



## Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: Avaliação das propriedades mecânicas em compósitos CRFC para uso aeroespacial

Bolsista: **GUILHERME** Tavares Felipe de Oliveira

Orientador(a): **RONALD** Izidoro Reis

Período a que se refere o relatório: Agosto de 2013 a Julho de 2014

### Resumo

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar as propriedades mecânicas, em especial, de cisalhamento, do compósito CRFC-SiC e CRFC-Si (Carbono – Carbetto de Silício e Carbono – Silício). Para obtenção dos mesmos, realizou-se o processamento desses materiais, iniciando-se com a preparação da fibra e resina. Na incorporação de resina (matriz) na fibra, utilizou-se o processo via impregnação líquida manual. Após a impregnação da fibra com resina, realizou-se a cura do laminado. No qual leva à formação de um material compósito com propriedades específicas, que derivam de seus materiais precursores.

Do laminado foram retirados corpos de prova, os quais foram instrumentados com “*strain gage*” para medição da tensão e deformação obtida no ensaio de cisalhamento Iosipescu.

## 1. INTRODUÇÃO

O alto desempenho térmico e mecânico dos compósitos de Carbono Reforçados com Fibras de Carbono (CRFC) tem contribuído para a utilização destes materiais em sistemas aeroespaciais. O Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA) tem desenvolvido estudos visando à utilização de compósitos CRFC como materiais isolantes e refratários com o objetivo de tomar reutilizáveis partes do sistema propulsor utilizadas em lançamentos de satélites em órbita terrestre.

Os compósitos são considerados materiais multifásicos, onde uma das fases é chamada reforço sendo ela responsável por atender aos requisitos estruturais do compósito, proporcionando resistência ao esforço mecânico. A outra fase denomina-se matriz, e tem como função a adesão dos reforços, para absorção e transferência dos esforços. Diante dessa combinação é possível se obter um material com características diversas: tenaz, leve, rígido, dúctil, elástico, entre outros.

O ensaio mecânico que será utilizado na caracterização do compósito será o de cisalhamento Iosipescu. Esse ensaio foi escolhido pois permite que as medições de resistência e módulo aconteçam em um mesmo ensaio além do fato de ser muito versátil e confiável. Permitindo também a determinação de propriedades de cisalhamento nas três direções do plano do material. Outra vantagem do ensaio é a condição de esforço cortante puro e uniforme na região central do corpo-de-prova.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 1.1 Materiais

A fibra de carbono utilizada no desenvolvimento experimental deste trabalho foi a *Plain Weave* com orientação **bidirecional (Fibra Plain )**

A tabela 2.1 apresenta as características técnicas da fibra de carbono segundo especificação do fabricante.

**Tabela 2.1** – Propriedades da fibra de carbono segundo especificação do fabricante.

	Fabricante	Propriedades	Unidades	Valores
Tecido Plain 282	Hexcel Fabrics	Gramatura	$\text{g/m}^2$	196
		Filamentos/cabo		3000
		Espessura	mm	0,22
		Massa específica	$\text{g/cm}^3$	1,78

O polímero utilizado para impregnação dos tecidos e como precursor da matriz carbonosa do compósito CRFC foi a resina fenólica do tipo resol CR-2830 fornecida pela Crios Resinas Sintéticas S/A.

A tabela 2.2 apresenta as características físico-químicas da resina utilizada no presente trabalho, segundo especificação do fabricante.

**Tabela 2.2-** Características segundo o fabricante da resina resol CR-2830.

Características	pH	Densidade	Temp. Ebulição	Teor de Sólidos	Viscosidade Brookfield MPa.s
Valores	7,5-8,5	1,17-1,21	100°C	58,98%	1,65 (20°C)

O Carbetto de silício (SiC) utilizado na mistura com a fenólica foi o SiC 1500 fornecido pela empresa Micro Service Ind. Quim. Ltda de Diadema – SP.

A tabela 2.3 apresenta as características técnicas do Carbetto de silício segundo especificação do fabricante.

**Tabela 2.3** – Características do Carbetto de silício segundo especificação do fabricante.

Características	Diâmetro médio $\mu\text{m}$	Densidade aparente $\text{g}/\text{cm}^3$	Densidade $\text{g}/\text{cm}^3$	Umidade %	Decomposição térmica °C
Valores	1,79	0,5	3,20	Max. 0,3	Acima 2.300

O silício (Si) utilizado na mistura com a fenólica foi o Si AX 10 de elevada pureza (99,995%) fornecido pela empresa H. C. STARK, com tamanho médio de partícula de  $4,5\mu\text{m}$ , densidade teórica de  $2,30\text{ g}/\text{cm}^3$ .

## 2.2 Equipamento

Para a obtenção dos laminados de CRFC-SiC e CRFC-Si foi utilizada a Prensa Hidráulica com Aquecimento Solab cuja temperatura de operação é de  $60^\circ\text{-}180^\circ\text{C}$  em conjunto com a bomba de vácuo Cragwill Modelo T-54 do Laboratório Compósito de Matriz Polimérica (LCMP), da Subdivisão de Processamento de materiais (AMR-P), localizada na Divisão de Materiais (AMR) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE). O laminado depois de curado foi cortado no mesmo laboratório utilizando-se uma Serra de Corte à água; feito isso foi carbonizado no Forno EDGCONSP utilizando-se Argônio como gás de proteção do sistema proteção, após carbonização, o corpo-de-prova passou pelo processo de “Grafitização”, o qual foi feito no Forno Fractal Tecnológica utilizando-se novamente Argônio como gás de proteção.

## 2.3 Procedimento Experimental

Nesta seção apresenta-se a metodologia utilizada para estudar os esforços mecânicos dos materiais CRFC-SiC e CRFC-Si. O presente trabalho envolverá as seguintes etapas:

### 2.3.1 Moldagem e caracterização dos materiais compósitos

A produção dos laminados se deu a partir da preparação de 20 lâminas das fibras cortadas em tamanhos semelhantes na forma de retângulo (230×210mm). Utilizou-se uma placa de metal com papel teflon para apoio das fibras, a seguir se iniciou a impregnação das fibras com a resina fenólica tipo resol CR 2830 previamente misturadas com carbeto de silício (SiC) e silício (Si) nas composições de 5% (cinco), 10% (dez), 15% (quinze) e 20% (vinte). Depois de todas as camadas serem empilhadas e impregnadas com a resina, as bordas do material foram isoladas por selante de vácuo “BANBAN” e então se montou uma bolsa de vácuo para cura da resina na Prensa Hidráulica com aquecimento Solab, o processo durou em torno de 5 horas. Feito isso se cortou os laminados nas dimensões próximas aos dos corpos de prova previstos pela norma ASTM *ASTM D5379/D5379M – 12*, ou seja, (80×20mm) para a carbonização e logo após realizou-se a “Grafitização”/ tratamento térmico do material a temperatura de 2.000°C. Entre um processo e outro fez-se a avaliação da massa específica para avaliação qualitativa do processamento.

Outro parâmetro importante para a caracterização do material compósito é a proporção relativa entre fibra e resina. Ocorre que, durante os processos de fabricação, é mais fácil o uso e a medição das massas relativas, enquanto os valores teóricos de propriedades usadas no projeto são calculados em termos de fração de volume.

Neste trabalho para determinar os volumes relativos de fibra e de matriz foram seguidos os seguintes passos (MENDONÇA, 2005):

i- Mediram-se as massas de fibra, de matriz e do compósito. A seguir calculou-se a

densidade do compósito,  $\rho_c = m_c/v_c$ ;

ii- Obtiveram-se as densidades de fibra e matriz,  $\rho_f$  e  $\rho_m$ ;

iii- Pesou-se a massa de fibra e de matriz,  $m_f$  e  $m_m$ ;

iv- Assim, a massa relativa de fibras e matriz foi obtida de:

$$M_f = \frac{m_f}{m_c} \quad M_m = \frac{m_m}{m_c} \quad (\text{Eq. 1})$$

v- E os volumes relativos de fibra, de matriz e de vazios, são obtidos de:

$$V_f = \frac{\rho_c}{\rho_f} M_f \quad V_m = \frac{\rho_c}{\rho_m} M_m \quad V_v = 1 - V_f - V_m \quad (\text{Eq. 2})$$

$$V_v = \frac{m_f / \rho_f + (m_c - m_f) / \rho_m}{m_c / \rho_c} \quad V_f = \frac{\rho_c m_f}{\rho_f m_c} \quad (\text{Eq. 3})$$

### 2.3.1 Caracterização em cisalhamentos dos materiais compósitos

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaaios Estruturais (LEE), da Subdivisão de Ensaaios Estruturais (ASA-E) pertencente a Divisão de Sistemas Aeronáuticos do Instituto e Aeronáutica e Espaço (IAE). Foi utilizado um equipamento de ensaios marca MTS (*Material Test Sytem*) modelo 81025 com célula de carga de capacidade 250KN (55.000lbs), ou seja, 25KN de fundo de escala. A aquisição de dados foi realizada em um equipamento da *National Instruments*, modelo SCXI e aplicativo computacional (*Labview*), para coleta de dados de deformação dos extensômetros elétricos e da carga aplicada.

