

O CARBETO DE SILÍCIO (SiC) UTILIZADO COMO REFORÇO EM MATERIAIS COMPÓSITOS: REVISÃO DA LITERATURA.

F. R. Semeghin ⁽¹⁾, M. V. M. Magliano ⁽¹⁾

(1) Saint-Gobain do Brasil Produtos Industriais e para Construção Ltda.

felipe.semeghin@saint-gobain.com

Resumo

Desde as primeiras tentativas de fabricação de compósitos reforçados com fibras, o carbeto de silício (SiC) é considerado um dos mais promissores candidatos para reforço de materiais. Assim como sua elevada resistência mecânica, rigidez e estabilidade térmica, o SiC apresenta também excelente resistência ao desgaste e boa resistência a oxidação. Este trabalho irá apresentar uma visão geral dos diversos tipos de fibras de SiC, os processos de produção mais utilizados e as propriedades e aplicações mais usuais. Através do trabalho, pôde-se relacionar o desempenho desta cerâmica inorgânica frente às propriedades químicas e físicas que muitas aplicações exigem em relação à popularização cada vez maior deste material.

1. Introdução – Materiais compósitos

Os materiais compósitos podem ser definidos como uma classe de materiais originada a partir da combinação ou mistura de dois ou mais materiais (macro-constituintes) com composições e/ou formas distintas e que sejam insolúveis entre si (apresentem a formação de mais de uma fase com interface bem definida). Esta combinação tem a finalidade de melhorar o desempenho das propriedades químicas e/ou mecânicas dos macro-constituintes isolados, ampliando as escolhas para os projetos de um produto. Antes da ampla utilização dos materiais compósitos os projetistas eram obrigados a adequar seus projetos aos materiais disponíveis [1-5].

Em uma escala microscópica, os compósitos apresentam duas ou mais fases química ou fisicamente separadas por uma distinta interface, região de grande importância para estes materiais. A fase contínua é conhecida como *matriz*. Suas propriedades são melhoradas através da incorporação de outros constituintes durante a fabricação do compósito. Estes constituintes incorporados recebem o nome de *reforço*, sendo, na maioria dos casos, materiais mais duros, fortes e rígidos

que a matriz. De uma forma geral, as matrizes e os reforços podem ser formados a partir de materiais cerâmicos, metálicos ou poliméricos. [2].

Em relação aos reforços, existe uma grande variedade de classificações utilizadas. Algumas das divisões mais comuns estão relacionadas à morfologia (whiskers, partículas, fibras curtas, fibras longas, novelos, mechas, laminas, etc.), a natureza (sintéticas ou naturais) e as propriedades químicas (cerâmicas, metálicas, poliméricas e carbonáceas) [1,6,7].

De uma forma geral, a idéia de utilizar materiais compósitos não é nova ou recente. Pode-se observar uma série de compósitos na natureza, como o bambu, a madeira ou ainda os ossos que compõem nossos corpos. Outros exemplos de compósitos amplamente utilizados pela humanidade são observados na construção civil como o cimento Portland, a mistura de asfalto com areia para o revestimento de estradas e cerâmicas refratárias [1].

Atualmente, devido ao grande potencial de redução de peso, elevada resistência a fadiga, elevada resistência a corrosão e outras vantagens, os compósitos estão presentes em praticamente todos os seguimentos de nossa sociedade como na indústria aeronáutica (transmissões, breques, fuselagens de aviões comerciais e militares), espacial (reservatórios, escudos de reentrada de atmosfera e propulsores), automobilística (rodas, suspensões e chassis), elétrica-eletrônica (isolantes, antenas e suporte de circuitos), de construção civil (piscinas, portas e painéis pré-moldados), esportiva (raquetes de tênis, tacos de golfe e pranchas de surf) etc [4,5,8].

2. O carbetto de silício – SiC

Desde o início do advento de compósitos reforçados com fibras, o carbetto de silício tem sido considerado um dos mais promissores reforços desenvolvidos. Este fato é decorrente do elevado desempenho das propriedades químicas e físicas que apresenta. Em meados da década de 80, diversos estudos foram desenvolvidos procurando relacionar as características microestruturais, de processamento e de desempenho do SiC voltadas para os materiais conjugados.

O carbetto de silício (SiC) é uma cerâmica inorgânica formada a partir da ligação de um átomo de silício e um átomo de carbono (12% de caráter iônico) [9-12] com coordenação tetraédrica e massa específica de 3,20 g/cm³. O principal processo de produção industrial do SiC é até hoje o *Processo Acheson*, onde fontes

de carbono e sílica são misturadas e levadas a altas temperaturas (próximas a 2600-3000 °C) [10-14].

