**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA**

ALEXANDRE DUTRA GOLANDA

**Preparação e caracterização de compósitos abrasivos resinoides reforçados
com alumina reciclada**

Lorena

2017

ALEXANDRE DUTRA GOLANDA

**Preparação e caracterização de compósitos abrasivos resinoides reforçados
com alumina reciclada**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de Lorena, da Universidade de São Paulo, para
obtenção do título de Mestre em Ciências do
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Materiais na área de Materiais Convencionais e
Avançados

Orientador: Prof. Dr. Carlos Yujiro Shigue

Edição reimpressa e corrigida

Lorena - SP

Outubro, 2017

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado
da Escola de Engenharia de Lorena,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Golanda, Alexandre Dutra

Preparação e caracterização de compósitos abrasivos
resinoides reforçados com alumina reciclada /
Alexandre Dutra Golanda; orientador Carlos Yujiro
Shigue - ed. reimpr., corr. - Lorena, 2017.
96 p.

Dissertação (Mestrado em Ciências - Programa de Pós
Graduação em Engenharia de Materiais na Área de
Materiais Convencionais e Avançados) - Escola de
Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo.
2017

Orientador: Carlos Yujiro Shigue

1. Alumina. 2. Reciclagem. 3. Compósito abrasivo. 4.
Abrasivo. 5. Resina fenólica. I. Título. II. Shigue,
Carlos Yujiro, orient.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, com amor e gratidão, a Deus, que tem me abençoado e conduzido os meus passos, aos meus pais Antonio e Maria Celeste, aos meus irmãos Daniel, Thaís e Letícia, às minhas avós Regina (*in memoriam*) e Neide, à senhora Georgina de Paula e a todos aqueles que, com muito amor e paciência, contribuíram de tantas formas, com a minha formação pessoal e profissional.

AGRADECIMENTO

Ao professor Carlos Yujiro Shigue, pela atenção a paciência em me orientar neste trabalho, além das inúmeras conversas e conselhos, os quais têm enriquecido a minha formação acadêmica.

Ao órgão de fomento CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

À professora Kátia Cristiane Gandolpho Candioto, por permitir a produção dos compósitos e o ensaio pela técnica de excitação por impulso, ao professor Clodoaldo Saron, por permitir a realização do ensaio de DMTA, e ao professor Sebastião Ribeiro, por permitir a realização do ensaio de porosidade, e a todos os outros professores responsáveis pelos outros equipamentos usados neste trabalho.

Às empresas Ascontec Abrasivos, Elfusa geral de eletrofusão Ltda, e SI Group Crios, pela doação das amostras de alumina e de resina, sem as quais este trabalho seria dificultado.

À empresa Saint Gobain, pela realização do ensaio de dureza por Sand Blasting Penetration.

Ao senhor Carlos Espoz Hidalgo e à Gabriela Jesus Marins, por toda colaboração dada a este projeto.

Aos meus pais Antonio Golanda Filho e Maria Celeste das Neves Dutra Golanda, aos meus irmãos Daniel Dutra Golanda, Thaís Dutra Golanda e Letícia Dutra Golanda, ao meu cunhado Bruno Rafael, à minha avó Neide Neves Dutra, aos meus tios Miriam, Rita e Paulo e aos meus primos.

Aos amigos da graduação, da Pós-Graduação e do departamento: André Rezende, Beatriz Macedo, Belmira Lima, Bento Ferreira, Bruno Freitas, Camila Cezar Grillo, Carolina Freire, Claudia Salim, Denis Felipe, Denise Hirayama, Diego David Pinzón Moreno, Domingos Sávio dos Santos Figueira, Eleazar Ribeiro, Fábila Zampieri, Felipe Torres, Isnaldi, Fabio Martins, Julio César Pereira, Julio César Lourenço, Karen Monique da Silva Palma, Lucas, Marcos Schmidt, Marcus Vinicius Salgado, Maria Luiza Pereira, Nabil, Paula Cury, Pérsio Mozart Pinto, Rafael Theotônio de Castro, Rayane Veloso de Camargo, Renato Honório Gonsalves, Robersio Marinho, Sérgio, Tulio Vanderlei Soares Rodrigues, aos amigos dos Grupos de Oração Universitário e aos amigos da república, os quais foram companheiros durante este trabalho e ajudaram com seus conselhos e/ou orações.

A todos os funcionários desta instituição, inclusive os da oficina, da portaria e da limpeza, os quais contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão deste projeto.

“A humildade é o primeiro degrau para a sabedoria”

Santo Tomás de Aquino

RESUMO

GOLANDA, A. D. **Preparação e caracterização de compósitos abrasivos resinoides reforçados com alumina reciclada.** 2017. 96p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2017.

A iminente escassez de recursos naturais e de fontes energéticas não renováveis são forças motrizes para a adoção de práticas sustentáveis. Dentre os processos industriais que fazem uso intensivo de recursos naturais, estão os que utilizam processos de usinagem baseados em ferramentas abrasivas para desbaste, esmerilhamento, corte, entre outros. A partir deste panorama geral, é possível enxergar a necessidade de estudar os processos de usinagem com ferramentas abrasivas a fim de aumentar a compreensão sobre eles e de torná-los sustentáveis. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é avaliar, por meio do comportamento mecânico de compósitos abrasivos resinoides, o potencial de reciclagem de grãos de alumina oriundos de ferramentas abrasivas. No presente trabalho, foi estudada a preparação e caracterização de compósitos abrasivos resinoides reforçados com grãos alumina reciclada e virgem. Uma das aluminas recicladas é oriunda de rebolos e discos de corte resinoides, outra alumina é oriunda de rebolos vitrificados, e a última, composta por alumina branca, é recuperada de rebolos vitrificados refugados ou usados. As amostras de grãos de alumina reciclada e a de grãos de alumina marrom virgem foram caracterizadas por meio das técnicas de fluorescência de raios X (FRX), difratometria de raios X (DRX), microscopias óptica (MO) e eletrônica de varredura (MEV). Corpos de prova de compósitos utilizando os quatro tipos de alumina foram preparados por meio da mistura, prensagem e tratamento térmico de grãos de alumina e resinas fenólicas resol e novolaca. Por fim, os compósitos foram caracterizados por meio das técnicas de calorimetria exploratória diferencial (DSC), módulo elástico por excitação por impulso, impacto Izod, flexão em quatro pontos, análise térmica dinâmico-mecânica (DMTA), dureza por Sand Blasting Penetration (SBP), porosidade pelo método de Arquimedes e microscopias óptica e eletrônica de varredura. Os resultados dos ensaios mecânicos mostraram que os compósitos de alumina reciclada apresentaram depreciação em todas as propriedades estudadas em relação ao compósito de alumina virgem, exceto a resistência ao impacto Izod, no qual todas as amostras apresentaram baixa resistência. A razão desta baixa resistência ao impacto deveu-se à estrutura formada pelo grão de alumina, ligante (resina fenólica) e porosidade, na qual a baixa proporção de resina fenólica (10% m.) foi a responsável pelo resultado. Por outro lado, a causa da depreciação nas propriedades mecânicas apresentadas pelos compósitos de alumina reciclada foi a menor concentração em alumina e a presença de impurezas oriundas da produção das ferramentas abrasivas. Neste caso, o compósito de alumina branca reciclada apresentou melhores resultados das propriedades mecânicas em relação aos compósitos de alumina oriunda de rebolos vitrificados e os de alumina oriunda de rebolos e discos resinoides. Concluindo, o potencial de reciclagem dos grãos de alumina oriundos de ferramentas abrasivas visando o seu reaproveitamento no processo de fabricação destas ferramentas é limitado pela sua pureza, de modo que se no processo de reciclagem dos grãos for aumentada a concentração de alumina haverá possibilidade de seu reaproveitamento.

Palavras-chave: Alumina. Reciclagem. Compósito abrasivo. Abrasivo. Resina fenólica

ABSTRACT

GOLANDA, A. D. **Preparation and characterization of resin bonded abrasives composites reinforced with recycled alumina.** 2017. 96p. Dissertation (Master of Science) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2017.

The imminent scarcity of natural resources and nonrenewable energy sources are driving forces for the adoption of sustainable practices. Among the industrial processes that make intensive use of natural resources, there are those that use machining processes based on abrasive tools for roughing, grinding, cutting, among others. From this general panorama, it is possible to see the need to study the machining processes with abrasive tools in order to increase the understanding about them. Thus, the objective of this work is to evaluate, through the mechanical behavior of resin-bound abrasive composites, the recycling potential of alumina grits from abrasive tools. In the present work, the preparation and characterization of resinoid abrasive composites reinforced with recycled and virgin alumina grits was studied. One of the recycled aluminas comes from resin-bound grinding wheels and thin wheel cut-off discs, another alumina comes from vitrified grinding wheels, and the latter, composed of white alumina, is recovered from scrapped or used glazed grinding wheels. The samples of recycled alumina grits and virgin brown alumina grits were characterized by X-ray fluorescence spectroscopy (XRF), X-ray diffractometry (XRD), optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM). Composite test bodies using the four types of alumina were prepared by mixing, pressing and heat treatment of alumina grits and resol and novolak phenolic resins. Finally, the composites were characterized by differential scanning calorimetry (DSC), impulse excitation elastic modulus, Izod impact, four-point flexing, dynamic-mechanical thermal analysis (DMTA), Sand Blasting Penetration hardness (SBP), porosity by the Archimedes method and optical and scanning electron microscopy. The results of the mechanical tests showed that the recycled alumina composites presented depreciation in all the studied properties in relation to the virgin alumina composite, except the Izod impact resistance, in which all the samples presented low resistance. The reason for this low impact strength was due to the structure formed by the alumina grit, binder (phenolic resin) and porosity, in which the low proportion of phenolic resin (10% m) was responsible for the result. On the other hand, the reason for the depreciation in the mechanical properties presented by the recycled alumina composites was the lower concentration in alumina and the presence of impurities from the production of the abrasive tools. In this case, the recycled white alumina composite presented better mechanical properties in relation to alumina composites from vitrified grinding wheels and those from alumina from grinding wheels and resinoid disks. In conclusion, the recycling potential of the alumina grits from abrasive tools aiming at their reuse in the process of manufacturing these tools is limited by their purity, so that if in the grit recycling process the alumina concentration increases it will make possible its reuse.