Os ensaios de cisalhamento IOSIPESCU foram executados aplicando-se a carga P sob carregamento monotônico no dispositivo de ensaio (Figura 1), em compressão, resultando em cisalhamento, a uma taxa constante de 0,5mm/min.

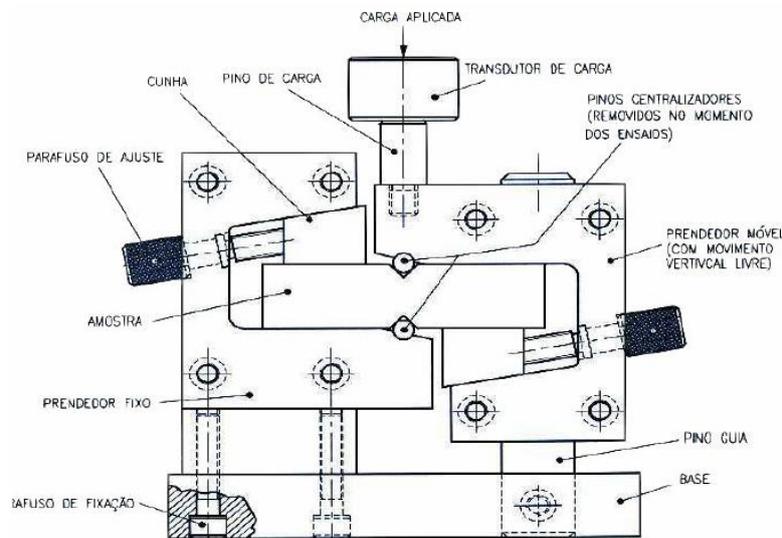


Figura 1 – Ilustração do dispositivo para ensaio estático de cisalhamento Iosipescu (DIAS, 2004).

Os ensaios foram conduzidos até a ruptura dos corpos de prova. Durante a execução de cada ensaio foram coletados os dados de dois canais de extensômetros elétricos,  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$ , colados a  $\pm 45^\circ$  em relação ao eixo horizontal do corpo de prova, conforme apresentado na Figura 2, e um canal da carga P.

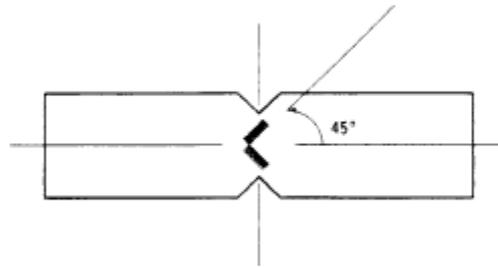


Figura 2 – Localização do extensômetro no corpo de prova. Fonte: ASTM D5379/D5379M – 12

Com os dados obtidos no ensaio da carga  $P$  e as deformações  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$  pode-se obter o gráfico de tensão de cisalhamento no plano  $\tau_{12}$ , em função da deformação no plano  $\gamma_{12}$ . A tensão de cisalhamento no plano é estabelecida como sendo a máxima tensão obtida na região linear elástica, dividida pela área da seção transversal da cada corpo de prova ( $w.t$ ), onde  $w$  é a largura e  $t$  é a espessura do corpo de prova. Após a obtenção das tensões máximas é calculada a média aritmética para cada grupo de material e obtida a tensão de cisalhamento média  $\bar{\tau}_{12}$ . A deformação é obtida como o somatório das deformações  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$ , em módulo, conforme eq. 4, para cada material.

$$\gamma = |\varepsilon^{+45}| + |\varepsilon^{-45}| \quad (\text{Eq. 4})$$

O módulo de cisalhamento no plano  $G_{12}$  é obtido na região considerada como linear elástica de cada material, e obtida a média aritmética para cada grupo de material dada em GPa, conforme estabelece a norma ASTM D5379/D5379M – 12

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Caracterização dos tecidos de fibra de carbono

A tabela 3.1 apresenta a massa específica real, do tecido *Plain* 282, feito por picnometria de hélio, nesta técnica empregou-se o princípio de Arquimedes do deslocamento de fluido para determinar o volume da amostra. Os ensaios foram realizados no LCP/INPE, utilizando um picnômetro de hélio, modelo Multivolume Pycnometer 1305, da marca Micromeritics.

**Tabela 3.1 - Massa específica real do tecido de carbono**

Amostra	Massa Específica Real [g.cm <sup>-3</sup> ]
Fibra Plain weave 282	1,78

#### 3.2 Caracterização da resina

A caracterização da resina foi realizada através de termogravimetria (TGA). Nesta técnica a variação da massa da amostra (perda ou ganho) é determinada em função da temperatura, enquanto a amostra é submetida a uma programação controlada de temperatura. Na figura 3 tem-se a curva termogravimétrica (TGA) para a resina tipo resol CR-2830. Observa-se uma região de perda de massa e reordenamento estrutural entre 25 e 800 °C. A temperatura de aproximadamente 300°C observa-se o início do processo de decomposição térmica com a

liberação de componentes voláteis. Na temperatura de  $\cong 350^{\circ}\text{C}$  houve o término da decomposição térmica com liberação completa dos voláteis de baixa massa molar (fenol/formaldeído-  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$  e  $\text{CH}_4$ ) e formação de carbono. Observa-se também um pico na temperatura em  $\cong 550^{\circ}\text{C}$  onde há o término de nova decomposição térmica com liberação de espécies ( $\text{CO}$  e  $\text{CO}_2$ ). Teve-se ainda uma perda de massa final de  $\cong 40\%$  a  $1000^{\circ}\text{C}$ .

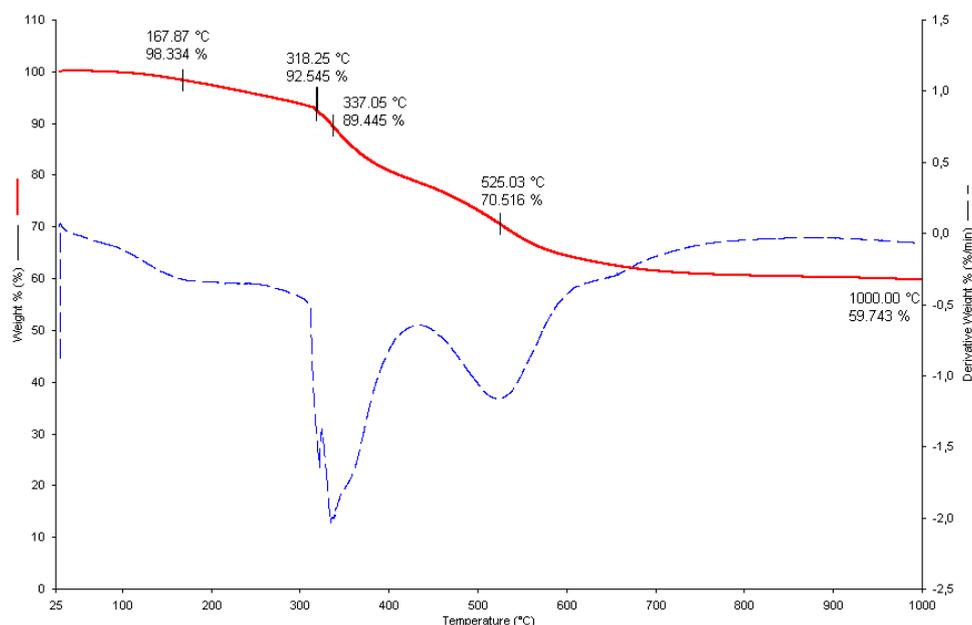


Figura 3 – Curva termogravimétrica para a resina fenólica tipo resol CR-2830.

### 3.3 Caracterizações dos laminados compósitos

Com a formação do compósito, realizou-se o corte destes conforme descrito no item 2.3.1 e então se calculou a densidade dos compósitos CRFC-SiC e CRFC-Si.

