



## COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA PARA SISTEMAS DE ÁGUA PARA COMBATE A INCÊNDIO

Daniella Cristina Rabelo da Silva Cheker

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientadora: Marysilvia Ferreira da Costa

Rio de Janeiro  
Setembro de 2016

COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA PARA SISTEMAS DE ÁGUA PARA  
COMBATE A INCÊNDIO

Daniella Cristina Rabelo da Silva Cheker

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIA EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Examinada por:

---

Prof: Marysilvia Ferreira da Costa, D.Sc.

---

Prof: Célio Albano da Costa Neto, Ph.D.

---

Eng: Antonio Henrique Monteiro da Fonseca Thomé da Silva, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
SETEMBRO DE 2016

Cheker, Daniella Cristina Rabelo da Silva

Compósitos de Matriz Polimérica para Sistemas de Água para Combate a Incêndio / Daniella Cristina Rabelo da Silva Cheker. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

X, 51 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marysilvia Ferreira da Costa

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 52-55.

1. Compósitos. 2. Matriz Polimérica. 3. Sistema de Água de Combate a Incêndio. I. Costa, Marysilvia Ferreira da. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

## COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA PARA SISTEMAS DE ÁGUA PARA COMBATE A INCÊNDIO

Daniella Cristina Rabelo da Silva Cheker

Setembro/2016

Orientadora: Marysilvia Ferreira da Costa

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

O estudo de materiais compósitos à base de matriz polimérica para utilização industrial vem crescendo de maneira acentuada nas últimas décadas. Diante da crescente busca pela redução dos custos em projetos, e sendo o sistema de água de combate a incêndio indispensável a qualquer indústria de grande porte, a utilização de materiais compósitos de matriz polimérica resistentes a altas temperaturas traria grandes vantagens a esta aplicação. Uma vez que a utilização de materiais compósitos em sistemas de água para combate a incêndio ainda não é tão difundida quando comparado com os materiais utilizados atualmente como o aço carbono, justifica-se o interesse em um estudo do comportamento de materiais compósitos de matriz polimérica quando exposto ao fogo. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é avaliar a integridade de compósitos de resina epóxi reforçada com fibra de vidro quando expostos ao fogo, visando a sua utilização em sistemas aéreos de água para combate a incêndio. Para isto, amostras do material compósito foram submetidas a ensaios de desempenho ao fogo, simulando assim, as condições de uso as quais estarão submetidos, após a realização dos ensaios e classificação dos materiais, foi verificado que os compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra de vidro, estão aptos para serem utilizados em sistemas de água para combate a incêndio aéreos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## POLYMER MATRIX COMPOSITES FOR USE IN FIRE FIGHTING WATER SYSTEMS

Daniella Cristina Rabelo da Silva Cheker

September/2016

Advisor: Marysilvia Ferreira da Costa

Department: Materials and Metallurgical Engineering

The study of composite materials based on polymer matrix for industrial use has considerably grown over the recent decades. Given the growing efforts to reduce the costs on projects and being fire fighting water systems essential for any large industry, the use of high temperatures resistant polymer matrix composite materials would bring great advantages to this application. Since the use of composite materials in fire fighting systems is still not as widespread as carbon steel, there is interest in the study of the behavior of polymer matrix composite materials when exposed to fire. This study aims to assess the integrity of epoxy resin composites reinforced with fiberglass when exposed to fire, focusing on their use in air fire fighting water systems. Therefore, samples of the composite materials were submitted to fire performance tests, simulating real conditions of use, after the tests and materials classification, was verified that the polymer matrix composite reinforced with fiberglass, are suitable for use in overground fire fighting water systems.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVO.....	2
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
3.1.	COMPÓSITOS.....	2
3.1.1.	COMPÓSITO DE MATRIZ POLIMÉRICA COM FIBRA DE VIDRO.....	3
3.1.2.	POLÍMEROS.....	4
3.1.2.1.	RESINA EPÓXI.....	5
3.1.3.	FIBRA.....	6
3.1.3.1.	FIBRA DE VIDRO.....	7
3.1.3.2.	FIBRA DE CARBONO.....	9
3.1.4.	INTERFACE.....	10
3.1.5.	ADITIVOS / REVESTIMENTO.....	11
3.2.	SISTEMA DE ÁGUA DE COMBATE A INCÊNDIO.....	12
3.3.	ANÁLISES TÉRMICAS.....	17
3.3.1.	ANÁLISE MÉCANICA DINÂMICA (DMA).....	17
3.4.	REQUISITOS DE DESEMPENHO AO FOGO.....	21
3.4.1.	CÓDIGO DE CLASSIFICAÇÃO PARA INCÊNDIO.....	23
4.	METODOLOGIA.....	26
4.1.	CHARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO.....	26
4.1.1.	AMOSTRAS.....	26
4.1.2.	ANÁLISE MÉCANICA DINÂMICA (DMA).....	27
4.2.	ENSAIOS DE DESEMPENHO AO FOGO.....	28
4.2.1.	AMOSTRAS.....	28
4.2.2.	ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO FOGO E TEMPO DE EXPOSIÇÃO.....	29
4.2.2.1.	ENSAIO 1 – MATERIAL 2420C – CONDIÇÃO DF.JF.EA/030.....	30
4.2.2.2.	ENSAIO 2 – MATERIAL 2416 – CONDIÇÃO DF.JF.EA/060.....	32

4.2.2.3.	ENSAIO 3 – MATERIAL 2425 – CONDIÇÃO SF.HF.EA/060 .....	35
4.2.2.4.	ENSAIO 4 – MATERIAL 2000M – CONDIÇÃO DF.IF.EA/030 .....	38
4.2.3.	ENSAIO DE REAÇÃO AO FOGO .....	40
4.2.3.1.	ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE CHAMA .....	40
4.2.3.2.	ENSAIO DE TOXICIDADE E FUMAÇA.....	41
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
5.1.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO - DMA.....	43
5.1.1.	ANÁLISE DOS RESULTADOS COM RELAÇÃO A RESINA EPÓXI .....	46
5.2.	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO FOGO E TEMPO DE EXPOSIÇÃO.....	46
5.2.1.	ANÁLISE DOS RESULTADOS COM RELAÇÃO ÀS CLASSIFICADORAS ...	47
5.3.	ENSAIOS DE PROPAGAÇÃO DE CHAMA.....	47
5.4.	ANÁLISE DE CUSTO .....	50
6.	CONCLUSÕES.....	51
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tubulação de compósito de fibra de vidro com matriz polimérica. ....	4
Figura 2: Grupo funcional da resina epóxi.....	5
Figura 3: Diferentes formas de fibra de vidro: (a) tecido; (b) fio; (c) picada .....	9
Figura 4: Diferentes tipos de fibra de carbono: (a) fio; (b) tecido.....	10
Figura 5: Compósito com revestimento contra incêndio.....	12
Figura 6: Rede de água de combate a incêndio: (a)hidrantes; (b) canhão; (c) válvulas .....	15
Figura 7: Sistema de dilúvio: (a) seco; (b) ativado. ....	16
Figura 8: Curvas de DMA para os módulos de armazenamento, módulo de ( $E'$ , $G'$ ), perda ( $E''$ , $G''$ ) e tangente de perda (Tan Delta) .....	18
Figura 9: Ensaio de DMA para resinas epóxi (a) Módulo de armazenamento ( $E'$ ); (b) tangente de perda (Tan Delta). ....	19
Figura 10: Ensaio de DMA por três diferentes métodos para resina Araldite-F .....	20
Figura 11: Módulo de Armazenamento medido por ensaio de DMA para resina RTM6 .....	20
Figura 12: Determinação da Temperatura de Transição Vítrea ( $T_g$ ),pelo Módulo de Armazenamento .....	21
Figura 13: Corpos de prova para ensaio de DMA. ....	27
Figura 14: Ensaio de DMA: (a) Equipamento; (b) Corpo de Prova no início do ensaio.....	27
Figura 15: Ensaio de jato de fogo 1. ....	32
Figura 16: Preparação para o ensaio de jato de fogo 2.....	33
Figura 17: Realização do ensaio de jato de fogo 2. ....	34
Figura 18: Corpo-de-prova antes do ensaio de fogo em poça.....	36
Figura 19: Corpo-de-prova durante o ensaio de fogo em poça (a) Vista de dentro do forno; (b) Vista do corpo de prova.....	37
Figura 20: Preparação para o ensaio de aplicação de chama impingente. ....	39
Figura 21: Realização do ensaio de aplicação de chama impingente. ....	39
Figura 22: Corpos-de-prova utilizados no ensaio de reação a chama.....	42

Figura 23: Curvas de DMA para o módulos de armazenamento ( $E'$ ), perda ( $E''$ ) e tangente de perda ( $\tan d$ ) - Corpo de Prova 1 .....	43
Figura 24: Curvas de DMA para o módulos de armazenamento ( $E'$ ), perda ( $E''$ ) e tangente de perda ( $\tan d$ ) - Corpo de Prova 2 .....	43
Figura 25: Curvas de DMA para o módulos de armazenamento ( $E'$ ), perda ( $E''$ ) e tangente de perda ( $\tan d$ ) - Corpo de Prova 3 .....	44
Figura 26: Determinação da Temperatura de Transição Vítreia ( $T_g$ ) – Corpo de Prova 1... 45	
Figura 27: Determinação da Temperatura de Transição Vítreia ( $T_g$ ) – Corpo de Prova 2... 45	
Figura 28: Determinação da Temperatura de Transição Vítreia ( $T_g$ ) – Corpo de Prova 3... 45	
Figura 29: Análise de custo de rede de água de combate a incêndio para uma refinaria de médio porte.....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Aplicações típicas para tubulação de compósito (ABNT NBR 15921-1, 2011). ...	22
Tabela 2: Código de classificação para propriedades de resistência ao fogo (ABNT NBR 15921-1, 2011). .....	24
Tabela 3: Código de classificação para propriedades de reação ao fogo (ABNT NBR 15921-1, 2011). .....	25
Tabela 4: Amostras da série Bondstrand utilizadas nos ensaios de desempenho ao fogo.	28
Tabela 5: Ensaio de resistência ao fogo e tempo de exposição.....	30
Tabela 6: Normas de referência para ensaios de reação ao fogo (ISO 14692-2, 2002). ....	40
Tabela 7: Classificação conforme ensaio de resistência ao fogo e tempo de exposição....	46
Tabela 8: Ensaios de propagação de chama. ....	48
Tabela 9: Resultado final do ensaio de propagação de chama .....	49

## 1. INTRODUÇÃO

O estudo de materiais compósitos para utilização industrial está crescendo de maneira acentuada nas últimas décadas, principalmente os que possuem base de matriz polimérica, pois estão sendo frequentemente utilizados em diversas áreas da engenharia, tais como: aeromodelismo, estruturas aeroespaciais, indústrias automotiva, petroquímica, papelreira, mineral, dentre outras.

Devido às suas características e desempenho, os compósitos trouxeram uma importante contribuição em aplicações industriais e vêm conquistando espaços ocupados pelos materiais metálicos, principalmente nas aplicações onde existem problemas de corrosão, custo e peso.

Uma área em potencial para utilização de tubulações de compósitos são as plataformas de petróleo, onde as mesmas são utilizadas para o escoamento de água produzida e de efluentes para a condução de produtos perigosos e até mesmo em sistemas de água para combate a incêndio, sendo, neste último, muito pouco utilizados atualmente no Brasil.

Em um momento que se visa a máxima eficiência com o menor custo e sendo o sistema de água para combate a incêndio indispensável a qualquer indústria de grande porte, a utilização de materiais compósitos de matriz polimérica resistentes a altas temperaturas traria grandes vantagens econômicas e técnicas, resultando em benefícios como: menor custo total (instalação e manutenção), maior ciclo de vida útil e redução de peso quando comparado aos materiais mais utilizados atualmente, neste caso aço carbono e PEAD (Polietileno de alta densidade linear) enterrado.

Atualmente, materiais não metálicos, em geral polímeros, só são utilizados em tubulações de água de combate a incêndio enterradas, devido à sua menor resistência a temperaturas elevadas quando comparado aos materiais metálicos. Este fator desestimula o seu uso, uma vez que dificulta a inspeção e detecção de vazamentos na mesma. Por se tratarem de materiais relativamente novos na engenharia, a utilização de materiais compósitos em redes de água de combate a incêndio ainda não é tão difundida quando comparado com o aço carbono, por exemplo.

Uma vez que, para utilizações específicas como em sistemas aéreos de água para combate a incêndio, o material deve apresentar um comportamento a temperaturas elevadas adequado à utilização prescrita, esta propriedade ganha grande importância.

Assim, justifica-se o interesse de um estudo do comportamento de materiais compósitos de matriz polimérica quando expostos ao fogo.

## 2. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a integridade de tubulações de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra de vidro quando expostos ao fogo, visando a sua utilização em sistemas aéreos de água para combate a incêndio, o que possibilitaria à redução de custo total e o aumento do tempo de vida útil em relação aos materiais utilizados atualmente, além de outros benefícios como redução de peso e ausência de corrosão.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1. COMPÓSITOS

Um material compósito é feito através da combinação de dois ou mais materiais que fornecem uma combinação única de propriedades. A definição acima é genérica e pode incluir metais, copolímeros, minerais e madeira. Materiais compósitos reforçados com fibras diferem dos materiais acima, pois os materiais constituintes não sofrem interação a nível molecular e são mecanicamente separáveis, os materiais constituintes trabalham juntos, mas permanecem em suas formas originais. As propriedades finais dos materiais compósitos são melhores do que as propriedades dos materiais constituintes (MAZUMDAR, 2002).

Os compósitos se dividem em, no mínimo, duas fases com composições propriedades e estruturas distintas, denominadas matriz e reforço. O reforço é a fase responsável por suportar os esforços mecânicos, conferindo alta rigidez e resistência ao compósito, enquanto a matriz é responsável por estabilizar, e transferir o esforço mecânico a fase de reforço. Tanto a matriz quanto o reforço podem ser metálicos, cerâmicos ou poliméricos. O reforço pode ainda possuir diversas formas: lâminas, fibras, partículas, entre outros, que podem estar dispostos de maneira ordenada ou aleatória (MI et al., 1998).

O desempenho destes materiais depende das fases constituintes, das suas quantidades relativas, do grau de adesão entre elas, do seu processo de fabricação, distribuição de tamanho, forma, defeitos, dentre outros (MAZUMDAR, 2002).

Os compósitos são classificados em compósitos reforçados por partículas, compósitos reforçados por fibras, compósitos estruturais (laminares) e nanocompósitos (ALEXANDRE; DUBOIS, 2000).

### 3.1.1. COMPÓSITO DE MATRIZ POLIMÉRICA COM FIBRA DE VIDRO

Um dos materiais compósitos mais utilizados atualmente é constituído por uma matriz polimérica termorrígida com um reforço de fibras de vidro, os quais são agregados após um processo de cura transformando-se no compósito PRFV, ou seja, Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (NETO; PARDINI, 2006).

Nestes materiais, as propriedades físico-químicas dos polímeros usados como matriz, são conjugadas com as elevadas propriedades mecânicas das fibras que constituem o reforço. As fibras e a matriz polimérica são os constituintes de maior relevância nestes materiais, sendo comum incorporar também material de enchimento e aditivos, que possibilitam a redução do custo, melhoram propriedades específicas e o próprio processo de fabricação (MAZUMDAR, 2002).

As principais vantagens oferecidas pelos compósitos poliméricos, quando comparados aos materiais tradicionais de engenharia, como por exemplo: cobre, ferro fundido, bronze, são: o potencial de produção com baixo custo, baixo peso, resistência à corrosão, alto módulo de elasticidade, boa resistência ao impacto, boa resistência à propagação de micro trincas, baixa condutividade elétrica, boa processabilidade e a possibilidade de reciclagem da matéria prima (MAZUMDAR, 2002).

Na Figura 1, podemos observar uma tubovia formada por tubulações de compósito de fibra de vidro com matriz polimérica.



**Figura 1: Tubulação de compósito de fibra de vidro com matriz polimérica (NOV, 2011).**

### 3.1.2. POLÍMEROS

Polímeros são compostos químicos de elevada massa molar, compostos por muitas unidades de repetição denominadas mero. Estes materiais encontram-se divididos em dois grupos, os termoplásticos e os termorrígidos, dependendo a sua classificação do modo como estão ligados química e estruturalmente (CANEVAROLO, 2006).