Keywords: Alumina. Recycle. Abrasive composite. Abrasive. Phenolic resin.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Algumas propriedades físicas finais da resina fenólica	29
Tabela 2 – Diferenças quanto à reação de cura e à densidade de reticulação com relação à razão mássica entre a resina novolaca e o HMTA.....	32
Tabela 3 - Estrutura da fase estável (α -Al ₂ O ₃) e de alguns dos seus polimorfos	35
Tabela 4 – Propriedades térmicas e mecânicas da fase α -Al ₂ O ₃	36
Tabela 5 - Composição química e dureza Knoop das aluminas fundidas típicas.....	37
Tabela 6 – Indicação de ferramentas, ligantes e materiais usinados por tipo de alumina	38
Tabela 7- Composição típica de bauxita para fusão	45
Tabela 8 - Produção mundial estimada de alumina eletrofundida em toneladas no ano de 2016	47
Tabela 9 - Quantificação de energia e de água consumidas e de CO ₂ emitido na produção de alumina e de SiC	49
Tabela 10 - Exemplos de riscos à saúde ao longo do ciclo produtivo de alguns abrasivos	49
Tabela 11 - Códigos de cada tipo de compósito e de alumina usados no presente trabalho	58
Tabela 12 – Fração mássica de cada componente do compósito abrasivo resinoide	59
Tabela 13 – Quantidade e massa dos corpos-de-prova produzidos por tipo de amostra e de ensaio	60
Tabela 14 – Relação dos tipos de corpos-de-prova com a pressão no manômetro e pressão aplicada sobre a amostra	61
Tabela 15 - Etapas do tratamento térmico para cura do ligante	61
Tabela 16 - Composição química (%m) das amostras de partículas de alumina virgem e recuperadas obtida por FRX.....	69
Tabela 17 - Tangente δ , da temperatura de pico e do módulo de armazenamento (E') por tipo de amostra.....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama esquemático dos componentes básicos de uma ferramenta abrasiva.....	22
Figura 2 - Exemplos de ferramentas abrasivas convencionais e superabrasivas.....	23
Figura 3 - Diagrama esquemático do processo produtivo das ferramentas abrasivas resinoides	28
Figura 4 - Estrutura química da resina resol.....	31
Figura 5 - Estrutura química da resina novolaca	31
Figura 6 – Estrutura do HMTA	32
Figura 7 - Transformações de fase da alumina a partir de hidróxidos de alumínio	35
Figura 8 - Representação esquemática da estrutura da fase α -Al ₂ O ₃	36
Figura 9 - Diagrama esquemático do processo produtivo da alumina marrom.....	39
Figura 10 - Diagrama esquemático do processo produtivo da alumina branca, rosa ou vermelha	40
Figura 11 - Dureza e tenacidade à fratura de abrasivos sintéticos em comparação com outros materiais usados em usinagem.....	44
Figura 12 - Fluxograma esquemático do processo típico de reciclagem das aluminas montado a partir de informações fornecidas pela empresa Ascontec Abrasivos	51
Figura 13 - Diagrama do equipamento de ensaio pela técnica de excitação por impulso	52
Figura 14- Desenho esquemático do equipamento utilizado no ensaio de impacto Izod	53
Figura 15 - Diagrama de cargas e dimensões do corpo de prova para ensaio de flexão de 4 pontos	54
Figura 16 – Representação esquemática do ensaio de dureza por SBP	56
Figura 17 - Diagrama da temperatura em função do tempo do tratamento térmico de cura....	62
Figura 18 - Fluxograma da preparação e caracterização dos compósitos abrasivos	63
Figura 19 - Representação da amostra e dos corpos-de-prova produzidos	64
Figura 20 - Difratoograma de raios X das amostras de alumina: (a) ALO BR; (b) ALO RR; (c) ALO RV e (d) ALO VG.....	71
Figura 21 - Micrografia por microscopia óptica das partículas de alumina: (a) ALO VG e (b) ALO BR	72
Figura 22 - Micrografia por microscopia óptica das partículas de alumina: (a) ALO RV e (b) ALO RR	73
Figura 23 - Micrografia por MEV das amostras: (a) ALO VG e (b) ALO BR.....	75

Figura 24 - Micrografia por MEV das amostras: (a) ALO RV e (b) ALO RR	76
Figura 25 - Termograma das amostras: (a) resina RI-1192; (b) resina CR-2211 e (c) compósito da blenda produzida com as resinas RI-1192 e CR-2211 reforçado com partículas de alumina marrom de granulometria 60	77
Figura 26 - Resultado da massa específica das amostras de compósito abrasivo	79
Figura 27 - Resultado do módulo de elasticidade das amostras de compósito abrasivo	80
Figura 28 - Resultado da resistência ao impacto das amostras	81
Figura 29 - Resultado da resistência à flexão das amostras	82
Figura 30 - Resultado do módulo de elasticidade por flexão das amostras	82
Figura 31 - Módulos de armazenamento (E') e $\tan \delta$ por tipo de amostra.....	83
Figura 32 - Resultado da porosidade aparente das amostras.....	85
Figura 33 - Resultado da massa específica aparente para cada tipo de amostra	85
Figura 34 - Resultado do ensaio de dureza por SBP por tipo de amostra.....	86
Figura 35 - Micrografia da superfície de fratura da amostra VG com ampliação de 200x.....	87
Figura 36 - Micrografia da superfície de fratura da amostra BR com ampliação de 200x	88
Figura 37 - Micrografia da superfície de fratura da amostra RV com ampliação de 200x.....	88
Figura 38 - Micrografia da superfície de fratura da amostra RR com ampliação de 200x	89

ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

AB	Alumina eletrofundida branca
AM	Alumina eletrofundida marrom
AMONO	Alumina monocristalina
AR	Alumina eletrofundida rosa
AV	Alumina eletrofundida vermelha
AZ	Alumina eletrofundida com zircônia
BET	Teoria Brunauer-Emmett-Teller
CBN	Nitreto de boro cúbico
DMTA	Análise térmica dinâmico-mecânica
DRX	Difratometria de raios X
DSC	Calorimetria exploratória diferencial
FRX	Fluorescência de raios X
HRC	Dureza Hockwell C
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MO	Microscopia óptica
psi	libras por polegada quadrada
SBP	Sand blasting penetration
tf	tonelada-força
BSE	Elétrons retro-espalhados

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	19
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1.	Reciclagem na indústria de manufatura	21
2.2.	Ferramentas abrasivas	21
2.3.	Ligante orgânico de resina dura.....	25
2.3.1.	Produção das ferramentas abrasivas resinoides.....	26
2.3.2.	Resina fenólica	28
2.4.	Ligantes vitrificados.....	32
2.5.	Ligantes metálicos	33
2.6.	Grãos abrasivos.....	34
2.6.1.	Alumina.....	34
2.6.2.	Carbeto de silício	40
2.6.3.	Diamante	41
2.6.4.	Nitreto de boro cúbico (CBN)	43
2.6.5.	Possíveis reações com a alumina em serviço	44
2.6.6.	Produção da alumina eletrofundida	45
2.6.7.	Análise econômica.....	46
2.6.8.	Análise ambiental	47
2.6.9.	Análise de risco para a saúde	49
2.7.	Reciclagem de abrasivos	50
2.8.	Técnicas de caracterização aplicadas aos compósitos abrasivos.....	52
2.8.1.	Ensaio dos módulos elásticos pela técnica de excitação por impulso	52
2.8.2.	Impacto Izod.....	53
2.8.3.	Flexão em quatro pontos	54
2.8.4.	Dureza por <i>Sand Blasting Penetration</i> (SBP)	56
2.8.5.	Porosidade pelo método de Arquimedes.....	56

3.	MATERIAIS E MÉTODOS	58
3.1.	Matérias-primas	58
3.1.1.	Alumina virgem e reciclada	58
3.1.2.	Resinas fenólicas.....	59
3.2.	Preparação dos compósitos	59
3.3.	Análise das partículas abrasivas	64
3.3.1.	Fluorescência de raios X (FRX)	64
3.3.2.	Difratometria de raios X (DRX).....	64
3.3.3.	Microscopia óptica e eletrônica	65
3.4.	Análise do ligante por calorimetria exploratória diferencial (DSC).....	65
3.5.	Análise dos compósitos.....	66
3.5.1.	Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico pela técnica de excitação por impulso.....	66
3.5.2.	Impacto Izod.....	66
3.5.3.	Flexão em quatro pontos	66
3.5.4.	Análise térmica dinâmico-mecânica (DMTA)	67
3.5.5.	<i>Sand Blasting Penetration</i> (SBP)	67
3.5.6.	Método de Arquimedes	67
3.5.7.	Microscopia eletrônica	68
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
4.1.	Caracterização das partículas	69
4.1.1.	Análise por fluorescência de raios X (FRX)	69
4.1.2.	Análise por difração de raios X (DRX).....	70
4.1.3.	Análises por microscopia óptica e eletrônica de varredura.....	71
4.2.	Caracterização do ligante	77
4.2.1.	Análise por calorimetria exploratória diferencial (DSC)	77
4.3.	Caracterização do compósito.....	78

4.3.1. Análise do módulo de elasticidade dinâmico pela técnica de excitação por impulso e da massa específica.....	78
4.3.2. Análise da resistência ao impacto pelo ensaio de impacto Izod.....	80
4.3.3. Análise do módulo de elasticidade e da resistência à flexão pelo ensaio de flexão em quatro pontos	81
4.3.4. Análise do módulo de armazenamento e da tangente δ por DMTA.....	83
4.3.5. Porosidade pelo método de Arquimedes.....	84
4.3.6. Análise de dureza por SBP	86
4.3.7. Análise fractográfica por MEV	87
5. CONCLUSÃO	90
REFERÊNCIAS	91

1. INTRODUÇÃO

A iminente escassez de recursos naturais e de fontes energéticas industriais de baixo custo são forças motrizes importantes para adoção de práticas sustentáveis nas indústrias de transformação, especialmente naquelas de uso intensivo de matérias-primas e energias não renováveis. No longo prazo, o paradigma da indústria mudará de uma produção em massa não sustentável para uma produção sustentável ambientalmente (LINKE, 2016b).

O sucesso das companhias de manufatura depende largamente das suas habilidades de adaptação rápida às mudanças globais. Estas são exemplificadas por uma competição internacional, rápido crescimento de intercomunicação e o aumento da importância às questões ambientais. Dentre os processos industriais que fazem uso intensivo de recursos naturais estão as que utilizam processos de usinagem baseadas em ferramentas abrasivas para esmerilhamento, desbaste, corte, retificação, brunimento, lapidação e polimento de materiais, que representam uma tecnologia-chave na engenharia de produção com alta eficiência, baixo custo, qualidade e segurança (KLOCKE, 2009).

Apesar da importância estratégica e econômica das ferramentas abrasivas, estas são as menos estudadas do ponto de vista da ciência e engenharia de materiais. A maior parte da literatura é dedicada ao estudo da interação da ferramenta com os materiais que sofrerão corte ou desbaste pela ferramenta abrasiva (SUBRAMANIA; RAMANATH, 2000; MALKIN; GUO, 2008).

O cenário atual mostra que o avanço na tecnologia de ferramentas abrasivas tem ocorrido essencialmente a partir da obtenção de resultados empíricos por causa do grande número de variáveis que afetam a sua eficiência em serviço. Por outro lado, a boa estabilidade térmica, química e física dos grãos abrasivos permite a sua reciclagem por meio da remoção do ligante. Entretanto, o seu reaproveitamento na fabricação de ferramentas abrasivas de qualidade torna necessária a sua caracterização química, mecânica e microestrutural de maneira a revalorizar este insumo industrial.

Sendo assim, torna-se necessário o estudo sistemático do processo produtivo das ferramentas abrasivas a fim de se obter argumentos científicos para o modo de operação de cada etapa, e como o processo produtivo interfere na produtividade destas ferramentas em serviço.

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho térmico e mecânico de compósitos abrasivos resinoides produzidos com partículas de alumina recuperadas de ferramentas

abrasivas vitrificadas e resinoides misturadas com resinas fenólicas *resol* e *novolaca* e as comparar com um compósito preparado com partículas abrasivas de alumina eletrofundida marrom virgem nas mesmas condições.