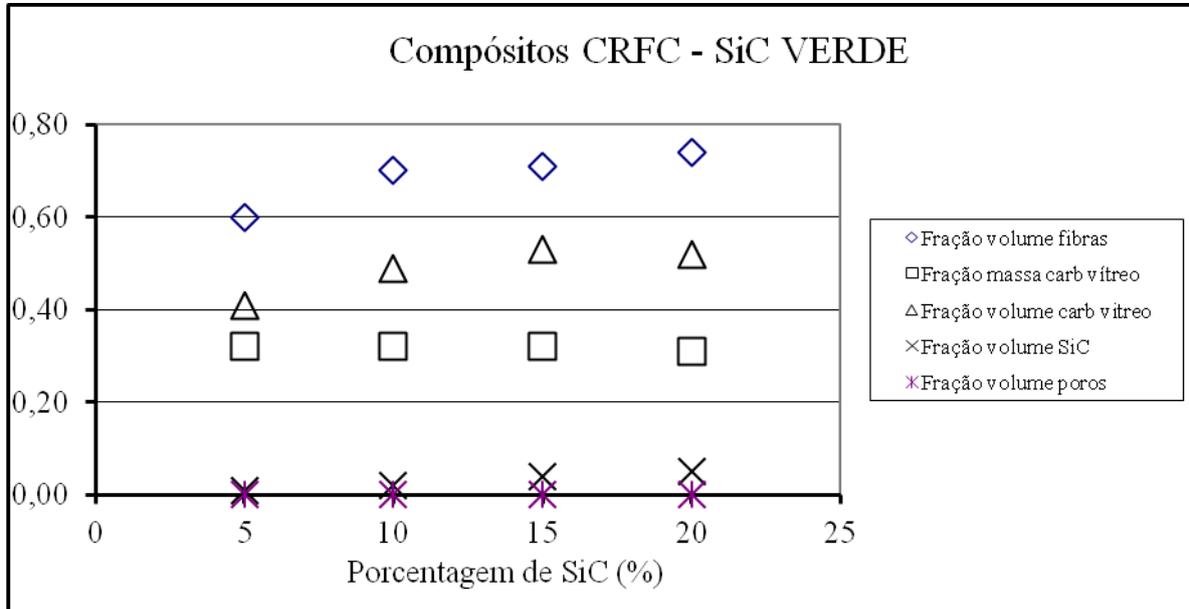
As propriedades de compósitos são fortemente influenciadas pelas proporções de matriz e reforço. Estas proporções são expressas pela fração em volume. As frações em massa foram calculadas pela massa do reforço antes da moldagem e pela massa do compósito após a moldagem.

Os resultados da análise da massa específica, para obtenção da fração em volume de fibra, matriz e poros são apresentados nas figuras 4 e 5, para o carбето de silício (verde e carbonizado) e silício (verde e carbonizado), respectivamente.

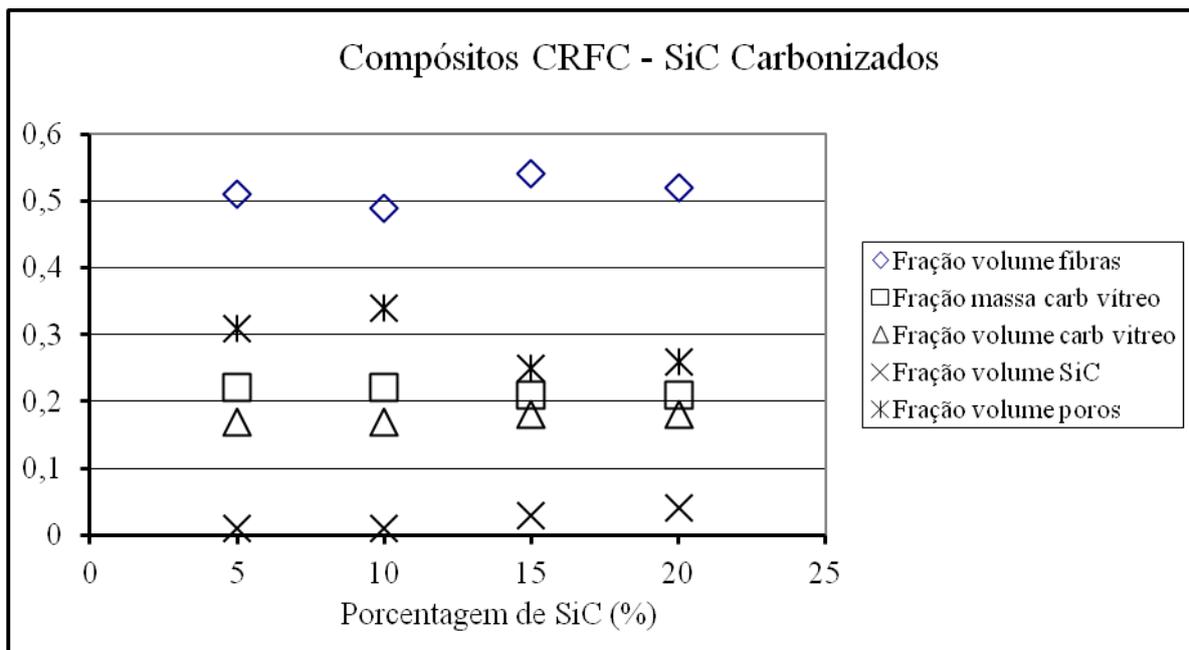
A diferença entre a massa do compósito e a massa do reforço utilizado é correspondente a massa de matriz. A massa específica do compósito é medida conforme descrito em 2.3.1(i).

Dos resultados da figura 4 verifica-se que a fração em volume de fibras aumenta proporcionalmente a quantidade de Carбето de Silício. Sabe-se que em compósitos fibrosos geralmente as fibras apresentam propriedades mecânicas melhores que a matriz, portanto esperava-se, nos ensaios realizados neste trabalho poder ensaiar as composições de 5-

20% SiC, para confirmar que a resistência mecânica em cisalhamento fosse maximizada com o aumento da fração volumétrica de fibras como observado na figura 4. Entretanto devido a limitação do número de extensômetros disponíveis para instrumentar o corpos de prova foram ensaiados apenas aqueles com 15 (quinze) % de SiC.

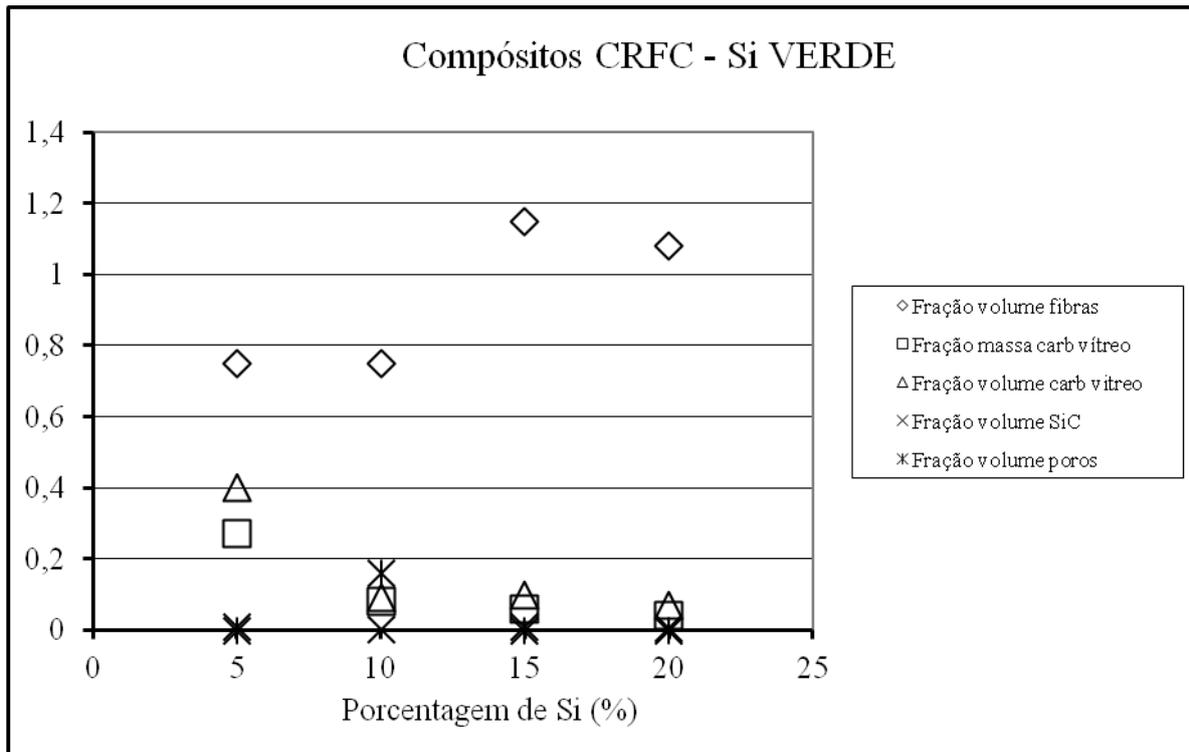


(a)