As resinas termoplásticas como o polipropileno, a poliamida, o polietileno, o polibutileno e a poli(éter-imida) são formadas por cadeias saturadas, são materiais com a capacidade de amolecer e fluir quando aquecidos podendo ser conformados neste estado, assumindo essa forma após arrefecimento. Este processo é reversível, podendo estas resinas serem novamente reprocessadas, em um número limitado de vezes, sem perda significativa das suas propriedades. As principais vantagens destas resinas são maior resistência ao impacto, baixa flamabilidade, alto coeficiente de dilatação térmica, baixa condutividade térmica, possibilidade de reprocessamento, maior facilidade de armazenamento (não requerem refrigeração), possibilidade de produção em série e menor ciclo de fabricação. No entanto, apresentam uma maior dificuldade de impregnação e adesão às fibras do que as resinas termorrígidas (CANEVAROLO, 2006).

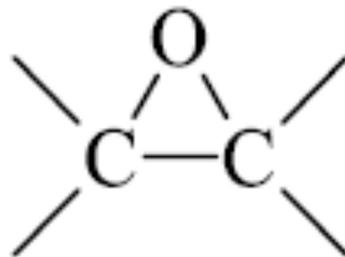
As resinas termorrígidas, por sua vez são formadas por uma estrutura tridimensional, na qual ocorrem várias ligações covalentes intercadeias, de modo que não é possível ocorrer um escorregamento entre as moléculas. Por isso quando curadas não podem mais

ser fundidas/amolecidas ou solubilizadas, pois ocorre a degradação da molécula, devendo desta forma ser processadas antes da cura. Estas resinas, muitas vezes são pré-polímeros que após o processo de cura adquirem as propriedades químicas da resina devido as ligações químicas. Estas ligações lhe conferem maior rigidez, resistência ao calor, resistência química e elétrica e melhor estabilidade dimensional quando comparadas as resinas termoplásticas (CANEVAROLO, 2006).

As resinas termorrígidas têm como grande vantagem reduzida viscosidade, o que permite velocidades de processamento elevadas. Também apresentam uma boa capacidade de impregnação das fibras e muito boas propriedades adesivas. Por estes motivos, são em geral o tipo de resina mais usada em materiais compósitos, dentre as quais podemos destacar as resinas epóxi, poliéster, éster vinílica e fenólicas (CHAWLA, 1987).

### 3.1.2.1. RESINA EPÓXI

Resinas epóxi são caracterizadas pela presença de pelo menos dois anéis de três membros conforme mostrado na Figura 2 (PENN; WANG, 1998):



**Figura 2: Grupo funcional da resina epóxi.**

As resinas epóxi são muito versáteis, permitindo uma ampla gama de propriedades e capacidades de processamento. Ela exibe baixa contração, bem como boa aderência a uma variedade de materiais. As resinas epóxi são amplamente usadas em diversas aplicações, desde a indústria aeroespacial até artigos esportivos (MAZUMDAR, 2002).

Existem vários graus de resina epóxi com diferentes níveis de desempenho para atender às diferentes necessidades de aplicação. Elas podem ser formuladas com outros materiais ou podem ser misturadas com outros epóxios para atender a uma necessidade de

desempenho específica. Ao alterar a formulação, as propriedades da resina epóxi como: a taxa de cura, a temperatura de processamento, o tempo de ciclo, aderência, a dureza, a resistência à temperatura entre outras podem ser alteradas (MAZUMDAR, 2002).

As resinas epóxi são convertidas em polímeros termorrígidos por um processo chamado reação de cura pela ação de endurecedores (agentes de cura). A reação de cura pode ser realizada tanto a temperatura ambiente como a altas temperaturas, as propriedades do produto final irão depender dos agentes de cura e da temperatura utilizada no processo (McDERMOTT, 1990).

Resinas epóxi apresentam excelentes propriedades mecânicas, estabilidade dimensional, boa resistência química e a impactos, baixa absorção de água, baixa contração, elevada rigidez e durabilidade e muito boas propriedades de adesão, apresentam bom desempenho quando utilizadas em elevadas temperaturas sendo auto extingüíveis (quando halogenadas). Este material pode ter vários aditivos na sua composição, os quais servem para alterar as propriedades de forma altamente específica (MAZUMDAR, 2002).

São particularmente versáteis podendo ser utilizadas em algumas aplicações bem específicas como (NETO; PARDINI, 2006):

- ✓ Aditivo em argamassa;
- ✓ Estabilizador de produtos químicos;
- ✓ Tintas;
- ✓ Anticorrosivo em peças de automóveis;
- ✓ Recobrimento de aparelhos eletrônicos;
- ✓ Laminação de produtos elétricos;
- ✓ Compostos de reestruturação dentária;
- ✓ Reforço estrutural;
- ✓ Reforço pra tubos.

### 3.1.3.FIBRA

A fibra é o elemento que confere ao compósito suas características mecânicas, por apresentarem elevado módulo de elasticidade e resistência, sua principal função é suportar as solicitações mecânicas dos elementos estruturais, garantindo assim resistência e rigidez suficientes ao longo da direção em que se desenvolvem (MAZUMDAR, 2002).

As fibras utilizadas no material compósito podem ser distribuídas de modo aleatório ou não, podendo ser curtas, as quais são injetadas no momento da moldagem da peça, ou longas que são cortadas após a fabricação da peça, podendo também se apresentar na forma de tecido. As fibras podem ainda ser definidas como sendo unidirecionais, quando orientadas segundo uma mesma direção, bidimensionais, com as fibras orientadas segundo duas direções ortogonais (tecidos) ou aleatórias quando são adicionadas no processo sem uma direção definida (MAZUMDAR, 2002).

Assim, o desempenho dos materiais compósitos é proporcional ao volume de fibras orientadas em cada direção, cujo comportamento depende dos seguintes parâmetros: tipo, orientação, comprimento, grau de concentração, forma como se dispõe no seio da matriz, composição, propriedades mecânicas da resina da matriz e adesão entre fibras e a matriz polimérica (SOARES; MARTINS, 2006).

A máxima resistência na direção das fibras (unidirecional) é obtida com fibras longas, contínuas e orientadas em uma direção. Uma resistência elevada, mas inferior à anterior, é também obtida através de tecidos de fibras dispostas em duas direções (bidirecional). A menor resistência é obtida por mantas de fibras orientadas aleatoriamente, onde as propriedades do material são menores às anteriores e sem um sentido preferencial (aleatório) (SOARES; MARTINS, 2006)

Dentre as fibras fabricadas atualmente, merecem destaque as fibras de vidro, de carbono, de poliamida aromática e de boro.

#### 3.1.3.1. FIBRA DE VIDRO

O material mais utilizado como reforço na composição de materiais compósitos são as fibras de vidro. O vidro é um excelente agente de reforço porque além do seu baixo custo, tem uma alta resistência à tração (acima de 3,6 GPa) e um alto módulo de elasticidade (94 GPa) (NETO; PARDINI, 2006).

A fibra de vidro é popular como reforço devido à facilidade do processamento do vidro no estado fundido, a farta disponibilidade, a boa aderência à matriz polimérica e a grande variedade de processos e técnicas de fabricação quando utilizada como reforço para materiais poliméricos. Devido aos seus atributos favoráveis é usado em praticamente todos os segmentos industriais, como indústrias civil, elétrica, automobilística, aeronáutica, etc (VAUGHAN, 1998).

Os compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de vidro apresentam as seguintes características favoráveis: elevada razão (quociente) entre resistência e peso; alta resistência mecânica, boa resistência ao impacto; boa estabilidade dimensional; boa resistência ao calor, à umidade e à corrosão; boas propriedades de isolamento elétrico; facilidade de fabricação e custo relativamente baixo. Como o vidro é um material praticamente inerte, as fibras também são imunes aos ataques biológicos e têm boa resistência aos ataques de solventes e produtos químicos (VAUGHAN, 1998).

Existem diversos grupos de vidro utilizados para fabricação de fibra, como a sílica, o oxinitrito e o fosfato. Os diferentes tipos de fibra são denominados por uma letra, sendo as principais a fibra de vidro E (composta a partir de alumínio, cálcio e silicatos de boro) destinada a produtos que necessitem de alta resistência mecânica e isolamento elétrico; a fibra de vidro S (composta de magnésio e silicatos de alumínio) empregada quando se requer alta resistência mecânica; e a fibra de vidro C a qual oferece maior resistência a ataques químicos (CHAWLA, 1987).

As fibras de vidro do tipo "E" são as mais utilizadas devido ao baixo custo. Este tipo de fibra fornece um pacote atrativo de propriedades mecânicas, químicas e elétricas. O uso desta fibra resulta em melhorias nas propriedades dos materiais como a resistência à tração e ao impacto (LARENA et al., 1992).

Na Figura 3, podemos observar alguns exemplos de formas de apresentação das fibras de vidro.



(a)



**Figura 3: Diferentes formas de fibra de vidro:  
(a) tecido; (b) fio; (c) picada (COELHO, 2012).**

### 3.1.3.2. FIBRA DE CARBONO

As fibras de carbono são fibras sintéticas compostas de finos filamentos de 5 a 8  $\mu\text{m}$  de diâmetro, constituídos por mais de 90% de carbono, e podem se apresentar em diferentes formas conforme mostrado na Figura 4 (MAZUMDAR, 2002).

As propriedades das fibras de carbono variam em função da estrutura cristalina e do processo de fabricação. Fibras de carbono provenientes de estruturas cristalinas de arranjo cúbico (diamante) possuem elevada resistência mecânica, enquanto que as provenientes de arranjo hexagonal (grafite) possuem elevado módulo de elasticidade (CHAWLA, 1987).

Fibras de carbono obtidas por carbonização alcançam temperaturas de até 1500  $^{\circ}\text{C}$  provocando a orientação das fibras, o que lhes confere elevada resistência mecânica, enquanto as fibras obtidas por grafitação alcançam temperaturas muito elevadas (entre 1500 e 2500 $^{\circ}\text{C}$ ) apresentando elevado módulo de elasticidade (NETO; PARDINI, 2006).

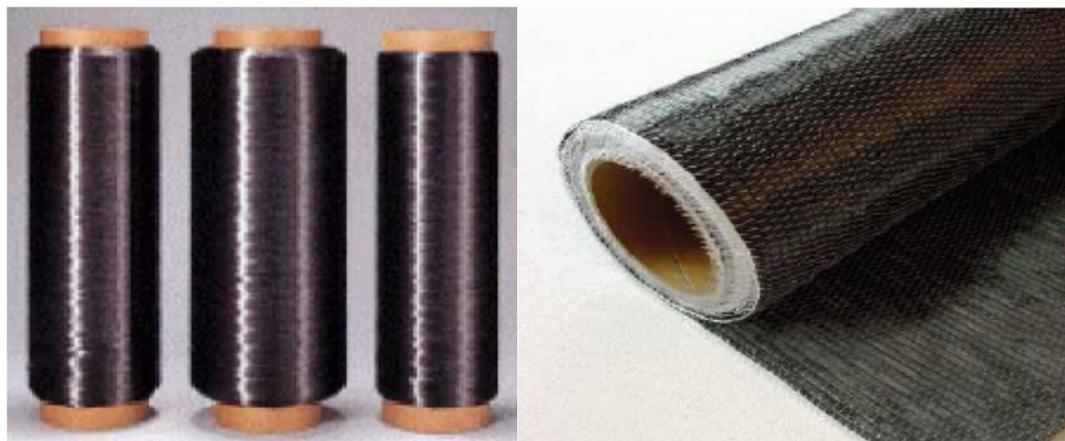
As fibras de carbono possuem propriedades mecânicas semelhantes às do aço e são leves como madeira ou plástico, entre as suas principais propriedades estão: elevada resistência à tração, módulo de elasticidade extremamente elevado, baixa massa específica, boa resistência elétrica e térmica, além de inércia química, exceto quanto à oxidação (LAFDI; WRIGHT, 1998).

Visto que é tão resistente e leve ao mesmo tempo, as fibras de carbono são um material versátil e de larga aplicação, sendo muito utilizadas na fabricação de naves espaciais, em componentes estruturais submetidos a altas temperaturas, como componentes de turbinas de aviões e foguetes, na indústria de automóveis, em equipamentos empregados em técnicas eletroanalíticas, em peças de bicicletas, bem

como em bens de consumo, tais como celulares, sapatos, móveis, eletrodomésticos, artefato de uso médico, esportivo e odontológico (MAZUMDAR, 2002).

Compósitos poliméricos reforçados com fibras de carbono, de resina epóxi, por exemplo, são caracterizados pelo fato de apresentarem uma combinação de baixo peso, resistência mecânica muito elevada e elevada rigidez (LAFDI; WRIGHT, 1998).

O custo de fibras de carbono depende do custo da matéria-prima e do processo de fabricação, o que interfere nas propriedades de resistência e de rigidez. As fibras com alta rigidez e resistência tem um custo mais elevado. O custo da fibra de carbono, também é influenciado pelo número de filamentos no feixe de fibra, devido ao processo de fabricação ser lento, quanto maior o número de filamentos, menor será o custo. (MAZUMDAR, 2002). O custo da fibra de carbono equivale a cerca de 20 vezes o custo da fibra de vidro, o que faz com que a primeira, apesar de apresentar melhores propriedades mecânicas, seja utilizada em menor quantidade que a segunda, (FIORELLI, 2002).



(a)(b)

**Figura 4: Diferentes tipos de fibra de carbono:**

**(a) fio; (b) tecido (FILHO, 2007).**

#### 3.1.4. INTERFACE

Interface é a fase do compósito responsável pela adesão entre a fase de reforço (fibra) e a matriz. De um modo geral, a interface é uma região bidimensional através da qual os parâmetros dos materiais como a concentração de um elemento, estrutura cristalina, módulo de elasticidade, densidade e coeficiente de expansão térmica, mudam de um lado para o outro (CHAWLA, 1987).

Para obter as características desejadas do material compósito, deve-se ter cuidado para que as fibras não sejam enfraquecidas por defeitos (superficiais ou internos) e para que a carga aplicada seja eficazmente transferida da matriz para as fibras através da interface, o que evidencia a importância da mesma (CHAWLA, 1987).

As propriedades mecânicas da ligação fibra/matriz são dependentes da adesão e compatibilidade mecânica entre as fibras e a matriz, bem como do ângulo entre as fibras e a direção de carregamento, verificando-se o valor máximo dessas propriedades quando a direção de carregamento e das fibras são idênticas. As principais condições para uma boa adesão entre a fibra e a matriz são a molhabilidade e a aderência (MAZUMDAR, 2002).

Com relação à molhabilidade, particularmente nos casos de compósitos de matriz polimérica, um contato íntimo a nível molecular entre a fibra e a matriz, pode levar a forças intermoleculares causando ou não uma ligação química entre os componentes. Este contato entre a fibra e a matriz requer que a matriz na forma líquida molhe a fibra na forma sólida. Agentes de ligação são frequentemente usados para melhorar a molhabilidade entre os componentes, em alguns casos são necessárias alterações como modificar a composição da matriz (CHAWLA, 1987).

Outra condição importante para uma boa adesão fibra matriz e a aderência, a qual pode ser mecânica ou química. A adesão mecânica ou ancoragem ocorre devido a alterações na superfície do material, enquanto a adesão química mais utilizada é a silanização, onde o silano hidrolisado condensa na superfície do vidro conferindo a aderência entre a fibra de vidro e a matriz (CHAWLA, 1987).

### 3.1.5. ADITIVOS / REVESTIMENTO

Os materiais compósitos reforçados com fibras recorrem ao uso de diversos aditivos para melhorar o seu desempenho, processamento, ou apenas, para alterar as suas propriedades (MAZUMDAR, 2002).

Os principais aditivos utilizados em compósitos são os plastificantes, os estabilizadores térmicos, os agentes antioxidantes, os agentes auxiliares de processamento, os agentes de acoplamento, os agentes dispersantes, os retardantes de chama (Figura 5), biocidas, modificadores de impacto e os colorantes. Sendo os objetivos principais descritos a seguir (HARPER et al., 1999):

- ✓ Reduzir o custo;
- ✓ Reduzir a inflamabilidade e a produção de fumos tóxicos em situação de incêndio;

- ✓ Aumentar a condutividade elétrica (através da adição de partículas metálicas e/ou de carbono) e a interferência eletromagnética (adição de materiais condutores);
- ✓ Inibir a oxidação dos polímeros;
- ✓ Reduzir o tempo de produção/processamento;
- ✓ Diminuir o teor de vazios;
- ✓ Aumentar a interação entre a matriz polimérica e os aditivos e/ou reforço;
- ✓ Reduzir a tendência para a atração de cargas elétricas (adição de agentes anti-estáticos);
- ✓ Promover a estrutura celular (aditivos precursores de espumas), com menor densidade, retração e custos do material, e com melhor isolamento térmico e elétrico;
- ✓ Prevenir a perda de brilho, descoloração e desintegração devido à radiação UV;
- ✓ Proteger contra fungos e bactérias;
- ✓ Absorver a energia gerada pelo impacto;
- ✓ Alteração da cor.