O SiC, segundo a escala Mohs, é considerado o terceiro material mais duro conhecido (13) estando atrás do diamante (15) e do carbeto de boro (14) [10]. É classificado como uma das cerâmicas com maior resistência mecânica a flexão (100-820 MPa) [15], com baixo coeficiente de expansão térmica ($4,1-4,6 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) [15,16] e elevado módulo elástico (207-483 GPa) [15,16]. Devido ao caráter pouco iônico da sua ligação Si – C e da alta densidade de empacotamento da célula unitária, as vibrações mecânicas em seu retículo cristalino (decorrentes da temperatura) têm facilidade de se tornarem harmônicas, propagando calor facilmente através do retículo, caracterizando assim, alta condutividade térmica (80-300 W/m-K) [10,15,16].

Em aplicações onde a resistência ao choque térmico é um requisito importante, a utilização de materiais baseados em SiC têm constante atuação. Esta propriedade demonstra a capacidade do material em suportar variações bruscas de temperatura sem alterações consideráveis em suas propriedades mecânicas [17-19]. Outra propriedade de destaque do SiC é a sua estabilidade química. O carbeto de silício não se funde, dissocia-se em carbono e vapor de silício em uma faixa de temperatura entre 2300-2800 °C dependente de variáveis como pressão, atmosfera e pureza das matérias primas utilizadas [10-12,20]. O SiC possui elevada inércia química sendo corroído por poucos materiais como Na_2O_2 , misturas de Na_2CO_3 - KNO_3 , cloro (Cl), tetracloreto de carbono (CCl_4) e flúor (F) [10]. Este elemento inicia seu processo de oxidação em temperaturas relativamente baixas, próximas a 850 °C, caso seja exposto à atmosfera altamente oxidantes [10,16]. A maior taxa de oxidação ocorre entre 850 e 1100 °C [21, 22].

Devido a sua elevada covalência, Tanaka H. [23] descreve o carbeto de silício como um material “não sinterizável”. Materiais com altas densidades baseados em SiC só poderão ser obtidos através de sinterização via fase sólida a temperaturas de 2050 a 2200 °C com a utilização de aditivos, como B, C ou Al [20]. Entretanto, muitos trabalhos têm sugerido novas rotas de sinterização, como via fase líquida, por deposição de vapor e via microondas com a utilização de diversos aditivos (Al_2O_3 , AlN, Y_2O_3 -MgO, Al_4C_3 , AlN- Y_2O_3 etc.) [20,23-25].

Partindo desta visão geral, pode-se perceber a importância desta cerâmica para a indústria mundial. Entretanto, poucos são os trabalhos que relacionam as características e propriedades do carbetto de silício com as exigências requeridas em materiais compósitos e os processamentos envolvidos. Esta revisão da literatura abordará algumas dos principais tipos e processamentos de reforços de carbetto de silício, suas exigências e desenvolvimentos tecnológicos.

3. O SiC como reforço

3.1. Fibra multifilamento contínua (Nicalon, Tyranno, Sylramic)

Yajima *et. al* desenvolveram no Japão, em 1975-76, um processo de produção de fibras contínuas de carbetto de silício através da pirólise controlada de um precursor polimérico [1,6,26]. Em seus experimentos iniciais as fibras eram individualmente fiadas em escala laboratorial. Em 1978, as fibras foram produzidas em escala piloto como multifilamentos (entre 4000 e 5000 filamentos) com comprimentos de 0,5 metros [26]. A produção comercial ocorreu, entretanto, apenas em 1981, na forma de fibras contínuas (multifilamentos formados com aproximadamente 500 fibras) pela *Nippon Carbon CO.* com o nome comercial de *Nicalon* [26]. Outras reforços contínuos de SiC comercializadas no mercado são a *Tyranno* (*Ube Industries*) e a *Sylramic* (*Dow Corning Corp.*) [1].

Segundo Coustumer *et. al* [27], esse material apresenta fórmula final de 55 % de SiC, 5% de C e 40% de $\text{SiO}_{1,15}\text{C}_{0,85}$ (em peso), valores semelhantes aqueles encontrados por Andersson e Warren [26]. A partir desta composição e das respectivas densidades de cada fase, pode-se estimar a densidade destas fibras como sendo $2,65 \text{ g/cm}^3$, diferentemente dos valores fornecidos pelos fabricantes ($2,55 \text{ g/cm}^3$). Esta diferença é decorrente de pequenas quantidades de porosidade (em torno de 2%) encontrada nas fibras [26,27]. De uma forma geral, o processo de fabricação deste reforço contínuo pode ser resumido da seguinte forma: **1)** A primeira etapa consiste na eliminação do cloro do precursor polimérico (eg. diclorometilsilano) pela adição de sódio metálico fundido para produzir-se o dimetilpolisilano [26]. **2)** A etapa seguinte consiste na polimerização do dimetilpolisilano em um policarbosilano através do aquecimento a $470 \text{ }^\circ\text{C}$ em uma autoclave com atmosfera de argônio por 8-14h. **3)** Em seguida ocorre o processo de destilação a vácuo em $280 \text{ }^\circ\text{C}$, onde o peso molecular médio do polímero será em torno de 1500 g/mol [26]. **4)** A seguir, este material é fiado no estado fundido (350