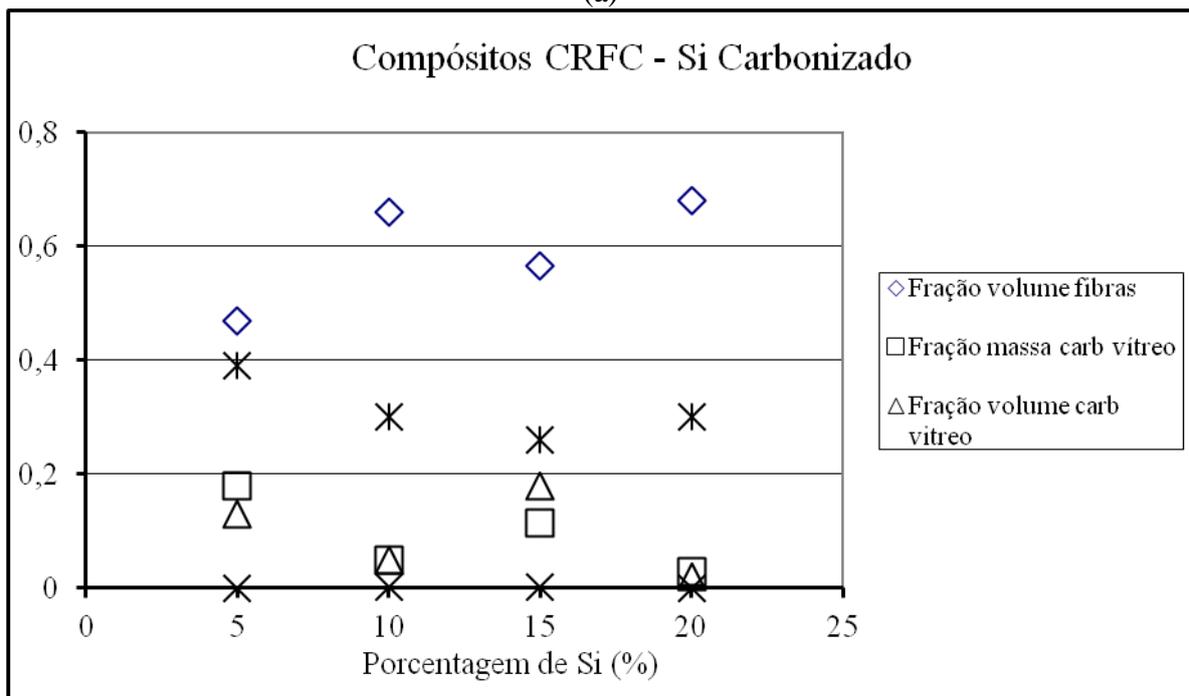


(b)

Figura 4 – Fração em Volume e Massa para os Compósitos CRFC - SiC: (a) Verde, (b) Carbonizado.



(a)



(b)

Figura 5 – Fração em Massa e Volume para os compósitos CRFC Si: (a) Verde, (b) Carbonizado.

Dos resultados da figura 5 observa-se que as frações volumétricas de fibra nos compósitos “verdes” e carbonizados sugerem comportamento semelhante ao previamente observado na figura 4 para o Carbetto de Silício de aumento do volume de fibras persiste para o Silício.

Entretanto devido a limitação do número de extensômetros disponíveis para instrumentar o corpos de prova foram ensaiados apenas aqueles com 15 (quinze)% de Si.

### 3.4 Compósitos CRFC modificados com 15% SiC (CRFC-15%SiC)

Os resultados de resistência ao cisalhamento, modo Iosipescu são apresentados nesta seção para os compósitos CRFC-SiC e CRFC-Si modificados respectivamente, tanto com carbetto de silício quanto com silício com o percentual de 15% (quinze por cento) em peso. Em todos os casos, o carregamento foi realizado em compressão, proporcionando uma tensão de cisalhamento no plano. A figura 6 apresenta uma imagem do corpo de prova CRFC-15%SiC instrumentado com extensômetro.



Figura 6 – Imagem do corpo de prova CRFC-15%SiC instrumentado com extensômetro.

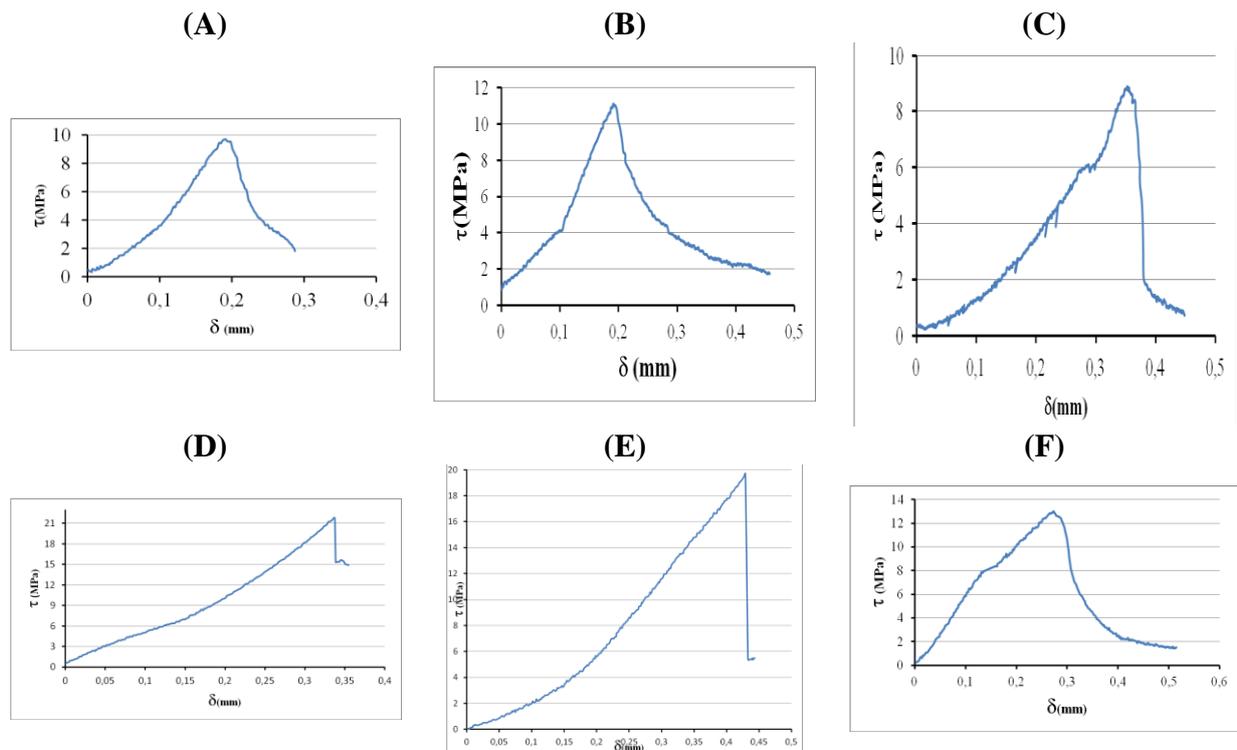


Figura 7 – Tensão de Cisalhamento Iosipescu ( $\tau$ ) em função do deslocamento ( $\delta$ ).

(A) CDP 01 - 15%SiC; (B) CDP 02 - 15%SiC; (C) CDP 04 - 15%SiC; (D) CDP 05 - 15%SiC; (E) CDP 06 - 15%SiC; (F) CDP 07 - 15%SiC.

**Tabela 3.2** – Resultados de carga e tensão de cisalhamento máxima e deslocamento máximo para o compósito CRFC-SiC

Corpo de Prova	$P_{\text{máx.}}$ (N)	$\tau_{\text{máx.}}$ (MPa)	$\delta_{\text{máx.}}$ (mm)
01	495,94	9,74	0,19
02	564,67	11,09	0,19
04	451,90	8,88	0,35
05	1109,17	21,79	0,34
06	990,93	19,70	0,43
07	663,23	13,02	0,27
<b>Média</b>	<b>712,64</b>	<b>14,04</b>	<b>0,30</b>

Os valores obtidos para  $P_{\text{máx}}$ ,  $\tau_{\text{máx.}}$  média, e  $\delta_{\text{máx.}}$  são de 712,64N, 14,04 MPa, e 0,30 mm respectivamente, conforme apresentado na tabela 3.2. Pode-se observar que a tensão de cisalhamento variou entre aproximadamente 9,74 MPa e 21,79MPa.

Segundo PINA (2000) as propriedades dos compósitos  $C_{\text{fibra}}/SiC_{\text{matriz}}$  de modo similar aos compósitos poliméricos, são controladas pela propriedade das fibras de carbono, da matriz e da interação entre a fibra e a matriz. Este pesquisador enfatiza que os valores de resistência para compósitos são geralmente bastante variáveis, como pode ser observado através dos gráficos da figura 7, e um conjunto numeroso de resultados é necessário para que uma média possa ser estabelecida com confiabilidade. Na figura 8 são plotados todos os ensaios em um mesmo gráfico e observando os resultados fica evidenciada a necessidade de um maior número de ensaios para a melhor caracterização deste material.

