

## INFLUÊNCIA DO TAMANHO DE GRÃO NO DESGASTE DE ALUMINA – UMA REVISÃO

P. Milak<sup>1,2\*</sup>; F. D. Minatto<sup>1,2</sup>; E. S. Gislon<sup>2</sup>; K. B. Coelho<sup>2</sup>; A. De Noni Jr. <sup>1,2</sup>; O. R. K. Montedo<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM

<sup>2</sup> CERTEC - Grupo de Pesquisa em Cerâmica Técnica

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

\* Av. Universitária, 1105 - Bairro Universitário, CEP 88806-000, Criciúma, SC, Brasil

e-mail: pamela.milak@gmail.com

### RESUMO

*Os materiais cerâmicos destacam-se por suas propriedades características e geram produtos que cumprem requisitos de engenharia remetendo a essa classe diversas aplicações. O óxido de alumínio está dentro deste contexto sendo vastamente aplicado em peças de alta tecnologia, principalmente em locais onde ocorre a solicitação em relação ao desgaste abrasivo e erosivo. As propriedades em relação ao desgaste de um material cerâmico podem ser melhoradas levando em conta as características do óxido utilizado, e do processo de fabricação que define a sua microestrutura final. Os efeitos dos diferentes parâmetros sobre o comportamento de desgaste da cerâmica de alumina foram previamente estudados e pode-se notar que a influência do tamanho de grão da alumina é um fator determinante nessa questão, dessa maneira o objetivo do trabalho é apresentar uma revisão sobre o tema, abordando o efeito dos dopantes na composição de alumina. Os resultados descritos possibilitam compreensão ampla sobre o assunto.*

Palavras-chave: alumina, tamanho de grão, desgaste, revisão.

## INTRODUÇÃO

Os materiais cerâmicos têm sido utilizados onde é necessário que sejam cumpridos requisitos de engenharia, como para produção de energia, e na indústria aeroespacial<sup>(1,2)</sup>, devido ao conjunto de propriedades que apresentam: estabilidade química, dureza relativamente elevada<sup>(1,2)</sup>, baixa densidade<sup>(2)</sup>, elevada resistência<sup>(2)</sup> e resistência a altas temperaturas<sup>(1,2)</sup>. Em comparação com os metais, cerâmicas, também são muito menos propensos a danos causados por ambientes corrosivos<sup>(1)</sup>.

A alumina pode ser considerada um representante típico das cerâmicas de engenharia<sup>(3)</sup>. Suas propriedades são atraentes para aplicações estruturais, automóveis, atividades aeroespaciais, biomédicas; e ferramentas de corte<sup>(4)</sup>, em especial quando as condições ambientais são graves. O desgaste de materiais cerâmicos é um assunto de grande importância industrial, pois leva à substituição frequente dos componentes<sup>(5)</sup>. A alumina surge então como o material mais comumente utilizado em aplicações que requerem resistência ao desgaste<sup>(6)</sup> tornando esse material particularmente importante por apresentar ampla gama de aplicações<sup>(7)</sup>; inércia química, considerável tenacidade à fratura, custo relativamente baixo<sup>(8)</sup>; alta dureza<sup>(1,2,7,8)</sup>, alta resistência à erosão<sup>(1,2,7)</sup>; bom comportamento em altas temperaturas<sup>(1,4,7,9)</sup>; elevada resistência elétrica; e alta disponibilidade<sup>(4)</sup>.

O processo de obtenção da alumina para produção em larga escala é conhecido como *Bayer*<sup>(9,10)</sup>, que consiste na sua extração a partir da bauxita. Existe uma grande variedade de aluminas comerciais que podem apresentar entre 85% e 99,999% de  $Al_2O_3$ . Além disso, essa classe de materiais pode ser encontrada com diferentes densidades e características microestruturais variadas, como tamanho de grão. O comportamento da alumina em relação ao desgaste pode ser afetado por todas essas variáveis<sup>(8)</sup>.