No presente trabalho, foram utilizados grãos de alumina recuperados pela empresa Ascontec Abrasivos (Lorena, SP), a qual atua no ramo da reciclagem principalmente de alumina e carbetos de silício oriundos de resíduos industriais e ferramentas abrasivas (lixas, rebolos e discos de corte) pós-consumo ou que não foram aprovados para venda. O seu processo de reciclagem começa com a queima do ligante orgânico ou de óleo refrigerante lubrificante, seguido pela de britagem e moagem do grão abrasivo (se o ligante for orgânico), ou pela britagem e moagem do ligante inorgânico juntamente com o grão abrasivo. Este trabalho avaliou a ocorrência de transformações químicas e microestruturais nas partículas abrasivas e de prejuízo nas suas propriedades físicas de interesse na fabricação e aplicação de ferramentas abrasivas utilizando os métodos de caracterização de materiais compósitos de matriz polimérica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Reciclagem na indústria de manufatura

As tecnologias de produção precisam se tornar sustentáveis, assim como as ferramentas usadas. A usinagem é um dos processos de acabamento mais importantes, desta forma, as ferramentas abrasivas precisam ser incluídas nos esforços de tornar as tecnologias de produção mais sustentáveis. Há vários pontos, ao longo de todo o ciclo de vida das ferramentas abrasivas, que precisam ser trabalhados a fim de solucionar esta questão. Uma das preocupações, dentro de todo o ciclo de vida delas, é dar um destino adequado ao fim da vida útil, sendo a reciclagem ou reuso de componentes delas uma ação necessária, colaborando tanto com a redução dos gastos com o descarte correto e do volume ocupado em aterros, como com a redução do consumo de matérias-primas, de energia e da liberação de gases tóxicos ou causadores do efeito estufa (LINKE, 2014; LINKE, 2016b).

2.2. Ferramentas abrasivas

Os abrasivos foram usados pelo homem muito tempo antes do desenvolvimento da escrita. Homens primitivos usavam abrasivos para afiar ossos, madeira ou pedra. O processo de usar partículas abrasivas duras para dar forma aos materiais por meio do atrito entre eles provavelmente permitiu ao homem sair da Idade da Pedra. Os homens pré-históricos usavam arenito como ferramenta abrasiva, o qual contém partículas de areia (quartzo) e ligante de silicato. Os modernos rebolos, por sua vez, são compostos por partículas abrasivas normalmente fabricadas pelo homem e por um ligante apropriado (LINKE, 2016b; MALKIN; GUO, 2008).

As ferramentas abrasivas são tradicionalmente usadas no final do processo de usinagem quando se requer componentes com superfícies lisas e tolerâncias finas. O uso das ferramentas abrasivas é essencial tanto para processos de corte preciso e delicado de *waffer* de silício para circuitos microeletrônicos usando discos de corte de somente 20 μm de espessura, como para desbaste pesado e limpeza de tarugos e blocos em fundições e siderúrgicas (MALKIN; GUO, 2008).

As ferramentas abrasivas, com exceção dos abrasivos livres, são ligadas umas às outras pelo que é chamado de ligante, permitindo a manutenção de um processo sustentável com

qualidade suficiente de peça. Tudo o que compõe as ferramentas abrasivas, com exceção dos abrasivos, recebe a designação de ligante. Os ligantes têm os objetivos de prover a retenção dos grãos abrasivos suficientemente sem o indesejável arrancamento destes, prover a resistência necessária para transmitir as forças de usinagem e as forças centrífugas, permitir a erosão controlada do ligante para expor novas arestas de corte, oferecer espaço de poros suficientes para transportar cavacos e refrigerante lubrificante, prover adequada condutividade térmica, resistência ao choque térmico e resistência química contra o refrigerante lubrificante (KLOCKE, 2009; LINKE, 2016b)

Os constituintes básicos das ferramentas abrasivas podem ser observados na Figura 1.

Figura 1 - Diagrama esquemático dos componentes básicos de uma ferramenta abrasiva

Fonte: Adaptado (ELBE-ABRASIVES, 2017).

As propriedades essenciais dos rebolos podem ser ajustadas pelo tipo e tamanho dos grãos abrasivos, tipo de ligante, dureza do rebolo e pela estrutura do rebolo (espaçamento entre as partículas abrasivas) (MALKIN; GUO, 2008; LINKE, 2016a; DOMPIERI; SZNELWAR; SCALABRIN, 2009).

Os rebolos convencionais utilizam alumina ou carbetto de silício (SiC) como material abrasivo e ligante resinoide ou vitrificado. Os rebolos superabrasivos utilizam diamante ou nitreto de boro cúbico (CBN) como material abrasivo e ligante resinoide, vítreo ou metálico. Enquanto os rebolos convencionais são formados por uma estrutura composta inteiramente por abrasivos e pelo ligante, os rebolos superabrasivos são formados por uma fina camada abrasiva, que pode ser monocamada ou multicamada, sobre um disco metálico ou plástico (MALKIN; GUO, 2008; LINKE, 2016b).

Algumas das ferramentas abrasivas convencionais (à esquerda) e superabrasivas (à direita) podem ser observadas na Figura 2.

Figura 2 - Exemplos de ferramentas abrasivas convencionais e superabrasivas

Fonte: LB SB GROUP (2017); AA ABRASIVES (2017).

O tamanho das partículas e a sua concentração, nas ferramentas abrasivas, definem o número de arestas de corte, sendo que as partículas menores normalmente obtêm superfícies de menor rugosidade, no entanto são aplicadas maiores cargas de usinagem e é reduzida a vida da ferramenta. Como exemplo de aplicação de abrasivos com granulometria muito fina na forma de pó, tem-se o polimento e acabamento de vidros, azulejos, pedras semipreciosas, entre outros. Em contrapartida, as partículas abrasivas maiores podem gerar amostras com superfície de menor qualidade. O tamanho das partículas e a sua distribuição de tamanho também interfere na densidade de compactação das ferramentas abrasivas durante a moldagem (LINKE, 2015; DOMPIERI; SZNELWAR; SCALABRIN, 2009).

Cada faixa de tamanho das partículas abrasivas é produzida por separação granulométrica, em que as partículas maiores (*macrogrits*), maiores que 50 μm em diâmetro, são separadas pelo processo de peneiramento, o qual é composto por um conjunto de peneiras que retêm e deixa passar uma quantidade definida de partículas. As partículas mais finas (*microgrits*) são separadas por vários métodos de elutriação, devendo ser destacado que, as partículas ultrafinas são frequentemente separadas por centrifugação (MENARD; THIBAULT, 2011; LINKE, 2015).

A dureza da ferramenta abrasiva está associada à resistência dos abrasivos de serem soltos da matriz desta, além de estar relacionada com a fração volumétrica de ligante, com a resistência à quebra das pontes de ligante e à capacidade de retenção dos abrasivos dentro do ligante (LINKE, 2016b).

Além dos ingredientes principais dos ligantes para as ferramentas abrasivas, há os reforços, os agentes separadores, os componentes auxiliares, ou mesmo abrasivos secundários. Existem, primeiramente, três tipos básicos de ligantes: orgânicos (resina fenólica, borracha, goma-laca, poli-imida e poliamida e resinas epóxi ou poliuretano); vitrificado e metálico. As ferramentas abrasivas ligadas são produzidas em uma ampla variedade de formatos e tamanhos (LINKE, 2016a; KLOCKE, 2009; MENARD; THIBAUT, 2011).

A fim de resumir a diferença entre os cinco tipos de ligantes orgânicos, estão exemplificadas a seguir as aplicações típicas das ferramentas abrasivas feitas com cada um deles.

A resina fenólica é usada em fundições, oficinas de soldagem ou em operações de corte e desbaste; a borracha, por sua vez, é elástica e utilizada quando o acabamento é importante, podendo ser feito até disco de corte com este ligante; já a goma-laca é usada na obtenção de acabamentos de elevada precisão (DOMPIERI; SZNELWAR; SCALABRIN, 2009).

A Poli-imida e a poliamida são membros da mesma família polimérica e possuem maior tenacidade, resistência térmica e elasticidade que os ligantes de resina fenólica. A poli-imida é indicada para aplicações especiais, como a usinagem de sulcos em brocas de carbeto duros, esmerilhamento de arestas de insertos de carbeto e uso como ligante de grãos de diamante, mas o seu uso é restringido devido ao seu alto custo (MENARD; THIBAUT, 2011; LINKE, 2016a).

As resinas epóxi ou de poliuretano, por outro lado, são os ligantes menos duros para o uso em ferramentas abrasivas. Eles são comumente usados na usinagem de determinados tipos de discos quando ligados aos grãos abrasivos convencionais. O poliuretano é usado quando é requerido um rebolo com elasticidade muito alta. Eles são limitados a serem ligados aos grãos de diamante micrométricos, dentre os grãos superabrasivos, sendo destinados à usinagem de materiais cerâmicos e de vidros. Quando é necessário um desbaste suave ou um polimento, as resinas epóxi e poliéster são as mais indicadas (LINKE, 2016a; KLOCKE, 2009).

2.3. Ligante orgânico de resina dura

Os ligantes resinoides consistem de uma resina sintética ou de uma combinação de resina sintética com ou sem reforço. Como exemplo de mistura a seco, resina fenólica do tipo resol é usada para umectar as partículas abrasivas assim como as resinas fenólicas em pó do tipo novolaca curadas com hexametilenotetramina (HMTA). Apesar da variedade de resinas disponíveis atualmente, as resinas fenólicas são as mais usadas em rebolos resinoides (KLOCKE, 2009; MENARD; THIBAUT, 2011).

Com exceção do diamante e do nitreto de boro cúbico (CBN), um método comum de produção por prensagem a frio envolve umectação dos abrasivos com resina fenólica líquida do tipo resol, furfural ou álcool furfurílico, seguida pelo recobrimento com uma mistura de resina fenólica em pó e cargas ou auxiliares da usinagem (MENARD; THIBAUT, 2011; GARDZIELLA; PILATO; KNOP, 1999).

A combinação de resina fenólica do tipo resol com álcool furfurílico interfere na produção de poros na matriz resinoide da seguinte forma: quanto maior a quantidade de álcool furfurílico nesta combinação, maiores são os poros gerados durante a cura e maior é a velocidade do processo de polimerização. É importante destacar que, quanto maior o volume de poros no rebolo, menor é a dureza dele (ZHANG; YUAN; ZHOU, 2013; MENARD; THIBAUT, 2011; MALKIN; GUO, 2008).

As cargas nos ligantes resinoides possuem vários objetivos, tanto na etapa de produção como durante o uso da ferramenta, como por exemplo, na tenacidade, na resistência ao calor e na resistência à ruptura, na indução de poros, na melhora das propriedades de ligação, na mudança da aparência, entre outros. A pirita (FeS_2), o sulfeto de zinco (ZnS) e o sulfato de potássio (K_2SO_4) são algumas das cargas comumente usadas. Óxidos básicos, como o CaO e o MgO , são cargas que aceleram o processo de endurecimento. Entretanto, o CaO somente pode ser aplicado em operações de usinagem a seco porque pode hidratar e se transformar em CaCO_3 em contato com o refrigerante lubrificante (LINKE, 2016a).