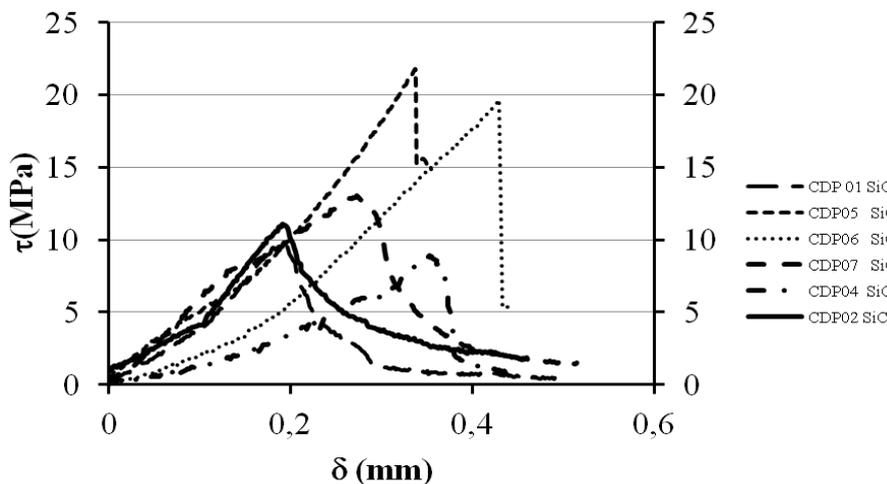


Figura 8 – Tensão de cisalhamento ( $\tau_{12}$ ) Iosipescu em função da deformação de cisalhamento ( $\gamma_{12}$ ) do compósito de fibra de carbono/fenólica+15%SiC 0/90°.

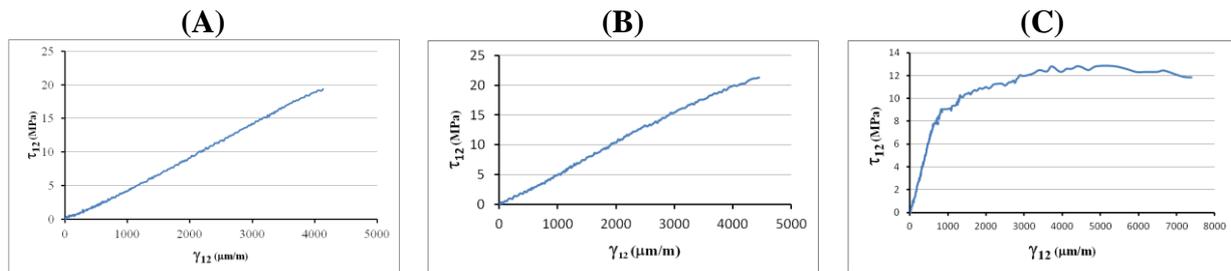


Figura 9 – Tensão de Cisalhamento ( $\tau_{12}$ ) Iosipescu em função da deformação ( $\gamma_{12}$ ).

(A) CDP 05 - 15%SiC; (B) CDP 06 - 15%SiC; (C) CDP 07 - 15%SiC.

**Tabela 3.3** - Resultados de tensão de cisalhamento máxima e módulo de cisalhamento para o compósito CRFC-SiC

Corpo de Prova	$P_{12}$ (N)	$\tau_{12}$ (MPa)	$\gamma_{12}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$G_{12}$ (GPa)
05	1084,30	21,30	4.455,00	5,10
06	973,70	19,36	4.131,00	4,40
07	646,00	12,84	5.339,70	12,50
<b>Média</b>	<b>901,33</b>	<b>17,83</b>	<b>4.641,90</b>	<b>7,33</b>

A figura 9 mostra o gráfico de tensão de cisalhamento no plano ( $\tau_{12}$ ) em função da deformação de cisalhamento ( $\gamma_{12}$ ) para os três corpos de prova ensaiados do compósito CRFC-SiC 0/90°. Pode-se observar que ocorre linearidade nas curvas das amostras 5 (cinco) e 6 (seis) até próximo a 20 MPa, com deformação em cisalhamento de aproximadamente 4000  $\mu\text{m/m}$ . Após essa tensão, a deformação de cisalhamento aumenta mais acentuadamente do que a tensão, associada ao escoamento plástico do material e logo em seguida ocorre a falha do material. Depreende-se dos dados que um modo de falha correspondente à fratura frágil pode estar presente. Entretanto percebe-se que para a amostra 5 tem-se um comportamento diferenciado das outras duas amostras evidenciando que pode ter ocorrido algum problema durante este ensaio.

Os valores obtidos para  $\tau_{12\text{médio}}$ ,  $G_{12\text{médio}}$  e  $\gamma_{12\text{médio}}$  são de **17,83** MPa, 7,33 GPa e 4.641,9  $\mu\text{m/m}$  respectivamente, conforme apresentado na tabela 3.3. Entretanto, excluindo os dados da amostra 7 tem-se para  $\tau_{12\text{médio}}$ ,  $G_{12\text{médio}}$  e  $\gamma_{12\text{médio}}$  os valores de **20,33** MPa, 4,75 GPa e 4.293  $\mu\text{m/m}$  respectivamente. PINA (2000) reporta que os pesquisadores SEP e Du Pont obtiveram propriedades mecânicas à temperatura ambiente para compósitos C-SiC, obtidos a partir do processo CVI, conforme resultados mostrados na Tabela 3.4. Semelhantemente a este trabalho o compósito CRFC é manufacturado com tecido de fibras de carbono do tipo *Plain* e matriz carbonosa à base de resina fenólica, entretanto este foi submetido a processo de densificação (CVI) com cerca de 30% em volume de SiC.

**Tabela 3.4 - PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS CRFC-SiC MANUFATURADOS**

PROPRIEDADES	CRFC-SiC
% Volume de fibra	45
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,1
Porosidade (%)	10
Resistência à tração (MPa)	350
Deformação (%)	0,9
Módulo de Young (GPa)	90
Resistência à flexão (MPa)	500
Resistência à compressão no plano (MPa)	580
Resistência à compressão perpendicular (MPa)	420
Resistência ao cisalhamento (MPa)	35
Tenacidade à fratura (MPa m)	35

Fonte: Modificado de PINA, 2000.

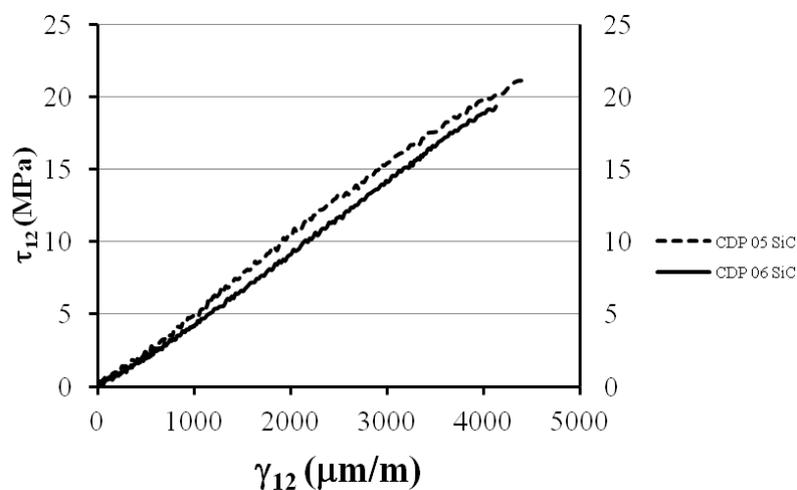


Figura 10 – Tensão de cisalhamento ( $\tau_{12}$ ) Iosipescu em função da deformação de cisalhamento ( $\gamma_{12}$ ) do compósito de fibra de carbono/fenólica+15%SiC 0/90°.

Na figura 10 são plotados em um mesmo gráfico todos os ensaios válidos para a tensão de cisalhamento, ou seja, excluindo-se os dados para o corpo de prova de número 7 (sete). Percebe-se da figura um comportamento similar entre os resultados, entretanto tal evidenciação só pode ser confirmada com a execução de um maior número de ensaios para a melhor caracterização deste material.

### 3.5 Compósitos CRFC modificados com 15%Si (CRFC-15%Si)

A figura 11 apresenta uma imagens dos corpos de prova CRFC-15%Si instrumentados com extensômetros.

