

O CARBETO DE SILÍCIO (SiC) NA INDÚSTRIA DE REFRAATÓRIOS: PROPRIEDADES E APLICAÇÕES – REVISÃO DA LITERATURA

Resumo

O carbeto de silício (SiC) é um material cerâmico com conhecidas propriedades mecânicas, abrasivas, químicas, termoelétricas e refratárias, sendo comumente utilizado na produção de peças e insumos refratários. Nas últimas décadas sua utilização tem se estendido a produtos como monolíticos, tijolos, mobília de fornos, cadinhos entre outros. Entretanto, poucos trabalhos estudam e abordam as propriedades do SiC e sua relação com as aplicações. Desta forma, este trabalho faz uma revisão da literatura sobre o uso e produção do carbeto de silício, apresenta e organiza os principais estudos já realizados e correlaciona as propriedades do SiC com as principais aplicações na indústria refratária. Como conclusão foi possível identificar as características que o coloca como refratário de alto desempenho, propondo novos processos produtivos, aumentando a resistência ao choque térmico, propiciando maior vida útil e novas possibilidades de aplicação.

Palavras chave: Carbeto de silício, refratários, propriedades e aplicações.

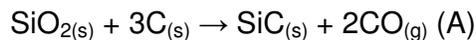
1. Introdução

O carbeto 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) [1] com coordenação tetraédrica e massa específica de 3,20 g/cm³. Sua forma natural é conhecida como moissanita, mineral transparente extremamente raro, descoberto em 1905 por Henri Moissan em um meteoro no Arizona, EUA [2]. O mineral encontrado na natureza não é utilizado na indústria, mas sim pelo mercado de jóias e é conhecido como pseudodiamante ou imitação de diamante.

Em 1824, Jöns Jacob Berzelius, cientista sueco, sugeriu pela primeira vez a existência da ligação entre átomos de silício e carbono. Entretanto, apenas em 1891, o primeiro processo de fabricação industrial do SiC foi desenvolvido. Tal avanço tecnológico foi realizado de forma acidental por Edward Goodrich Acheson, assistente de Thomas A. Edison, durante um experimento onde se buscava sintetizar diamante a partir de argila e carbono [1,3]. Acheson acreditou que o produto de seu experimento era uma combinação do carbono (*carbon*) e da alumina (*corundum*) proveniente da argila, o que o levou a nomeá-lo *carborundum* [1,2].

Anos depois se concluiu que esse composto sintetizado era na verdade a combinação de átomos de silício e carbono.

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) [1,2]. Neste processo, dois eletrodos são conectados através de uma resistência, usualmente de grafite, envolta por uma mistura de coque ou carvão como fontes de carbono e areia como fonte de sílica. A mistura é aquecida eletricamente para a formação do SiC segundo a seguinte reação:



Os produtos formados podem possuir colorações que vão do verde e azul claro ao azul escuro e preto dependendo das impurezas do material [2]. As mais comuns são o Al, Al₂O₃, Fe, Fe₂O₃, Si e a SiO₂ oriundas da areia, e o C e o S provenientes do coque, sendo os produtos mais claros produzidos a partir de matérias primas mais puras.

O SiC é encontrado em duas estruturas cristalinas diferentes: α-SiC e β-SiC. O β-SiC é uma forma cristalina transitória não estável a temperatura ambiente, podendo existir nessas condições de forma metaestável por meio de processos especiais em escala laboratorial. Sua formação ocorre em temperaturas inferiores a 2100 °C e sua estrutura cristalina é a cúbica de face centrada (idêntica ao diamante) [2,3,4]. Esta forma de SiC é única, não apresentando politipos [2-5].

O α-SiC é a forma estável do carbeto de silício apresentando célula unitária hexagonal ou romboédrica. Importante salientar que este material apresenta politipismo, fenômeno no qual fases termodinamicamente idênticas apresentam estruturas de empilhamento atômico diferentes [2-5]. Na tabela 1, os principais politipos do SiC podem ser observados, sendo o 6H-SiC o mais estável. São conhecidos aproximadamente 250 politipos de α-SiC, apresentando propriedades e características ligeiramente diferentes [1,5]. Entretanto, não se conhece profundamente os parâmetros que governam a formação de um ou outro politipo determinado. Desta maneira, o produto final (SiC beneficiado) é uma mistura de diversos politipos e uma combinação das propriedades e características destes.