°C) sob uma atmosfera de nitrogênio, proporcionando um aumento da resistência destas fibras (10MPa) [26,28,29]. **5)** As fibras estiradas são então curadas para prevenir sua fusão no tratamento subsequente (190 °C por 30 min. sem atmosfera controlada), onde ocorre um considerável aumento da quantidade de oxigênio nas fibras. **6)** A conversão do polímero em carbeto de silício ocorre pelo tratamento térmico das fibras após a cura em temperaturas superiores a 850 °C em vácuo ou em atmosfera de nitrogênio [26,27,29].

As fibras multifilamentos são conhecidas pela relação de baixo peso, elevado módulo elástico e considerável resistência mecânica que apresentam. Como as fibras são compostas por partículas ultrafinas, sua superfície apresenta característica de elevada polidez, dispersando tensões ao longo dos contornos de grão (inibe a concentração de tensão) [30]. Adicionalmente, devido à grande coesão entre suas partículas (elevada força de ligação), as fibras apresentam elevada resistência mecânica [30]. Outras características das fibras de SiC produzidas a partir de precursores poliméricos são elevada resistência térmica, resistência a oxidação, inércia térmica (refratariedade) e química. Essas fibras podem ser utilizadas por longos períodos de tempo a 1000 °C e curtos períodos a 1200 °C em ar [30]. Além disso, devido a seu baixo coeficiente de expansão térmica, esse reforço apresenta excelente estabilidade dimensional.

Ishikawa [30] demonstra em seu trabalho que as fibras contínuas de SiC apresentam a resistividade de um semicondutor, sendo possível ajustar esta propriedade entre $10^2 - 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ variando-se a temperatura de tratamento térmico (figura 1). A variação da tensão de ruptura com as condições de tratamento térmico são mostradas na figura 2. Como esperado, observa-se que a atmosfera de argônio afeta em menor grau a resistência das fibras, pois não propicia a oxidação das mesmas [30]. Através das medidas do módulo de Young aparente, Andersson e Warren [26] determinaram o módulo de fibras piloto como sendo de $200 \pm 10 \text{ GPa}$, valores que concordam com os dados encontrados por outros pesquisadores (180-200 GPa) [1,26]. A grande diferença observada entre este valor e o do SiC puro (475 GPa) é explicada pela composição das fibras (não apenas SiC, mas também SiO_2 e C) [26].

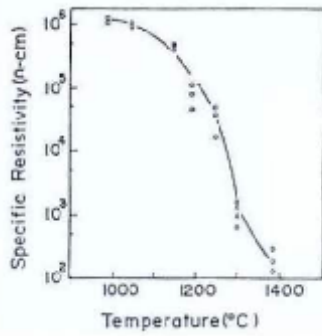


Figura 1 – Variação da resistividade específica das fibras *Nicalon* devido aos tratamentos térmicos em diferentes temperaturas [30].

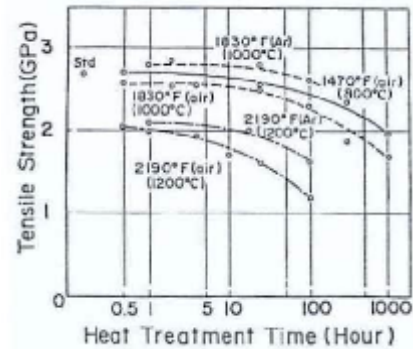


Figura 2 – Tensão de fratura das fibras *Nicalon* a elevadas temperaturas [30].

Neste mesmo trabalho, Andersson e Warren [26] apresentaram as diferenças entre as resistências mecânicas em função do diâmetro das fibras e do tamanho

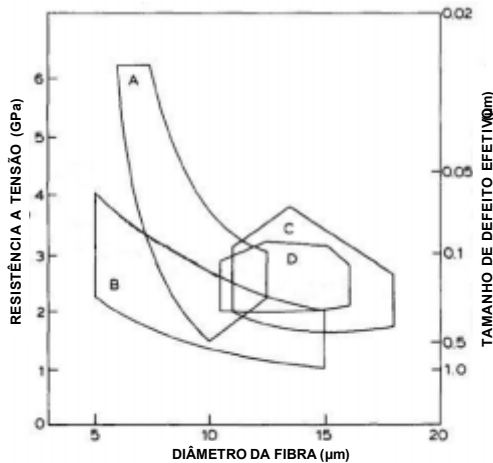


Figura 3 – Resistência mecânica das fibras contínuas em função do diâmetro para vários tipos de fibra multifilamentos. A – Fibras de laboratório ; B – Fibras piloto; C – Fibras comerciais; D – Fibras piloto [26].

efetivo de defeito para os diferentes tipos de fibras contínuas (figura 3). Devido ao maior controle existem nos ambientes laboratoriais, as fibras desenvolvidas nestes locais apresentam tamanhos de defeitos menores quando comparados as fibras produzidas em escala comercial. Este fato impacta diretamente na resistência mecânica do reforço, como era esperado.