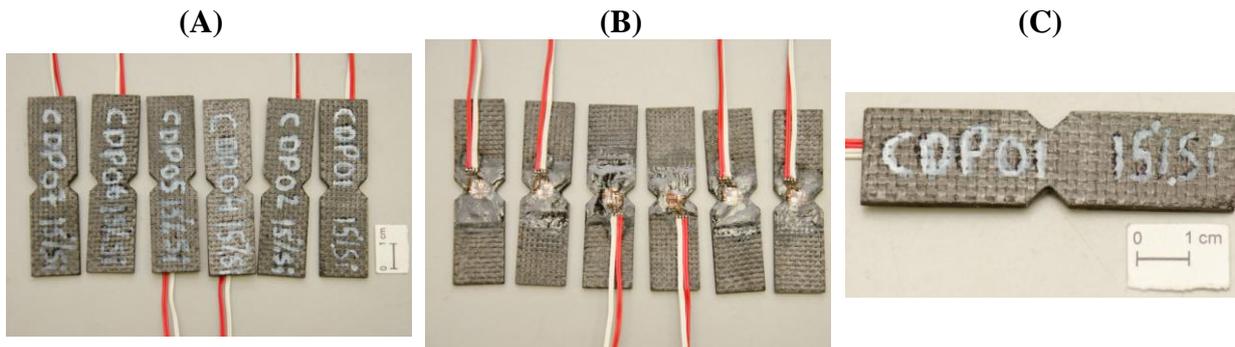


Figura 11 - Imagem dos corpos de prova CRFC-15%Si instrumentados com extensômetros.

(A) Identificando dos corpos de prova; (B) Mostrando os extensômetros colados;  
(C) Colocando uma escala.

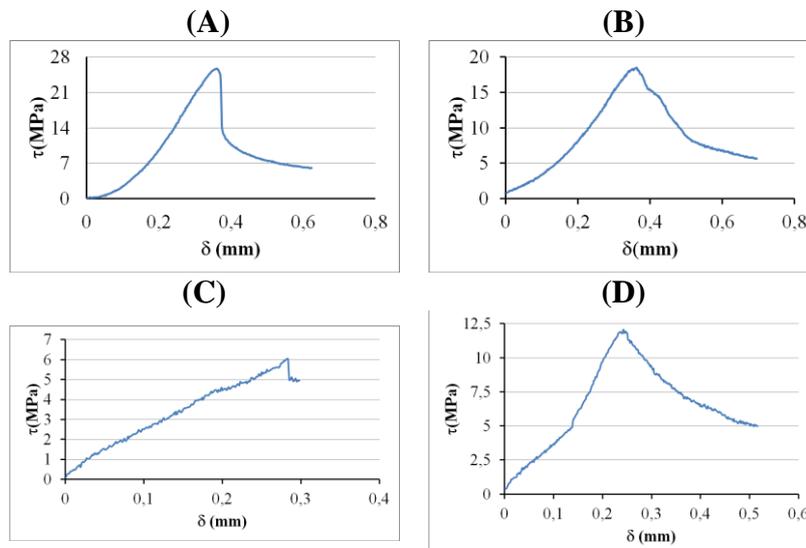


Figura 12 – Tensão de Cisalhamento ( $\tau$ ) Iosipescu em função do deslocamento ( $\delta$ ).

(A) CDP 04 - 15%Si; (B) CDP 05 - 15%Si; (C) CDP 06 - 15%Si; (D) CDP 07 - 15%Si.

**Tabela 3.5** – Resultados de tensão de cisalhamento máxima e deslocamento máximo para o compósito CRFC-Si 0/90°

Corpo de Prova	$P_{\text{máx.}}$ (N)	$\tau_{\text{máx.}}$ (MPa)	$\delta_{\text{máx.}}$ (mm)
04	1308,74	25,71	0,36
05	540,95	18,54	0,36
06	307,17	6,03	0,28
07	614,29	12,07	0,24
<b>Média</b>	<b>692,79</b>	<b>15,59</b>	<b>0,31</b>

Os valores obtidos para  $P_{máx}$ ,  $\tau_{máx. média}$ , e  $\delta_{máx.}$  são de 692,79N, 15,59 MPa, e 0,31 mm respectivamente, conforme apresentado na tabela 3.5. Pode-se observar que a tensão de cisalhamento variou entre aproximadamente 6,03 MPa e 25,71MPa. Em relação aos dados da tabela 3.2 percebe-se que a carga é 3% menor, que a tensão é 11% maior e que o deslocamento é 6% menor.

Estes resultados podem sugerir que o compósito modificado com o silício apresenta uma melhor resistência ao cisalhamento do que aquele modificado com o carvão. Entretanto, haveria necessidade de um número maior de ensaios para se chegar a esta conclusão.

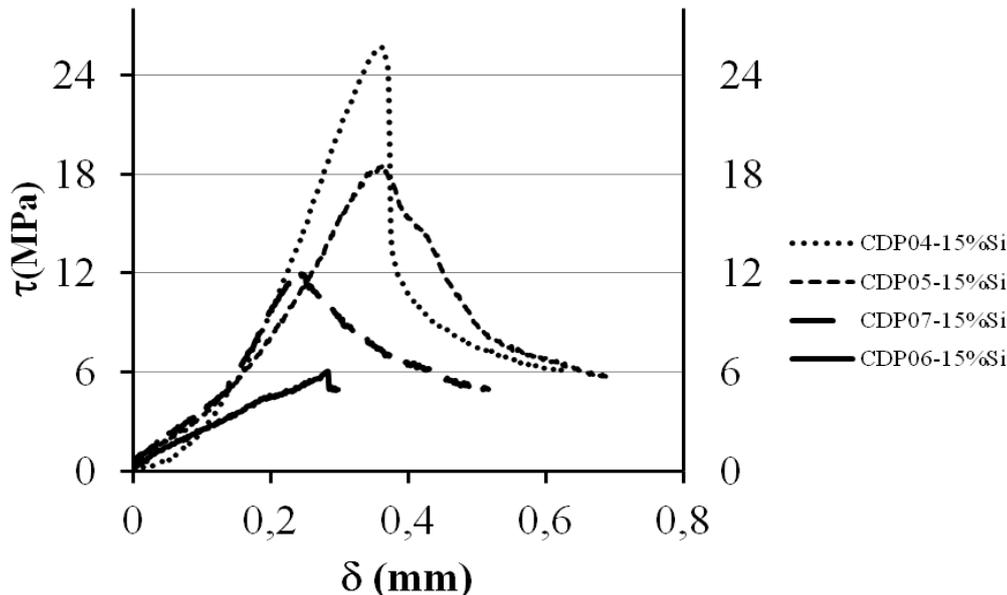


Figura 13 – Tensão de cisalhamento Iosipescu em função do deslocamento do compósito de fibra de carbono/fenólica+Si 0/90°.

Semelhantemente ao apresentado na figura 8, na figura 13 são plotados todos os ensaios para o compósito CRFC-Si em um mesmo gráfico. Observa-se também através da figura que para maior confiabilidade dos resultados é necessário um maior número de ensaios para a melhor caracterização deste material.

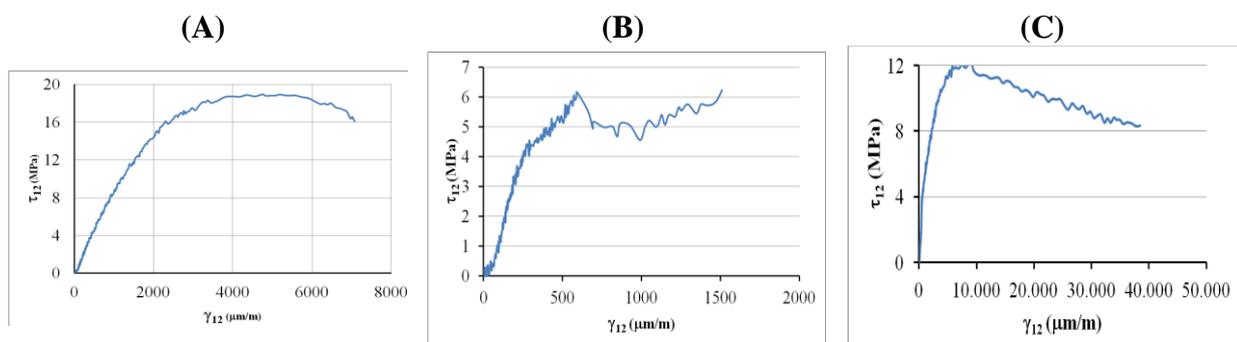


Figura 14 - Tensão de Cisalhamento ( $\tau_{12}$ ) Iosipescu em função da deformação ( $\tau_{12}$ ).

(A) CDP 05 - 15% Si; (B) CDP 06 - 15% Si; (C) CDP 07 - 15% Si.

A figura 14 mostra o gráfico de tensão de cisalhamento no plano ( $\tau_{12}$ ) em função da deformação de cisalhamento ( $\gamma_{12}$ ) para os três corpos de prova ensaiados do compósito CRFC-Si 0/90°. Os valores obtidos para  $\tau_{12\text{médio}}$ ,  $G_{12\text{médio}}$  e  $\gamma_{12\text{médio}}$  são de **12,45MPa**, 10,47 GPa e 5.110,4  $\mu\text{m/m}$  respectivamente, conforme apresentado na tabela 3.6.