Um elevado número de publicações estuda a influência da microestrutura sobre o desgaste de cerâmica de alumina, sendo grande parte focada no papel do tamanho de grão<sup>(11-18)</sup>. De maneira geral sabe-se que um tamanho de grão reduzido e uma estreita faixa de distribuição granulométrica, muitas vezes promovem a melhoria da resistência ao desgaste da alumina<sup>(13,18)</sup>. Relações semelhantes entre as taxas de desgaste e tamanho de grãos são observados em trabalhos que tratam sobre variados modos de desgaste, como erosivo, abrasivo, corte e moagem<sup>(12)</sup>.

Objetivando abordar a influência do tamanho de grão sobre o desgaste da alumina foi possível perceber que diversos fatores interferem sobre esta característica microestrutural como a rota de fabricação, método e tempo de sinterização e concentração de dopantes. Dentre estes, a concentração de dopantes destaca-se como um fator vastamente explorado, tornando-se o foco desta revisão.

## TAMANHO DE GRÃO DE ALUMINA

O papel do tamanho de grão da alumina sobre o comportamento em relação ao desgaste tem sido vastamente estudado<sup>(11-18)</sup> e tem gerado consideráveis melhorias nesses materiais. O tamanho de grão do material sinterizado já é considerado como o principal fator na determinação da resistência e desgaste<sup>(13,14,16)</sup>.

Percebe-se que a transição do "desgaste moderado" para o "desgaste grave" acontece quanto mais rápida for a microfissura, à medida que há um aumento do tamanho de grão; logo, essas cerâmicas são utilizadas em aplicações práticas, devido às suas excelentes propriedades mecânicas, elétricas e ópticas<sup>(16)</sup>.

Ao obter microestrutura controlada para se chegar às cerâmicas densas e de grão fino, é possível melhorar as propriedades da alumina para diversas aplicações. A resistência mecânica da alumina pode ser melhorada diminuindo-se a dimensão dos grãos, com porosidade residual inferior a 0,05%<sup>(17)</sup>. Cerâmica estrutural de grãos grosseiros apresentam maior desgaste erosivo do que grãos finos<sup>(2)</sup>.

Com a crescente disponibilidade de pós comerciais de tamanho nanométrico de alumina, materiais com tamanho de grão submicrométrico têm sido fabricados com sucesso, gerando produtos de alta resistência, alta dureza e, de maneira geral, com alta tenacidade. Estas propriedades favoráveis tornam a alumina de fina granulação um material atraente para aplicações onde seja exigida alta resistência à aplicação de carga e desgaste, como bombas, selos, bicos de alta precisão e implantes biomédicos<sup>(15)</sup>.

Abaixo de determinado tamanho de grão – nanocerâmicas – efeitos da plasticidade sobre o tamanho tendem a se tornar importantes, resultando em maiores valores de dureza<sup>(18)</sup>. Como consequência, a tração de plasticidade induzida deverá acumular numa menor taxa em materiais nanocerâmicos. Assim, a combinação de maior dureza e escala nanométrica de falhas na fronteira de grão podem resultar em melhorias na resistência ao desgaste de nanocerâmicas.

Avaliando-se as propriedades da alumina com diferentes tamanhos de grão, a densidade aumenta para um menor tamanho de grão, bem como a dureza do material<sup>(15)</sup>. Roy et al.<sup>(15)</sup> mostraram que a dureza Vickers de aluminas com tamanho de grão de 4  $\mu\text{m}$ , 0,95  $\mu\text{m}$  e 0,45  $\mu\text{m}$  foi respectivamente de 17,5 GPa, 20,56 GPa e 23,77 GPa, e a densidade foi de 3,94 g/cm<sup>3</sup>, 3,92 g/cm<sup>3</sup> e 3,96 g/cm<sup>3</sup><sup>(15)</sup>. Neste estudo, a taxa de desgaste diminuiu com a redução do tamanho de grão da alumina.

O efeito da composição e da microestrutura em relação ao desgaste abrasivo de uma série de cerâmicas de alumina com pureza de 85 a 99,997% indicaram que, para melhorar a resistência ao desgaste, o tamanho do grão de alumina deve ser pequeno, independentemente do teor de alumina<sup>(8)</sup>.