Como apresentado no início da introdução, o silício e o carbono possuem coordenação tetraédrica e ligação fortemente covalente. Estas características,

aliadas a reduzida massa de seus elementos, são responsáveis por algumas das propriedades que fazem desta cerâmica um material de grande interesse para a indústria. Nas próximas seções abordaremos algumas das propriedades mais relevantes.

Tabela 1 – Politipos comuns do carbeto de silício [3,5].

Politipos	Estrutura	Número de camadas	Sequência
2H (α -SiC)	Hexagonal	2	ABABAB
4H (α -SiC)	Hexagonal	4	ABACABAC
6H (α -SiC)	Hexagonal	6	ABCACBABCACBA
15H (α -SiC)	Romboédrica	15	ABDACBCABACABCBA

1.1 Propriedades do SiC

O SiC, segundo a nova escala Mohs, é considerado o terceiro material mais duro conhecido (13) estando atrás do diamante (15) e do carbeto de boro (14) [1]. É classificado como uma das cerâmicas com maior resistência mecânica a flexão (100-820 MPa) [6], com baixo coeficiente de expansão térmica ($4,1-4,6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) [6,7] e elevado módulo elástico (207-483 GPa) [6,7].

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) tem facilidade de se tornarem harmônicas, propagando calor facilmente através do retículo, caracterizando assim alta condutividade térmica (80-300 W/m-K) [1,6,7].

A resistência à abrasão (desgaste) é uma medida da resistência do material ao escoamento de partículas em alta velocidade sobre sua superfície [8,9]. Uma estimativa direta da resistência à abrasão pode ser dada através da resistência mecânica a frio [8]. O carbeto de silício, por possuir elevada resistência mecânica a flexão e relativa tenacidade à fratura (dentre os principais materiais cerâmicos fica atrás apenas da zircônia e do diamante) [6], apresenta elevada resistência ao desgaste em comparação com outras cerâmicas.

Em aplicações onde a resistência ao choque térmico é um requisito importante, a utilização de materiais baseados em SiC tem constante atuação. Esta propriedade demonstra a capacidade do material em suportar variações bruscas de temperatura sem alterações consideráveis em suas propriedades mecânicas [10]. O carbeto de silício por possuir alta condutividade térmica (σ) e baixo coeficiente de expansão

térmica (α) não permite a geração de elevadas tensões termomecânicas em seu interior.

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 [1-3,11]. 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) [1]. O SiC inicia seu processo de oxidação em temperaturas relativamente baixas, próximas a 850 °C, caso seja exposto à atmosfera altamente oxidantes [1,7]. A maior taxa de oxidação ocorre entre 850 e 1100 °C [12]. Segundo Galesi et al., os principais mecanismos de oxidação são conhecidos como oxidação passiva e oxidação ativa [13].

Como pôde ser observado, algumas das principais propriedades e características do SiC são decorrentes de seu elevado caráter covalente. Adicionalmente, o comportamento de sinterização também é afetado por essa característica. Segundo Tanaka H. [14], o carbeto de silício de elevada pureza é fundamentalmente 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 [11]. 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.) [11,14-16]. Desta maneira, muito ainda pode ser feito para desenvolver o potencial de sinterização do SiC aumentando o desempenho de produtos sinterizados a partir dessa matéria prima.

Partindo desta visão geral, pode-se perceber a importância desta cerâmica para a indústria mundial de refratários. Entretanto, poucos são os trabalhos que relacionam as características e propriedades do carbeto de silício com as exigências requeridas. Esta revisão da literatura abordará algumas das principais aplicações refratárias de carbeto de silício, suas exigências, composições usuais, processamento e desenvolvimentos tecnológicos.

2. Aplicações

Algumas das principais aplicações refratárias do carbetos de silício são mobílias de fornos, cadinhos, canais de corrida, revestimento de cubas eletrolíticas para produção de alumínio, revestimento de fornos de incineração, tubos de proteção de termopares, tijolos, bicos queimadores, trocadores de calor, revestimento de tubos exaustores de gás, concretos, etc. [18,19,20]. Dentre essas e outras aplicações, este trabalho irá abordar de forma mais detalhada algumas das mais utilizadas.