Simon e Bunsell [31] também apresentaram o comportamento mecânico destas fibras sob tensão onde realizaram aproximadamente cem testes levantando a distribuição da tensão de ruptura. Os resultados encontrados são similares aos encontrados por Andersson e Warren [26].

3.2. CVD (*Chemical Vapor Deposition*)

Outro processo de produção de fibras de SiC amplamente utilizado é conhecido por deposição química de vapor ou *CVD – Chemical Vapor Deposition*. Neste processo um filme fino de SiC é depositado sobre um substrato (tungstênio ou carbono), a partir de uma atmosfera rica em Si e C, formando um monofilamento. Como resultado, as fibras formadas apresentam elevadas densidades com a utilização de temperaturas mais baixas (1300 °C) daquelas utilizadas por outros

processos de produção e sem a utilização de aditivos [1,6,32,33]. O carbetto produzido apresenta elevado desempenho mecânico e químico, sendo superior aquele produzido por outros processos. Entretanto, apesar das elevadas propriedades, esta rota de processamento de fibras de SiC apresenta elevado custo de produção [1,6,33].

A síntese de SiC através do processo CVD utiliza-se de matérias primas ricas em Si e C, encontradas em moléculas individuais ou através de substâncias distintas [33]. Essas matérias primas ou misturas delas são depositadas em filamentos de carbono ou tungstênio a partir de uma atmosfera gasosa composta de 70% de hidrogênio e 30% de silano, através do dispositivo da figura 4. A reação das matérias primas ocorre em uma câmara cilíndrica de um a dois metros de comprimento, com temperaturas entre 1200-1500 °C, onde as extremidades são seladas por mercúrio [6,26,32]. Segundo Andersson e Warren [26], a temperatura de deposição influencia a taxa de deposição, parâmetro determinante na formação das estruturas cristalinas das espécies depositadas.

O metiltriclorosilano é uma das matérias primas ideais para a produção de SiC por CVD pois apresenta um átomo de silício para um de carbono, fato que facilita a reação estequiométrica para a formação do revestimento (equação 1) [6]. Uma quantidade ótima de hidrogênio é requerida para a correta continuidade da reação. Se houver uma quantidade de hidrogênio menor que a necessária, os clorosilanos não serão reduzidos a silício e carbono livre. Da mesma forma, o excesso de hidrogênio irá favorecer a deposição de silício metálico no filamento [6].

Em contraste com as fibras de SiC produzidas a partir de precursores poliméricos, o processo de CVD possui a vantagem de formar camadas de SiC rapidamente sem a introdução de óxidos deletérios às propriedades finais do produto [32]. Entretanto, o mecanismo de formação de SiC por CVD é bastante complicado e muito sensível a uma grande variedade de parâmetros como espécies reagentes, pressão de deposição, temperatura, concentração dos gases, fluxo de gases, etc [32]. Geralmente, após o fim do processo, pode-se encontrar tanto silício quanto carbono livre misturados com o SiC depositado de acordo com a figura 5.

Em relação aos substratos mais utilizados, o filamento de carbono apresenta menor densidade média ao filamento e é mais barato que o tungstênio. Além disso,

o substrato de tungstênio pode reagir em determinadas situação com o SiC fragilizando a interface e promovendo a fratura do compósito [26].

Fibras de SiC fabricas por CVD com substratos de carbono podem apresentar diâmetros médios de 140 µm e módulo elástico em torno de 400 GPa. Fibras com substratos de tungstênio também estão disponíveis no mercado e apresentam resistência mecânica inicial próxima a 4 GPa. Entretanto, após a exposição ao ar, argônio ou vácuo por 48 horas a 200 °C, esta propriedade apresenta considerável redução (1GPa). Falhas por envelhecimento térmico são atribuídas ao crescimento de falhas na região de interface entre W e SiC [32,34].

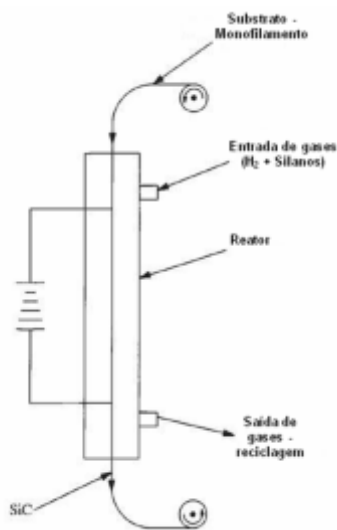
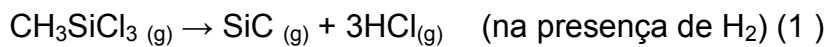


Figura 4 – Desenho esquemático da produção de fibras de SiC por CVD [6].