Entretanto, há certa controvérsia. Foi observado que o aumento do tamanho de grão conduz a um aumento do desgaste. Sugere-se que o efeito do tamanho de grão sobre o comportamento de desgaste da alumina seja fortemente influenciado pela geometria de contato<sup>(19)</sup>. O aumento da resistência ao desgaste também pode ser obtido quando grandes grãos alongados são introduzidos como reforço na microestrutura, o que resulta numa melhora da tenacidade à fratura do compósito<sup>(19)</sup>. Melhorias no comportamento do desgaste tanto erosivo quanto abrasivo são perceptíveis com a utilização de partículas chamadas de reativas (menores que 1  $\mu\text{m}$ ), mas essa melhoria não pode ser atribuída apenas ao tamanho de grão, tornando-se necessário avaliar o papel das fases intergranulares<sup>(20)</sup>.

Dentre as maneiras de modificar as características microestruturais da alumina, a utilização de dopantes influencia e pode ser utilizada como uma ferramenta para controlar o crescimento anormal dos grãos, que por sua vez, como mencionado, afeta o desgaste de alumina. Devido ao grande número de publicações referentes à dopagem de alumina, é essencial a abordagem deste tema.

## EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE DOPANTES

As propriedades mecânicas da alumina são influenciadas pela seleção dos aditivos<sup>(14,20-22)</sup> e dopantes<sup>(16,23-27)</sup> utilizados na sinterização, que afetam a distribuição do tamanho de grãos e as fases formadas na fronteira do grão.

É conhecido que dopantes favorecem a sinterização, e reduzem a mobilidade do limite do grão. O MgO, por exemplo, tem sido explorado, pois aumenta a taxa de densificação, proporciona tamanho uniforme de grão, diminui a taxa de crescimento

do grão e aumenta a densidade final da alumina durante a sinterização. Já dopantes como  $\text{SiO}_2$  e  $\text{CaO}$  são conhecidos por favorecerem o crescimento anormal do grão<sup>(25)</sup>. Sabe-se que a utilização de terras raras influi sobre as propriedades mecânicas, incluindo fluência, resistência à fratura e força, entre outros, embora não esteja claro o mecanismo de modificação das propriedades<sup>(26)</sup>. Segundo estudo realizado por West et al.<sup>(24)</sup>, a dopagem de alumina com zircônio e terras raras (Yb, Gd, La) aumentou a dureza do material nas condições de sinterização em que o tamanho de grão se manteve abaixo de  $0,5 \mu\text{m}$ , alcançando alta densificação, acima de 97%. Para a alumina dopada com 500 ppm de Yb, Gd e La, prensada a quente a  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ , que obtiveram tamanho de grão menor que  $1 \mu\text{m}$ , houve presença de precipitados, sugerindo saturação e segregação do dopante, de maneira uniforme, na fronteira do grão para esta concentração<sup>(24)</sup>.

A utilização de dopantes de terras raras retardou o crescimento do grão para as temperaturas estudadas e a magnitude do retardo tem relação com a espécie de terras raras. O retardo do crescimento de grão aumentou com o aumento do raio iônico do cátion  $\text{Yb} < \text{Gd} < \text{La}$  (o menor tamanho de grão foi obtido com o La). Isso ocorre pois cátions de terras raras bloqueiam a difusão da  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Contudo, a alumina dopada apresentou maior fratura intergranular em relação ao material não dopado e de tamanho de grão semelhante. Já a fratura transgranular aumentou com a redução do tamanho de grão, devido às microtensões entre grãos com diferentes orientações geradas pela expansão térmica. Isso vem a gerar em grãos maiores uma fratura espontânea na fronteira de grão<sup>(24)</sup>. O efeito da adição de dopantes de terras raras não apresentou efeito catastrófico sobre a resistência à fratura. A resistência à fratura foi afetada de maneira modesta, onde as aluminas dopadas apresentaram maior fratura intergranular, porque o dopante segrega e, assim, reduz a coesão no limite de grão. Entretanto, a redução da coesão na fronteira de grão foi compensada pelo aumento da área de superfície da fratura, devido ao caminho da fratura mais tortuoso que segue a falha intergranular<sup>(24)</sup>.