**Figura 5: Compósito com revestimento contra incêndio.**

### 3.2. SISTEMA DE ÁGUA DE COMBATE A INCÊNDIO

De acordo com o decreto 56.819 de 10 de março de 2011, instalações terrestres com área construída superior a 750 m<sup>2</sup> ou com mais de 12 m de altura devem ser protegidas por sistemas fixos de combate a incêndio, os quais devem ser compostos por, no mínimo, tanque/reservatório de água de combate a incêndio, rede de água de combate a incêndio, hidrantes/mangotinhos e bombas para alimentar a rede de água de combate a incêndio, exceto nos caso onde for possível pressurizar o sistema por gravidade (VIEIRA, 2011).

A rede de água de combate a incêndio deve ser independente de outras redes de água e abranger toda área industrial, deve ser disposta na forma de anéis ao redor das instalações, os quais deverão possuir válvulas de bloqueio instaladas de tal forma que permitam o isolamento dos ramais em caso de acidentes, reparos e manutenção, sem prejuízo da proteção da área coberta pela mesma (N-1203, 2013). Na Figura 6, podemos ver exemplos de redes de água de combate a incêndio utilizadas em refinarias de petróleo e unidades de processamento de gás.

De modo a facilitar a inspeção e manutenção, sempre que possível, a rede de água de combate a incêndio deverá ser aérea. No entanto, para locais críticos, como, por exemplo, acessos às instalações, travessias de ruas, entorno de unidades de processo, deve ser avaliado se as linhas serão aéreas ou enterradas (N-1203, 2013).

Quando fora de uso, a rede de água de combate a incêndio deve ser mantida permanentemente cheia e pressurizada, com o mínimo de 99 kPa no ponto mais desfavorável da linha. Com o sistema em operação, a pressão nos hidrantes, inclusive naquele situado na posição mais desfavorável, deve estar entre 520 kPa e 862 kPa. A pressão de projeto da rede deve ser limitada a 1370 kPa (ABNT NBR 17505-7, 2013).

A rede de água de combate a incêndio também pode alimentar sistemas de dilúvio, sistemas fixos de pulverização de água destinados à proteção de equipamentos específicos. Estes sistemas tem o objetivo de controlar um incêndio, extingui-lo ou proteger o equipamento da exposição ao mesmo, através de seu resfriamento. Neste sistema, a tubulação que alimenta os bicos aspersores de água fica seca/vazia quando fora de uso, só havendo fluxo de água no caso de acidentes. Na Figura 7, podemos ver exemplos destes sistemas (N-1203, 2013).

Os materiais mais utilizados atualmente em sistemas de água para combate a incêndio são o aço carbono e o PEAD. O primeiro já é utilizado para esta aplicação há muitos anos e é o material encontrado na rede de água para combate a incêndio na maioria das instalações *onshore* da Petrobras. A principal desvantagem do aço carbono quando comparado aos materiais não metálicos é o custo elevado e o tempo de vida útil, pois é mais propício a corrosão.

O PEAD veem substituindo o aço carbono em projetos mais novos devido ao seu menor custo, porém por não ser resistente a elevadas temperaturas, só é permitida sua instalação em redes de água de combate a incêndio enterradas, o que dificulta a manutenção e detecção de vazamentos. Outro grande problema verificado no uso deste material é sua junção com o aço carbono, quando da necessidade de aflorar os trechos

enterrados para conexão de equipamentos de combate a incêndio (hidrantes e canhões) ou válvulas, pois a mesma tem apresentado muitos problemas de vazamento.

Fora as exigências já mencionadas, o sistema de água de combate a incêndio deve estar de acordo com as principais normas internacionais, nacionais e requisitos locais como as instruções técnicas do corpo de bombeiros. Sendo as principais normas citadas a seguir:

- ✓ N-111 – Hidrantes Industriais;
- ✓ N-1203 – Projeto de Sistemas Fixos de proteção Contra Incêndio em Instalações Terrestres com Hidrocarboneto e Álcool;
- ✓ NR-23 – Proteção Contra Incêndios
- ✓ ABNT NBR 13714 – Sistemas de Hidrantes e Mangotinhos para Combate a Incêndio;
- ✓ ABNT NBR 17505 – Armazenamento de Líquidos Inflamáveis e Combustíveis. Parte 7: Proteção contra Incêndio para Parques de Armazenamento com tanques Estacionários;
- ✓ API RP 2001 – Fire Protection in Refineries;
- ✓ API 2030 Application of fixed Water Spray Systems for Fire Protection in the Petroleum and Petrochemical Industries;
- ✓ NFPA 15 – Standard for Water Spray Fixed System for Fire Protection;
- ✓ NFPA 20 – Standard for the Installation of Stationary Pumps for Fire Protection;
- ✓ NFPA 25 – Standard for the Inspection, Testing, and Maintenance of Water-Based Fire Protection Systems.



(a) (b)



(c)

**Figura 6: Rede de água de combate a incêndio:  
(a) hidrante; (b) canhão; (c) válvulas.**



(a)



(b)

Figura 7: Sistema de dilúvio: (a) seco; (b) ativado.

### 3.3. ANÁLISES TÉRMICAS

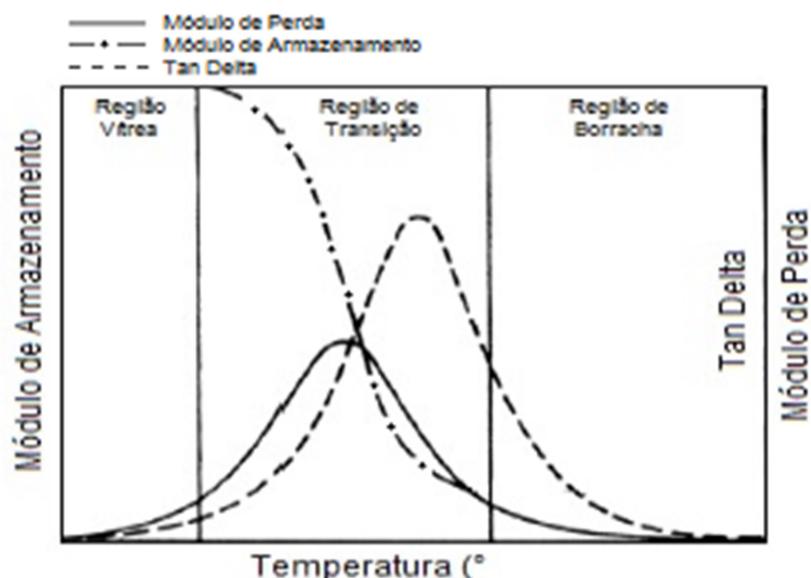
Análise térmica é um termo que abrange um grupo de técnicas nas quais uma propriedade física ou química de uma substância, ou de seus produtos de reação, é monitorada em função do tempo ou temperatura, enquanto a temperatura da amostra, sob uma atmosfera específica, é submetida a uma programação controlada. (WENDHAUSEN et al., 2004)

#### 3.3.1. ANÁLISE MÊCANICA DINÂMICA (DMA)

A técnica de DMA consiste na aplicação de uma tensão oscilante a uma amostra, em uma determinada frequência, durante um determinado tempo, e na análise a resposta do material a esta força, através das curvas de tensão-deformação. A partir desta, calcula-se propriedades como a viscosidade a partir da diferença de fase e a rigidez (módulo de elasticidade) a partir da deformação da amostra (LORANDI et al., 2016).

O estudo da região de transição vítrea por DMA ocorre a uma dada oscilação de frequência e envolve a medida do módulo de perda ( $E''$ ,  $G''$ ), expresso pelo componente em fase com a deformação, e do módulo de armazenamento ( $E'$ ,  $G'$ ) do material, expresso pelo componente fora de fase com a deformação ( $90^\circ$ ), desde a temperatura ambiente até acima da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) (GARAY et al., 2011).

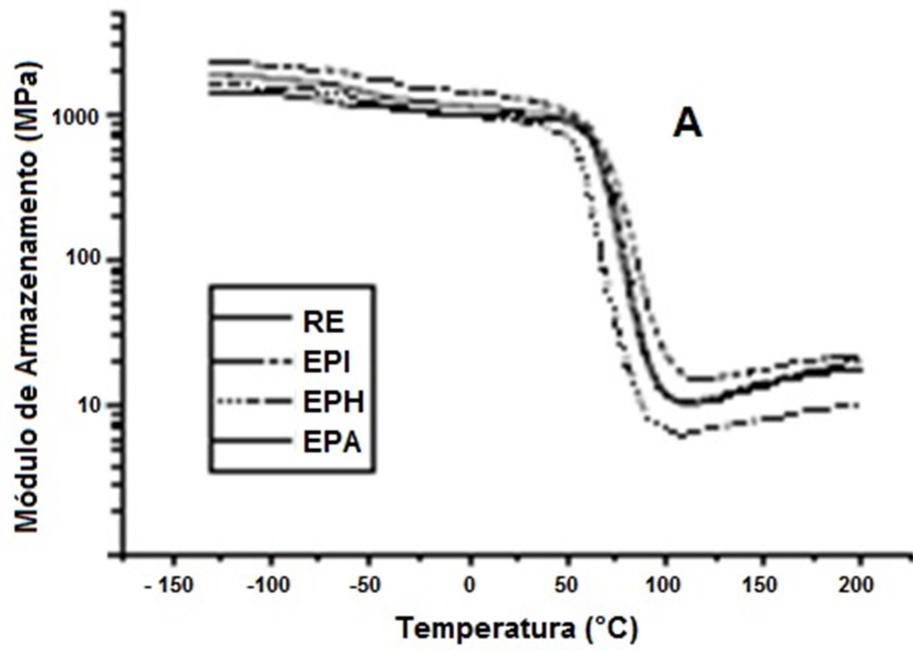
A determinação da temperatura de transição vítrea a partir dos ensaios de DMA é possível devido aos picos característicos identificados devido a significativa variação dos valores do módulo de armazenamento, do módulo de perda e do fator de perda com a temperatura durante o processo de transição vítrea. No caso do módulo de armazenamento, essa variação ocorre na forma de uma queda acentuada, enquanto que o módulo de perda e o fator de perda apresentam um pico positivo, conforme mostrado na Figura 8 (NETO, 2014).



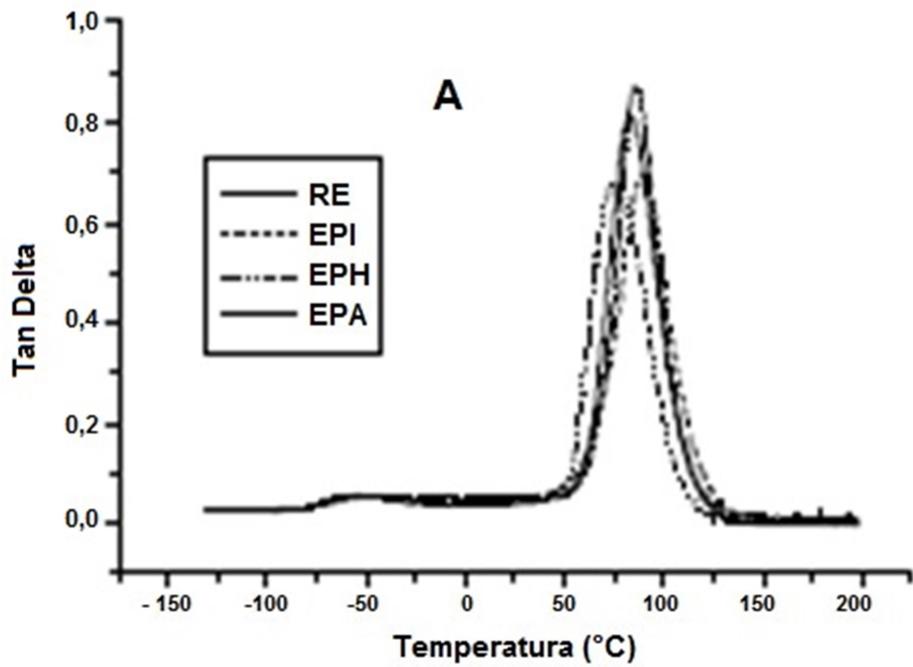
**Figura 8: Curvas de DMA para os módulos de armazenamento, módulo de perda e fator de perda (Tan Delta) (adaptado de WARD; SWEENEY, 2004).**

A temperatura de transição vítrea do material é caracterizada como um ponto localizado na região de transição da Figura 8. Como pode ser observado, tanto o ponto inicial da curva do módulo de armazenamento ( $E'$ ,  $G'$ ), quanto o pico do módulo de perda ( $E''$ ,  $G''$ ) e o pico da tangente de perda (Tan Delta), determinam os pontos onde os valores de temperatura se encontram na faixa da região de transição do material, entre o estado vítreo e o borrachoso (NETO, 2014).

Nas Figuras de 9 a 11 podemos observar resultados de ensaios de DMA, para diferentes tipos de resinas epóxis. A Figura 9 mostra as curvas de módulo de armazenamento e Tan Delta medidas por DMA para resinas epóxi a uma taxa de aquecimento de  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  e frequência de 3 Hz, em um intervalo de temperatura de  $100$  a  $200^{\circ}\text{C}$  (BERRY et al., 2002). A Figura 10 mostra as curvas de módulo de armazenamento e tan delta medidas por DMA com três diferentes métodos: flexão em três pontos, flexão fixa em dois pontos e flexão fixa em um ponto; para a resina epóxi Araldite -F a uma taxa de aquecimento de  $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$  e frequência de 1 Hz, em um intervalo de temperatura de  $20$  a  $120^{\circ}\text{C}$ . Enquanto a Figura 11, mostra a curva de módulo de armazenamento medida por DMA pelos métodos de flexão em três pontos e flexão fixa em um ponto; a uma taxa de aquecimento de  $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$  e frequência de 1 Hz, em um intervalo de temperatura de  $-80$  a  $240^{\circ}\text{C}$ , para a resina epóxi RTM6, a qual é uma resina adequada para temperaturas de serviço a partir de  $-60$  a  $180^{\circ}\text{C}$ , devido a um ciclo de pós cura de  $180^{\circ}\text{C}$  por 120 minutos (DENG et al., 2007).



(a)



(b)

Figura 9: Ensaio de DMA para resinas epóxi (adaptado de BERRY et al., 2002).  
 (a) Módulo de armazenamento ( $E'$ ); (b) tangente de perda (Tan Delta)

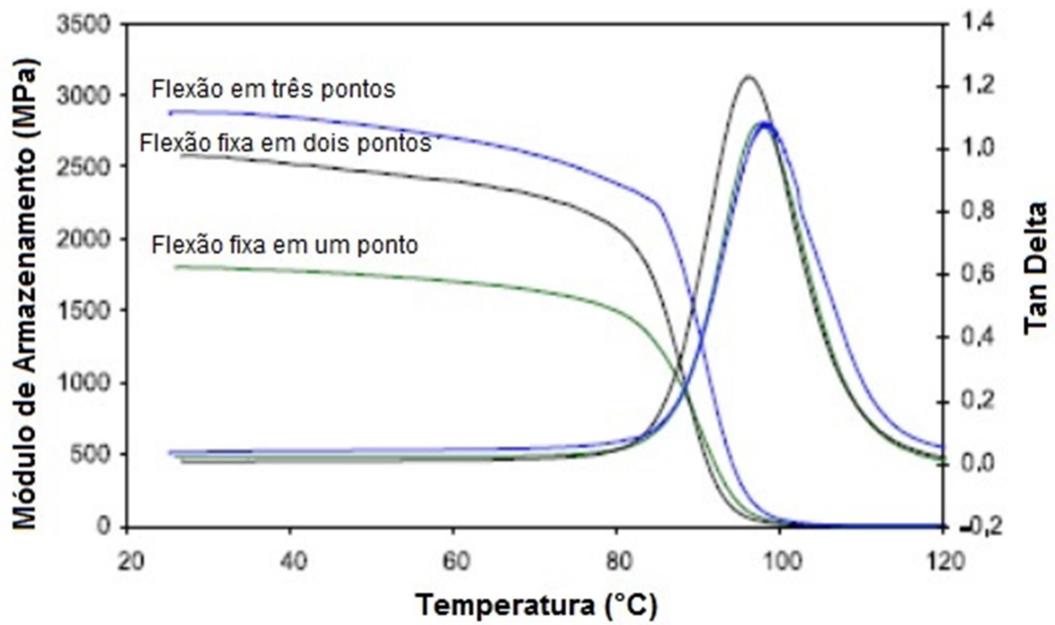


Figura 10: Ensaio de DMA por três diferentes métodos para resina Araldite-F (adaptado de DENG et al., 2007).