**Tabela 3.6** – Resultados de tensão de cisalhamento máxima e módulo de cisalhamento para o compósito CRFC-Si

Corpo de Prova	$P_{12}$ (N)	$\tau_{12}$ (MPa)	$\gamma_{12}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$G_{12}$ (GPa)
05	905,40	18,94	4748,10	8,80
06	294,70	6,24	1509,20	16,00
07	589,40	12,15	9073,90	6,60
<b>Média</b>	<b>596,50</b>	<b>12,45</b>	<b>5110,40</b>	<b>10,47</b>

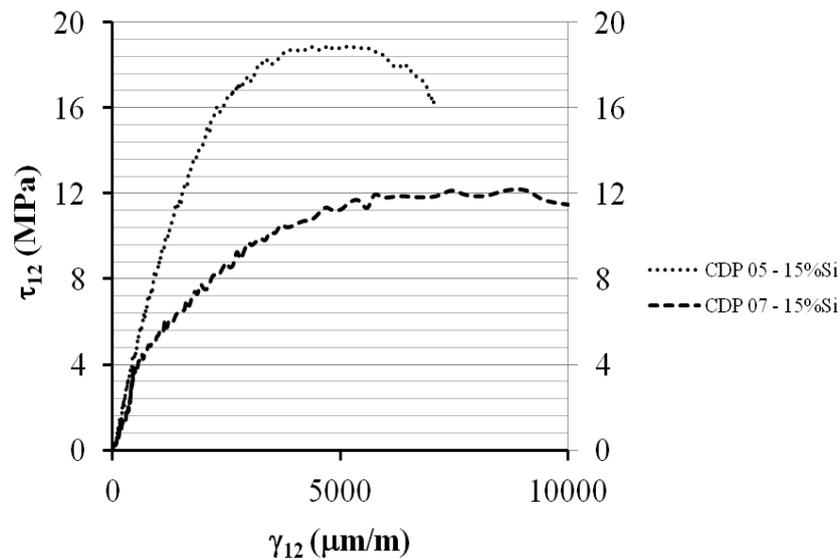


Figura 15 – Tensão de cisalhamento ( $\tau_{12}$ ) Iosipescu em função da deformação de cisalhamento ( $\gamma_{12}$ ) do compósito de fibra de carbono/fenólica+15%Si 0/90°.

Na figura 15 são plotados em um mesmo gráfico todos os ensaios válidos para a tensão de cisalhamento, ou seja, excluindo-se os dados para o corpo de prova de número 6 (seis). Percebe-se da figura um comportamento similar entre os resultados, entretanto tal evidência só pode ser confirmada com a execução de um maior número de ensaios para a melhor caracterização deste material.

PINA et al (2007) obteve valores médios da tensão de cisalhamento a partir de medições em cinco amostras para um compósito designado COMPOSITE 2 (C/SiC<sub>x</sub>Oy<sub>3</sub>/ POSS). A resistência e módulo ao cisalhamento foram de  $14,2 \pm 4,1$  MPa e  $15,0 \pm 2,0$  GPa, respectivamente.

Verifica-se através dos dados apresentados na tabela 3.3 de tensão e módulo de cisalhamento médios de 17,83 e 7,33, respectivamente para o compósito CRFC-SiC e, na tabela 3.6 de tensão e módulo de cisalhamento médios, de 12,45 e 10,47, respectivamente para o

compósito CRFC-Si que os valores aproximam-se dos obtidos por PINA et al(2007). Entretanto, como já mencionado, haveria a necessidade de um número maior de ensaios para se confirmar esta aproximação. Além disso, o autor utiliza uma matriz de polissiloxano de fibras de carbono dando origem a um compósito polissiloxano/tecido de fibras de carbono.

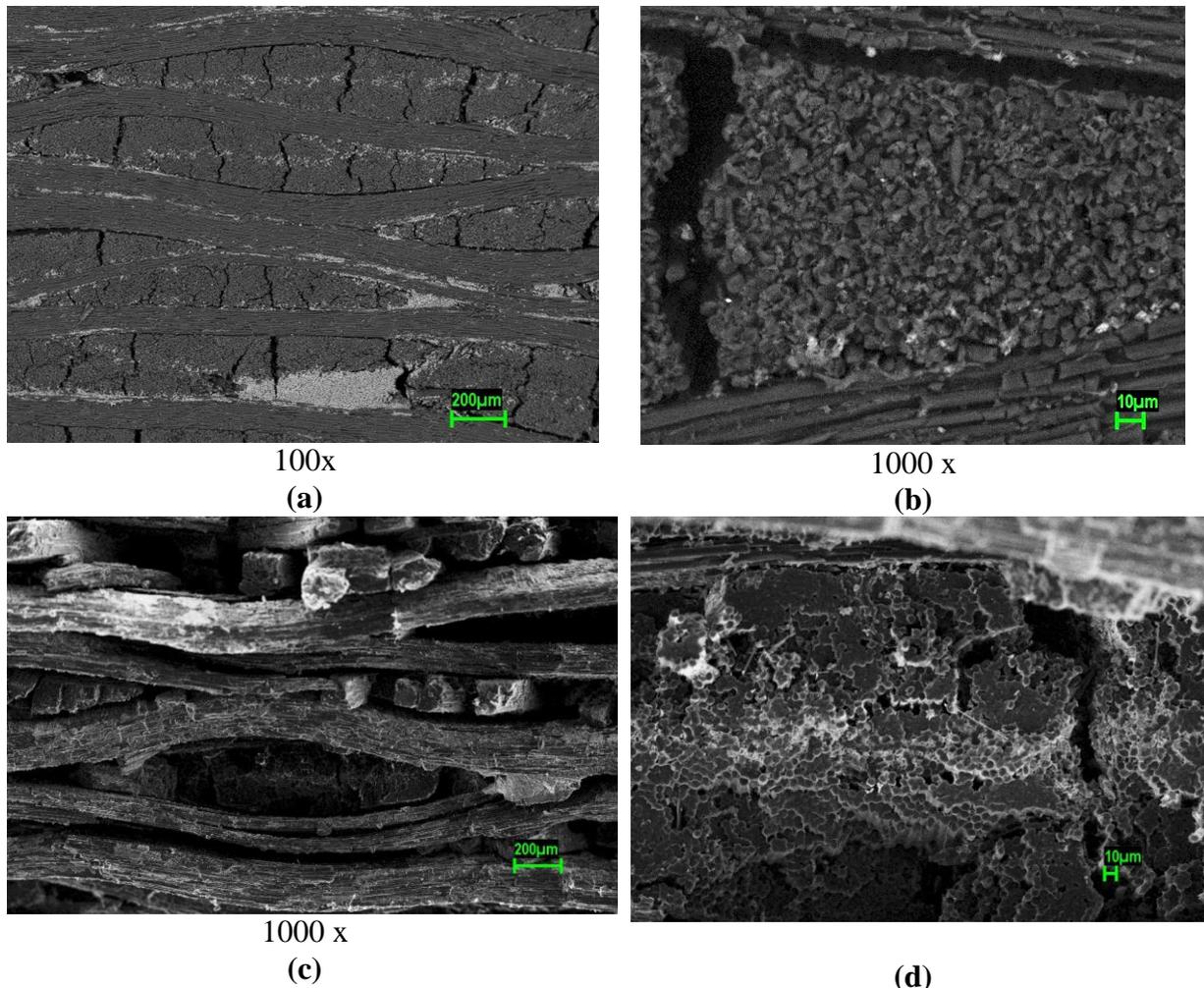


Figura 16 - Imagens do compósito CRFC-Si, (a) ampliação de 100x e (b) ampliação de 1000x, tratado termicamente à 1000 °C, e posteriormente a 2000 °C; (c) e (d) densificados com sílica e tratados termicamente obtidas na Divisão de Materiais do IAE.

A análise por MEV/EDX fornece boas informações topográficas e de elementos da região da amostra sob análise mas, nenhuma informação química direta pode ser obtida.

A Figura 16 (a) mostra uma imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com um aumento de 100x, de regiões entre a matriz e o reforço do compósito CRFC-Si (antes da densificação com o polimento de sílica) e após o processo de pirólise à 1000 °C. As alterações na microestrutura são devidas unicamente às modificações na matriz porque as fibras de carbono do tecido *Plain 282* são comerciais, tendo alta resistência (~2,8 GPa) e são submetidas a tratamento térmico à temperaturas de 1500 °C.

Sabe-se que durante o tratamento térmico (pirólise à 1000 °C) ocorre encolhimento da matriz, quando se utilizado piche ou resina.