Maiti et al.<sup>(26)</sup> utilizou-se de amostras compostas de  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 5\%$  em peso de  $\text{ZrO}_2 + 1000 \text{ ppm}$  de dopante Y e La. As amostras foram sinterizadas a  $1500, 1600$  e  $1700 \text{ }^\circ\text{C}$  por 3, 6, 9 e 12 h. Avaliando-se os resultados, foi possível perceber que assim como em outros estudos<sup>(25)</sup>, o tamanho de grão aumenta de acordo com o aumento da temperatura de sinterização<sup>(26)</sup>. Em relação aos dopantes, o Ítrio (Y) inibiu o crescimento dos grãos, enquanto o La gerou grãos maiores. As amostras

sinterizadas a 1600 e a 1700 °C apresentaram dureza menor porque têm tamanho de grão maior. Os melhores resultados de dureza foram obtidos com as amostras sinterizadas a 1500 °C. As amostras dopadas com Y e Y-La sinterizadas a 1700 °C têm alta tenacidade, embora apresentem menor dureza e maior tamanho de grão<sup>(26)</sup>.

Buscando-se melhorias que pudessem ser adaptadas a processos industriais, Biotteau-Deheuvels et al.<sup>(25)</sup> estudaram a influência dos dopantes Ca-Mg-Si na microestrutura de compósitos de alumina e zircônia. A zircônia é muito encontrada em trabalhos que buscam o aperfeiçoamento das propriedades da alumina, por apresentar maior tenacidade do que a alumina, o que favorece o comportamento das cerâmicas em situação de desgaste. A utilização de ZrO<sub>2</sub> aumenta a resistência à fratura, pois ocorre a transformação da fase tetragonal até a monoclinica de ZrO<sub>2</sub>, acompanhado por um aumento do volume específico na ordem de 3-6%. Esse aumento de volume gera um esforço de compressão na matriz cerâmica próximo à interface ZrO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dificultando a propagação da trinca<sup>(26)</sup>. Além disso, é relatado que a matriz de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ZrO<sub>2</sub> gera melhoria na densificação do material<sup>(28-30)</sup>.

A primeira resposta do estudo de Biotteau-Deheuvels et al.<sup>(25)</sup> é bastante conhecida, quanto maior a temperatura, maior o tamanho de grão. Outra constatação foi que quanto maior a quantidade de ZrO<sub>2</sub>, maior o tamanho de grão do ZrO<sub>2</sub> e menor o tamanho de grão da alumina, devido à força de arrasto exercida pelos grãos de ZrO<sub>2</sub> sobre os grãos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>(25)</sup>. Em relação aos dopantes utilizados, abaixo de 1500 °C o Ca e o Mg não apresentaram efeito significativo sobre o tamanho de grão da alumina. Entre 1600 e 1650 °C o Ca aumentou o tamanho de grão da alumina, enquanto o Mg diminuiu. Mesmo com a alta temperatura e com o alto teor de cálcio, colaborando para o aumento do tamanho de grão, a presença do zircônio ainda diminuiu significativamente o tamanho de grão da alumina. O efeito do ZrO<sub>2</sub> superou o efeito dos dois dopantes, isso para qualquer quantidade de ZrO<sub>2</sub> e dopantes<sup>(25)</sup>. A presença de SiO<sub>2</sub> acelerou o crescimento do grão quando comparado ao CaO e ao MgO e a presença dos dopantes Si ou Si+Ca aumentaram, respectivamente, o tamanho de grão da alumina em cinco e três vezes em relação aos materiais com Ca e/ou Mg apenas<sup>(25)</sup>.