Alguns exemplos de cargas e suas respectivas aplicações estão exemplificados a seguir: as lascas de vidro, as quais são usadas como reforço no diâmetro interno dos rebolos; outro tipo de carga são os pós metálicos de alta condutividade térmica, que são usados a fim de melhorar a absorção de calor durante a usinagem; bem como as partículas finas de SiC , que são usadas como endurecedor do ligante; os lubrificantes sólidos (cloreto de potássio, grafite, pirita e criolita, entre outros), por outro lado, são usados a fim de reduzir o atrito na interface ferramenta-peça, diminuindo as cargas por meio dos cavacos e preservando a afiação das

partículas abrasivas e as telas de fibra de vidro ou de fibra de carbono, por exemplo, as quais são adicionadas antes da prensagem a fim de diminuir o risco de o disco se desintegrar durante a rotação em altas velocidades (KLOCKE, 2009; LINKE, 2016a).

A fim de solucionar certas carências dos rebolos resinoides, é comum modificar as resinas fenólicas em pó. Além das variações na proporção de HMTA, têm sido adicionados elastômeros para alterar a dureza e a fragilidade do ligante, podendo-se assim, aumentar a velocidade de rotação segura do rebolo e diminuir os riscos de formação de fratura causados pelas grandes mudanças de temperatura produzidas pelo atrito e pressão. Neste contexto, polivinil butiral, alguns tipos de borracha, resina epóxi ou outros termoplásticos têm sido úteis. E no caso de rebolos reforçados com fibras, a adição de resina epóxi, por exemplo, melhora adesão da fibra de vidro à matriz (ligante) (KLOCKE, 2009; MENARD; THIBAUT, 2011).

Os rebolos resinoides possuem um problema, que é a perda da resistência e dureza quando em contato com refrigerantes lubrificantes alcalinos, a qual é atribuída à penetração das moléculas de água e, particularmente, dos íons OH^- na interface entre as partículas abrasivas e o ligante resinoide. A fim de minimizar este problema, os abrasivos são tratados com adesivos especiais. Ao usar rebolos resinoides, os refrigerantes lubrificantes misturados com água não podem exceder o pH de 9 (KLOCKE, 2009).

2.3.1. Produção das ferramentas abrasivas resinoides

A produção das ferramentas abrasivas resinoides contempla principalmente as etapas de pesagem, mistura, moldagem, compactação e cura do ligante resinoide. A pesagem dos componentes básicos (grão abrasivo e ligante), sem contar as cargas, é importante para se definir as proporções volumétricas de abrasivo, do ligante e da porosidade da ferramenta abrasiva. A mistura dos componentes é composta pela mistura úmida (grão abrasivo mais resina líquida ou furfural), a qual tem a finalidade de envolver os grãos abrasivos com este ligante, facilitando assim, a adesão da resina em pó e das cargas ao grão abrasivo; pela mistura à seco (resina em pó mais cargas) e pela mistura final, que é a mistura entre os produtos da mistura úmida e da mistura à seco, até se obter uma massa homogênea (MALKIN; GUO, 2008; LINKE, 2016a).

Antes da compactação, alguns produtos resinoides, como discos de corte e rebolos portáteis para usinagens brutas são reforçados por telas de fibra de vidro tecidas no interior ou nos dois lados (LINKE, 2016a; NORTON COMPANY, 1975).

A cura do ligante fenólico é feito em um forno entre 140 e 200°C, ou dielectricamente. Produtos com porosidade muito baixa podem ser obtidos com prensagem a quente entre 160 e 175°C, seguida pela cura no forno, assim como os produtos prensados a frio (MENARD; THIBAULT, 2011; GARDZIELLA; PILATO; KNOP, 1999). A prensagem a frio é feita com pressões entre 15 e 30 MPa, e tempo de aplicação entre 5 e 30 s, dependendo das dimensões e da forma da ferramenta abrasiva, da plasticidade da mistura, entre outros fatores. A prensagem a quente, por outro lado, é realizada entre 30 e 60 s por milímetro de espessura da ferramenta (LINKE, 2016a).

O tratamento térmico de cura do ligante resinoide precisa seguir um perfil de temperaturas a fim de se obter as propriedades desejadas para a ferramenta abrasiva. O tratamento térmico dos ligantes formados pelas resinas fenólicas dos tipos resol e novolaca leva em conta as seguintes reações em função da temperatura a que elas são submetidas:

Entre 70 e 80°C, o ligante resinoide começa a fluir e se transformar em uma massa fundida, além disso, a resina resol cura, liberando água na forma de vapor, endurecendo-se. O vapor de água pode escapar pelos poros na matriz resinoide (LINKE, 2016a; GARDZIELLA; PILATO; KNOP, 1999).

Entre 110 e 120°C, ocorre a iniciação do endurecimento (cura) da resina novolaca fundida pela decomposição do HMTA, liberando principalmente amônia (NH_3), (LINKE, 2016a; GARDZIELLA; PILATO; KNOP, 1999).

Entre 170 e 180°C, ocorre a reticulação final (vitrificação) da resina, tendo a liberação da maior parte da amônia, porém, deve-se ter cuidado com a cura excessiva devido à diminuição dos níveis de resistência. As propriedades finais (dureza, resistência, fragilidade) do compósito são definidas nesta etapa (LINKE, 2016a; GARDZIELLA; PILATO; KNOP, 1999).

Entre 180 e 200°C, as estruturas da benzilamina são quebradas e resultam na geração de mais amônia, tornando o ligante mais frágil, mas também, mais estável (LINKE, 2016).

A fim de elucidar o processo produtivo das ferramentas abrasivas resinoides, a Figura 3 apresenta um diagrama esquemático deste processo.

Figura 3 - Diagrama esquemático do processo produtivo das ferramentas abrasivas resinoides

Fonte: Adaptado (LINKE, 2016a).

Finalizando, serão colocadas, a seguir, algumas qualidades dos ligantes resinoides: são indicados para rebolos que são sujeitos a impactos assim como pressões laterais e cargas repentinas; são permitidas para altas velocidades de rotação e volumes de cavaco para discos de corte e rebolos para desbaste grosseiro e são capazes de produzir superfícies com alta qualidade devido à alta elasticidade no caso de discos de polimento (KLOCKE, 2009; LINKE, 2016b).

2.3.2. Resina fenólica

Os rebolos resinoides de resina dura são compostos, na maioria das vezes, pela resina fenólica, a qual tem substituído, gradualmente, os ligantes vitrificados em se tratando de desbaste grosseiro porque os rebolos ligados com este tipo de resina são mais fortes e têm maior resistência ao choque, podendo assim, ser operados com segurança sob o efeito de maiores velocidades e resultando em maior eficiência. O diamante e todos os abrasivos manufaturados estão disponíveis para este ligante (MALKIN; GUO, 2008; MENARD; THIBAUT, 2011).

A resina fenólica é produzida basicamente a partir da reação de condensação de fenol com formaldeído, sendo catalisada em meio ácido, neutro ou básico (GARDZIELLA; PILATO; KNOP, 1999).

Os fenóis são compostos que diferem dos alcoóis por se comportarem como ácidos fracos e dissolverem rapidamente em solução aquosa de hidróxido de sódio, mas são insolúveis em solução aquosa de carbonato de sódio. Os fenóis são sólidos sem cor, com exceção de alguns alquilfenóis líquidos. O fenol é altamente tóxico, devendo-se controlar rigidamente a sua exposição (GARDZIELLA; PILATO; KNOP, 1999).

O formaldeído é um dos compostos mais importantes da indústria química e é o primeiro dentre vários aldeídos alifáticos. Ele é um composto perigoso por causar irritação nos olhos, no trato respiratório superior e na pele. A agência de proteção ambiental dos Estados Unidos (EPA), apesar de não haver evidências, tem considerado o formaldeído como um possível cancerígeno humano, devendo-se, pois, controlar a exposição de trabalhadores a este composto. O formaldeído, à temperatura ambiente, é um gás incolor e com odor pungente, além de ser altamente reativo (GARDZIELLA; PILATO; KNOP, 1999).

As propriedades das resinas fenólicas são dependentes dos tipos de fenol e de aldeído, do pH de catálise, do excesso de fenol ou de aldeído, e do grau de reticulação (GARDZIELLA; PILATO; KNOP, 1999). Podem-se observar algumas propriedades físicas da resina fenólica na Tabela 1.

Tabela 1– Algumas propriedades físicas finais da resina fenólica

Propriedade (unidade)	Valor
Massa específica (g/cm ³)	1,3
Resistência à tração na ruptura (MPa)	55 a 70
Alongamento na ruptura (%)	1,0 a 2,5
Módulo de elasticidade por tração (GPa)	3,0 a 3,4
Módulo de cisalhamento (GPa)	1,1
Resistência à flexão (MPa)	90
Módulo de elasticidade por flexão (GPa)	4
Resistência à compressão (MPa)	130
Coefficiente de expansão térmica (°C ⁻¹)	1x10 ⁻⁵
Condutividade térmica (W/m°C)	0,3
Calor específico (J/kg°C)	1000
Temperatura de trabalho limite (°C)	120 a 200

Fonte: Adaptado (VAN KRAVELEN, 1990; GAY; HOA; TSAI, 2003).

As resinas fenólicas estão divididas basicamente em dois grandes grupos: novolacas e resóis. Eles se diferenciam quanto ao método de preparação, funcionalidade do monômero/oligômero, nível de condensação e forma final da resina (sólido ou líquido). As novolacas são sólidas, enquanto as resóis podem ser líquidas (dissolvidas em água ou em outro solvente) ou sólidas (GARDZIELLA; PILATO; KNOP, 1999).

As resinas fenólicas possuem as seguintes propriedades de destaque: excelente comportamento térmico; alto nível de resistência; não propaga chama e não emite fumaças tóxicas; estabilidade térmica e mecânica em longo prazo; excelente isolante térmico e elétrico, além de boa relação entre custo e desempenho mecânico e térmico.

As resinas fenólicas resol ou novolaca são combinadas na maioria dos casos com diversos materiais, como madeira (madeira compensada, aglomerada), areia (produtos de fundição), cargas minerais, pó de madeira, celulose ou de vidro (materiais de moldagem), alumina (abrasivos), mineral ou vidro (isolamento), papel (laminados), fibra de vidro ou fibra de carbono (pultrudados) (GARDZIELLA; PILATO; KNOP, 1999). Compósitos de resina fenólica reforçados com fibra de carbono também são usados em turbinas de foguete, em superfícies de veículos de reentrada e outras aplicações em que são submetidos a temperaturas extremas (GARDZIELLA; PILATO; KNOP, 1999; SREBRENKOSKA; BOGOEVA-GACEVA; DIMESKI, 2009).