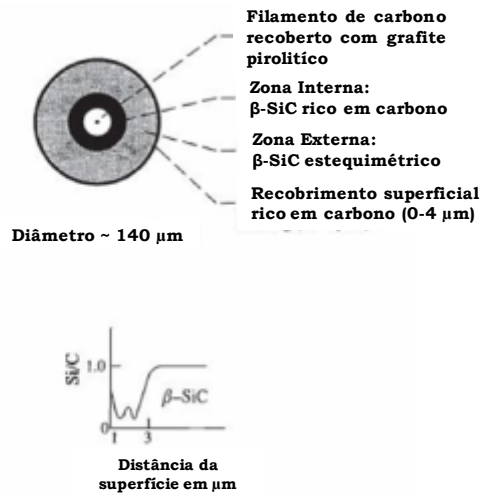


Figura 5 – perfil de composição do filamento de carbono recoberto com SiC por CVD [6].

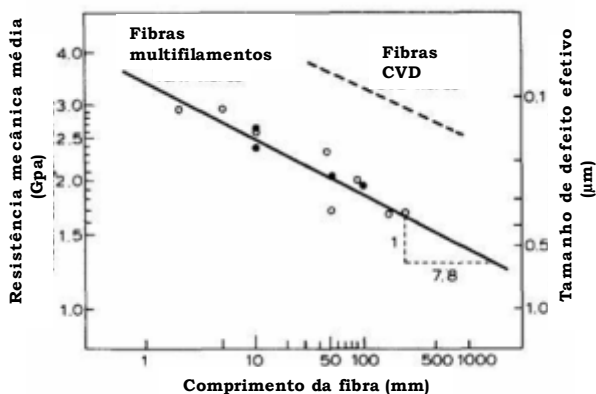


Figura 6 – Efeito do comprimento da fibra na resistência mecânica de fibras fabricadas pro CVD e fibras contínuas [26].

A resistência média destas fibras pode ser observada na figura 6. Fica claro que as fibras fabricadas por CVD apresentam maiores resistências que fibras contínuas multifilamentos. Este fato pode ser explicado devido ao menor tamanho dos defeitos encontrados em fibras sintetizadas por CVD [26].

3.3. Whiskers

Whiskers de SiC foram desenvolvidos pelas primeiras vezes na década de 80 por diversos pesquisadores como Yajima *et. al*, Cutler, Milewsski *et. al* e Lee e Cutler [26,34]. Whiskers são fibras curtas monocristalina que apresentam formato de agulhas e elevada resistência mecânica que se aproxima da resistência teórica calculada por modelos matemáticos devido a ausência de defeitos cristalinos como poros, discordâncias e contornos de grão [1,6,34-36]. Os whiskers de SiC podem apresentar coeficientes de aspecto (comprimento/diâmetro) da ordem de 50 até 10.000 [1,34]. Essas fibras têm sido utilizadas nas últimas décadas em uma grande variedade de materiais com matrizes metálicas, cerâmicas e poliméricas (principalmente em compósitos) com intuito de melhorar o desempenho de algumas das propriedades físicas e químicas destes materiais como dureza, resistência térmica, inércia química, resistência mecânica, etc. Na tabela 1 pode-se observar, comparativamente, whiskers de SiC e de outros materiais disponíveis no mercado.

Apesar dos grandes benefícios que a incorporação deste reforço pode trazer, uma importante desvantagem é decorrente do fato de suas propriedades apresentarem uma ampla distribuição de valores (heterogeneidade). O manuseio e o alinhamento dos whiskers nas matrizes são outras dificuldades encontradas para utilização deste reforço de modo mais amplo nos compósitos [36].

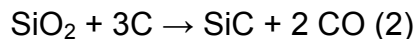
Tabela 1 – Sumário dos whiskers disponíveis no mercado [36].

Material	Whiskers	Produtor	Nome do produto	Gravidade específica	Diâmetro (μm)	Comprimento (μm)	Principal Aplicação
SiC	β -SiC	Tokai Carbon	Tokawhiskers	3,19	0,1-1,6	50-200	Diversas
SiC	β -SiC	Tateho Chemical	SCW	3,18	0,05-1,5	20-200	FRP
SiC	α -SiC	ACMC (USA)	SILAR	3,2	0,6	10-80	FRM
SiC	β -SiC	American Matrix	-	3,2	1-3	100-500	FRC
Si ₃ N ₄	α -Si ₃ N ₄	Tateho Chemical	SNW	3,18	0,1-0,6	20-200	FRP
Si ₃ N ₄	α -Si ₃ N ₄	Ube Industries	-	3,18	0,1-0,4	5-20	FRC
Si ₃ N ₄	β -Si ₃ N ₄	Ube Industries	-	3,19	0,1-1,5	10-50	-
C	Grafite	Nikkiso	Graskers	2,25	0,1-1,0	10-20	FRP