Hsu et al.<sup>(16)</sup> avaliaram a influência do Nióbio (Nb) sobre a densificação e o crescimento dos grãos de alumina<sup>(16)</sup>. Foram feitas adições de 0,1-0,5% de Nb em alumina com 99,5% de pureza. A sinterização ocorreu entre 1200-1450 °C com permanência de 2 h no patamar. Notou-se que a presença de Nb aumenta a

densificação da alumina com temperatura e tempo de sinterização menores do que o necessário para uma alumina pura, em torno de 100 a 150 °C inferior. Esse efeito é intensificado conforme o aumento do teor de  $Nb_2O_5$  até 0,5% em base molar. A densidade relativa do material foi de 95% comparado à alumina pura na temperatura de 1350 °C, independente da quantidade de dopante. Os melhores resultados foram com temperatura de sinterização de 1350 a 1450 °C para os teores de 0,2 a 0,5% em base molar de  $Nb_2O_5$ , onde foi possível obter  $Al_2O_3$  densificada com microestrutura homogênea e diferentes tamanhos de grãos. A amostra sinterizada a 1350 °C por 2 h com 0,4%  $Nb_2O_5$  alcançou 97% de densificação<sup>(16)</sup>.

Hah et al.<sup>(27)</sup> investigaram o efeito do tamanho de grão e de dopante na fronteira do grão em um conjunto de materiais de alumina, juntamente com o comportamento tribológico da mesma em um regime de desgaste moderado<sup>(27)</sup>. Utilizou-se alumina com pureza 99,5% contendo 500 ppm de MgO para auxiliar na sinterização, dopando a fronteira de grão com  $Y_2O_3$  de 0 a 1500 ppm com diferentes tamanhos de grãos. Como a solubilidade da ítria é muito baixa, cerca de 10 ppm em alumina policristalina, este dopante segrega na fronteira de grão. Com este estudo foi possível notar que quanto maior a dureza, menor o tamanho de grão independente da concentração de dopantes, e menor a resistência à fratura. A alumina que apresentou o menor tamanho de grão também teve o coeficiente de atrito mais baixo. O dopante  $Y_2O_3$  não fez diferença significativa na dureza. A resistência do material foi proporcional à área de concentração de dopante na fronteira do grão. Para um tamanho de grão constante, a resistência mudou com a concentração de dopante. A relação entre dureza e tamanho médio de grão é independente da dopagem de ítria, ou seja, a dopagem influencia menos que o tamanho de grão na dureza. Apesar disso, uma elevada quantidade de dopantes de ítria causa maior desgaste em baixas cargas. A resistência à fratura é proporcional à concentração de dopante na fronteira do grão. A indentação de alumina não dopada causa rachaduras que não são encontradas na alumina dopada com ítria. A alumina dopada com ítria apresenta fricção ou atrito relativamente maior que a alumina pura. Esse resultado está relacionado com a segregação na fronteira do grão<sup>(27)</sup>.

Sendo a taxa de desgaste de alumina dependente do tamanho do grão<sup>(13)</sup> e a resistência à fratura afetada pelas impurezas, com as informações do tamanho médio de grão e concentração de dopantes na fronteira de grão, é possível estabelecer a relação entre propriedades mecânicas, microestrutural e

tribológicas<sup>(27)</sup>. As mudanças de tamanho de grão encontradas e a presença de dopantes na fronteira do grão produzem mudanças mensuráveis nas propriedades mecânicas e no comportamento tribológico, mas essas mudanças são pequenas<sup>(27)</sup>.

Wang et al.<sup>(31)</sup> utilizaram nanopó de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  contendo 12% em peso de  $\text{TiO}_2$  com tamanho médio de cristalito de 40 nm<sup>(31)</sup>. Nos últimos anos, o material nanocristalino ganhou atenção, pois apresenta variedade de propriedades físicas interessantes; entretanto, a utilização de cerâmicas nanocristalinas têm incidido sobre o problema de alcançar altas densidades sem crescimento excessivo dos grãos<sup>(31)</sup>.