2.3.2.1. Resol

As resinas fenólicas do tipo resol são produzidas a partir de uma razão molar entre fenol e formaldeído menor que um, e catalisadas por hidróxidos de metais alcalinos, carbonato de sódio, hidróxidos alcalinos terrosos, amônia e por varias aminas. Estas resinas são comumente curadas em pH básico por NaOH, por exemplo, liberando vapor d'água com a cura, mas podem também ser curadas em meio com pH ácido ou por aquecimento. As resinas do tipo resol, quando completamente curadas, apresentam uma temperatura de transição vítrea moderadamente alta, de aproximadamente 150°C (GARDZIELLA; PILATO; KNOP, 1999). Pode-se ver, na Figura 4, a estrutura química da resina resol e os destaques às pontes metilol e metilênica, as quais são importantes para a reticulação desta resina.

Figura 4 - Estrutura química da resina resol

Fonte: Adaptado (YANG; PU, 2009).

2.3.2.2. Novolaca

As resinas fenólicas do tipo novolaca são produzidas a partir de uma razão molar entre fenol e formaldeído maior que um, catalisadas em pH ácido. Para a sua catálise, é usado, por exemplo, o ácido oxálico, sulfúrico ou fosfórico. Elas são majoritariamente curadas com hexametilenotetramina (HMTA), mas também podem ser curadas com resina resol sólida, com bismetilol cresol, com bisoxazolina ou bisbenzoxazina. A resina novolaca é moderadamente ácida, enquanto o HMTA é básico (GARDZIELLA; PILATO; KNOP, 1999).

As resinas resol e novolaca podem também ser catalisadas por sais ácidos de metais bivalentes, como por exemplo, o acetato de zinco. Vários ácidos orgânicos são também usados como catalisadores (GARDZIELLA; PILATO; KNOP, 1999). Podem-se ver, na Figura 5, a estrutura química da resina novolaca e o destaque à ponte metilênica, a qual é importante para a reticulação desta resina.

Figura 5 - Estrutura química da resina novolaca

Fonte: Adaptado (JANECKI et al, 2013).

O grau de reticulação da resina novolaca está diretamente relacionado com a razão mássica entre a resina novolaca e o HMTA conforme pode ser observada na Tabela 2.

Tabela 2 – Diferenças quanto à reação de cura e à densidade de reticulação com relação à razão mássica entre a resina novolaca e o HMTA

Razão novolaca/ HMTA	Quantidade de HMTA	pH	Taxa de reação	Densidade de reticulação
94/6	Baixa	Mais baixo	Mais rápida	Baixa
80/20	Alta	Baixo	Mais lenta	Alta

Fonte: Adaptado (GARDZIELLA; PILATO; KNOP, 1999).

O hexametenotetramina (HMTA), cuja estrutura pode ser observada na Figura 6, é o composto mais importante para a cura das resinas novolaca. Ele é produzido a partir da reação entre o formaldeído e a amônia e se decompõe em elevadas temperaturas, liberando amônia, além de ter alta solubilidade na água e ser propenso à explosão na forma de pó (GARDZIELLA; PILATO; KNOP, 1999).

Figura 6 – Estrutura do HMTA

Fonte: (GARDZIELLA; PILATO; KNOP, 1999).

2.4. Ligantes vitrificados

Os ligantes vitrificados são altamente estáveis termicamente. Os rebolos vitrificados modernos são fáceis de ajustar o contorno e afiar em um passo só. A retenção dos abrasivos pelos ligantes vitrificados é parcialmente mecânica porque o ligante envolve as partículas, além disso, o ligante geralmente reage quimicamente com a superfície das partículas (LINKE, 2016a).

Os ligantes vitrificados consistem de silicatos (argilas vermelha e branca), caulim (também conhecido como argila branca, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), feldspato (KAlSi_3O_8 – $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ – $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), quartzo (SiO_2) e fritas. A frita é um material gerado a partir da mistura de minerais, óxidos e outros compostos inorgânicos, seguida pelo aquecimento até, no mínimo, a temperatura de fusão (acima de 1150°C aproximadamente) e pelo resfriamento rápido, sendo finalizado com a sua pulverização. A sinterização do ligante, que ocorre em temperaturas de até 1250°C por até 100 h, gera uma estrutura em que as partículas abrasivas são envoltas pelo ligante (LINKE, 2016a; LINKE, 2014).

Os ligantes vitrificados mudam de aparência devido à mudança de composição e do processo de sinterização. Há dois tipos de ligantes vitrificados, o primeiro deles é conhecido como ligante fundido, o qual é um ligante vidrado, com uma grande quantidade de fase vítrea. Ele resulta de um alto percentual de argila e fritas como matérias-primas. Durante a sinterização, o ligante funde completamente, fluindo em volta das partículas, e reage com a superfície delas. Por outro lado, o segundo tipo é o ligante sinterizado, que ocorre como uma pequena proporção de fase vítrea, sendo, pois, formada por uma grande proporção de feldspato e baixa proporção de fritas. As partículas só estão presas umas às outras por um material ligante parcialmente fundido. Este tipo de ligante é usado para usinagens críticas que requerem baixa carga e com carbeto de silício como grão abrasivo (LINKE, 2016a).

2.5. Ligantes metálicos

Os ligantes metálicos ou são do tipo multicamada (produzido por sinterização ou infiltração) ou monocamada (produzido por eletrodeposição ou brasagem). Eles são usados somente em partículas superabrasivas. Os ligantes metálicos proporcionam alta retenção dos abrasivos e baixo desgaste durante a usinagem, com exceção do cobre. Os ligantes metálicos possuem porosidade muito baixa, por isso são adicionadas cargas para a lubrificação durante a usinagem. Ferramentas com ligante metálico são difíceis de condicionar mecanicamente (LINKE, 2016a).

Os ligantes metálicos multicamadas consistem de várias ligas, como o cobre-estanho (bronze), cobalto-bronze, carbeto de tungstênio (W/WC) ou ligas do sistema ferro-cobre-estanho, e etc. O ligante precisa ter boa molhabilidade sobre as partículas abrasivas. Ferro e ligas com ferro podem causar reação indesejada com o diamante (carbono) devido à afinidade do ferro por carbono (LINKE, 2016a).

2.6. Grãos abrasivos

Os grãos abrasivos são uma ampla gama de materiais naturais ou sintéticos usados para moer, desgastar, lixar, alisar, limpar ou polir, frequentemente unidos entre si por um ligante a fim de fazer rebolos ou afixar com cola sobre costado (papel, tecido, fibra vulcanizada, combinação entre papel e tecido, entre outros) para fazer lixas. Embora esta definição inclua placas plásticas, lâs metálicas e pedra-pome, e ferramentas que usam uma única e grande pedra de diamante, este trabalho dissertará sobre as partículas abrasivas. Os grãos abrasivos usados em ferramentas abrasivas possuem tamanhos que variam de 1 μm a 5 mm (MENARD; THIBAULT, 2011; 3M INNOVATIVE PROPERTIES COMPANY, 2001).

2.6.1. Alumina

A alumina (Al_2O_3) é o óxido cerâmico mais largamente usado, devido às suas propriedades de resistência à abrasão, estabilidade química e refratariedade, cuja maior aplicação está na forma de abrasivos livres para lixamento e polimento de componentes ópticos. Outras aplicações da alumina estão na produção de cerâmicas eletrônicas, lâmpadas de vapor de sódio, materiais estruturais para altas temperaturas, cerâmicas resistentes à corrosão, blindagem, fibras cerâmicas, refratários e velas de ignição. Ele é também o mais largamente usado na forma de monocristal (LIU et al, 2007; MENARD; THIBAULT, 2011; CAWLEY; LEE, 2005; SHIRAI et al., 2009).

A alumina possui mais de 20 fases, dentre as quais, algumas delas são: $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$; $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$; $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$; $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$; $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$; $\rho\text{-Al}_2\text{O}_3$; $\eta\text{-Al}_2\text{O}_3$; $\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$; $\chi\text{-Al}_2\text{O}_3$ e $\varepsilon\text{-Al}_2\text{O}_3$, mas as fases mais importantes são: $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$; $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$; $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ e $\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$. As estruturas de algumas destas fases estão listadas na Tabela 3. A fase mais estável e aproveitada é a $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, cuja estrutura é romboédrica, que é a base para o coríndon. As outras fases são geradas a partir da decomposição térmica dos hidróxidos de alumínio sob diferentes condições. A fase $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ é o produto final formado a partir da desidrogenação de todos os hidróxidos de alumínio, conforme pode ser observado na Figura 7, a qual mostra as transformações mais comuns. (ANDERSSON, 2005; LINKE, 2016b; DAVIS, 2010; SHIRAI et al., 2009; GITZEN, 1970).

Tabela 3 - Estrutura da fase estável (α - Al_2O_3) e de alguns dos seus polimorfos

Fase da alumina	Estrutura
Alfa (α)	Romboédrico
Chi (χ)	Cúbico
Eta (η)	Cúbico
Gama (γ)	Tetragonal
Delta (δ)	Tetragonal
Teta (θ)	Monoclínico
Kappa (κ)	Ortorrômico

Fonte: Adaptado (GITZEN, 1970).

Figura 7 - Transformações de fase da alumina a partir de hidróxidos de alumínio

Fonte: Adaptado (SHIRAI et al., 2009).

A estrutura da α - Al_2O_3 , em que 2/3 dos interstícios octaédricos são ocupados pelos cátions Al^{3+} , e 1/3 dos interstícios octaédricos é ocupado pelos ânions O^{2-} , pode ser observada na Figura 8. As ligações iônicas compõem 60% da estrutura da alumina, enquanto as ligações covalentes compõem 40%. Deve-se destacar que a presença dos íons de oxigênio permite fortes ligações, o que influencia nas suas propriedades de destaque. As propriedades físicas da α - Al_2O_3 podem ser observadas na Tabela 5 (LINKE, 2016b; DAVIS, 2010; SHIRAI et al., 2009).

Figura 8 - Representação esquemática da estrutura da fase α -Al₂O₃

Fonte: Adaptado (SHIRAI et al., 2009)

Tabela 4 – Propriedades térmicas e mecânicas da fase α -Al₂O₃

Propriedade (unidade)	Valor
Massa específica (g/cm ³)	3,96
Módulo de elasticidade (GPa) (25 °C)	435 (paralelo ao eixo c)
Módulo de cisalhamento (GPa)	175
Resistência à flexão (MPa) (25 °C)	1035 (paralelo ao eixo c) 760 (perpendicular ao eixo c)
Resistência à compressão (GPa) (25 °C)	2
Dureza Knoop (GPa)	19 (paralelo ao eixo c) 22 (perpendicular ao eixo c)
Tenacidade à fratura (MPa.m ^{1/2})	2,8 a 4,5
Temperatura de fusão (°C)	2053
Estabilidade térmica (°C)	até 2000
Condutividade térmica (W/cmK) (25 °C)	0,4
Coeficiente de expansão térmica (25 a 1000 °C) (x10 ⁻⁶)	8,8 (paralelo ao eixo c) 7,9 (perpendicular ao eixo c)

Fonte: Adaptado (CAWLEY; LEE, 2005).

A alumina utilizada na indústria possui diferenças quanto à sua composição química e rota de produção, podendo ser fundida, sinterizada ou sol-gel. A alumina fundida é produzida de diferentes formas, podendo ser gerados os seguintes produtos:

- Alumina fundida marrom (AM);
- Alumina branca (AB);
- Alumina rosa (AR);
- Alumina vermelha (AV);
- Alumina com zircônia (AZ);
- Alumina monocristalina (AMONO);
- Alumina microcristalina;
- Alumina esférica porosa.