2.1. Canal de corrida

Uma das estruturas de engenharia mais importantes para as indústrias de produção de aço, metais e ligas metálicas é conhecida como *canal de corrida*. Esta estrutura e seus dispositivos auxiliares são responsáveis pelo transporte do metal fundido dos locais de produção e/ou armazenamento aos locais de carregamento (fornos de tratamento, fornos de espera, linhas de produção etc.) [21]. Estes dispositivos refratários estão sujeitos ao contato direto com o metal fundido e suas escórias em temperaturas que podem variar de 1700 °C (gusa) [10] a 420 °C (zinco) [6].

Na indústria de produção de aço, a principal composição refratária utilizada nos canais de corrida é conhecida como ASC (Al_2O_3 -SiC-C) [21-24]. Porém, outras composições também são utilizadas, como as sílico-aluminosas e as mulíticas. Tradicionalmente, são produzidas peças pré-moldadas de concreto refratário (vibrado) [13,21,25]. O principal ligante deste sistema refratário é o cimento de aluminato de cálcio (CAC), ligante hidráulico com 70-80% de alumina [13,20,21].

Propriedades desejáveis

O canal de corrida está constantemente sujeito a variações de temperatura, devido aos constantes ciclos de carregamento e descarregamento de metal. Desta maneira, os materiais utilizados devem possuir elevada resistência ao choque térmico. Outra exigência fundamental é a resistência ao desgaste. Os concretos do canal estão sujeitos a elevadas taxas de erosão devido ao fluxo constante de metal líquido e escória [21].

A inércia química é outro requisito importante na seleção dos materiais de revestimento para o canal de corrida. Uma alternativa para aumentar a resistência ao desgaste dos concretos refratários é elevar o teor de SiC nas composições

refratárias [22]. Entretanto, este aumento pode levar a maior oxidação do refratário. Como apresentado na seção 1.1, o carbetos de silício é uma cerâmica que apresenta taxa crítica de oxidação entre 850 e 1100 °C em atmosferas com oxigênio [1,7,12]. Segundo *Galesi et. al*, três são os mecanismos principais de desgaste por oxidação, conhecidos como oxidação da borda, oxidação da interface da linha de trabalho e de segurança e oxidação por práticas de operação [13].

Entretanto, desenvolvimentos foram realizados para contornar esta característica negativa, como a utilização de agentes antioxidantes (pós de metais e ligas, carbetos, boretos e óxidos de níquel), melhorias de projeto (seleção de materiais com coeficientes de expansão térmica próximos), aumento da resistência ao choque térmico [13] e a nitretação (Si_3N_4) dos grãos de SiC.

2.2. Carro torpedo

A redução do minério de ferro nos auto fornos tem como principal produto o ferro gusa, liga de ferro com alto teor de carbono e impurezas como silício, manganês, fósforo e enxofre. Para a fabricação do aço, o gusa deve ser submetido a um processo de refino para a redução do teor de carbono e outros elementos. O transporte do ferro líquido dos auto fornos para as estações de tratamento (estação de dessulfuração e aciaria) é realizado por vagões, revestidos por refratários, conhecidos como *carros torpedo* [10 26-28].

Na década de 70 e 80, as composições refratárias utilizadas eram de alumina ligadas a piche. Entretanto, o tempo de serviço destes materiais não chegava a 250.000 toneladas de metal transportado [29]. Nos final dos anos 80 e início dos 90, tijolos de $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ (ASC) foram implantados aumentando a vida útil do revestimento em mais de 100.000 toneladas [29].

Propriedades desejáveis

Os carros torpedo são equipamentos que estão sujeitos a contínuas tensões termomecânicas durante o carregamento e descarregamento, assim como à corrosão e desgaste por ferro e escória a temperaturas próximas de 1700 °C [20,29]. Desta forma, é exigido do revestimento refratário elevada resistência ao choque térmico e à corrosão.

Segundo a literatura, a quantidade de gusa transportado por cada vagão esta entre 250-400 toneladas de metal por viagem [29,30,31] (quantidade similar a um ciclo de vazamento do auto forno), fazendo do equipamento peça fundamental na

produção do aço. Desta maneira, os refratários encontram-se constantemente sujeitos a elevados estados de compressão devido às cargas suportadas.