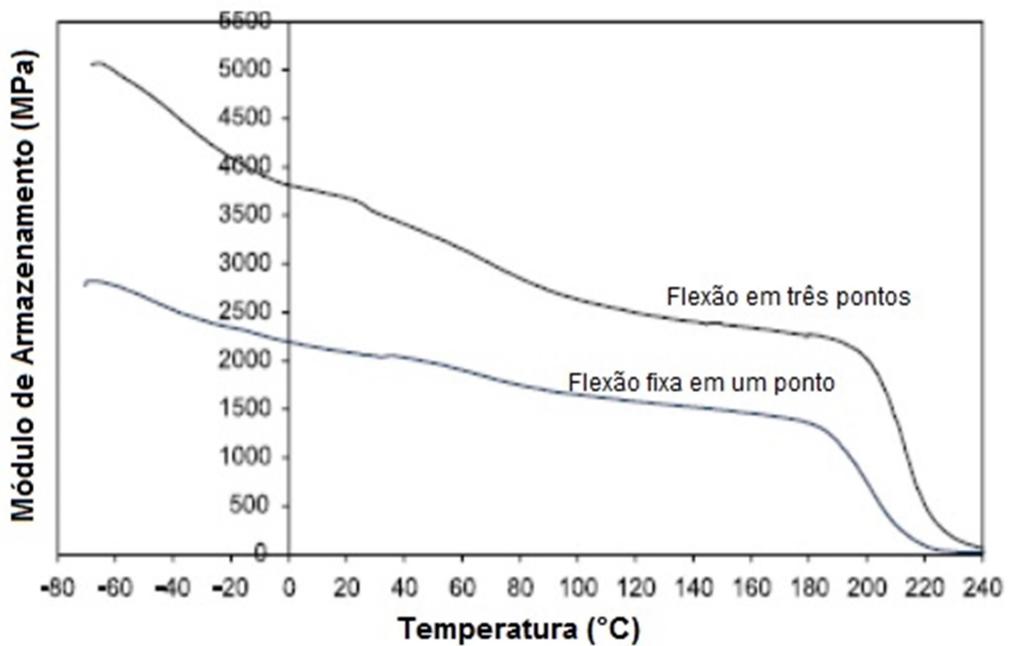


Figura 11: Módulo de Armazenamento medido por ensaio de DMA para resina RTM6 (adaptado de DENG et al., 2007).

Comparando as curvas mostradas nas Figuras de 8 a 10, pode ser observado que a curva do módulo de armazenamento é a que fornece um menor valor de  $T_g$ , sendo desta forma o método mais conservativo. Segundo a ASTM D7028, a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) de compósitos poliméricos pode ser determinada pela curva do módulo de armazenamento ( $E'$ ), em função da temperatura, obtida pelo ensaio de DMA utilizando o método de flexão. Como durante a transição vítrea, este reduz significativamente, a  $T_g$  é determinada pela intersecção de duas linhas tangentes (A e B) da curva de  $E'$ , conforme mostrado na Figura 12.

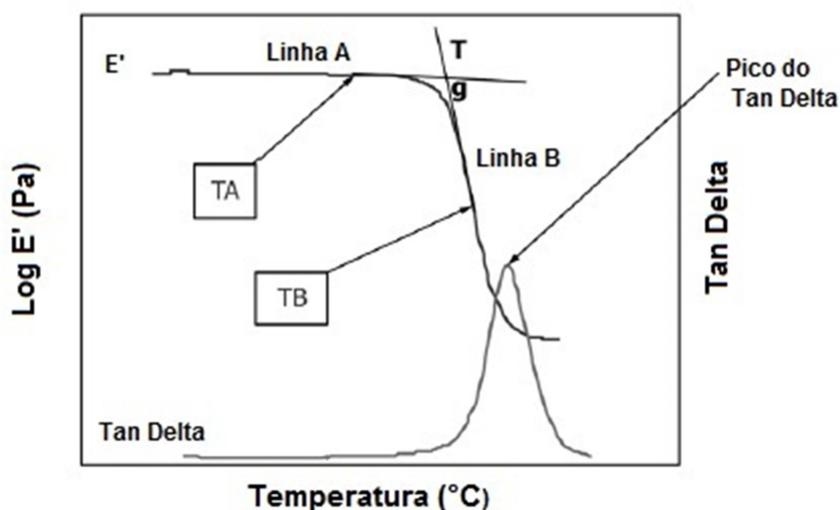


Figura 12: Determinação da Temperatura de Transição Vítrea ( $T_g$ ), pelo Módulo de Armazenamento (adaptado de ASTM D 7028).

#### 3.4. REQUISITOS DE DESEMPENHO AO FOGO

O estudo conduzido foi baseado nos requisitos de desempenho ao fogo estabelecidos na norma ABNT NBR 15921. Esta norma aplica-se às tubulações de compósitos associadas ao processamento da indústria de petróleo e gás e aplicações em serviços de utilidades. Apesar de ter sido desenvolvida originalmente para aplicações *offshore*, pode também ser usada como orientação para a especificação, fabricação, ensaio e montagem dos sistemas de tubulação de compósito em aplicações similares encontradas *onshore*, dentre os quais se encontra a rede de água de combate a incêndio, conforme mostrado na Tabela 1.

**Tabela 1: Aplicações típicas para tubulação de compósito (ABNT NBR 15921-1, 2011).**

Principais Aplicações para Tubulações de Compósito		
Água de Resfriamento	Salmoura	Cloreto de Alquila
Água de Lastro	Condensado (água e gás)	Cloreto de Hidrogênio (gás)
Água para Caldeira	Emulsões (óleo/água)	HCl
Água de Processo	Gás Inerte	Glicol
Água de Injeção	Combustível	Hidróxido de Sódio
Água de Incêndio (anel principal e dilúvio)	Querosene de Aviação	Hipoclorito de Sódio
Água Doce	Gasolina Automotiva	Tubulações para bombas, tubos de amortecimento ou risers
Água Potável	Petróleo	Tubulação de lastro
Água do Mar	Gás (metano etc...)	Respiros
Água Produzida	Gás de Superfície	Drenos (não perigosos)
Água de Serviço	Petróleo Instabilizado	Esgoto (água vermelha)
Águas Residuais	Óleo e Gás associados	Esgoto (água cinza)
Água de Formação	CO <sub>2</sub>	

### 3.4.1. CÓDIGO DE CLASSIFICAÇÃO PARA INCÊNDIO

Aplicando-se os testes de desempenho ao fogo exigidos na ABNT NBR 15921 aos compósitos de resina epóxi reforçados com fibra de vidro, pode-se avaliar o comportamento destes quando expostos ao incêndio e classificá-los quanto aos requisitos de resistência e reação ao fogo, conforme descrito a seguir, de modo a validá-lo ou não para a finalidade desejada.

O desempenho ao fogo de sistemas de tubulação deve ser definido de acordo com a codificação A-B-C/xxx-(D-E), em termos das condições de trabalho, gravidade e duração do fogo.

Resistência ao fogo é a capacidade da tubulação/item de tubulação de manter seu desempenho funcional em presença de fogo ou incêndio. Seu código de classificação é designado por três letras A – B – C, conforme Tabela 2, na qual A representa o serviço, B o tipo de fogo e C a integridade, que recebem níveis prescritos em ordem decrescente de severidade.

O parâmetro /xxx é o tempo de exposição ao fogo em minutos, no qual o tubo está qualificado para operar nas condições de serviço.

Reação ao fogo é uma propriedade do material e está relacionada com o tempo de ignição, a propagação superficial de chama e a taxa de evolução de calor fumaça e gases tóxicos. O código de classificação de reação ao fogo é designado por um número de dois dígitos, conforme Tabela 3, onde a propagação de chama e a liberação de calor, D, bem como fumaça e toxicidade, E, recebem níveis prescritos em ordem decrescente de gravidade.

**Tabela 2: Código de classificação para propriedades de resistência ao fogo (ABNT NBR 15921-1, 2011).**

A: Serviço (Fluido ou estado do fluido)		B: Tipo de Fogo		C: Integridade/Duração	
DE	Seco ou vazio	JF	Jato de fogo	EA	Capaz de manter a pressão de ensaio sem vazamento durante ou após o ensaio
DF	Inicialmente seco/vazio por 5 min no mínimo, seguido de água corrente (velocidade linear $\leq 1$ m/s)	HF	Fogo em poça de hidrocarbonetos	EB	Sem vazamento durante o ensaio de fogo, porém sendo aceita pequena exsudação. Capaz de manter a pressão de ensaio após o esfriamento sem vazamento significativo ( $\leq 0,2$ L/min) por 15 min no mínimo
ST	Água estagnada	IF	Chama impingente	EC	Vazamento mínimo ou nenhum ( $\leq 0,5$ L/min) durante o ensaio de fogo. Capaz de manter a pressão de ensaio após o esfriamento com vazamento conhecido (taxa de vazamento por metro de comprimento do tubo a ser quantificada em cada caso)
SF	Inicialmente estagnado por 5 min no mínimo, seguido de água corrente (velocidade linear $\leq 1$ m/s)	CF	Fogo de materiais celulósicos		
WF	Água corrente (velocidade linear $\leq 1$ m/s)			ED	Vazamento permitido ( $\geq 0,5$ L/min) durante o ensaio de fogo. Capaz de manter a pressão de ensaio após o esfriamento com vazamento conhecido (taxa de vazamento por metro de comprimento do tubo a ser quantificada em cada caso)
FG	Gás inflamável				
HL	Hidrocarboneto líquido			EE	Vazamento permitido ( $\geq 0,5$ L/min) durante o ensaio de fogo. A pressão que pode ser mantida após esfriamento com vazamento conhecido a ser quantificado
OC	Outro produto químico			EF	Não exige resistência ao fogo

Tabela 3: Código de classificação para propriedades de reação ao fogo (ABNT NBR 15921-1, 2011).

D: Propagação de Fogo e Liberação de Calor		E: Toxicidade e Fumaça	
1	A propagação de fogo não é permitida	1	Toxicidade e emissão de fumaça não são permitidas
	Áreas confinadas onde a propagação de chama deve ser limitada a:		Áreas confinadas onde níveis exigidos não podem exceder:
2	ISO 5658-2 $Q_{CFE} \geq 20 \text{ kW/m}^2$ , $Q_{sb} \geq 1,5 \text{ MJ/m}^2$ , $Q_t \leq 0,7 \text{ MJ}$ , $q_p \leq 4,0 \text{ kW}$	2	$D_m < 400$ $CO < 1450 \text{ } \mu\text{g/g}$ , $HCl < 600 \text{ } \mu\text{g/g}$ , $HCN < 140 \text{ } \mu\text{g/g}$ , $HF < 600 \text{ } \mu\text{g/g}$ , $NO_x < 350 \text{ } \mu\text{g/g}$ , $HBr < 600 \text{ } \mu\text{g/g}$ , $SO_2 < 120 \text{ } \mu\text{g/g}$
3	Áreas onde a propagação de chama precisa ser limitada e quantificada, usando os procedimentos da: ISO 5658-2	3	Os níveis precisam ser quantificados e aceitáveis dentro do tempo de evacuação: ISO 5659-2
4	Nenhuma exigência quanto a propagação de chama	4	Níveis em áreas abertas sem restrição de toxicidade ou densidade de fumaça

Desta forma, de acordo com as Tabelas 2 e 3 a classificação mais rigorosa para uma tubulação de compósito, tendo água como fluido seria DE.JF.EA/xxx-(1-1), enquanto a menos rigorosa seria WF.CF.EF/xxx-(4-4).

Tomando como base as normas e resoluções seguidas pelas sociedades classificadoras, obtém-se ainda como parâmetro de classificação as resoluções IMO A.753, “Guidelines for the Application of Plastic Pipes on Ships”, e as regras ABS, “Rules for Building and Classing – Facilities on Offshore Installations”, que apesar de terem sido desenvolvidas para sistemas *offshore* assim como a ABNT NBR 15921, podem ser usadas como parâmetro para sistemas *onshore*.

A resolução IMO A.753, tem o propósito de fornecer critérios de aceitação para materiais poliméricos em sistemas de tubulação instalados em unidades marítimas, apresenta requisitos de projeto e instalação e, para cada aplicação, o critério necessário de resistência ao fogo. Estes critérios estão divididos em três níveis, conforme descritos a seguir:

- ✓ Nível L1, exige 60 minutos de exposição ao calor com temperatura de 1100°C, sem apresentar vazamento, equivalente a classificação DE.HF.EA/060 da ABNT NBR 15921.
- ✓ Nível L2, exige 30 minutos de exposição ao calor com temperatura de 1100°C, sem apresentar vazamento, equivalente a classificação DE.HF.EA/030 da ABNT NBR 15921.
- ✓ Nível L3, exige 30 minutos de exposição à chama com o tubo cheio de água estagnada a 3 bar de pressão, equivalente a classificação ST.IF.EB/030 da ABNT NBR 15921.

Já as regras da ABS “Rules for Building and Classing – Facilities on Offshore Installations”, a qual contém os requisitos técnicos e critérios empregados na revisão e avaliação de instalações de produção de hidrocarbonetos que estiverem sendo considerados para classificação e para manutenção da classificação, considera a aplicação de tubos em PRFV para sistemas de combate a incêndio.

#### 4. METODOLOGIA

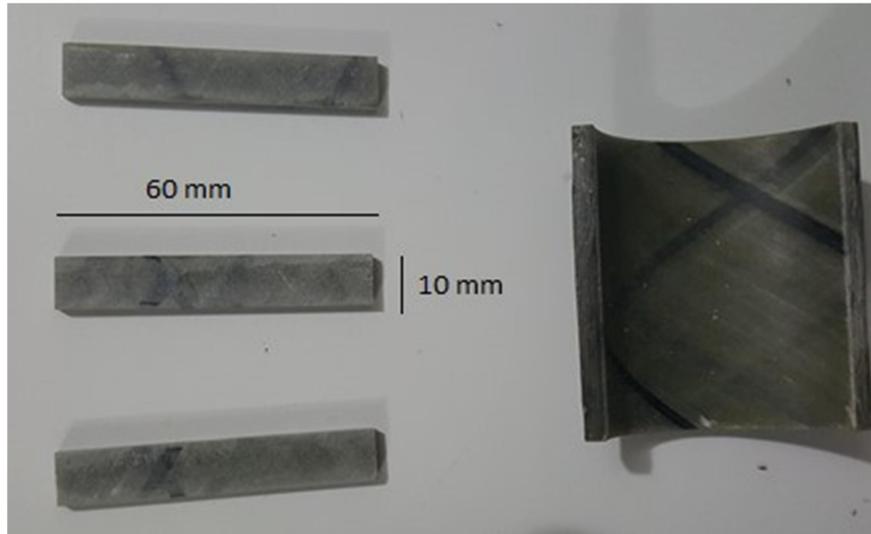
No presente trabalho, foram testados compósitos de resina epóxi reforçados com fibra de vidro e carbono, para utilização em sistemas de água para combate a incêndio aéreos. De modo a conhecer o seu comportamento quando expostos a um incêndio, foram realizados ensaios de desempenho ao fogo, tomando como base a norma ABNT NBR 15921-2.

##### 4.1. CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO

###### 4.1.1. AMOSTRAS

Com o objetivo de caracterizar o compósito utilizado, foram testados 3 corpos de prova obtidos a partir de tubulações de compósitos de resina epóxi com fibra de vidro e carbono da linha Bondstrand 2000M fornecidos pela empresa NOV (National Oil Varco).

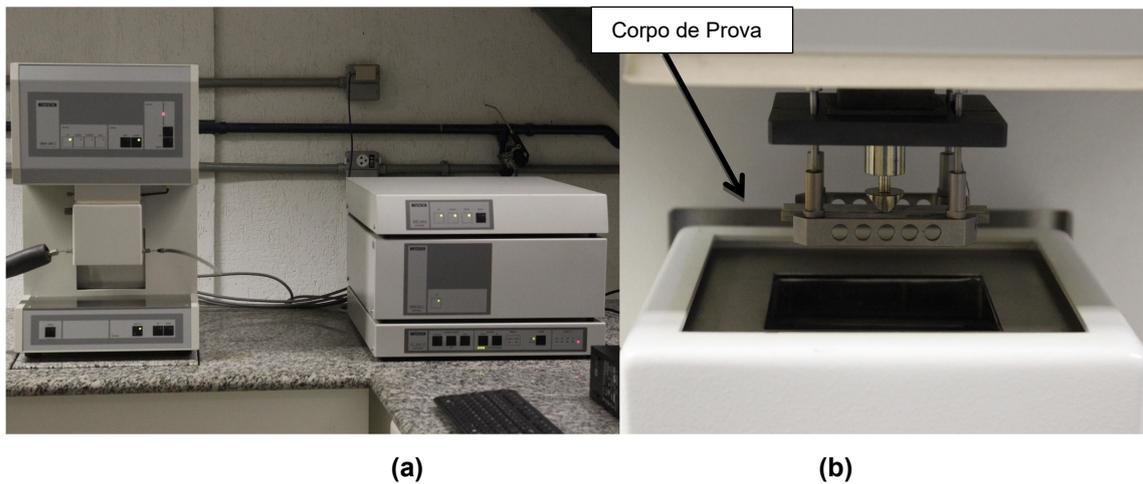
Estes corpos de prova, foram obtidos a partir do corte longitudinal de tubulação de 2”, com espessura de aproximadamente 3 mm. Após o corte, os corpos de prova foram usinados até apresentarem a forma plana, conforme mostrado na Figura 13.