Sabe-se que  $\text{Al}_2\text{O}_3$  contendo Ti são amplamente utilizados em aplicações de desgaste<sup>(32)</sup>. Wang et al.<sup>(31)</sup> trabalharam para obter uma cerâmica de grãos-ultra-refinados (UFG). Os resultados de desgaste foram comparados com uma alumina pura e com uma alumina dopada com Ti preparada em condições que resultasse na obtenção de tamanhos de grãos grosseiros (CG)<sup>(31)</sup>. Foram encontradas as fases  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  e  $\beta\text{-Al}_2\text{TiO}_5$ , este último resultante da reação entre o Ti e a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  durante a sinterização. Não houveram grandes diferenças na microestrutura das cerâmicas UFG e CG e ambas são totalmente densas. Em geral, foi possível notar que os grãos menores são de  $\beta\text{-Al}_2\text{TiO}_5$  e os grãos maiores são de  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . O tamanho de grão mínimo na cerâmica ultra fina (UFG) foi de 400 nm. No caso da  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pura (densidade relativa de 99%), o tamanho médio de grão encontrado foi de 2,5  $\mu\text{m}$ , demonstrando claramente a funcionalidade de utilizar nanopós metaestáveis contendo solução sólida de Ti na obtenção de cerâmicas densas ultra-refinadas.

O soluto Ti contido na  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  foi o responsável pela maior dureza da cerâmica UFG (17,6 GPa) em relação à cerâmica GC (15,3 GPa), corroborando com estudos efetuados sobre o efeito da solução sólida sobre a dureza de materiais<sup>(33)</sup>. Além disso, nas amostras UFG houve menor incidência da fase  $\beta\text{-Al}_2\text{TiO}_5$ , que trata-se da fase menos dura, e fez com que essa cerâmica obtivesse o resultado desejado. É provável que o tamanho dos grãos não influencie a dureza destas cerâmicas, porque o tamanho dos grãos de 400 nm da cerâmica UFG ainda é muito grande para ser o responsável pelo endurecimento observado em outros nanomateriais<sup>(34)</sup>. A tenacidade da cerâmica CG é ligeiramente maior do que da cerâmica UFG<sup>(31)</sup>.

O comportamento de desgaste das amostras UFG e CG foi típico de cerâmicas policristalinas: desgaste leve inicial controlado por processos de deformação plástica, seguido por fratura controlada severa. O desgaste na cerâmica CG é maior e mais rápido em comparação com a cerâmica UFG, o que condiz com a maior

dureza da cerâmica UFG. Tanto comparado com a cerâmica CG quanto com a alumina pura, o desgaste da cerâmica UFG tornou-se menor<sup>(31)</sup>.

O refinamento de grão é a provável causa do retardo no tempo de transição de desgaste resultando na melhoria da resistência ao desgaste da cerâmica. Abaixo de um determinado tamanho de grão – nanocerâmicas, efeitos da plasticidade sobre o tamanho tendem a se tornar importantes, resultando em maiores valores de dureza<sup>(34)</sup>.

## CONCLUSÕES

A tendência da cerâmica nos mostra que "menor é melhor", onde tamanho de grãos menores favorecem as propriedades dessa classe de materiais. A partir dos fatores apresentados, tem-se definido a alumina como o material cerâmico que, levando em consideração questões econômicas e alto desempenho de engenharia, fornece através de um tratamento térmico, a microestrutura adequada às melhores propriedades, a fim de se obter um produto com elevada resistência ao desgaste. Conforme discutido, tamanho de grão é um fator de grande relevância na resistência ao desgaste de alumina e deve ser considerado quando deseja-se otimizar esta propriedade, embora é bem visto que ainda há dados aleatórios, fazendo com que o entendimento sobre os mecanismos de desgaste de alumina com tamanho de grão submicrométrico ainda esteja distante de ser completo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo suporte para a realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- (1) ZHOU, J.; BAHADUR, S. Erosion characteristics of alumina ceramics at high temperatures. *Wear*, v.181-183, p.178-188, 1995.
- (2) ZHANG, Y.; CHENG, Y. B.; LATHABAI, S. Erosion of alumina ceramics by air- and water-suspended garnet particles. *Wear*, v. 240, p.40–51, 2000.
- (3) CESARI, F.; ESPOSITO, L.; FURGIUELE, F.M.; MALETTA, C.; TUCCI, A. Fracture toughness of alumina-zirconiacomposites. *Ceram. Int.*, v.32, p.249-255, 2006.