Podemos classificar os processos de fabricação de SiC na forma de whiskers em quatro processos principais:

(1) Redução carbotérmica da sílica

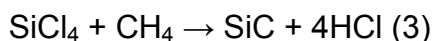
Este é o principal processo de produção em massa de SiC na forma de whiskers, onde fontes de sílica (eg. areia) e carbono (eg. coque ou negro de fumo) são misturadas e aquecidas a temperaturas elevadas (acima de 2000 °C) para a formação de SiC (equação 2) [35,36].

**(2) Decomposição ou redução hidrotérmica de organossilanos.**

A literatura relata a utilização de fenil-metilsilano, do sistema $\text{Si}(\text{CH}_3)_4 - \text{H}_2\text{S} - \text{H}_2$ e do trimetilclorosilano na produção por decomposição [35,36].

(3) Reação de haletos de silício e hidrocarbonetos.

A reação de haletos e hidrocarbonetos inclui a utilização de SiCl_4 e CCl_4 , conforme a reação 3. Este processo pode ser utilizado na produção de whiskers de SiC em larga escala, mas seu alto custo é um fator que tem limitado sua maior utilização [35,36]:

**(4) Carbonização de silício metálico**

Técnicas de carbonização de silício metálico abordam o sistema $\text{Si}_{(s)} - \text{C}_3\text{H}_6 - \text{H}_2\text{S}$. Este é um processo de elevada qualidade e elevados custos de produção [35,36]:



Comumente, os diâmetros e comprimentos dos whiskers produzidos a partir dos processos descritos acima não são constantes, apresentando uma distribuição em torno de um determinado valor. Akyama e Yamamoto [36] desenvolveram whiskers (*Tokawhiskers*) com diâmetros de 0,1-1,0 μm , comprimentos de 10-100 μm e aspecto de forma entre 50-200. Em outro trabalho, Niwano [35] estudou whiskers com diâmetros de 0,05-1,5 μm , comprimentos de 20-200 μm e aspecto de forma médio igual a 70 (figura 7 e 8).

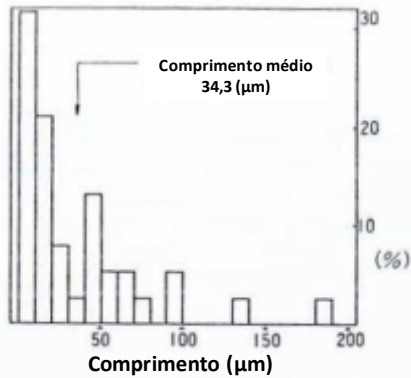


Figura 7 – Distribuição de comprimentos de whiskers de SiC [35].

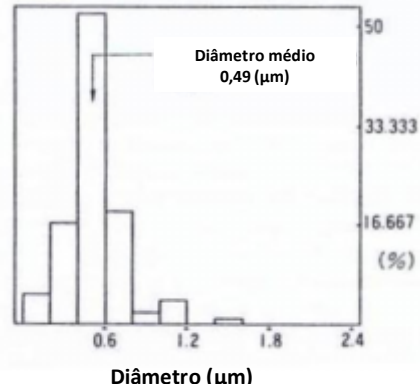


Figura 8 – Distribuição de diâmetros de whiskers de SiC [35].

Em análises de microscopia eletrônica de varredura pôde-se observar que existem dois tipos de seções transversais de whisker: Os whiskers α -SiC apresentam formas hexagonais enquanto que os β -SiC formas ligeiramente triangulares. Esta diferença está relacionada com o fato da estrutura cristalina do α -SiC ser hexagonal enquanto que a do β -SiC é cúbica e possui uma direção preferencial de crescimento [36]. A estrutura cristalina é extremamente dependente dos parâmetros de processo, sendo relatado que os whiskers podem apresentar tanto predominância da fase β [35] quanto da fase α [26] como pode-se observar na tabela 1.

Devido à dificuldade para realizar medidas de resistência mecânica de whiskers, muitas vezes utiliza-se uma medida indireta através da resistência mecânica do compósito e da quantidade de reforço utilizado [36]. Entretanto, muitos pesquisadores desenvolveram equipamentos específicos para as medidas de tensão de ruptura e módulo elástico de whiskers, como mostra a literatura [37]. Petrovic *et al* [37] desenvolveram um dispositivo de ensaio onde os valores de resistência a tensão e módulo elástico médios encontrados foram de 8,4 GPa e 581 GPa respectivamente (figura 9 e 10).