Deve-se destacar que a presença de outros óxidos na alumina pode alterar as suas propriedades. A presença de Cr_2O_3 e TiO_2 , por exemplo, aumenta a tenacidade, enquanto a de Na_2O é desvantajosa porque induz a formação do composto $\beta\text{-}11\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Na}_2\text{O}$, o qual é menos duro. Pode-se observar, na Tabela 5, a composição química das aluminas fundidas típicas e a dureza Knoop de cada uma delas, com exceção da alumina monocristalina (LINKE, 2016b).

Tabela 5 - Composição química e dureza Knoop das aluminas fundidas típicas

	AM	AB	AR	AV	AMONO	AZ (40%)	AZ (25%)
Al_2O_3 (%)	96,1	99,8	99,5	97,4	99,3	59-60	75
Na_2O (%)	ND	0,2	0,2	0,2-0,26	<0,09	≤0,03	0,08
Cr_2O_3 (%)	ND	ND	0,25-0,3	2,1-2	ND	ND	ND
TiO_2 (%)	2,70	ND	ND	ND	0,3-0,6	0,15-0,3	0,1
SiO_2 (%)	0,67	ND	0,05	0,01	ND	≤0,35	0,3
Fe_2O_3 (%)	0,11	ND	0,03	0,08	ND	≤0,15	0,3
ZrO_2 (%)	ND	ND	ND	ND	ND	39-40	23
Y_2O_3 (%)	ND	ND	ND	ND	ND	0,6-0,8	ND
Dureza Knoop (kg/mm^2)	2090	2000-2160	2160	2150	ND	1600- 1700	1450

Fonte: Adaptado (LINKE, 2016b).

A alumina é produzida normalmente na forma de um material policristalino, sendo que o tamanho dos monocristais dentro dos grãos abrasivos depende do tipo de produção

utilizado. A alumina rosa, por exemplo, possui cristais com tamanho médio de 750 μm . A alumina com zircônia, por exemplo, possui cristais de até 10-12 μm , já alumina sol-gel, por sua vez, possui cristais menores que 500 nm, provocando um comportamento de fratura muito diferenciado (LINKE, 2016b).

As ferramentas e ligantes usados em cada tipo de alumina e os materiais que podem ser usinados estão elencados na Tabela 6.

Tabela 6 – Indicação de ferramentas, ligantes e materiais usinados por tipo de alumina

Tipo de alumina	Variedade de aplicações	Ligante usado	Materiais que podem ser trabalhados
Alumina branca	Rebolos, anéis, segmentos, rebolo tipo copo, pontas montadas e lixas	- Vitrificado (mais usado)*	Aços não ligados, ligados, não temperados, temperados até 63 HRC, aço rápido, fundido, metais não ferrosos, madeira, plástico (**)
Alumina rosa	Igual à alumina branca, porém é raramente usado em lixas	- Vitrificado (mais usado)*	Igual à alumina branca, porém, com melhor desempenho na usinagem de materiais mais duros
Alumina vermelha	Igual à alumina branca, porém sem lixas	- Vitrificado (mais usado)	
Alumina monocristalina	Igual à alumina branca, porém sem lixas	- Vitrificado (mais usado)	Aço especialmente temperado, com dureza superior a 63 HRC, aço ferramenta, aço rápido (**)
Alumina semifriável	Igual à alumina branca	- Vitrificado (mais usado)*	Aços não ligados, ligados, não temperados, temperados até 63 HRC, ferro nodular, aço ferramenta (**)
Alumina marrom	Igual à alumina branca, além de discos de corte	- Resinoide (mais usado);	Aços não ligados, aços de baixa liga e metais comuns
Alumina zirconada	Rebolos e lixas	- Resinoide	Aço carbono
Alumina de bauxita sinterizada	Rebolos	ND	Aço austenítico
Alumina sinterizada	Rebolo e lixas	- Vitrificado*	Igual à alumina branca e à alumina monocristalina

(*) O ligante usado em lixas é resinoide.

(**) HRC (Dureza Hockwell C)

Fonte: Adaptado (KLOCKE, 2009).

2.6.1.1. Alumina marrom

A alumina marrom é dividida em regular e semifriável. A alumina regular possui uma composição química média de 95% de Al_2O_3 , 1,5% de SiO_2 , menos de 0,5% de Fe_2O_3 e 3% de TiO_2 . Já a alumina semifriável é mais pura que a regular, possuindo uma composição química média de 97% de Al_2O_3 , 0,5% de SiO_2 , menos de 0,5% de Fe_2O_3 e 2% de TiO_2 . A alumina marrom e semifriável é produzida a partir da bauxita calcinada. A calcinação ocorre a aproximadamente 950 °C, desidratando assim a bauxita. A bauxita calcinada é então eletrofundida juntamente com coque e cavaco de ferro, sendo que o coque tem a função de reduzir as impurezas da bauxita, as quais se combinam com o ferro e se depositam no fundo do forno. Para se fundir uma tonelada de alumina marrom, consome-se 2,2 MVA aproximadamente. Depois de fundida, a mistura é resfriada, sendo, em seguida, britada, moída, peneirada e limpa. O processo de produção da alumina marrom está esquematizado na Figura 9 (MENARD; THIBAULT, 2011; LINKE, 2016b; DOMPIERI; SZNELWAR; SCALABRIN, 2009).

Figura 9 - Diagrama esquemático do processo produtivo da alumina marrom

Fonte: Adaptado (KLOCKE, 2009; JACKSON; HITCHINER, 2013).

2.6.1.2. Alumina branca

A alumina branca é produzida a partir da bauxita purificada pelo processo Bayer, o qual torna esta bauxita em torno de 5 vezes mais cara que a usada para a produção da alumina eletrofundida marrom (JACKSON; HITCHINER, 2013). O processo produtivo da alumina branca, rosa ou vermelha está esquematizado na Figura 10.

Figura 10 - Diagrama esquemático do processo produtivo da alumina branca, rosa ou vermelha

Fonte: Adaptado (KLOCKE, 2009; JACKSON; HITCHINER, 2013).

A fusão de uma tonelada de alumina branca consome 1,5 MVA aproximadamente. Devido a uma pequena quantidade de Na_2O , ela é friável e indicada para “cool cutting”. Este tipo de alumina possui poros devido à volatilização de uma pequena quantidade de Na_2O . Às vezes, pequenas quantidades de óxido de cromo são adicionadas à mistura, ocorrendo a incorporação deste óxido na estrutura da alumina, produzindo alumina rosa ou alumina vermelha (rubi). Da mesma forma, a adição de uma pequena quantidade de óxido de vanádio resulta em uma alumina esverdeada (LINKE, 2016b; MENARD; THIBAUT, 2011).

2.6.2. Carbetto de silício

O carbetto de silício (SiC), também conhecido como carborundum, é utilizado como abrasivo em sua fase hexagonal, α -SiC. Apesar de ser conhecido por ser produzido pelo processo Acheson, o SiC também é encontrado, de forma rara, na natureza (Moissanita, kimberlito siberiano, etc). Cada átomo de carbono é envolvido por quatro átomos de silício e vice-versa. A proporção de ligações covalentes para ligações iônicas é de 90:10. O carbetto de silício ocorre em duas modificações: cúbica (β -SiC), e majoritariamente hexagonal e romboédrico (α -SiC) (LINKE, 2016b; TELLE, 2005).

O carbetto de silício foi o primeiro abrasivo a ser sintetizado. Há dois tipos principais de carbetto de silício: o carbetto de silício verde e o preto. O carbetto de silício verde tem maior pureza e é usado principalmente para usinagem de precisão. O carbetto de silício preto, por sua vez, tem maior resistência e é usado para operações de usinagem grosseira. A fase α -SiC

pura é sem cor, mas inclusões de nitrogênio na estrutura cristalina dão uma cor amarela ao material, enquanto o alumínio e o boro dão uma cor azul escuro ao material (LINKE, 2016b).

O SiC tem uma dureza Knoop entre 21 e 29 GPa em geral, e partículas abrasivas de SiC têm dureza Knoop entre 24 e 26 GPa. Embora as impurezas presentes no SiC preto pareçam não prejudicar a resistência das partículas, a sua friabilidade é levemente menor que a do SiC verde. A resistência à compressão do SiC é de aproximadamente 2943 MPa (LINKE, 2016b).

O carbetto de silício reage fortemente com a alumina contida nos ligantes vitrificados, levando-o a um dano, precisando, pois, de ligantes especiais. Uma vantagem da alumina monocristalina sobre o SiC é que ela pode suportar melhor cargas dinâmicas e repentinas, como na usinagem de rolamentos de aço endurecido. Apesar disso, o comportamento de desgaste do SiC permite uma boa habilidade de autoafiação da ferramenta (LINKE, 2016b).

O SiC preto, que é o mais comum, é usado na forma ligada ou na forma de lixas para usinagem de baixa tensão, de metais não ferrosos, como alumínio, ligas de cobre, alguns ferros fundidos, e não metálicos, como por exemplo, vidro, rochas, concreto e refratários. O SiC verde, de maior pureza, porém, é empregado em rebolos de matriz vítrea para usinagem pesada de ferramentas cementadas, sendo que este tipo de abrasivo é mais friável. Há também um outro tipo de SiC de menor pureza que o SiC preto que é utilizado em aplicações com os grãos livres, como o corte com fio e lapidação (MENARD; THIBAULT, 2011).

2.6.3. Diamante

O carbono forma várias estruturas: o hexagonal grafite, a estrutura cúbica blenda de zinco do diamante, o carbono não grafitico e o esférico fulereno. O diamante é o material mais duro encontrado na natureza e muito resistente contra compactação. Isto é devido à densa compactação dos átomos de carbono, ao seu ordenamento regular e simétrico e à forte energia de ligação covalente (LINKE, 2016b).

A célula unitária do diamante é composta por oito átomos de carbono, sendo que, quatro deles ($8 \times 1/8 + 6 \times 1/2$) definem uma célula de face centrada. Todo átomo de carbono é cercado tetraedricamente por quatro átomos. A massa específica do diamante é de aproximadamente $3,52 \text{ g/cm}^3$ e a dureza fica entre 70 e 80 GPa, dependendo da pureza. A dureza do monocristal de diamante é determinada pela pureza do cristal, apesar do tamanho, forma e origem do cristal. A dureza do cristal é anisotrópica, dependendo da orientação do cristal, a qual é

dependente da distância entre os átomos de carbono em cada plano cristalino. A maior densidade de ligações atômicas ocorre no plano octaédrico (111), resultando em uma maior dureza. As menores partículas são comumente mais resistentes que as maiores em virtude de aquelas terem menos e menores defeitos e inclusões (LINKE, 2016b).

À temperatura ambiente, o diamante é quase inerte, mas acima de 800°C, ele reage com o oxigênio do ar, liberando CO₂. Dependendo do tamanho da partícula, da área específica e do tipo de cristal, as reações com o oxigênio ocorrem entre 500 e 700°C. O diamante pode reagir com diferentes grupos de construtores de carbetos, como os elementos de transição do 8º grupo, os metais Mn, Cr, Ta e Nb, elementos fortemente eletro-positivos, como o Ca, e com os elementos Si, B, Al, entre outros (LINKE, 2016b).