Com o objetivo de aumentar a produtividade e o tempo de serviço dos vagões, Silva, et. al identificaram que os principais mecanismos de desgaste dos tijolos de $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C}$ contendo microssílica (MS), ocorrem na presença do CaO e Na_2O provenientes dos tratamentos de refino do gusa [32,33,34]. A matriz dos tijolos, composta de mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), reage com o produto da reação do CaO e da SiO_2 formando guelenita e anortita, fases de baixo ponto de fusão e baixa densidade [32,33,34]. No caso do Na_2O , proveniente dos agentes fluxantes e das matérias primas utilizadas nos auto fornos, este componente alcalino consome a alumina, o carbeto de silício e o carbono presentes nos refratários através de reações de oxidação [29,30,31].

Portanto, tendo em vista que a corrosão é iniciada na mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), uma grande vantagem seria a substituição de parte da alumina e sílica da composição por SiC. Esta substituição, entretanto, acarretaria na necessidade de pré sinterização das peças em temperaturas acima de 2000°C (vide secção 1.1).

Além da inércia química, outras propriedades também são fundamentais, como o módulo de ruptura a quente (MRQ) e a resistência ao choque térmico (RCT). Ye F.

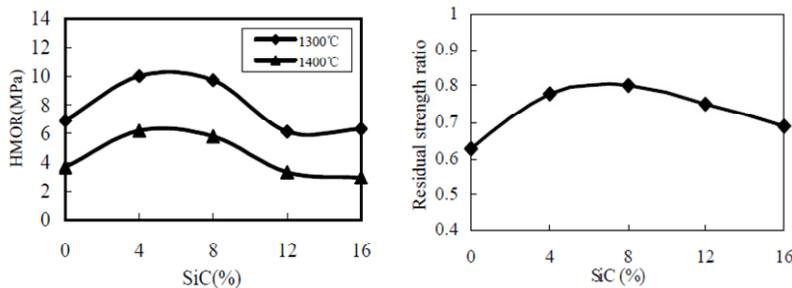


Figura 1 – HMOR e resistência mecânica residual em função do teor de SiC utilizado [35].

et. al [32]

obtiveram

máximos de módulo de ruptura

a quente utilizando

teores de 4 a 8%

de SiC. Neste mesmo trabalho

apresentou-se o

comportamento termomecânico desta composição. Da mesma forma que os resultados de MRQ, o teor ótimo de SiC observado foi entre 4 e 8%.

Uma alternativa utilizada por alguns autores para melhorar o desempenho destes tijolos foi a utilização de refratários ASCMg ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC} - \text{C} - \text{MgAl}_2\text{O}_4$) sem a presença de sílica livre [29,31]. O espinélio, formado a partir da alumina e da magnésia, é uma fase de maior refratariedade, resistência a corrosão e resistência ao desgaste que a mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) [29,31], sendo uma matéria prima ideal

para adição. Outra opção é a substituição parcial da MS por SiC ultra fino ($D_{50} = 5,0 \mu\text{m}$) ou metaestável em peças pré-queimadas em atmosfera controlada para evitar a oxidação. Esta substituição irá reduzir a formação de fase vítrea residual e a formação de mulita na matriz, aumentando o MRQ, a RCT e a resistência ao ataque químico.

2.3. Cuba de redução eletrolítica de alumínio

No final do século XIX, Charles M. Hall e Paul L. T. Héroult desenvolveram o primeiro processo industrial de produção de alumínio, conhecido como *Hall-Héroult*. Ele consiste na obtenção do alumínio metálico por meio da redução da alumina, através da passagem de corrente elétrica [20,33,34]. O equipamento responsável por este processo de transformação é conhecido como cuba ou célula eletrolítica. As cubas costumam trabalhar em temperaturas entre 960-1000 °C.

Cada cuba é revestida com uma grande diversidade de materiais cerâmicos (figura 2) como o catodo, as pastas frias, o revestimento de fundo (isolantes e tijolos densos) e os materiais da *sidewall* (revestimento lateral). Antigamente, os materiais do revestimento lateral da célula eram basicamente compostos de carbono. Atualmente estas composições foram substituídas por materiais de carbetos de silício ligados a nitreto de silício (SNBSC). A aplicação industrial destes materiais permitiu a utilização de paredes mais finas (60-100 mm), anodos maiores, a utilização de correntes mais elevadas e conseqüentemente maior produtividade [35,36].