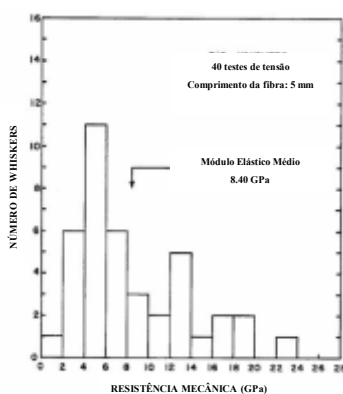


Figura 9 – Distribuição das resistências a tensão de whiskers de SiC [37].

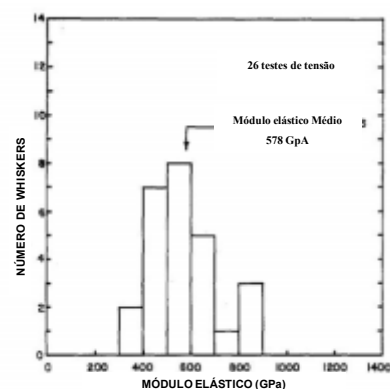


Figura 10 – Distribuição do módulo elástico de whiskers de

5. Conclusão

Uma revisão das principais tecnologias, processamentos e propriedades de fibras de SiC utilizadas como reforço em materiais foi apresentada neste trabalho. Com algumas exceções, percebe-se que as fibras de SiC ainda não são de uso comum, permanecendo no campo da pesquisa e desenvolvimento. Além disso, os custos de implementação em escala industrial, processos e matérias-primas ainda são muito elevados, dificultando a sua utilização.

Apesar do desenvolvimento de muitas aplicações de compósitos reforçados com SiC ainda ser muito recente, uma grande quantidade de melhorias já podem ser sumarizadas. Segundo Yamamoto e Akiawa [36], o futuro do desenvolvimento de compósitos provavelmente será decorrente da resolução de alguns destes problemas apresentados, assim como os quatro pontos principais listados abaixo:

- (1) Redução dos custos de processamento.
- (2) Levantamento de dados de design.
- (3) Ausência de tecnologias para controle de qualidade dos produtos.
- (4) Ausência de tecnologias para reciclagem destes materiais.

6. Bibliografia

- [1] CHAWLA, K. K. **Composite materials: Science and Engineering**. 2 ed. Nova York, Springer, 1998. 483p.
- [2] SAVAGE G. Formula 1 Composite Engineering. **Engineering Failure Analysis**. Reino Unido, 17, 92-115, 2010.
- [3] HAGE, E. **Materiais Conjugados**. São Carlos: Departamento de Engenharia de Materiais, 2010. Slides da disciplina Materiais Conjugados.
- [4] GAY, D. et al. **Composite Materials: Design and Applications**. 4 ed. EUA, CRC Press, 523p. 2003.
- [5] CHUNG, D. D. L. **Composite Materials: Science and Applications**. 2 ed. EUA, Springer, 358 p. 2010.
- [6] CHAWLA, K. K. **Fibrous Materials**. 2. ed. Reino Unido, Cambridge University Press, 309 p. 1998.
- [7] Disponível em: <<http://composite.about.com/od/aboutcompositesplastics/a/HistoryofComposites.htm>> Acesso em 15/11/2010.
- [8] Disponível em: <<http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/9602/Scala-9602.html>> Acesso em: 14/11/2010.
- [9] Disponível em: <<http://strong.groups.et.byu.net/pages/articles/articles/history.pdf>> Acesso em: 14/11/2010.
- [10] YAMADA, K.; MOHRI, M. Properties and applications of silicon carbide ceramics. In: SŌMIYA, S.; INOMATA, Y. **Silicon carbide ceramics: fundamental e solid reaction**. Londres: Elsevier Applied Science, 1991. 13-44.
- [11] KNIPPENBERG, W. F. **Growth phenomena in silicon carbide**. 1963. 113 p. Tese – Universidade de Leiden, Holanda, 1963.
- [12] PIERSON, H. O. Covalent Carbides: Structure and Composition. In: _____ **Handbook of refractory carbides e nitrides: Properties, Characteristics, Processing and Applications**. Estados Unidos, Noyes Publications, 1996.118-136.
- [13] INOMATA, Y. Crystal chemistry of silicon carbide. In: SŌMIYA, S.; INOMATA, Y. **Silicon carbide ceramics: fundamental e solid reaction**. Inglaterra: Elsevier Applied Science, 1991. 1-11.
- [14] STARKE, U. Atomic Structure of SiC Surfaces. In: CHOYKE, W.J.; MATSUNAMI, H.; PENSL, G. **Silicon carbide: Recent Major advances**. Estados Unidos: Springer, 2003. 281-316.
- [15] CALLISTER, W. D. JR. Estrutura e propriedades das cerâmicas. In: _____ **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. Rio de Janeiro, LTC, 2002. 265-290.
- [16] HARRIS, G. L. Basic Physical Properties. In: _____ **Properties of Silicon Carbide**. Londres: Institution of Electrical Engineers, 1995. 3-13.
- [17] BANERJEE, S. Properties of Refractories. In: SCHACHT, C. A. **Refractories Handbook**. Estados Unidos, Marcel Dekker, 2004. 1-10.
- [18] HSU, S. M.; SHEN, M. Wear prediction of ceramics. **Wear**. no. 256, 867-878. 2004.

