessado em 04/04/2005.
71. Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico (FISPQ) da Innova S.A.. **Estireno Monômero Estabilizado**. p. 5. Novembro 2004.