Propriedades requeridas

A primeira função do revestimento lateral da cuba é a contenção dos sais de

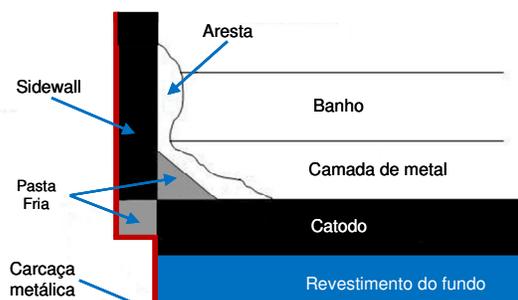


Figura 2 – Desenho esquemático da seção transversal do revestimento de uma cuba.

criolita fundidos e do alumínio líquido. Durante a operação da cuba, a transmissão de calor através das paredes mantém uma camada de banho *congelado* (na forma sólida) – *aresta* – responsável pela proteção do revestimento [33,36]. Desta maneira, os materiais das paredes laterais

devem possuir elevada condutividade térmica para que a temperatura no interior da cuba não fique muito elevada, derretendo a *aresta* e conseqüentemente permitindo o ataque direto do banho e do metal líquido ao revestimento. No entanto,

circunstâncias operacionais podem ocasionar instabilidades na cuba, aumentando a temperatura em seu interior e expondo a lateral do revestimento ao banho eletrolítico. Adicionalmente, os refratários localizados acima da linha do banho fundido, (sem a proteção da aresta) estarão sujeitos a ataques por vapores altamente corrosivos como o HF e NaAlF₄ [33,36]. Desta maneira, os materiais utilizados neste ambiente devem apresentar, além de elevada condutividade térmica, elevada resistência à corrosão. Os refratários de SiC ligados a Si₃N₄ são considerados o estado da arte para esta aplicação.

Atualmente, encontram-se no mercado diversos produtores de tijolos de SiC ligados a Si₃N₄. Após as etapas de processamento, a composição típica destes tijolos consistirá em 72-80 %-p de SiC e 20-28 %-p de Si₃N₄ [33,35-37].

Duas são as estruturas cristalinas que o Si₃N₄ pode apresentar: α -Si₃N₄ e β -Si₃N₄. A estrutura α pode ser convertida em β em temperaturas próximas a 1300-1450 °C [36,38]. Estudos encontrados na literatura apontam o β -Si₃N₄ como uma fase mais reativa nos tijolos SNBSC que a fase alfa [33,36]. Segundo Etzion et al. e Skybakmoen et al, quanto menor a razão α/β maior é a corrosão dos refratários (figura 3).

Adicionalmente, sabe-se que, termodinamicamente, o nitreto de silício é menos estável que o carbetto de silício. Desta forma, o ligante deverá ser atacado mais

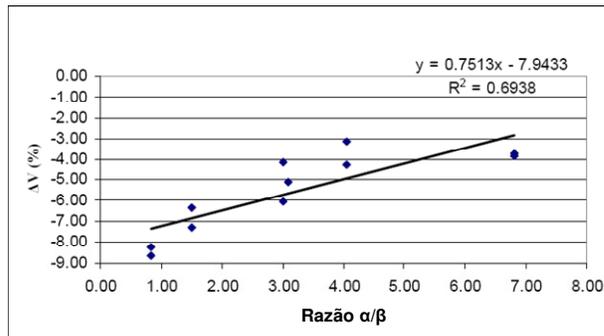


Figura 3 – Correlação entre a taxa de corrosão (% ΔV) e a razão de α/β [40].

facilmente que o SiC. Laucournet e colaboradores observaram em seus trabalhos que os grãos de SiC não apresentam tendência a corrosão pelo banho eletrolítico. Estudos da literatura reportaram que amostras com 26,6% do ligante de nitreto demonstraram maior grau de corrosão que amostras com 22,5%

[33]. Entretanto, é importante ressaltar a importância deste ligante, pois, sem a sua utilização, os custos energéticos para a produção de tijolos de SiC sinterizados seriam exorbitantes em decorrência das altas temperaturas necessárias para a sinterização destes materiais, inviabilizando a produção. Portanto, o controle das variáveis que afetam a resistência à corrosão dos tijolos SNBSC e dos parâmetros de operação das cubas é apenas uma medida inicial para o correto desempenho do

revestimento. Além de tais precauções, deve-se trabalhar visando à fase ligante dos tijolos. Uma das alternativas seria reduzir a quantidade de matriz (e consequentemente aumentar o teor de SiC) mantendo o mesmo poder ligante do refratário. Outra opção seria o desenvolvimento e utilização de carbeto super-finos ou metaestabilizados para compor a matriz, visando o favorecimento da sinterização e não da oxidação. Em último caso, devido à dificuldade de controle da queima, o favorecimento da formação de α -Si₃N₄ elevaria a resistência à corrosão dos tijolos e consequentemente a vida útil do revestimento.