As propriedades dos diamantes naturais são aproximadamente idênticas às dos diamantes sintéticos. Por volta de 80% do diamante natural é rejeitado para uso como objetos decorativos devido ao seu pequeno tamanho e pureza insuficiente, sendo destinado à indústria de ferramentas. Grandes diamantes de alta pureza são incorporados em fieiras, identadores, ferramentas de dressagem e etc. Outros diamantes naturais de pureza variável são usados em brocas para a indústria de gás natural e máquinas de perfuração de túneis. Diamantes irregulares e impuros, chamados “borts”, são usados na forma ligada para diversas ferramentas diamantadas e de forma não ligada para polimento. Ele é processado pela indústria de abrasivos em tamanhos de partículas de 1 a 1100 µm (KLOCKE, 2009).

O diamante pode ser recoberto com metal (níquel ou cobre) a fim de aumentar a eficiência do rebolo resinoide. Em geral, tanto o diamante natural como o sintético é usado no polimento de carbetos e outros materiais duros, desbaste, perfuração e corte de materiais cementados e de uma larga variedade de não metálicos, como plásticos, vidro, rochas, concreto, refratários, silício e quartzo (MENARD; THIBAUT, 2011; KLOCKE, 2009).

O SiC também pode ser aplicado para estes materiais, mas, apesar dos rebolos diamantados terem maior custo de produção, frequentemente são mais eficientes, resultando em menores custos totais por unidade de trabalho realizado. Devido à afinidade entre o diamante (carbono) e o ferro, a usinagem de materiais ferrosos não é economicamente viável para este abrasivo, com exceção dos metais contendo grande quantidade de constituintes duros, como certos aços contendo vanádio (MENARD; THIBAUT, 2011).

2.6.4. Nitreto de boro cúbico (CBN)

A invenção do superabrasivo nitreto de boro cúbico (CBN) está ligada fortemente com a síntese do diamante artificial. O CBN tem a mesma estrutura do diamante (cúbica de blenda de zinco), mas os átomos de carbono são substituídos pelos elementos boro e nitrogênio. Cada um dos átomos do CBN e do diamante é ligado a quatro outros em um perfeito alinhamento tetraédrico, sendo que cada átomo de nitrogênio está ligado a quatro átomos de boro e vice-versa, cujas ligações são predominantemente covalentes com um pequeno grau de ligações iônicas porque o boro e o nitrogênio são átomos dissimilares (LINKE, 2016b).

Enquanto o diamante tem quatro planos, o CBN tem seis. O módulo de elasticidade do nitreto de boro cúbico é estimado em 4500 kg/mm^2 e a sua resistência à compressão é de aproximadamente 7063 N/mm^2 . A dureza Knoop do CBN é de aproximadamente 47 GPa, tanto que ele é o segundo material mais duro comparado com o diamante (LINKE, 2016b).

Ao ar, o CBN é estável até 1400°C , mas, durante a usinagem de titânio, o CBN apresenta desgaste por atrito e fratura, devido à reação entre este abrasivo e o titânio. O CBN é coberto com óxido de boro (B_2O_3), em ar seco à temperatura de 1200°C , tendo, supostamente, a função de inibidor de desgaste (LINKE, 2016b).

O revestimento das partículas de CBN com metal tem melhorado a eficiência dos rebolos resinoides feitos com estes abrasivos. As primeiras aplicações com sucesso do CBN foram com a usinagem de alto desempenho de metais ferrosos de difícil usinagem em que o uso de rebolos com alumina resulta em altas taxas de desgaste por unidade de material removido da peça e rápido abaulamento dos abrasivos. Atualmente, com o desenvolvimento de sistemas controlados por computador, tem-se aumentado o uso deste abrasivo na indústria automobilística, por exemplo, mas o preço deste abrasivo ainda tem sido um problema para diminuir os custos totais da usinagem fazendo uso dele (MENARD; THIBAUT, 2011).

Uma visão geral da dureza e da tenacidade à fratura dos materiais abrasivos citados neste trabalho é fornecida na Figura 11.

Figura 11 - Dureza e tenacidade à fratura de abrasivos sintéticos em comparação com outros materiais usados em usinagem

Fonte: Adaptado (KLOCKE, 2009).

Com os grãos abrasivos convencionais, as melhoras de desempenho foram possíveis por meio do recente desenvolvimento da alumina sinterizada. Embora a dureza dos materiais abrasivos seja maior que a do material a ser processado, a tenacidade deles é muito menor, sendo, pois, um desafio o desenvolvimento de novos abrasivos com durezas muito maiores e tenacidades suficientes (KLOCKE, 2009).

2.6.5. Possíveis reações com a alumina em serviço

Há suspeitas de que a alumina reaja com a água ao ser atritada contra os materiais, produzindo gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ou diásporo ($\text{AlO}(\text{OH})$), os quais possuem menor dureza que a alumina, mas há controvérsias quanto a esta reação (DE PORTU; GUICCIARDI, 2014).

Durante a usinagem de titânio e de suas ligas, foi encontrado um intenso desgaste das partículas de alumina, o qual pode ser devido à formação de TiO_2 e de alumínio metálico; outra possível reação, quando a alumina for atritada contra o ferro, é a formação de um espinélio de ferro (FeAl_2O_4), o qual pode formar uma camada entre as partículas de alumina e o cavaco aderido (LINKE, 2016b).

2.6.6. Produção da alumina eletrofundida

O óxido de alumínio fundido, produzido em fornos elétricos a arco, utiliza a bauxita como matéria-prima. A bauxita, na forma como está na natureza, contém 25% de impurezas, como Fe_2O_3 , hidróxido de ferro ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), TiO_2 , ácido silícico, mistura de boehmita e/ou diásporo, que estão nas formas α e β do $\text{AlO}(\text{OH})$, respectivamente, e gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) (KLOCKE, 2009; CAWLEY; LEE, 2005). A composição química típica da bauxita pode ser observada na Tabela 7.

Tabela 7- Composição típica de bauxita para fusão

Al_2O_3	85,0 a 87,0%
TiO_2	3,0% a 4,5%
SiO_2	3,0% a 5,5%
Fe_2O_3	6,0% a 10,3%
Perda ao fogo	1,0% a 2,0%

Fonte: (DOMPIERI; SZNELWAR; SCALABRIN, 2009).

O minério é britado e, se ele for destinado à produção da alumina eletrofundida marrom, é depois calcinado então misturado com cavaco de ferro e coque, cuja mistura é carregada no forno. Mas se o minério for destinado à produção de alumina eletrofundida branca, ele é purificado pelo processo Bayer, e então carregado no forno. Para a produção de alumina eletrofundida marrom, proporção de minério carregada no forno é de 80%, a de cavaco de ferro é de 15% e a de coque é de 5%. O coque reduz as impurezas, que se combinam com o ferro e depositam no fundo do forno. O tempo de fusão depende do método e do tamanho do forno (em um forno Higgins, o tempo de fusão se encontra entre 15 e 24 h, já em um forno *tilting*, entre 3 e 5 h). A alumina é fundida a uma temperatura superior a 2000°C (DOMPIERI; SZNELWAR; SCALABRIN, 2009; LINKE, 2016b; KLOCKE, 2009).

Após a reação, a mistura é resfriada em condições controladas, de modo que se obtenha o tamanho desejado dos cristais (de 0,2 mm a vários milímetros). O tempo de resfriamento de um lingote de 20 toneladas, por exemplo, produzido pelo forno Higgins pode levar de 10 a 14 dias, sendo formados cristais grandes (entre 10 e 15 mm, em média), já o produto fundido pelo forno *tilting*, resfria em uma panela rasa, sendo gerados cristais menores devido ao resfriamento mais rápido (DOMPIERI; SZNELWAR; SCALABRIN, 2009; MENARD; THIBAUT, 2011; LINKE, 2016b).

A mistura resfriada é então britada, moída, peneirada e limpa. Os grãos podem variar em rigidez, tipo de fratura, adesão e diversas outras propriedades, dependendo da aplicação final. A adição de certos elementos pode alterar as suas propriedades, como é o caso do cromo: aumenta a dureza da alumina sem que sua rigidez aumente significativamente, sendo, pois, importante para aplicações onde se deseja uma menor temperatura de operação. Já a adição de zirconita produz uma alumina de extrema durabilidade, que é útil em fundições e condicionamento do aço, sendo aplicado principalmente em abrasivos revestidos e com ligas. Na forma de pó, o óxido de alumínio é utilizado em aplicações que requeiram um acabamento fino da superfície, como é o caso da indústria eletrônica (DOMPIERI; SZNELWAR; SCALABRIN, 2009; JACKSON; HITCHINER, 2013).

2.6.7. Análise econômica

A produção da alumina sintética começou com o uso da energia hidrelétrica barata das cachoeiras do Niágara. A China, hoje em dia, tem imensa capacidade de produção de alumina fundida, já o leste europeu, a Índia, a Coreia do Sul e a América do sul estão crescendo como produtores de alumina fundida. A produção mundial de alumina eletrofundida em 2016 está estimada em aproximadamente 1.280.000 toneladas, conforme pode ser observado na Tabela 8 (LINKE, 2016b; U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2017).

O baixo custo da energia tem se tornado um fator importante para a competitividade dos produtores de alumina, tão bem como a capacidade dos fornos e os baixos custos do fornecimento de matérias-primas. Desafios parecidos se aplicam aos produtores de todos os abrasivos (LINKE, 2016b).

O mercado de abrasivos, o qual compreende os abrasivos em si (natural ou sintético), os produtos (rebolos, lixas, entre outros) e o uso industrial (indústria automobilística, siderúrgica, e etc.) tem projeção de crescer de USD 41,21 bilhões em 2015 para USD 58,43 bilhões em 2021. Estima-se que o mercado de abrasivos testemunhe nos próximos anos o crescimento dos mercados automobilístico, metalúrgicos, eletrônico, elétrico e indústrias de construção (ROHAN, 2016).

Os produtores podem escolher, hoje, entre os abrasivos mais resistentes, mas o uso de abrasivos mais resistentes não necessariamente significa um maior tempo de serviço. Partículas que são muito resistentes para uma aplicação especial, tornar-se-ão abauladas e aumentarão o atrito, levando a um desnecessário processo de aquecimento e vibração. Por

outro lado, partículas muito friáveis desgastam rapidamente, resultando em um tempo de serviço menor e possíveis erros de forma (LINKE, 2016b).

Tabela 8 - Produção mundial estimada de alumina eletrofundida em toneladas no ano de 2016

País	Produção (t)
China	800.000
EUA e Canadá	60.400
Argentina	—
Austrália	50.000
Áustria	60.000
Brasil	50.000
França	40.000
Alemanha	80.000
Índia	40.000
Japão	25.000
México	—
Noruega	—
Venezuela	—
Outros países	80.000
Total mundial (aproximado)	1.280.000

Fonte: Adaptado de U.S. GEOLOGICAL SURVEY (2017).