**Figura 13: Corpos de prova para ensaio de DMA.**

#### 4.1.2. ANÁLISE MÊCANICA DINÂMICA (DMA)

Os ensaios de DMA foram realizados conforme normas ASTM D7028, em um equipamento de análise mecânica-dinâmica Netzch, no Laboratório de Processamento e Caracterização de Materiais (LPCM) da COPPE. O método adotado foi o de flexão em três pontos, a uma taxa de aquecimento de 2 °C/min e frequência de 1 Hz, em intervalos de temperatura de 20 a 200°C e 20 a 260°C. Os corpos de prova foram posicionados no equipamento conforme Figura 14.



**Figura 14: Ensaio de DMA: (a) Equipamento; (b) Corpo de Prova no início do ensaio.**

## 4.2. ENSAIOS DE DESEMPENHO AO FOGO

### 4.2.1. AMOSTRAS

Para os ensaios de resistência ao fogo, foram utilizadas tubulações de compósitos de resina epóxi com fibra de vidro da linha Bondstrand fornecidos pela empresa NOV (National Oil Varco), cuja composição encontra-se na Tabela 4. Estes compósitos sofreram pequenas alterações em sua composição, como por exemplo, acréscimo de fibra de carbono ou de revestimento contra incêndio, em função do tipo de ensaio de resistência ao fogo ao qual seriam submetidos, porém a matriz polimérica de resina epóxi e o reforço com fibra de vidro foram mantidos em todos os tipos de ensaios, sendo a classe de pressão e o tipo de revestimento a principal diferença entre eles.

**Tabela 4: Amostras da série Bondstrand utilizadas nos ensaios de desempenho ao fogo.**

Material	Resina	Fibra	Adesivo	Revestimento para Proteção contra Fogo
2420C	Epóxi	Vidro e Carbono	PSX 60	PSX 111
2416	Epóxi	Vidro	PSX 60	PSX 111
2425	Epóxi	Vidro	Pittchar	Pittchar
2000M	Epóxi	Vidro e Carbono	PSX 60	PSX 111

Com relação ao material, podemos dizer que os dois primeiros dígitos do código equivalem a série, enquanto os dois últimos dígitos representam a pressão que o tubo suporta em bar. O adesivo PSX 60 é uma mistura de epóxi e siloxano usado para unir permanentemente os tubos e as conexões. PSX 111 é um revestimento com formulação própria da NOV, utilizado para proteger as juntas e conexões externamente. Já o Pittchar, é um revestimento intumescente a base de resina epóxi, que pode ser usado tanto como adesivo quanto revestimento para proteção das junções de tubos e conexões de PRFV.

#### 4.2.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO FOGO E TEMPO DE EXPOSIÇÃO

Conforme as normas brasileiras mencionadas no item 3.2, redes de água de combate a incêndio em instalações *onshore* devem ser mantidas constantemente pressurizadas, cheias de água mesmo quando fora de operação, desta forma, sua classe de serviço seria do tipo SF, fluido inicialmente estagnado seguido de água corrente. Por outro lado, o sistema de dilúvio é mantido permanentemente vazio, só havendo fluxo de água em caso de incidentes que requeiram sua utilização, o que corresponderia à classe de serviço DF, tubo inicialmente seco seguido de água corrente. Por este motivo, o tipo de serviço foi escolhido diante da condição de fogo mais provável para cada sistema de combate a incêndio em função da sua localização. Sendo assim, os ensaios de Fogo em Poça, os quais simularam fogo em redes de água de combate a incêndio, foram realizados na condição SF, enquanto os demais ensaios por simularem as condições de fogo em um sistema de dilúvio, utilizaram a condição de serviço DF.

A condição de integridade requerida para tubulação de água de combate a incêndio é a mais rigorosa, condição EA, pois a mesma é considerada um sistema crítico, ou seja, deve executar sua função durante o incêndio, desta forma sua pressão de ensaio deve ser mantida sem vazamento durante ou após o mesmo.

Redes de água de combate a incêndio devem resistir ao fogo enquanto durar o incêndio: porém como não é possível obter um tempo padrão de duração para o mesmo, foram tomados como base os tempos de duração de 30 e 60 minutos, conforme resolução IMO A.753 e tipo de fogo ensaiado.

O ensaio de Jato de Fogo foi realizado nos tempos de exposição de 30 e 60 minutos, porém utilizando materiais diferentes. O ensaio com tempo de exposição de 30 minutos foi realizado com material 2420C, o qual contém fibra de carbono, e resiste a pressões mais elevadas (20 kgf/cm<sup>2</sup>), enquanto o ensaio com tempo de exposição de 60 minutos utilizou um material 2416, que é adequado para classe de pressão de até 16 kgf/cm<sup>2</sup>, a qual, para sistemas de combate a incêndio, já é a máxima pressão admissível.

O ensaio de Chama Impingente visa simular a condição de chama em tubulações de sistema de dilúvio. Como o objetivo deste sistema é um combate imediato ao incêndio, este ensaio foi realizado somente para o tempo de exposição de 30 minutos.

As condições de realização de cada ensaio, de acordo com a norma ABNT NBR 15921-2, podem ser melhor observadas na Tabela 5.

**Tabela 5: Ensaio de resistência ao fogo e tempo de exposição.**

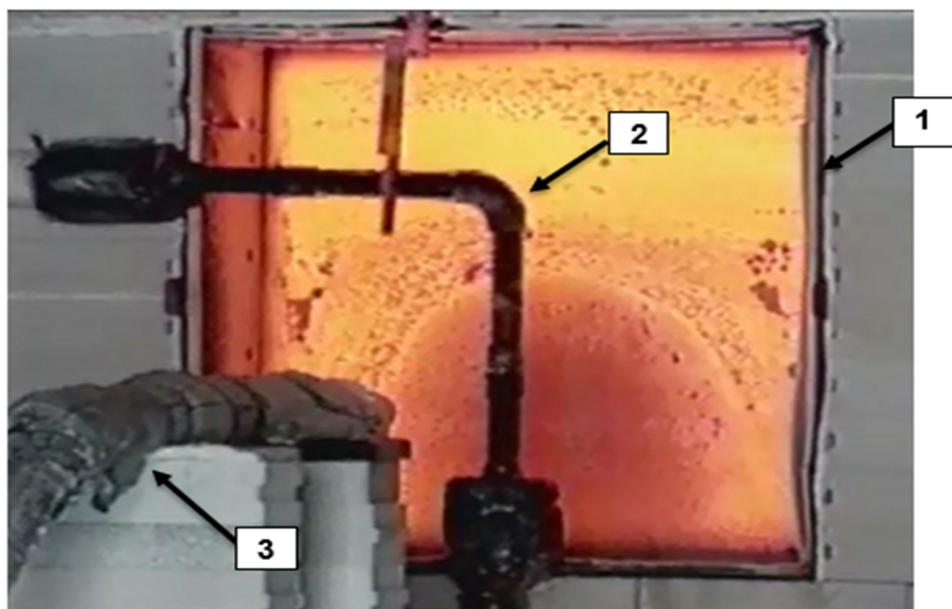
Ensaio	Material	A: Serviço	B: Tipo de Fogo	C: Integridade
1	2420C	Inicialmente seco seguido de água corrente (DF)	Jato de Fogo (JF)	Capaz de manter a pressão de ensaio sem vazamento (EA)
2	2416	Inicialmente seco seguido de água corrente (DF)	Jato de Fogo (JF)	Capaz de manter a pressão de ensaio sem vazamento (EA)
3	2425	Inicialmente estagnado seguido de água corrente (SF)	Fogo em Poça (HF)	Capaz de manter a pressão de ensaio sem vazamento (EA)
4	2000M	Inicialmente seco seguido de água corrente (DF)	Chama Impingente (IF)	Capaz de manter a pressão de ensaio sem vazamento (EA)

#### 4.2.2.1. ENSAIO 1 – MATERIAL 2420C – CONDIÇÃO DF.JF.EA/030

No ensaio 1, foi simulado o caso de sistemas de combate a incêndio sujeitos a Jato de Fogo (JF). O jato de fogo ocorre devido a um vazamento em um sistema pressurizado que ao entrar em contato com uma fonte de ignição se inflama e forma um jato que pode atingir outros equipamentos, é característico de instalações onde se utiliza gás em pressões elevadas, como por exemplo: unidades de processamento de gás e unidades de compressão de gás. No caso de sistemas de combate a incêndio o ensaio realizado poderia simular tanto a condição de fogo em redes de água de combate a incêndio ao redor de unidades de processamento e/ou transferência de gases, quanto à condição de fogo em um sistema de dilúvio de algum equipamento da unidade. Por este motivo, optou-se pela condição mais restritiva de cada sistema adotando-se pressões equivalentes à rede de incêndio (20 kgf/cm<sup>2</sup>) e a condição de serviço do sistema de dilúvio DF (tubo inicialmente seco seguido de água corrente). O tempo de exposição considerado foi de 30

minutos. O ensaio em tubulação de compósito de resina epóxi com fibra de vidro e carbono foi realizado conforme descrito a seguir:

- ✓ Foram utilizadas tubulação e conexões de 4 in (100 mm) da série Bondstrand 2420C;
- ✓ O corpo de prova foi confeccionado com tubos e conexões inteiramente recobertos com revestimento intumescente PSX 111 com espessura de 12 mm;
- ✓ O corpo-de-prova foi devidamente montado em frente a uma caixa de aço aberta com uniões soldadas e estanques, conforme mostrado na
- ✓ Figura 15. A finalidade da caixa é fornecer um anteparo à chama, garantindo que o corpo-de-prova seja envolvido pelo turbilhonamento de fogo e simular os efeitos de erosão;
- ✓ Para a simulação do jato de fogo, foi utilizado um sistema de vaporização e propulsão de propano a uma velocidade de 40 a 60 m/s, dirigido para a “caixa de anteparo”;
- ✓ A contagem de tempo do ensaio foi iniciada após o corpo-de-prova estar totalmente envolvido pelas chamas;
- ✓ O fluxo totalmente controlado foi estabelecido em até 30 s após o início do ensaio e mantido entre 250 e 320 kW/min;
- ✓ O ensaio foi mantido na condição de tubo seco por 5 minutos;
- ✓ Após o período de 5 minutos de ensaio a válvula de retenção localizada em uma das extremidades do tubo foi aberta e o corpo-de-prova foi completamente preenchido com água;
- ✓ De modo a manter o fluxo de água entre 0,25 e 1 m/s, conforme especificado na ABNT NBR 15921-2, foi utilizado o auxílio de uma bomba;
- ✓ A pressão interna do sistema foi mantida em  $20,0 \pm 0,5$  kgf/cm<sup>2</sup> durante o ensaio;
- ✓ Tempo de duração total do ensaio de jato de fogo: 30 min;
- ✓ Após o ensaio de jato de fogo, o corpo de prova já resfriado, foi preenchido com água a uma pressão de 20 kgf/cm<sup>2</sup> durante 15 minutos, para verificação da condição de integridade.



**Figura 15: Ensaio de jato de fogo 1.**

Legenda:

- 1 Caixa de Aço
- 2 Corpo de Prova
- 3 Sistema de Propulsão de Propano (Jato de Fogo)

#### 4.2.2.2. ENSAIO 2 – MATERIAL 2416 – CONDIÇÃO DF.JF.EA/060

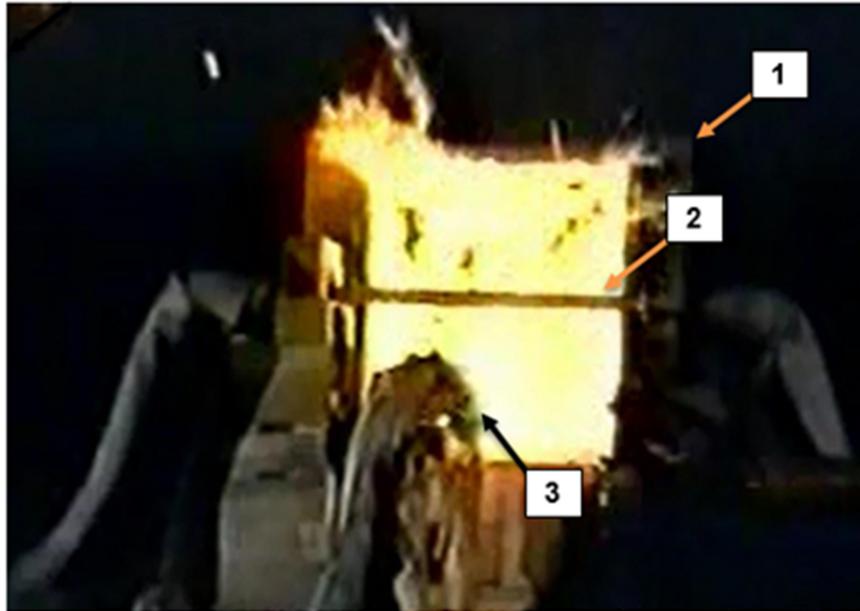
No ensaio 2, foi simulado novamente o caso de sistemas de combate a incêndio sujeitos a Jato de Fogo (JF). Foram mantidas as condições mais restritivas do ensaio anterior, porém devido ao material utilizado não conter fibra de carbono a pressão foi reduzida para 16 kgf/cm<sup>2</sup> a um tempo de exposição de 60 minutos. O ensaio foi realizado conforme descrito a seguir:

- ✓ Foram utilizadas tubulação e conexões de 4 in (100 mm) da série Bondstrand 2416;
- ✓ O corpo de prova foi confeccionado com tubos e conexões inteiramente recobertos com revestimento intumescente PSX 111 com espessura de 7 mm;
- ✓ O corpo-de-prova devidamente montado em frente a uma caixa de aço aberta com uniões soldadas e estanques, conforme mostrado na Figura 16. A finalidade da caixa é fornecer um anteparo à chama, garantindo que o corpo-de-prova seja envolvido pelo turbilhonamento de fogo e simular os efeitos de erosão;

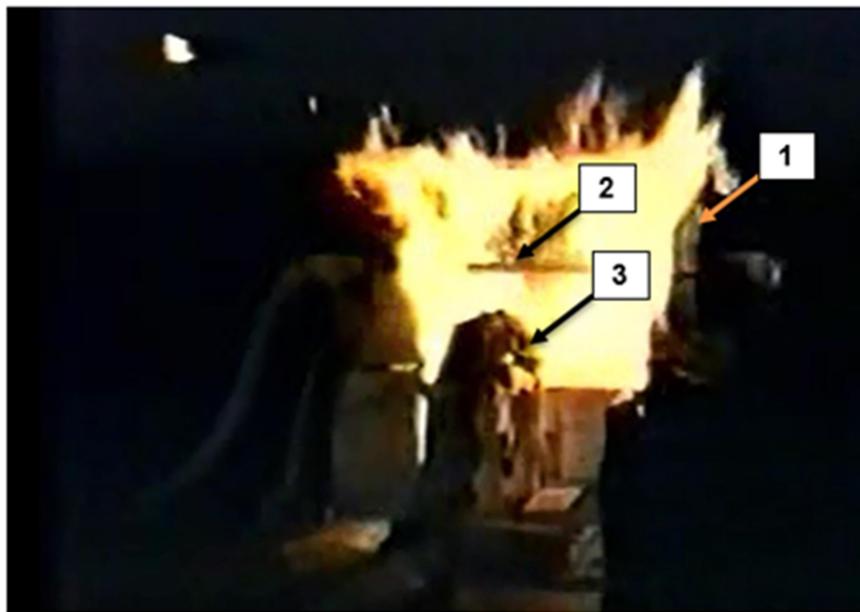
- ✓ Para a simulação do jato de fogo, foi utilizado um sistema de vaporização e propulsão de propano a uma velocidade de 40 a 60 m/s, dirigido para a “caixa de anteparo”, conforme pode ser verificado na Figura 17;
- ✓ A contagem de tempo do ensaio foi iniciada após o corpo-de-prova estar totalmente envolvido pelas chamas;
- ✓ O fluxo totalmente controlado foi estabelecido em até 30 s após o início do ensaio e mantido entre 250 e 320 kW/min;
- ✓ O ensaio foi mantido na condição de tubo seco por 5 minutos;
- ✓ Após o período de 5 minutos de ensaio a válvula de retenção localizada em uma das extremidades do tubo foi aberta e o corpo-de-prova foi completamente preenchido com água;
- ✓ De modo a manter o fluxo de água entre 0,25 e 1 m/s, conforme especificado na ABNT NBR 15921-2, foi utilizado o auxílio de uma bomba;
- ✓ A pressão interna do sistema foi mantida em  $16,0 \pm 0,5$  kgf/cm<sup>2</sup> durante o ensaio;
- ✓ Tempo de duração total do ensaio de jato de fogo: 60 min;
- ✓ Após o ensaio de jato de fogo, o corpo de prova já resfriado, foi preenchido com água a uma pressão de 20 kgf/cm<sup>2</sup> durante 15 minutos, para verificação da condição de integridade.