- (4) KUMAR, A. S.; DURAI, A. R.; SORNAKUMAR, T. Wear behaviour of alumina based ceramic cutting tools on machining steels. Trib. Int., v.39, p.191-197, 2006.
- (5) SAHIN, Y.; DURAK, O. Abrasive wear behaviour of austempered ductile iron. Mater. and Design, v.28, p.1844-1850, 2007.
- (6) ESPOSITO, L.; TUCCI, A. Microstructural dependence of friction and wear behaviours in low purity alumina ceramics. Wear, v.205, p.88-96, 1997.
- (7) ĆURKOVIĆ L.; KUMIĆ, I.; GRILEC, K. Solid particle erosion behaviour of high purity alumina ceramics. Ceram. Int., v.37, p.29-35, 2011.
- (8) DOĞAN, C.P.; HAWK, J.A. Role of composition and microstructure in the abrasive wear of high-alumina ceramics. Wear, v. 225–229, p.1050–1058, 1995.
- (9) PARK, N.; CHOI, H.; KIM, D.; LEE, T.J.; KANG, M.; LEE, W.G.; KIM, H.D.; PARK, J.W. Purification of Al(OH)<sub>3</sub> synthesized by Bayer process for preparation of high purity alumina as sapphire raw material. J. of Crystal Growth, v.373, p.88-91, 2013.
- (10) HIND, A.R.; BHARGAVA, S.K.; GROCCOTT, S.C. The surface chemistry of Bayer process solids: a review. Colloids and Surfaces, v.146, p.359-374, 1999.
- (11) DAVIDGE, R.W.; RILEY, F.L. Grain-size dependence of the wear of alumina. Wear, v.186-187, p.45-49, 1995.
- (12) MARTINEZ, M.M.; DAVIDGE, R.W.; RILEY, F.L. Grain size effects on the wet erosive wear of high-purity polycrystalline alumina. Wear, v.172, p.41–48, 1994.
- (13) CHO, S.-J.; HOCKEY, B.J.; LAWN, B.R.; BENNINGSON, S.J. Grain-size and *R*-curve effects in the abrasive wear of alumina. J. of the Am. Ceram. Soc., v.72, p.1249–1252, 1989.
- (14) GALUSEK, D.; TWIGG, P.C.; RILEY, F.L. Wet erosion of liquid phase sintered alumina. Wear, v.233-235, p.588-595, 1999.
- (15) ROY, R.S.; GUCHHAIT H.; CHANDA, A.; BASU, D.; MITRA M.K. Improved sliding wear-resistance of alumina with sub-micron grain size: A comparison with coarser grained material. J. of the Eur. Ceram. Soc., v.27, p.4737-4743, 2007.
- (16) HSU, Y.F.; WANG, S.F.; WANG, Y.R.; CHEN, S.C. Effect of niobium doping on the densification and grain growth in alumina. Ceram. Int., v.34, p.1183-1187, 2008.