2.4. Móbilias de forno

A móbilias de forno é uma estrutura de engenharia, utilizada como suporte para queima de produtos cerâmicos como peças refratárias, louça branca, louça sanitária, porcelanas elétricas, cerâmicas avançadas etc. [39,40]. Este equipamento pode ser composto por uma grande diversidade de componentes extrudados, colados, moldados ou prensados, dependendo da função a ser exercida e do ambiente de trabalho a que estarão sujeitos [20,39,40]. As composições mais utilizadas na produção de móbilias são compostas por mulita (Al₂O₃ – SiO₂), cordierita (Al₂O₃ – SiO₂ – MgO) e carbetos de silício [20,39,40].

Propriedades requeridas

Quatro das principais propriedades requeridas pelas móbilias são: a resistência a fluência (*creep*), resistência mecânica a altas temperaturas (MRQ), resistência choque térmico devido aos inúmeros ciclos de aquecimento e resfriamento de fornos de queima de produtos cerâmicos e resistência a oxidação, sendo esta última o principal limitador de tempo de serviço em móbilias de SiC. Desta maneira, conforme visto anteriormente, o SiC apresenta as propriedades necessárias para uso nesta aplicação [41-43].

Atualmente, os principais tipos de composições de carbetos de silício utilizadas na fabricação de móbilias são: Carbetos de silício recristalizado (ReSiC), carbetos de silício ligado a nitretos (NSiC), carbetos de silício infiltrado por silício (SiSiC) e carbetos de silício sinterizado (SSiC). Cada material possui diferentes propriedades, vantagens e limitações. A tabela 2 apresenta algumas das principais propriedades destes materiais [41-43].

Como pôde ser observado, existem diversas opções de refratários para fabricação de móbilias de forno. Assim sendo, cada situação específica exigirá

mobílias com propriedades diferenciadas. Logo, o principal parâmetro na escolha do material será o conhecimento do processo e das características do sistema de queima utilizado, considerando aspectos de custos e produtividade.

Tabela 2 – Características de dos materiais mais utilizados em mobília de forno. [40,41]

Tipo de ligação	α-ReSiC	β-ReSiC	SiSiC	NSiC	SSiC	Cordierita	Mulita
%SiC ou Al₂O₃	> 99	90-95	85-92	70-80	>98	45	60
Porosidade Aparente (%)	14-18	14-20	0-2	12-18	<0,1	-	-
M.O.R. a 1400 °C (MPa)	40-50	30-40	260	35-50	450- 600	6,2	11
Temperatura máx. de serviço (°C)	1600	1450	1350	1600	1900	1250	1760
Preço relativo	300	-	-	125	250	100	200

3. Conclusão

Através deste trabalho foi possível identificar algumas as principais aplicações refratárias do SiC e as propriedades relevantes deste material. O bom desempenho desta cerâmica é diretamente dependente de suas propriedades tais como: resistência mecânica, condutividade térmica, estabilidade dimensional, dureza, e principalmente devido a elevada resistência ao choque térmico e inércia química. Estas duas últimas propriedades foram identificadas como essenciais para desempenhar a importante função do SiC na indústria de refratários. Entretanto, ainda existe amplo campo de desenvolvimentos a serem realizados. Uma limitação atual desta matéria prima diz respeito às altas temperaturas necessárias para sinterização do SiC que, em geral, ultrapassam os valores comumente utilizados na indústria, impossibilitando a sua utilização em algumas aplicações. Como alternativa, o mercado, hoje, utiliza outras matérias primas nas composições à base de SiC objetivando reduzir a temperatura de sinterização. Essas matérias primas aumentam a densificação durante a queima, em contrapartida prejudicam as propriedades do refratário. Assim, abre-se um amplo campo para desenvolvimento de carbetos de silício reativos, metaestabilizados (com proporções de β -SiC ou fases amorfas) ou ultrafinos (nanométricos) que poderiam ser opções para auxiliar no comportamento durante queima, reduzindo as temperaturas de sinterização.