**Figura 16: Preparação para o ensaio de jato de fogo 2.**



(a)



(b)

**Figura 17: Realização do ensaio de jato de fogo 2.**

**(a) Aplicação da chama; (b) Retorno da Chama.**

Legenda:

- 1 Caixa de Aço (Anteparo)
- 2 Corpo de Prova
- 3 Sistema de Propulsão de Propano (Jato de Fogo)

#### 4.2.2.3. ENSAIO 3 – MATERIAL 2425 – CONDIÇÃO SF.HF.EA/060

Neste ensaio, foi simulada a condição de Fogo em Poça (HF). O incêndio em poça ocorre quando o combustível proveniente de uma liberação empoça e ao queimar produz chamas elevadas. Este tipo de incêndio é característico de instalações onde há processamento e/ou armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis, como por exemplo: refinarias de petróleo e unidades de transferência e estocagem. No caso de sistemas de combate a incêndio o ensaio realizado simularia a condição de fogo em redes de água de combate a incêndio ao redor de áreas de tancagem, processamento e/ou transferência de líquidos inflamáveis e/ou combustíveis. Como as redes de água de combate a incêndio em instalações *onshore* devem ser mantidas constantemente pressurizadas, cheias de água mesmo quando fora de operação, a classe de serviço adotada foi a SF, fluido inicialmente estagnado seguido de água corrente; A condição de integridade EA, sem vazamento durante todo o ensaio e o tempo de exposição de 60 minutos. Os ensaios em tubulação de compósito de fibra de vidro com resina epóxi foi realizado conforme descrito a seguir:

- ✓ Foram utilizadas tubulação e conexões de 12 in (300 mm) da série Bondstrand 2425;
- ✓ O corpo-de-prova foi montado com dois tubos de aproximadamente 1750 mm unidos por uma conexão isolada com revestimento intumescente Pittchar com espessura de 2 mm;
- ✓ O corpo-de-prova foi ensaiado na posição horizontal com aproximadamente 3000 mm no interior do forno e as extremidades do lado de fora conforme mostrado na Figura 18;
- ✓ O ensaio de incêndio em poça foi realizado dentro de um forno com rápido aumento de temperatura simulando a condição de incêndio em hidrocarboneto líquido totalmente desenvolvido, chegando a 1100°C no final do ensaio.
- ✓ Para medir a temperatura no interior do forno, foram utilizados 6 termopares localizados a uma distância de 100 mm do corpo de prova;
- ✓ O ensaio foi mantido na condição de água estagnada por 10 minutos;
- ✓ Após o período de 10 minutos de ensaio a válvula de retenção localizada em uma das extremidades do tubo foi aberta e foi introduzida água a um fluxo entre 0,25 e 1 m/s no corpo de prova;
- ✓ De modo a manter o fluxo de água conforme especificado na ABNT NBR 15921-2, foi utilizado o auxílio de uma bomba;
- ✓ O fluxo de água foi mantido entre 180 e 182 m<sup>3</sup>/h e a velocidade entre 0,64 e 0,65 m/s durante todo o ensaio;

- ✓ A pressão interna do sistema foi mantida em  $7 \pm 0,5 \text{ kgf/cm}^2$ ;
- ✓ Tempo de duração total do ensaio de fogo em poça: 60 min;
- ✓ O corpo de prova foi resfriado a temperatura ambiente e posteriormente com jatos de água, para então ser preenchido com água a uma pressão de  $25 \text{ kgf/cm}^2$  durante 15 minutos, para verificação da condição de integridade.



**Figura 18: Corpo-de-prova antes do ensaio de fogo em poça.**

Legenda:

- 1 Forno
- 2 Conexão isolada com revestimento intumescente
- 3 Corpo de prova na posição horizontal



(a)



(b)

**Figura 19: Corpo-de-prova durante o ensaio de fogo em poça.**  
(a) Vista de dentro do forno; (b) Vista do corpo de prova.

#### 4.2.2.4. ENSAIO 4 – MATERIAL 2000M – CONDIÇÃO DF.IF.EA/030

No ensaio 4, foi simulada a condição de chama direta em um sistema de dilúvio (*water spray*), este tipo de incêndio é característico de unidades de processamento de produtos inflamáveis as quais podem estar presentes em refinarias, estações de bombeamento e transferência de produtos, entre outros. Para tal foi considerada a condição de serviço DF, tubo inicialmente seco seguido de água corrente; O tipo de fogo IF, Chama Impingente; A condição de integridade EA, sem vazamento durante todo o ensaio e o tempo de exposição de 30 minutos. Como as pressões em sistemas de dilúvio são menores que as da rede de combate a incêndio, o ensaio foi realizado com pressão de aproximadamente 3,0 kgf/cm<sup>2</sup>. O ensaio em tubulação de compósito de fibra de vidro com resina epóxi foi realizado conforme descrito a seguir:

- ✓ Foram utilizadas tubulação e conexões de 2 in (50 mm) da série Bondstrand 2000M;
- ✓ O corpo-de-prova foi recoberto com revestimento intumescente com espessura de 2 mm;
- ✓ Para formar a chama, foram utilizadas duas fileiras de cinco queimadores;
- ✓ A distância entre os bicos do queimador e o tubo foi mantida entre 125 ± 10 mm durante o ensaio;
- ✓ Durante o ensaio, foi mantida uma média constante de fluxo de calor de (113,6 ± 11,4) kW/m<sup>2</sup>;
- ✓ Após o período de 5 minutos de ensaio a válvula de retenção localizada em uma das extremidades do tubo foi aberta e o corpo-de-prova foi completamente preenchido com água;
- ✓ De modo a manter o fluxo de água entre 0,25 e 1 m/s, conforme especificado na ABNT NBR 15921-2, foi utilizado o auxílio de uma bomba;
- ✓ A pressão interna do sistema foi mantida em 3,0 ± 0,5 kgf/cm<sup>2</sup> durante o ensaio;
- ✓ A temperatura da chama exterior foi medida por meio de termopares;
- ✓ O ensaio foi realizado conforme mostrado na Figura 20 e Figura 21;
- ✓ Tempo de duração total do ensaio de chama impingente: 30 min;
- ✓ Após o ensaio de chama impingente, o corpo de prova já resfriado, foi preenchido com água nas pressões de 16, 25 e 50 kgf/cm<sup>2</sup> durante 15 minutos cada, para verificação da condição de integridade. Vale lembrar que devido ao material utilizado não ter uma classe de pressão específica, dois últimos dígitos 00, foram adotadas 3 diferentes pressões para avaliação da condição de integridade.

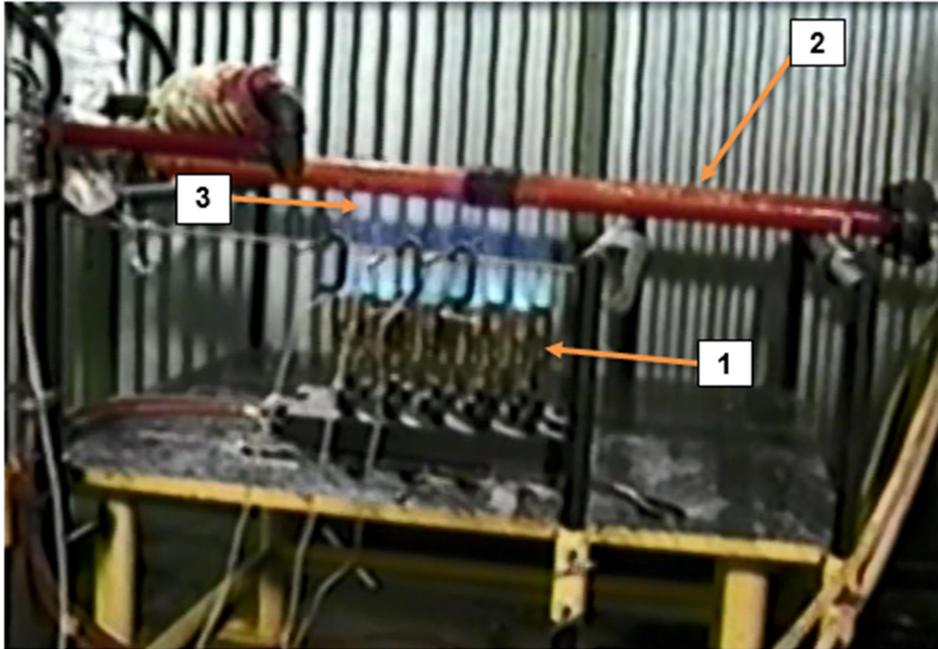


Figura 20: Preparação para o ensaio de aplicação de chama impingente.



Figura 21: Realização do ensaio de aplicação de chama impingente.

Legenda:

- 1 Fileiras de Queimadores (2)
- 2 Corpo de Prova
- 3 Chama
- 4 Termopar

#### 4.2.3. ENSAIO DE REAÇÃO AO FOGO

Os ensaios de reação ao fogo foram realizados com amostras da série Bondstrand 2000M conforme resoluções IMO recomendadas pela ISO 14692-2, conforme mostrado na Tabela 6. A norma ISO 14692-2 é a norma internacional equivalente a ABNT NBR 15921-2 no Brasil, como o material testado é produzido fora do país, seus testes foram baseados na norma internacional.

**Tabela 6: Normas de referência para ensaios de reação ao fogo (ISO 14692-2, 2002).**

D: Propagação de Fogo e Liberação de Calor		E: Toxicidade e Fumaça	
1	A propagação de fogo não é permitida	1	Toxicidade e emissão de fumaça não são permitidas
	Áreas confinadas onde a propagação de chama deve ser limitada a:		Áreas confinadas onde níveis exigidos não podem exceder:
2	Resolução IMO A.653(16) $Q_{CFE} \geq 20 \text{ kW/m}^2$ , $Q_{sb} \geq 1,5 \text{ MJ/m}^2$ , $Q_t \leq 0,7 \text{ MJ}$ , $q_p \leq 4,0 \text{ kW}$	2	$D_m < 400$ $CO < 1450 \text{ } \mu\text{g/g}$ , $HCl < 600 \text{ } \mu\text{g/g}$ , $HCN < 140 \text{ } \mu\text{g/g}$ , $HF < 600 \text{ } \mu\text{g/g}$ , $NO_x < 350 \text{ } \mu\text{g/g}$ , $HBr < 600 \text{ } \mu\text{g/g}$ , $SO_2 < 120 \text{ } \mu\text{g/g}$
3	Áreas onde a propagação de chama precisa ser limitada e quantificada, usando os procedimentos da: Resolução IMO A.653(16)	3	Os níveis precisam ser quantificados e aceitáveis dentro do tempo de evacuação: IMO MSC.61(67)(Parte 2, Anexo 1)
4	Nenhuma exigência quanto a propagação de chama	4	Níveis em áreas abertas sem restrição de toxicidade ou densidade de fumaça

##### 4.2.3.1. ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE CHAMA

O ensaio de propagação de chama foi realizado conforme ASTM D635, esta norma é equivalente a resolução IMO A.653 recomendada pela ISO 14692-2, sendo que enquanto na primeira o corpo de prova é testado na posição horizontal, na segunda o ensaio é realizado na posição vertical.

No ensaio de propagação de chama, o corpo-de-prova do material a ser ensaiado é suportado horizontalmente numa extremidade. A extremidade livre é exposta a uma chama de gás durante um período de 30 s. Após este período, são medidos os tempos de queima para a extensão de chama de 25 e 100 mm. Se a amostra não atingir uma extensão de

propagação de chama final de 100 mm, serão medidos o tempo e a extensão da chama e será calculada uma taxa de propagação de chama média para o material. Os ensaios de propagação de chama foram realizados conforme descrito a seguir:

- ✓ Foram utilizados 10 corpos-de-prova de 4 in (100 mm) da série Bondstrand 2000M;
- ✓ Os corpos-de-prova possuíam tamanho nominal de 125 mm x 13 mm e espessura de 5,2 mm;
- ✓ Os corpos-de-prova foram mantidos durante 48 horas antes do teste sob temperatura de  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa de  $50 \pm 5 \%$ ;
- ✓ Os corpos-de-prova foram assinalados com duas linhas perpendiculares ao eixo longitudinal em 25 e 100 mm a partir da extremidade em que seria inflamado;
- ✓ O corpo-de-prova foi preso num suporte com o seu eixo longitudinal na horizontal e o seu eixo transversal inclinado a  $45^{\circ}$ ;
- ✓ O queimador foi colocado na posição vertical e a vazão de gás foi ajustada para produzir uma chama azul de 20 mm de altura;
- ✓ O queimador foi posicionado de modo que a chama de ensaio colidisse com a extremidade livre do corpo-de-prova a uma profundidade de aproximadamente 6 mm;
- ✓ A chama foi aplicada durante 30 s na mesma posição;
- ✓ Na Figura 22 são mostrados os corpos de prova utilizados no ensaio.

#### 4.2.3.2. ENSAIO DE TOXICIDADE E FUMAÇA

Segundo a ISO 14692-2, os ensaios de toxicidade e fumaça deveriam ser realizados conforme a IMO MSC.61(67) parte 2, anexo 1. Porém, de acordo com a resolução IMO FTP 2010, válida a partir de 1 de Julho de 2012, não é necessária a realização de testes de toxicidade e fumaça quando o calor total ( $Q_t$ ) é menor que 0,2 MJ e o calor de pico ( $Q_p$ ) é inferior a 1,0 kW. Desta forma como os valores encontrados para o material da série Bondstrand 2000M cumprem esta regra, não foi necessária a realização do referido teste.