- (17) KRELL, A.; BLANK, P.; MA, H.; HUTZLER, T.; NEBELUNG, M. Processing of high-density submicrometer  $\text{Al}_2\text{O}_3$  for new applications. *J. of the Am. Ceram. Soc.*, v.86, p.546-553, 2003.
- (18) MUKHOPADHYAY, A.K.; MAI, Y.W. Grain size effect on abrasive wear mechanisms in alumina ceramics. *Wear*, v.162-164, p.258-268, 1993.
- (19) TERHECI, M. Grain boundary and testing procedure: a new approach to the tribology of alumina materials. *Wear*, v.211, p.289-301, 1997.
- (20) GOSWAMI, A.P.; ROY, S.; MITRA, M.K.; DAS, G.C. Influence of powder, chemistry and intergranular phases on the wear resistance of liquid-phase-sintered  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . *Wear*, v.244, p.1-14, 2000.
- (21) KOSTIĆ, E.; BOŠKOVIĆ, S.; KISS, S.J. Reaction sintering of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in the presence of the liquid phase. *Ceram. Int.*, v.19, p.235-240, 1993.
- (22) GOSWAMI, A.P.; DAS, G.C. Role of fabrication route and sintering on wear and mechanical properties of liquid-phase-sintered alumina. *Ceram. Int.*, v.26, p.807-819, 2000.
- (23) YOSHIDA, H.; HASHIMOTO, S.; YAMAMOTO, T. Dopant effect on grain boundary diffusivity in polycrystalline alumina. *Acta Mater.*, v.53, p.433-440, 2005.
- (24) WEST, G.D.; PERKINS, J.M.; LEWIS, M.H. The effect of rare earth dopants on grain boundary cohesion in alumina. *J. of the Eur. Ceram. Soc.*, v.27, p.1913-1918, 2007.
- (25) BIOTTEAU-DEHEUVELS, K.; ZYCHA, L.; GREMILLARD, L.; CHEVALIER, J. Effects of Ca-, Mg- and Si-doping on microstructures of alumina-zirconia composites. *J. of the Eur. Ceram. Soc.*, v.32, p.2711-2721, 2012.
- (26) MAITI, K.; SIL, A. Microstructural relationship with fracture toughness of undoped and rare earths (Y, La) doped  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{ZrO}_2$  ceramic composites. *Ceram. Int.*, v.37, p.2411-2421, 2011.
- (27) HAH, S.R.; FISCHER, T.E.; GRUFFEL, P.; CARRY, C. Effect of grain boundary dopants and mean grain size on tribomechanical behavior of highly purified  $\alpha$ -alumina in the mild wear regime. *Wear*, v.181-183, p.165-177, 1995.
- (28) CALDERÓN-MORENO, J.M.; ARELLANO-LÓPEZ, A.R.; DOMÍNGUEZ-RODRÍGUEZ, A.; ROUTBORT, J.L. Microstructure and creep properties of alumina/zirconia ceramics. *J. of the Eur. Ceram. Soc.*, v.15, p.983-988, 1995.

- (29) WANG, C.; HUANG, C.; WU, Y. Two-step sintering of fine alumina–zirconia ceramics. *Ceram. Int.*, v.35, p.1476-1472, 2009.
- (30) TUAN, W.; CHEN, J.; HO, C. Critical zirconia amount to enhance the strength of alumina. *Ceram. Int.*, v.34, p.2129-2135, 2008.
- (31) WANG, X.; PADTURE, N.P.; TANAKA, H.; ORTIZ, A.L. Wear-resistant ultra-fine-grained ceramics. *Acta Mater.*, v.53, p.271-277, 2005.
- (32) BANSAL, P.; PADTURE, N.P.; VASILIEV, A. Improved interfacial mechanical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13wt% TiO<sub>2</sub> plasma-sprayed coatings derived from nanocrystalline powders. *Acta Mater.*, v.51, p.2959-2970, 2003.
- (33) MITCHELL, T.E.; HEUER, A.H. Solution hardening by aliovalent cations in ionic crystal. *Mater. Sci. and Eng.*, v.28, p.81-97, 1977.
- (34) GLEITER, H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. *Acta Mater.*, v.48, p.1-29, 2000.

## **THE INFLUENCE OF GRAIN SIZE IN THE ALUMINA WEAR - A REVIEW**

### **ABSTRACT**

Ceramic materials stand out for their characteristic properties, which generate products that meet engineering requirements for different applications. Aluminum oxide belongs to that class of ceramic materials, being applied widely in the production of high-tech pieces, especially in places where the abrasive and erosive wear area strongly demanded. The properties relative to wear of a ceramic material can be improved taking into account the characteristics of the oxide used, and the manufacturing process that defines its final microstructure. The effects of various parameters on the wear behavior of alumina were previously studied and may be noted that the influence of grain size of alumina is a determining factor in this issue. In this way, the objective of this work is to present a review of that subject, including the effect of dopants on the composition of alumina. The results described allow a better understanding on the subject.

Key-words: alumina, grain size, wear, review.