Para resina fenólica CR 2830 esse encolhimento é correspondente a  $\cong 40\%$  em volume conforme a curva termogravimétrica apresentada na figura 3 sendo, portanto, uma mudança dimensional permanente. As mudanças dimensionais apresentadas pelo compósito durante o tratamento térmico geram tensões térmicas e estas, por sua vez, podem gerar trincas como as observadas na figura 16(a). Estas trincas são então formadas tanto por encolhimento da matriz quanto por alívio de tensões térmicas. As trincas de tensões térmicas podem ser causadas por diferenças de anisotropia no coeficiente de expansão térmica entre fibra e matriz.

A Figura 16 (b) mostra a imagem da matriz do compósito CRFC-Si entre o tecido de fibra de carbono obtida na análise por energia dispersiva de raios X (EDX) para a mesma região da Figura 16 (a) com um aumento de 1000x. As áreas na interface fibra matriz apresentam um descolamentos que podem ser devidos à pouca adesão fibra/matriz ou mesmo a ar aprisionado durante a moldagem. Em compósitos estruturais poliméricos estes defeitos são totalmente indesejáveis, porque comprometem a integridade estrutural da peça moldada, reduzindo também as propriedades mecânicas.

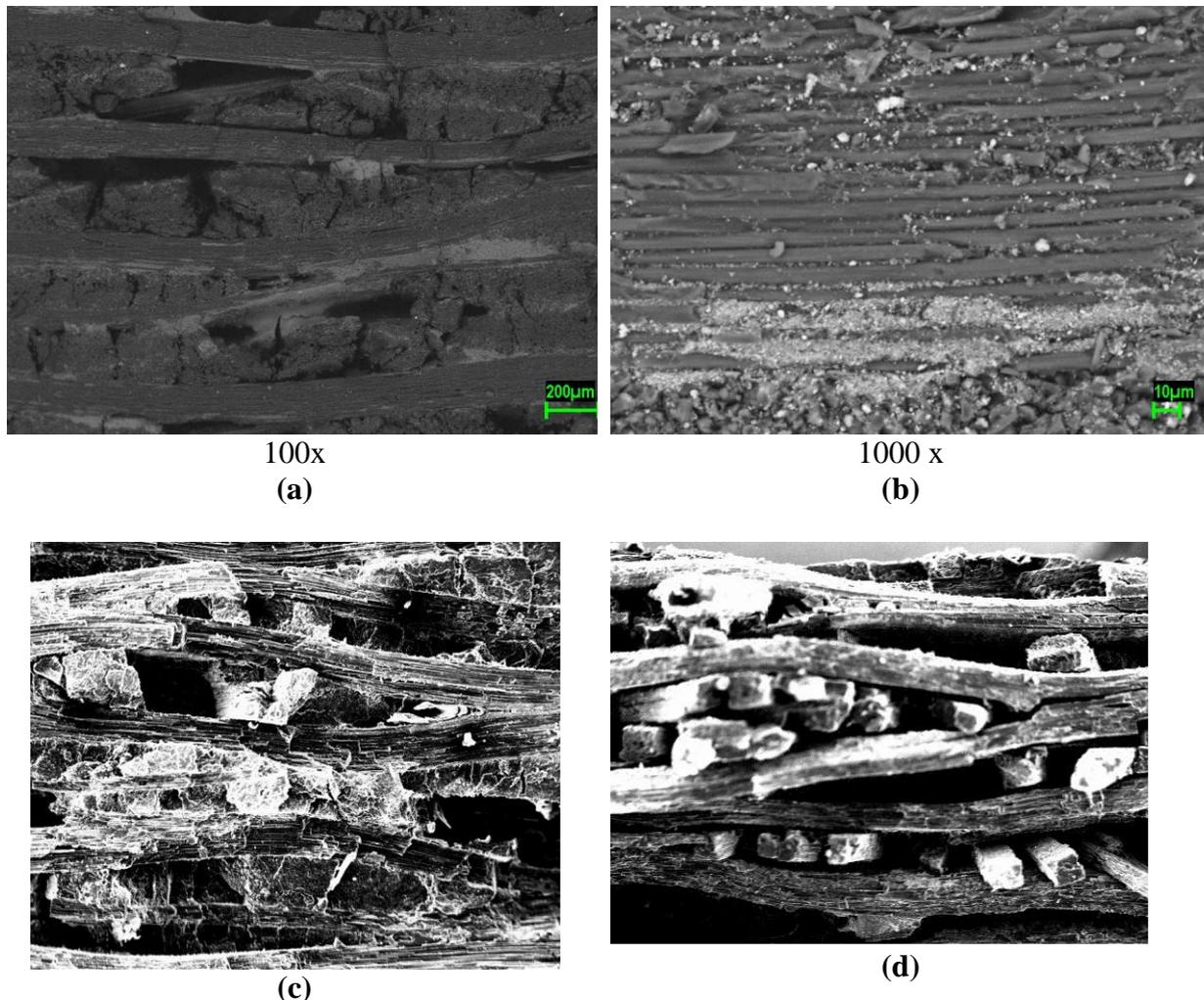


Figura 17 - Imagens do compósito CRFC-SiC, (a) ampliação de 100x e (b) ampliação de 1000x, tratado termicamente à 1000 °C, e posteriormente a 2000 °C; (c) e (d) densificados com silicena e tratados termicamente obtidas na Divisão de Materiais do IAE

A Figura 17 (a) mostra uma imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com um aumento de 100x, de regiões entre a matriz e o reforço do compósito CRFC-SiC (antes da densificação com o polimento de sílica) e após o processo de pirólise à 1000 °C. Observa-se a presença de porosidades e trincas no compósito estes podem ser atribuídos tanto ao aprisionamento de ar durante o processo de moldagem quanto pela perda de voláteis durante o processo de carbonização.

Na Figura 17 (b) observa-se áreas claras na imagem que podem representar a distribuição que compõe a matriz SiC no material. Pode-se também identificar as fibras individualmente com pouca ou nenhuma matriz envolvendo-as e com o SiC presente em domínios isolados no material.

#### 4. CONCLUSÕES

O compósito CRFC-SiC apresentou tensão de cisalhamento máxima de 17,83MPa, 54%/Volume de fibras de carbono e módulo de cisalhamento de 7,33 GPa. O compósito CRFC-Si apresentou tensão de cisalhamento máxima de 12,45MPa, 25%/Volume de fibras de carbono e módulo de cisalhamento de 10,47 GPa. Apesar da diferença entre as matrizes utilizadas conclui-se que estes valores são próximos aos obtidos por PINA et al (2007), ou seja, resistência e módulo ao cisalhamento foram de  $14,2 \pm 4,1$  MPa e  $15,0 \pm 2,0$  GPa, respectivamente.

Observa-se através dos resultados apresentados na figura 7 até a figura 15 que para maior confiabilidade dos resultados é necessário um maior número de ensaios para a melhor caracterização dos materiais.

A carbonização e tratamentos térmicos a 2000°C dos compósitos CRFC – SiC/ Si, conforme apresentado nas figuras 16 (a-b) e 17 (a-b), para o compósito CRFC-Si e CRFC-SiC, respectivamente provocam o surgimento de defeitos (poros e trincas) ocasionados por perda de voláteis das matrizes e alívio de tensões térmicas entre fibra/matriz.

A densificação com o polímero de sílica e posterior tratamento térmico forneceu uma matriz conforme apresentado nas figuras 16 (c-d) e 17 (c-d), com percentual de 88%C e 12%Si para o compósito CRFC-Si e percentual de 85%C e 15%SiC para o CRFC-SiC, respectivamente.

#### 5. REFERÊNCIAS

- MENDONÇA, P. T. R. *Materiais Compositos & Estruturas-Sanduiche*. Barueri, SP: Editora Manole Ltda, 2005.
- CANEVAROLO Jr, S.V. *Técnicas de Caracterização de Polímeros*. São Paulo, SP: Artliber Editora Ltda, 2004.
- MATTHEWS, F.L.; RAWLINGS, R.D. *Composite Materials: Engineering and Science*. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited, 1999.
- DIAS, J. C. Resistência ao cisalhamento do compósito carbono reforçados com fibras de carbono/tecido tipo Twill. *Revista Matéria*, v.9, n.4, PP 263-270, 2004.



PINA, S. R. O. Processamento de Compósitos C-SiC/OX Via Pirólise Polimérica para Aplicações Termo Estruturais. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica Espacial e Controle), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

ASTM D5379M-12 (2012) In Standard method for shear properties of composite materials by the V-notched beam method. American Society for the Testing of Materials, New York.

PINA, S. R. O.; PARDINI, L. C.; YOSHIDA, I. V. P. Carbon fiber/ceramic matrix composites: processing, oxidation and mechanical properties. Journal Material Science v. 42, n.12, pp 4245-4253, 2007.