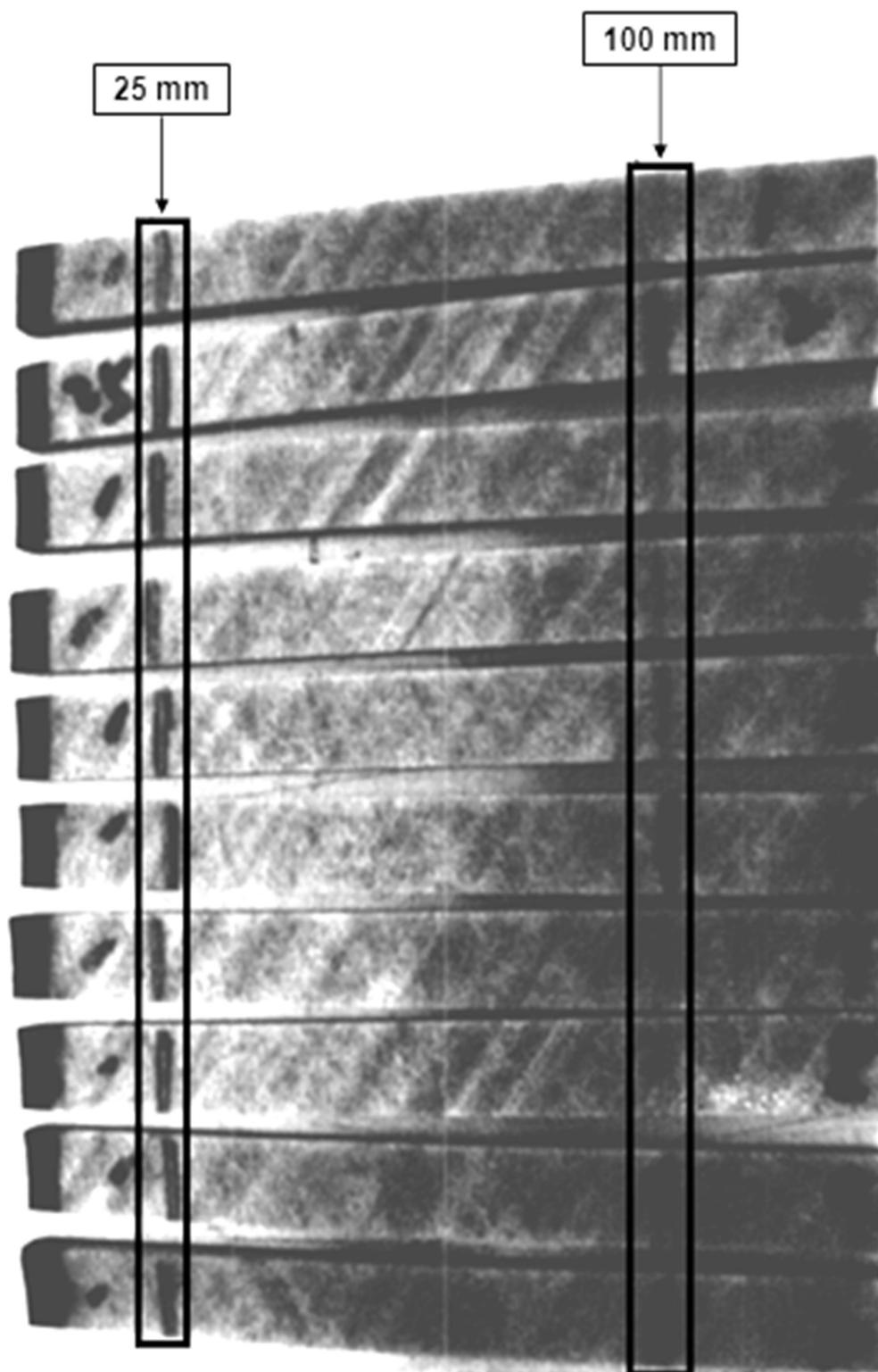
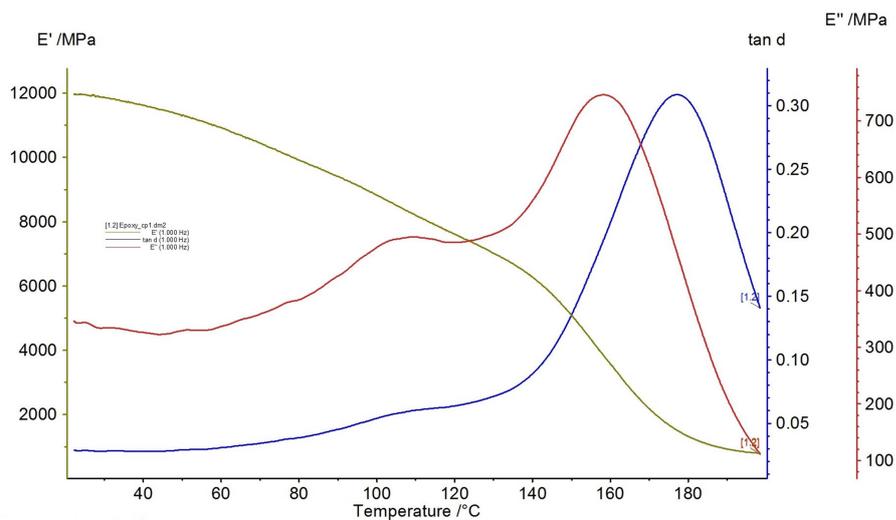


Figura 22: Corpos-de-prova utilizados no ensaio de reação a chama.

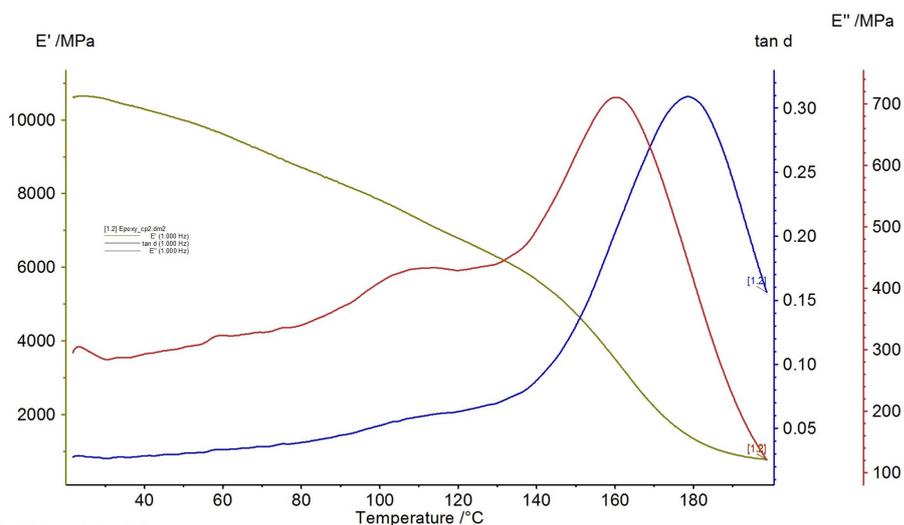
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO - DMA

O compósito de resina epóxi com fibra de vidro, da série Bondstrand 2000M, foi caracterizado através de ensaio de DMA. Na Figura 23 e Figura 24, pode ser observado os resultados obtidos para os corpos de prova 1 e 2.

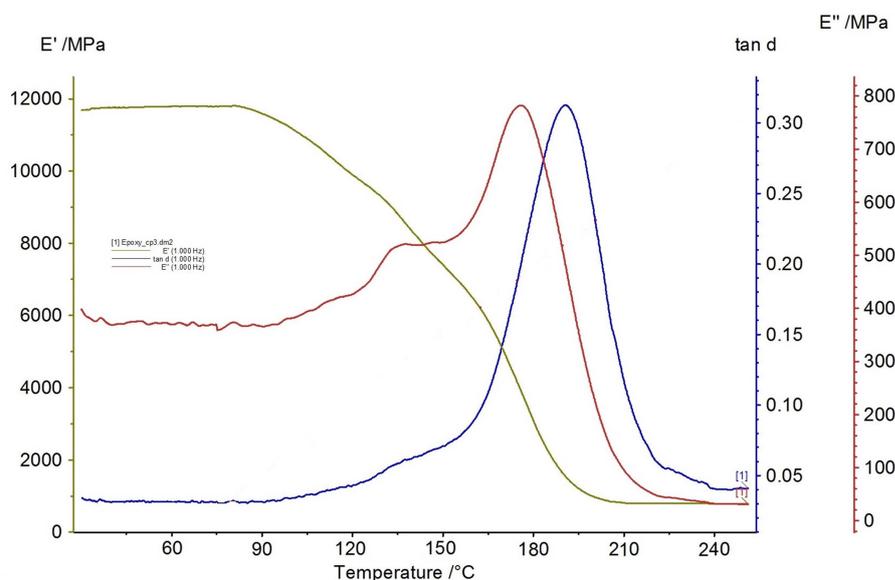


**Figura 23: Curvas de DMA para o módulos de armazenamento (E'), perda (E'') e tangente de perda (tan d) – Corpo de Prova 1**



**Figura 24: Curvas de DMA para o módulos de armazenamento (E'), perda (E'') e tangente de perda (tan d) – Corpo de Prova 2**

Através da análise da Figura 23 e da Figura 24, é possível verificar que o intervalo de temperatura utilizado (20 a 200°C) não possibilitou visualizar o final das curvas dos módulos de armazenamento, perda e tan delta. Por este motivo, para o ensaio do terceiro corpo de prova, o intervalo de temperatura foi alterado para 25 a 260°C, possibilitando a visualização completa de todos os módulos conforme mostrado na Figura 25.



**Figura 25: Curvas de DMA para o módulos de armazenamento ( $E'$ ), perda ( $E''$ ) e tangente de perda ( $\tan d$ ) – Corpo de Prova 3**

Através destes ensaios foi possível obter a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) do compósito de resina epóxi com fibra de vidro utilizado, a partir da interseção das duas linhas tangentes à curva do módulo de armazenamento, conforme ASTM D7028. Com o auxílio do Excel, a primeira tangente foi determinada pela temperatura antes da transição (TA), enquanto a segunda tangente foi determinada pelo centro do ponto de inflexão do módulo de armazenamento (TB), conforme podemos verificar na Figura 26, Figura 27 e Figura 28. A partir destas Figuras, podemos identificar que a temperatura de transição vítrea do compósito utilizado encontra-se na faixa de 140 a 143°C.

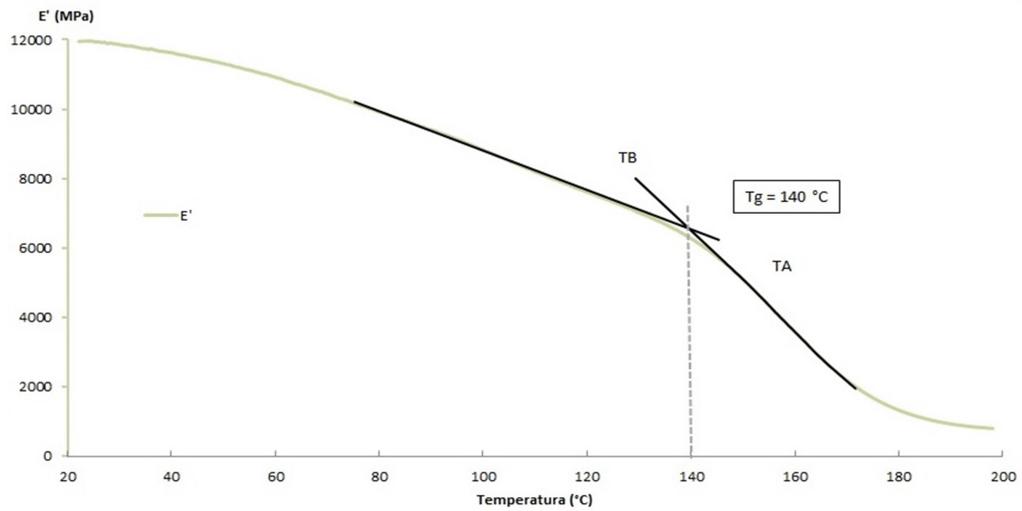


Figura 26: Determinação da Temperatura de Transição Vítreia ( $T_g$ ) – Corpo de Prova 1

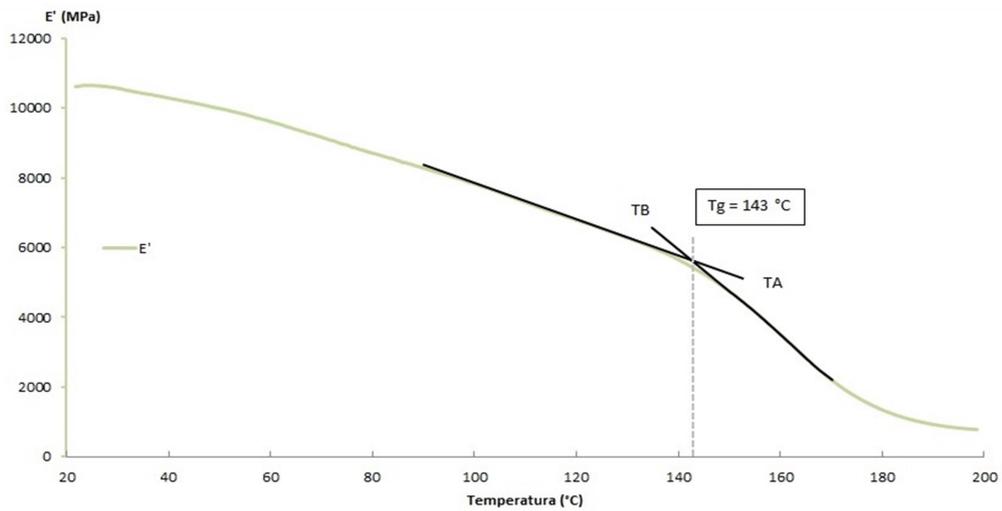


Figura 27: Determinação da Temperatura de Transição Vítreia ( $T_g$ ) – Corpo de Prova 2

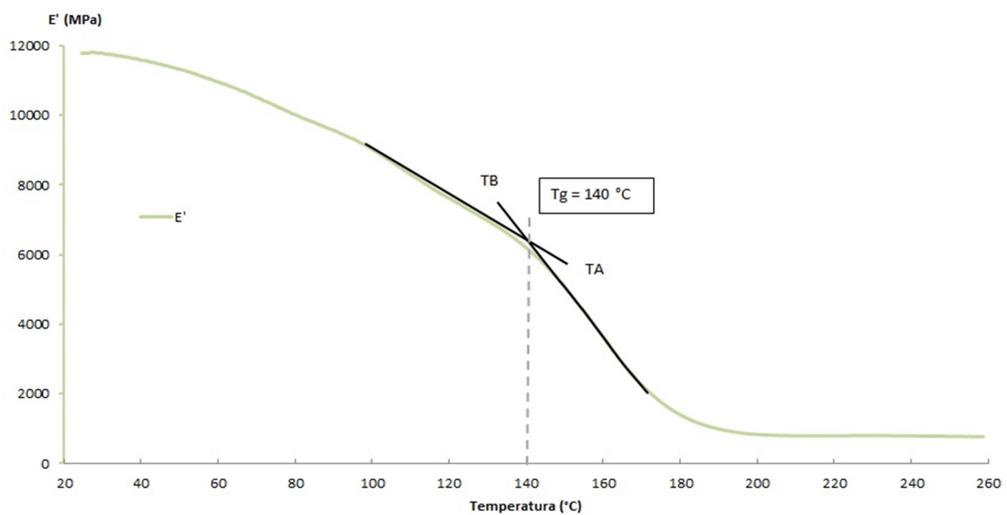


Figura 28: Determinação da Temperatura de Transição Vítreia ( $T_g$ ) – Corpo de Prova 3

### 5.1.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS COM RELAÇÃO A RESINA EPÓXI

Através dos gráficos obtidos pelos ensaios de DMA, pode-se observar que a presença das fibras tende a aumentar o valor do módulo de armazenamento ( $E'$ ), quando comparado aos gráficos do módulo de armazenamento de resinas epóxi mostrados nas Figuras de 9 a 11. Por outro lado, não é possível relacionar diretamente a adição das fibras com uma tendência de alteração da  $T_g$ , visto que as temperaturas encontradas para o compósito (140 a 143°C) são superiores as encontradas para resina epóxi apresentada na Figura 9 e Figura 10 ( $T_g$  entre 70 e 100°C) porém é inferior a  $T_g$  da resina epóxi mostrada na Figura 11 ( $T_g$  aproximadamente 200°C), o que ocorre devido ao fato da  $T_g$  também ser influenciada por outros fatores, como por exemplo: tipo de cura da resina e aditivos.

### 5.2. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO FOGO E TEMPO DE EXPOSIÇÃO

A Tabela 7 apresenta a classificação A-B-C/xxx dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibra de vidro, e em alguns casos carbono, quanto aos requisitos de resistência ao fogo e tempo de exposição conforme ABNT NBR 15921.

**Tabela 7: Classificação conforme ensaio de resistência ao fogo e tempo de exposição.**

Material	A	B	C	XXX
2420C	DF	JF	EA	030
2416	DF	JF	EA	060
2425	SF	HF	EA	060
2000M	DF	IF	EA	030

Através da Tabela 7 podemos verificar que todos os compósitos testados atenderam aos requisitos de desempenho ao fogo aos quais foram submetidos.

Para o ensaio de Fogo em Poça, como o material para classe de pressão mais elevada (25 kgf/cm<sup>2</sup>) resistiu aos 60 minutos, não foi necessária a realização de ensaios com tempo de duração de 30 minutos.

### 5.2.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS COM RELAÇÃO ÀS CLASSIFICADORAS

De modo a obter uma avaliação mais crítica dos resultados obtidos, pode ser feita uma associação dos mesmos com as normas e resoluções seguidas pelas sociedades classificadoras como a resolução IMO A.753 e as regras ABS.

De acordo com a resolução IMO A.753, o requisito de fogo indicado para tubulações de rede de água de combate a incêndio é o L1, equivalente a classificação DE.HF.EA/060 da ABNT NBR 15921.

Já as regras da ABS, demandam a aplicação de tubos L1, mas oferecem a alternativa de uso do tubo L3, considerando que estes satisfaçam os requisitos indicados, dentre eles manter a tubulação sempre cheia de água e pressurizada.

Vale lembrar que o teste L1 da IMO A.753 é considerado muito severo, inclusive com a possibilidade de uma tubulação de aço carbono não ser aprovada. Para o teste L2, também se considera a possibilidade de uma tubulação de liga Cu-Ni, que costuma ser utilizada em linhas de incêndio em instalações *offshore*, não ser aprovada. Sendo atualmente o L3, o nível de resistência ao fogo da grande maioria dos tubos comerciais.