- [19] CINTRA, G. B. **Caracterização termomecânica de concretos espinelizados no sistema Al_2O_3 -MgO**. 2008. 200 p. Dissertação em Engenharia de Materiais – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.
- [20] RIBEIRO, S.; GARCIA, G. C. R. Estudo da viabilidade de obtenção de cerâmicas de SiC por infiltração espontânea de misturas eutéicas de Y_2O_3 -AlN, Y_2O_3 - Al_2O_3 , R_2O_3 -AlN. **Cerâmica**. no. 54, 227-232. 2008.
- [21] SUMER, G. et al. Proper selection of kiln furniture. **American Ceramic Society Bulletin**. Vol. 74, no. 7, pp. 54-65. 1995
- [22] GALESI, et al. Blast furnace trough and runners: techniques for minimizing the working lining oxidation process. In: **UNITECR**, 11., 2009, Salvador.
- [23] TANAKA, H. Sintering of silicon carbide. In: SŌMIYA, S.; INOMATA, Y. **Silicon carbide ceramics: fundamental e solid reaction** Inglaterra: Elsevier Applied Science, 1991. 213-238.
- [24] IZHEVSKYI, V. A. et al. Liquid phase sintered SiC ceramics from starting materials of a different grade. **Cerâmica**. no.50, 261-267, 2004.
- [25] DEKSNYS, T. P. et al. Síntese de Al_2O_3 /SiC em forno de microondas : estudo de parâmetros de processo. **Cerâmica**. no. 51, 343-348, 2005.
- [26] ANDERSSON, C-H., WARREN, R. Silicon Carbide Fibres and Their Potential for Use in Composite Materials: Part 1. **Composites**. Janeiro, 16-24, 1984.
- [27] COUSTUMER, P. Le, et. al. Understanding Nicalon Fibre. **Journal of European Ceramic Society**. 11, 95-103, 1993.
- [28] YAJIMA, S. et al, Synthesis of Continuous Silicon Carbide Fiber with High Tensile Strength and High Young's Modulus. Part 1. **Journal of Materials Science**. 13, 2569-2576.
- [29] HASEGAWA, Y. IIMURA, M. YAJIM, S. Synthesis of continuous Silicon Carbide Fiber: Part 2. **Journal of Materials Science**. 15, 720-728, 1980.
- [30] ISHIKAWA, T. Silicon Carbide Continuous Fiber. In: SOMIYA, S.; INOMATA, Y. **Silicon Carbide Ceramics – 2**. EUA: Elsevier, 1991, 81-98.
- [31] SIMON, G.; BUNSELL, A. R. Mechanical and Structural Characterization of the Nicalon Silicon Carbide Fiber. **Journal of Materials Science**. 19, 3649-3657, 1984.
- [32] YUN, H-M.; DiCARLO, J.A. Non-Oxide (Silicon Carbide) Fiber. In: BANSAL N. P., **Handbook of Ceramic Composites**. 1 ed. EUA: Springer, 2004, 558p.
- [33] HIRAI, T.; SASAKI, M. Silicon Carbide Prepared by Chemical Vapor Deposition. In: SOMIYA, S.; INOMATA, Y. **Silicon Carbide Ceramics – 1**. EUA: Elsevier, 1991, 77-98.
- [34] ANDREW, W. **Fiber Reinforced Ceramic Materials**. EUA: 1991, 532p.
- [35] NIWANO, K. Properties and Applications of SiC Whiskers. In: SOMIYA, S.; INOMATA, Y. **Silicon Carbide Ceramics – 2**. EUA: Elsevier, 1991, 99-116.
- [36] AKIYAMA, M.; YAMAMOTO, M. Silicon Carbide (Tokawhiskers) and their Application. **Silicon Carbide Ceramics – 2**. EUA: Elsevier, 1991, 117-138.
- [37] PETROVIC, J.J. et. al. Tensile Mechanical Properties of SiC Whiskers. **Journal of Materials Science**. 20, 1167-1177, 1985.

Abstract

Since the first attempts of fabrication of fiber reinforced composites, silicon carbide (SiC) is considered one of the most promising candidates for reinforce materials. Just as their high mechanical strength, stiffness and thermal stability, SiC also has excellent wear resistance and good resistance to oxidation. This paper will present an overview of the various types of SiC fibers, the production processes used and the most common properties and applications. Through this work, it will be possible correlate the performance of this inorganic ceramic with the chemical and physical properties that many applications requires and relation to the increasing popularity of this material.