4. Referências Bibliográficas

- [1] YAMADA, K.; MOHRI, M. Properties and applications of silicon carbide ceramics. In: SÕMIYA, S.; INOMATA, Y. **Silicon carbide ceramics: fundamental e solid reaction**. Londres: Elsevier Applied Science, 1991. 13-44.
- [2] KNIPPENBERG, W. F. **Growth phenomena in silicon carbide**. 1963. 113 p. Tese – Universidade de Leiden, Holanda, 1963.
- [3] 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.
- [4] INOMATA, Y. Crystal chemistry of silicon carbide. In: SÕMIYA, S.; INOMATA, Y. **Silicon carbide ceramics: fundamental e solid reaction**. Inglaterra: Elsevier Applied Science, 1991. 1-11.
- [5] 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.
- [6] CALLISTER, W. D. JR. Estrutura e propriedades das cerâmicas. In: _____ **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. Rio de Janeiro, LTC, 2002. 265-290.
- [7] HARRIS, G. L. Basic Physical Properties. In: _____ **Properties of Silicon Carbide**. Londres: Institution of Electrical Engineers, 1995. 3-13.
- [8] BANERJEE, S. Properties of Refractories. In: SCHACHT, C. A. **Refractories Handbook**. Estados Unidos, Marcal Dekker, 2004. 1-10.
- [9] HSU, S. M.; SHEN, M. Wear prediction of ceramics. **Wear**. no. 256, 867-878. 2004.
- [10] CINTRA, G. B. **Caracterização termomecânica de concretos espinelizados no sistema Al₂O₃-MgO**. 2008. 200 p. Dissertação em Engenharia de Materiais – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.
- [11] RIBEIRO, S.; GARCIA, G. C. R. Estudo da viabilidade de obtenção de cerâmicas de SiC por infiltração espontânea de misturas eutéticas de Y₂O₃-AlN, Y₂O₃-Al₂O₃, R₂O₃-AlN. **Cerâmica**. no. 54, 227-232. 2008.
- [12] SUMER, G. et al. Proper selection of kiln furniture. **American Ceramic Society Bulletin**. Vol. 74, no. 7, pp. 54-65. 1995
- [13] GALESI, et al. Blast furnace trough and runners: techniques for minimizing the working lining oxidation process. In: **UNITECR**, 11., 2009, Salvador.
- [14] TANAKA, H. Sintering of silicon carbide. In: SÕMIYA, S.; INOMATA, Y. **Silicon carbide ceramics: fundamental e solid reaction** Inglaterra: Elsevier Applied Science, 1991. 213-238.
- [15] IZHEVSKYI, V. A. et al. Liquid phase sintered SiC ceramics from starting materials of a different grade. **Cerâmica**. no.50, 261-267, 2004.
- [16] DEKSNYS, T. P. et al. Síntese de Al₂O₃/SiC em forno de microondas : estudo de parâmetros de processo. **Cerâmica**. no. 51, 343-348, 2005.
- [17] KAMENSKIKH, V.A. et al. Silicon carbide refractory castables. **Refractories and Industrial Ceramics**, Vol. 46, no. 6, 2005. 412-415.
- [18] METZGER, M. R.; WITMER, M. L. **Understanding Silicon Carbide Types Having the Right Tool for the Job**. Disponível em: <<http://www.scprobond.com/WorldCoal.pdf>>. Acesso em: 16 mar. 2010.
- [19] KORDINA, O. SADDOW, S. E. Silicon Carbide Overview. In: SADDOW, S. E.; AGARWAL, A. **Advances in silicon carbide: Processing and Applications**. Norwood: Artech House, 2004. 1-26.
- [20] CARNIGLIA, S. C.; BARNA G. L. **Handbook of industrial refractories technology: Principles, types, properties and applications**. Estados Unidos, Noyes Publications, 1992. 627 p.
- [21] CHOIDHURY, S. K. et al. Role of ULC based Al₂O₃-SiC-C castable in improving endless lining life in B.F. runners in Indian steel plants. 12p. In: **UNITECR**, 7., 2001, Cancun.
- [22] IIDA, M.; OGURA, K. Dissolving Behavior of Al₂O₃-SiC-C castables into blast furnace slag. In: **UNITECR**, 11., 2009, Salvador.
- [23] PRIMACHENKO, V. V. et al. Al₂O₃-SiC-C thixotropic runner castable for blast furnaces. In: **UNITECR**, 11., 2009, Salvador.
- [24] PROMPT, N. et al. Thermomechanical modeling of a refractory structure: The wear layer of blast furnace trough. 7p. In: **UNITECR**, 7., 2001, Cancun.
- [25] YAO J. et al. Research on ASC hot shotcreting castable. In: **UNITECR**, 9., 2005, Orlando.
- [26] Disponível em: <<http://www.cesec.ufpr.br/metallica/01/01-texto.htm>>. Acessado em: 16 mar. 2010.
- [27] Disponível em: <<http://www.skamol.com/media/TorpedoCar2.JPG>>. Acessado em 10 mar. 2010.