Como a rede de água para combate a incêndio em sistemas *onshore* é mantida permanentemente cheia e pressurizada, a condição SF.HF.EA/060 atende os requisitos de resistência ao fogo necessários para este sistema de acordo com a ABS.

Para os casos de sistema de dilúvio, o qual é mantido seco quando fora de uso, com fluxo de água após alguns minutos quando acionado e onde o tipo de fogo mais provável é a chama impingente, a condição DF.IF.EA/030 corresponderia ao nível L3 da IMO A.753 com um resultado até superior com relação à integridade da tubulação.

As condições DF.JF.EA/030 e DF.JF.EA/060 atenderiam sistemas de combate a incêndio próximos a instalações de processamento e/ou transporte de gás em pressões elevadas e, apesar de não estarem associadas diretamente aos requisitos da IMO A.753 e ABS, atendem aos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 15921.

### 5.3. ENSAIOS DE PROPAGAÇÃO DE CHAMA

Na Tabela 8 são mostrados os resultados para cada corpo de prova dos ensaios de propagação de chama dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibra de vidro conforme ASTM D635, enquanto na Tabela 9 é apresentado um resumo dos mesmos.

**Tabela 8: Ensaios de propagação de chama.**

Amostra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média	Desvio Padrão
Tempo de propagação de chama 25 mm $t_1(s)$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tempo de propagação de chama 100 mm $t_2(s)$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tempo de extinção da propagação de chama $t_2(s)$	55	41	55	55	32	31	56	41	44	46	45,6	7,8
Tempo final da propagação chama $t_f=t_2-t_1 (s)$	55	41	55	55	32	31	56	41	44	46	45,6	7,8
Tempo depois da chama $t_d=t_2-30 (s)$	25	11	25	25	2	1	26	11	14	16	15,6	7,8
Comprimento queimado a partir da borda $l (mm)$	8	9	10	11	9	10	9	10	9	10	9,5	0,7
Comprimento queimado além de 25 mm $L = l - 25 (mm)$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O comprimento queimado atingiu a marca de 100 mm ? (S / N)	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	-	-
Taxa de Queima 60L / ( $t_f$ )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Tabela 9: Resultado final do ensaio de propagação de chama**

Descrição	Unidade	Resultado
Número de corpo-de-prova	-	10
Tempo que a frente de chama passou 25 mm	s	Frente de chama não chegou a 25 mm
Tempo que a frente de chama passou 100 mm	s	Frente de chama não chegou a 100 mm
Comprimento queimado	mm	9,5
Taxa de Queima	mm/min	Não Obtida

Conforme observado na Tabela 9, a frente de chama não chegou a 25 mm em nenhum dos corpos-de-prova ensaiados. A média de comprimento queimado a partir da borda foi de 9,5 mm e a média de tempo de extinção da chama após a retirada da fonte de ignição foi de 16 segundos.

Segundo ASTM D635, um material pode ser classificado como HB (Horizontal Burning Test) quando atende um dos requisitos a seguir:

- ✓ Quando não há sinais visíveis de combustão após a remoção da fonte de ignição;
- ✓ Quando a frente de chama não ultrapassa a marca de referência de 25 mm;
- ✓ Quando a frente de chama ultrapassa a marca de referência de 25 mm, mas não alcança a marca de referência de 100 mm;
- ✓ Quando a frente de chama alcança a marca de referência de 100 mm e a taxa de queima linear não ultrapassa 40 mm/min para corpos-de-prova com espessura entre 3 e 13 mm ou 75 mm/min para corpos-de-prova com espessura menor que 3 mm ;

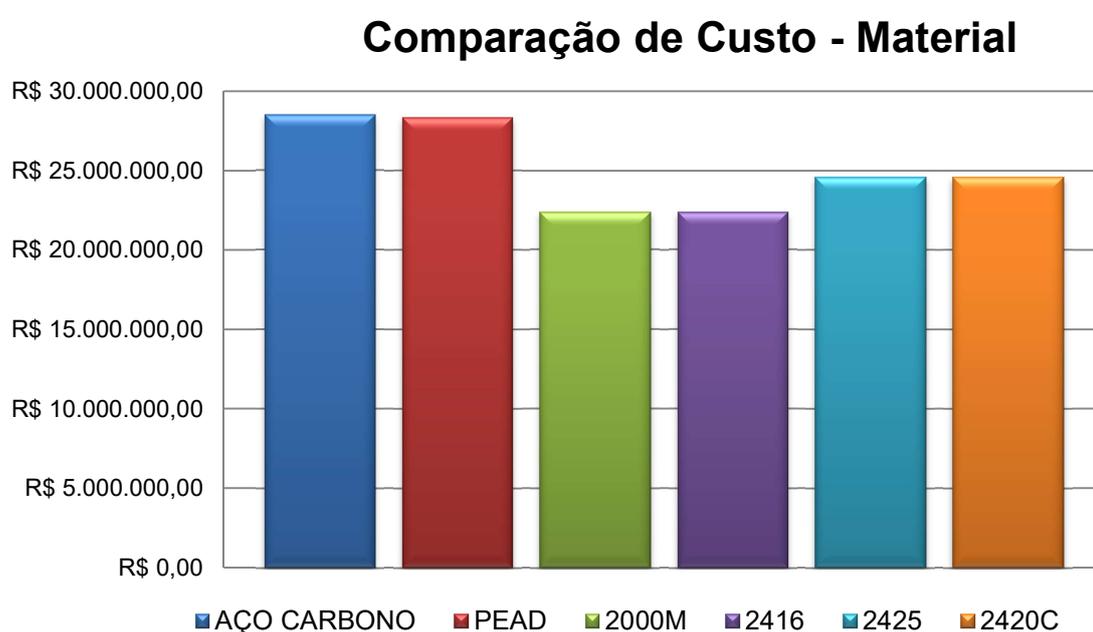
Desta forma os compósitos de resina epóxi com fibra de vidro da série Bondstrand S2000M podem ser classificados como HB conforme ASTM D635, pois a frente de chama não ultrapassou a marca de 25 mm.

Pode ser destacado ainda que apesar dos testes de propagação de chama terem sido realizados apenas em amostras da série Bondstrand 2000M, esta classificação poderia ser considerada para os demais produtos da série Bondstrand uma vez que a principal diferença deste para os demais é com relação a classe de pressão cuja a principal

alteração é a espessura e o tipo de revestimento usado que tem como função principal aumentar a resistência ao fogo e retardar a chama.

#### 5.4. ANÁLISE DE CUSTO

Na Figura 29, podemos verificar o custo médio de uma rede de água para combate a incêndio de uma refinaria de médio porte, para os materiais compósitos analisados e para os materiais utilizados atualmente em redes de água para combate a incêndio, como o aço carbono e o PEAD.



**Figura 29: Análise de custo de rede de água de combate a incêndio para uma refinaria de médio porte.**

Através desta análise podemos verificar que o custo de utilização dos compósitos 2000M e 2416 é em média 27% inferior ao custo dos materiais utilizados atualmente como aço carbono e PEAD, enquanto o custo dos materiais adequados a uma classe de pressão mais elevada como o 2425 e 2420C, é em média 16% inferior ao do aço carbono e 15% inferior ao do PEAD. Vale ressaltar que este custo representa um preço médio e irá variar em função da quantidade de revestimento necessária para a tubulação em função do tipo de fogo a qual a mesma estará sujeita.

Com relação ao PEAD, podemos destacar que devido ao mesmo ser fabricado usualmente para tubulações de até 12", acima deste diâmetro foi considerada a utilização de aço carbono, o que elevou significativamente o custo deste material.

Deve ser observado também que esta análise considerou apenas o custo da tubulação e acessórios sem levar em conta o custo de instalação e o custo de manutenção da rede. Se considerarmos que o material compósito de matriz polimérica é mais leve e não apresenta problemas de corrosão, podemos concluir que a redução do custo total com a sua utilização é ainda maior, pois o mesmo necessitará de menos estruturas de suportação e reduzidos servios de manuteno e troca de trechos quando comparado ao ao carbono. Com relao ao PEAD, haverá uma economia de instalao, pois não será necessária escavao para enterrá-lo além de facilidade de manuteno e deteco de vazamentos.

## 6. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados apresentados e a classificao obtida, pode-se dizer que os compósitos de matriz polimérica (epóxi) reforados com fibra de vidro, estão aptos para serem utilizados em sistemas de água para combate a incêndio aéreos, possibilitando assim   reduo de custo total, o aumento do tempo de vida útil e a reduo de peso em relao aos materiais utilizados atualmente, como ao carbono.

Com relao ao PEAD (Polietileno de alta densidade linear), a grande vantagem seria a possibilidade de utilizao aérea, o que facilita a inspeo e deteco de vazamentos, reduzindo o custo de instalao e manuteno.

Todas as composio es testadas neste trabalho (Bondstrand 2420C, 2416, 2425 e 2000M), apresentaram desempenho satisfatório nos ensaios de resistência ao fogo, porém cada uma destina-se a uma aplicao específica. De forma a prever o material adequado para os sistemas de água para combate a incêndio, deve ser realizada previamente uma análise de risco a qual auxiliar  na identificao do tipo de fogo ao qual a mesma estará sujeita. Desta forma, evita-se o uso de um material mais resistente e conseqüentemente mais caro, adequado para jato de fogo, em locais onde há maior probabilidade de incêndio por chama impingente.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDRE, M.; DUBOIS, P.; "Polymer-layered silicate nanocomposites: Preparation, properties and uses of a new class of materials", **Materials Science and Engineering**, n. 28, PP.1-63, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15921**: Indústria de Petróleo e Gás Natural – Tubulação de Compósito. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17505-7**: Armazenamento de Líquidos Inflamáveis e Combustíveis – Parte 7: Proteção Contra Incêndio para Parques de Armazenamento com Tanques Estacionários. Rio de Janeiro, 2013.

AMERICAN BUREAU OF SHIPPING. **ABS**: Rules for Building and Classing – Facilities on Offshore Installations. New York, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D635**: Standard Test Method for Rate of Burning and/or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position. Pennsylvania, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7028**: Standard Test Method for Glass Transition Temperature (DMA T<sub>g</sub>) of Polymer Matrix Composites by Dynamic Mechanical Analysis (DMA). Pennsylvania, 2015.

BERRY, NARA G.; BARCIA, FÁBIO L.; SOARES, BLUMA G.; MOREIRA, ANA CRISTINA F.; AMARAL, THIAGO PAULO; d'ALMEIDA, JOSÉ ROBERTO M. "Avaliação da Degradação Térmica da Resina Epóxi Pura e Modificada". **6ª COTEQ - Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos**. Salvador, Bahia, 19 a 21 de agosto de 2002.

CANEVAROLO JR., SEBASTIÃO V. **Ciência dos Polímeros: Um Texto Básico para Tecnólogos e Engenheiros**. 2 ed. São Paulo, Artliber, 2006.

CHAWLA, KRISHAN K. **Composite Materials Science and Engineering**. 1 ed. New York, Springer-Verlag, 1987.

COELHO, JÓAO LUIZ VAZ. **Efeitos da Combinação entre Velocidade de Carregamento e Temperatura nas Propriedades Mécnicas de Compósitos "PRFV"**. Dissertação de Mestrado, Programa Francisco Eduardo Mourão Saboya de Pos-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2012.

COMISSÃO DE NORMALIZAÇÃO TÉCNICA (CONTEC). **N-1203**: Projeto de Sistemas Fixos de Proteção Contra Incêndio em Instalações Industriais Terrestres. Rio de Janeiro, 2013.

DENG, SHIQIANG; HOU, MENG; YE LIN. "Temperature-dependent elastic moduli of epoxies measured by DMA and their correlations to mechanical testing data". **Science Direct- Polymer Testing**. n. 26, pp. 803-813, 2007.

FILHO, JÚLIO JERÔNIMO HOLTZ SILVA. **Reforço à Torção de Vigas de Concreto Armado com Compósitos de Fibras de Carbono**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

FIGLIOLI, JULIANO. **Utilização de Fibras de Carbono e de Fibras de Vidro para Reforço de Vigas de Madeira**. Dissertação de Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

GARAY, ANDRÉ C.; SAMPERT, FERNANDO; OLIVEIRA, FELIPE H.; SOUZA, JEFERSON A.; AMICO, SANDRO C. "Estudo das características térmicas da resina éster-vinílica". **11º Congresso Brasileiro de Polímeros**. Campos do Jordão, São Paulo, Brasil, 16-20 outubro 2011.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **IMO A.753**: Guidelines for the Application of Plastic Pipes on Ships. London, 1993.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **IMO A.653**: Recommendation on Improved Fire Test Procedures for Surface Flammability of Bulkhead, Ceiling and Deck Finish Materials. London, 1989.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **IMO MSC.61(67)**: International Code for Application of Fire Test Procedures — Annex 1 — Part 2: Smoke and Toxicity Test. London, 1996.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **IMO FTP 2010**: International Code for Application of Fire Test Procedures. London, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 5658-2**: Reaction to fire tests — Spread of flame — Part 2: Lateral spread on building and transport products in vertical configuration. 2 ed. Switzerland, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 5659-2**: Plastics — Smoke generation — Part 2: Determination of optical density by a single chamber test. 3 ed. Switzerland, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 6721-1**: Plastics – Determination of dynamic mechanical properties – Part: 1 General Principles”, International Organization for Standardization. 3 ed. Switzerland, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14692-2**: Petroleum and Natural Gas Industries – Glas-reinforced Plastics (GRP) Piping – Part: 2 Qualification and Manufacture”, International Organization for Standardization. 1 ed. Switzerland, 2002.

HARPER, CHARLES A.; KATTAS, LOU; GASTROCK, FRED; LEVIN, INESSA; CACCIATORE, ALLISON. “Plastic Additives”, **Modern Plastics Handbook**. 1 ed. New York, McGraw Hill, 1999.

LAFDI, KHALID; WRIGHT, MAURICE A. “Carbon Fibers”, **Handbook of Composites**. 2 ed. Cambridge, Chapman & Hall, 1998.

LARENA, A.; DE LA ORDEM, M.U.; URREAGA, J.M. “Effect of E-glass Short Fiber on the Degradation of Polypropylene”, **Polymer Degradation and Stability**, v.36, n. 1, pp. 81-84, 1992.

LORANDI, NATÁLIA P.; CIOFFI, MARIA ODILA H.; ORNAGHI JR., HEITOR. “Análise Dinâmico-Mecânica de Materiais Compósitos Poliméricos”, **Scientia Cum Industria (SCI. CUM IND.)**, v. 4, n. 13, pp. 48-60, 2016.

MAZUMDAR, SANJAY K. **Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering**. 1 ed. Florida, CRC Press, 2002.

McDERMOTT, J. “The structure of the advanced composite industry”, **Advance Composites Bluebook**, 1990.

MI, Y.; GUO, Q.; CHEN, X. “Bamboo fiber-reinforced polypropylene composites: A study of the mechanical properties”, **Journal of Applied Polymer Science**, v. 69, pp. 1891-1899, 1998.

NETO, CLARO S. “DMA – O que é preciso saber antes de sua utilização (parte III)”, **Brazilian Journal of Thermal Analysis**, v. 3, n. 1-2, pp 26E-29E, 2014.

NETO, FLAMÍNIO LEVY; PARDINI, LUIZ CLAÚDIO. **Compósitos Estruturais**. 1 ed. São Paulo, Edgar Blucher, 2006.

NOV (National Oil Varco), Fiberglass Reinforced Piping Systems, **Engineering & Piping Design Guide**, NOV Fiber Glass Systems, 2011.

PENN, L. S.; WANG H. "Epoxy Resins", **Handbook of Composites**. 2 ed. Cambridge, Chapman & Hall, 1998.

SOARES, C.M; MARTINS, J. G. **Reforço de Estrutura de Betão Armado com CFR**. Série Reabilitação, 1 ed., 2006.

WARD, I. M.; SWEENEY, J. **An Introduction to the Mechanical Properties of Solid Polymers**. 2 ed. Chichester, John Wiley & Sons, 2004.

WENDHAUSEN P. A. P.; RODRIGUES G. V.; MARCHETTO O. **Análises Térmicas**. Apostila do Curso de Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

VAUGHAN, DENNIS J. "Fiberglass Reinforcement", **Handbook of Composites**. 2 ed. Cambridge, Chapman & Hall, 1998.

VIEIRA, JAIR LOT. **Regulamento de Segurança Contra Incêndio das edificações e áreas de risco de São Paulo**. 1 ed. São Paulo, Edipro, 2011.