- [28] Disponível em; <<https://www.infomet.com.br/site/img/siderurgia/03/033/05.gif>>. Acessado em: 10 mar. 2010.
- [29] SILVA S. N. et al. Evolution of Torpedo Car Refractory Lining Campaign. In: **UNITECR**, 9., 2005, Orlando.
- [30] JUSTUS, S. M. et al. Wear mechanism of Al₂O₃-SiC-Graphite refractories under the action of a desulfurizing agent based on a mixture containing CaO and powdered aluminum dross. In: **UNITECR**, 7., 2001, Cancun.
- [31] JUSTUS, S. M. et al. Post mortem study of Al₂O₃-SiC-C-MgAl₂O₄ ceramic lining used in torpedo cars. **Ceramics International**. No. 31, 897-904, 2005.
- [32] Ye F. et al. Rheological and thermo-mechanical properties of bauxite-based sprayable castable and their application in torpedo car. In: **UNITECR**, 9., 2005, Orlando.
- [33] ZUJOVIC, Z. D. ETZION, R.; METSON, J. B. Solid-State NMR Characterization of Silicon Nitride Bonded Silicon Carbide Refractories. **Ind. Eng. Chem. Res.** No. 47, 9913-9918, 2008.
- [34]
- [35] SKYBAKMOEN, E. et al. Quality evaluation of nitride bonded silicon carbide sideling materials. **Light Metals**. 773-778. 2005.
- [36] ETZION, R.; METSOB, J. B.; DEPREE N. Wear mechanism study of silicon nitride bonded silicon carbide refractory materials. **Light Metals**. 955-959.
- [37] LAUCORNET, R.; LAURENT, V.; LOMBARD, D. Chemical resistance of sideling refractory based on Si₃N₄ bonded SiC. **Light Metals**. 961-966. 2008.
- [38] McColm, I. J. Special light ceramics for modern applications. In: **Ceramic Science for Materials Technologists**. Escócia: Leonard Hill, 1983. 63-131.
- [39] SUMER G. Proper selection of kiln furniture. **American Ceramic Society bulletin**. Vol. 74, no. 7, 54-65, 1995.
- [40] SAINT-GOBAIN CERAMIC MATERIALS. LO-MASS[®] kiln furniture for saving energy. Disponível em: <<http://www.refractories.saint-gobain.com/uploadedFiles/SGrefractories/Documents/LoMassBro.pdf>>. Acessado em: 02 abr. 2010.
- [41] ROUTSCHKA, G. **Pocket Manual: Refractory Materials**. 1 ed. Essen: Vulkan-Verlag, 1997. 442 p.
- [42] SAINT-GOBAIN CERAMIC MATERIALS. LO-MASS[®] kiln furniture for saving energy. Disponível em: <http://www.refractories.saint-gobain.com/uploadedFiles/SGrefractories/Documents/Porzellan_GB_12s.pdf>. Acessado em: 02 abr. 2010.
- [43] ANDREAS, S. et al. Innovation in Design and materials for complete kiln furniture solutions. **C.F.I.** vol. 85, no. 5, 2008.

Abstract

Silicon carbide (SiC) is a ceramic material with known mechanical, abrasive, chemical, thermoelectric and refractory properties, and is commonly used in the production of monolithics, bricks, kiln furniture, crucibles and others. Although, there are few works that study and discuss the properties of silicon carbide and its relation to the applications. Thus, this study reviews the literature about the usage and production of silicon carbide, presents and organizes the main studies and correlates the properties with the primary applications in the refractory industry. In conclusion it identifies the characteristics that make silicon carbide a high-performance refractory material, proposing new processes, increasing the thermal shock resistance, providing longer service life and new applications.

Keywords: Silicon carbide, refractories, properties and applications.