Ao se escolher entre um abrasivo convencional e um superabrasivo, deve-se considerar as propriedades de cada abrasivo e os respectivos preços. Como por exemplo, superabrasivos possuem maiores custos de produção, mas também possuem maior resistência ao desgaste. O preço das ferramentas abrasivas está relacionado com o preço do abrasivo, o qual depende da pressão, do tempo de processo e da energia consumida. Para se ter um comparativo, o diamante necessita de uma pressão muito alta para ser sintetizado, apesar de consumir somente vários minutos, já para sintetizar alumina, leva-se horas ou mesmo dias, além de um consumo de energia maior (LINKE, 2016b).

2.6.8. Análise ambiental

Para começar esta análise pelo consumo de matéria-prima, é importante destacar que a produção de 670 kg de óxido de alumínio marrom, por exemplo, deve consumir cerca de uma

tonelada de matérias-primas, além disso, na produção de um bloco de cerca de 5442 kg, são produzidos 4142 kg de alumina eletrofundida marrom. Para esta mesma produção, usando um forno Higgins comum, deve-se consumir 750 kW por aproximadamente 18 h, consumindo-se em média 3,3 kWh por kg de material obtido, sendo gerado 273 g de CO₂/kg *in situ* de alumina, o que equivale a 1129 kg de CO₂ em uma fornada (DOMPIERI; SZNELWAR; SCALABRIN, 2009).

O risco ambiental dos abrasivos em si é baixo, mas alguns problemas surgem dos resíduos gerados com a produção deles, como é o caso dos materiais particulados e do monóxido de carbono liberados dos fornos usados na produção dos abrasivos convencionais. Durante o processo de sintetização do carbetto de silício (SiC), a partir do quartzo (SiO₂) e do carvão, além de sal e de serragem, uma grande quantidade de dióxido de carbono é gerada, além da possível produção de cloretos e compostos orgânicos voláteis (VOC) a partir do sal e da serragem, e da produção de SO₂ e poeira nos gases liberados. Visando minimizar a poluição gerada, os gases liberados são coletados e filtrados, e desta forma, o CO, por exemplo, pode ser purificado e usado. O enxofre também pode ser obtido a partir da dessulfurização dos gases (LINKE, 2016b).

A produção de alumina é provável de emitir fluoretos, sulfetos, e metais constituídos das matérias-primas. As etapas de reprocessamento dos abrasivos convencionais também geram impactos ambientais, como é o caso da lavagem e o do refinamento, os quais usam diversos ácidos, e da britagem, a qual emite material particulado. O processo de síntese de superabrasivos, por sua vez, tem como lixo os catalisadores metálicos e refratários ao fim da vida útil deles. Além do mais, os recobrimentos metálicos dos grãos abrasivos, que geram melhores resultados para a retenção e o fluxo de calor em ligantes resinoides e vitrificados, têm a desvantagem de poder trazer riscos em sua produção (LINKE, 2016b).

A síntese de cada tipo de abrasivo consome uma quantidade de energia característica, sem contar que a energia consumida durante a usinagem dos materiais será diferente devido às diferentes resistências ao desgaste. A Tabela 9 mostra a quantidade de energia e de água consumidas e de CO₂ emitido na produção de alumina e de SiC (LINKE, 2016b). Estes dados indicam-nos a importância da reciclagem dos grãos abrasivos, a qual deve reduzir estes gastos e as emissões de efluentes tóxicos ou causadores do efeito estufa.

Tabela 9 - Quantificação de energia e de água consumidas e de CO₂ emitido na produção de alumina e de SiC

Abrasivo	Energia consumida na produção primária (estimado) (MJ/kg)	Água consumida na produção primária (estimado) (L/kg)	CO₂ liberado na produção primária (estimado) (kg/kg)
Alumina (99,5% de pureza)	49,5 a 54,7	29,4 a 88,1	2,67 a 2,95
SiC	70,2 a 77,6	33,5 a 101	6,25 a 6,91

Fonte: (LINKE, 2016b).

2.6.9. Análise de risco para a saúde

A mineração das matérias-primas é conhecida por ter muitos riscos físicos, químicos, biológicos, ergonômicos e para a saúde psicossocial. Além disso, o processamento dos abrasivos pode ser prejudicial aos trabalhadores, como, por exemplo, as emissões geradas com a fusão da bauxita podem levar a uma doença pulmonar conhecida como pulmão da fundição de alumina, ou fibrose da bauxita, a qual causa edema alveolar (LINKE, 2016b; DIKSHITH, 2016). Podem ser observadas, na Tabela 10, informações ambientais conhecidas e riscos para a saúde relacionados à mineração e produção de alguns abrasivos.

Tabela 10 - Exemplos de riscos à saúde ao longo do ciclo produtivo de alguns abrasivos

Abrasivo	Informação ambiental conhecida	Riscos à saúde
Carbeto de boro	Baixa disposição de toxidez aquática e baixo potencial de bioacumulação	Prejudicial (oral, respiratório) suspeita de risco para a reprodução
Alumina zirconada	Baixo potencial de bioacumulação	Irritante (pele, olhos, sistema respiratório)
Alumina marrom	Baixo potencial de bioacumulação	Irritante (pele, olhos, sistema respiratório), suspeito carcinogênico (inalação-exposição repetida)
Alumina branca	Baixo potencial de bioacumulação	ND
Carbeto de silício	Baixo potencial de bioacumulação	Irritante (pele, olhos, sistema respiratório)

Fonte: Adaptado (LINKE, 2016b).

As partículas abrasivas e os seus pós podem gerar poeira incômoda, que pode causar irritação no trato respiratório, tosse e falta de ar, entre outros possíveis riscos, sendo necessário o uso de máscaras apropriadas. A pele e os olhos podem ser machucados pelo atrito com os abrasivos, sendo, pois, essencial a proteção dos trabalhadores (LINKE, 2016b).

2.7. Reciclagem de abrasivos

Há algumas empresas que reusam material abrasivo de refugo, como é o caso de uma que funde alumina reciclada, transformando-a em alumina fundida de alta qualidade, sendo possível reciclar 100% do material gasto em um processo com ciclo completamente fechado. Em outro exemplo, produtores de abrasivos inventaram um processo usando refugo de alumina/zircônia/sílica, porque zircônia para a produção de alumina zirconada tem um alto custo. Pela adição de um agente redutor, a quantidade de sílica no abrasivo final pode ser mantida abaixo de 0,8% em massa (LINKE, 2016b).

Há também empresas que realizam a reciclagem de ferramentas abrasivas. Como exemplos de empresas estrangeiras, tem-se a Valoref, a Kuhmichel e a Noritake. A empresa francesa Valoref, líder na reciclagem de refratários, recicla todos os tipos de ferramentas abrasivas ligadas, de todos os tamanhos e partículas abrasivas. A empresa alemã Kuhmichel, por sua vez, recicla minerais e metais usados em jateamento, ferramentas abrasivas ligadas, pós do processo produtivo de abrasivos, entre outros.

Já a empresa japonesa Noritake recicla rebolos vitrificados, queimando-os, triturando-os e os selecionando a fim de os utilizar como elementos moedores em moinhos cilíndricos, no rebarbamento ou polimento de diferentes tipos de produtos metálicos, podendo até ser adicionados a novos abrasivos, dependendo da aplicação, além disso, eles são utilizados na jardinagem e, após serem impregnados com TiO_2 , na purificação de água e do ar.

Há também empresas brasileiras que fazem a reciclagem de grãos abrasivos, como é o caso da empresa Romão Gogolla, a qual recupera alumina e carbeto de silício dos rebolos, e recicla sucata de ferro fundido a fim de produzir granalha para jateamento; e da empresa Ascontec Abrasivos, que recicla abrasivos (alumina e SiC) de ferramentas abrasivas resinoides e vitrificadas (ASCONTEC, 2017; ROMÃO, 2017; SAINT-GOBAIN, 2017; KUHMICHEL, 2017; NORITAKE, 2017).

O processo de reciclagem realizado pela empresa Ascontec Abrasivos, a qual é doadora dos grãos de alumina recuperados usados no presente trabalho, começa com a separação das

ferramentas abrasivas por tipo de ligante (resinoide ou vitrificado), seguido pela separação conforme o tipo de abrasivo que se deseja recuperar (ASCONTEC, 2017).

Conforme pode ser visto na Figura 12, a qual mostra o processo de reciclagem realizado com três tipos de aluminas vendidos pela empresa Ascontec Abrasivos, os grãos advindos de ferramentas abrasivas resinoides (rebolos e discos de corte) e vitrificadas passam inicialmente pela queima a fim de eliminar o ligante (no caso das ferramentas resinoides) além de refrigerante lubrificante e graxa (no caso de serem ferramentas usadas). As etapas de queima das ferramentas abrasivas resinoides e dos rebolos vitrificados têm duração, em média, de 12 horas a 14 horas, sendo que a temperatura alcançada pelos fornos supera os 1000°C, já o resfriamento dura, pelo menos, 48 horas, passando, em seguida, pela moagem dos materiais que não volatilizaram (abrasivo, carga, reforço ou matriz vítrea), pela descontaminação magnética (caso a especificação do cliente exija) e pela separação granulométrica.

Figura 12 - Fluxograma esquemático do processo típico de reciclagem das aluminas montado a partir de informações fornecidas pela empresa Ascontec Abrasivos

Fonte: Próprio autor

2.8. Técnicas de caracterização aplicadas aos compósitos abrasivos

Serão explicadas, nesta seção, algumas das técnicas de ensaio aplicadas nas amostras dos compósitos abrasivos resinoides.

2.8.1. Ensaio dos módulos elásticos pela técnica de excitação por impulso

A técnica de excitação por impulso é um método por meio do qual os módulos elásticos dos materiais (módulo de elasticidade (E), módulo de cisalhamento (G) e coeficiente de Poisson (μ)) podem ser determinados por meio da frequência de ressonância específica de cada material, da geometria e da massa da amostra a ser ensaiada. A dureza de rebolos também pode ser inferida por haver uma correlação entre o seu módulo de elasticidade e a sua dureza. Esta técnica pode ser utilizada para medir estas propriedades tanto em temperatura ambiente, como em altas temperaturas, bastando que se façam as adaptações devidas no equipamento e no cálculo para compensar a expansão térmica (ASTM, 2012; KLOCKE, 2009).

A frequência de ressonância fundamental da amostra é determinada por meio da colisão de um martetele ou de um pulsador eletromagnético contra a amostra. Conforme pode ser visto na Figura 13, as frequências são medidas por meio de um microfone preso próximo à amostra, cujos sinais captados são amplificados, analisados e, juntamente com os valores da massa e da geometria da amostra, convertidos nos módulos elásticos desta (ASTM, 2012).

Esta técnica não destrutiva de ensaio é frequentemente utilizada para caracterização e desenvolvimento de materiais, controle de qualidade, entre outros (ASTM, 2012).

Figura 13 - Diagrama do equipamento de ensaio pela técnica de excitação por impulso

Fonte: Adaptado (ASTM, 2012).

2.8.2. Impacto Izod

Os compósitos abrasivos foram submetidos ao ensaio de impacto a fim de avaliar a capacidade destes de absorver impactos, haja vista que os rebolos e discos de corte precisam suportar choques contra os materiais a serem usinados (MALKIN; GUO, 2008).

O ensaio de impacto é um ensaio dinâmico empregado para análise da fratura frágil de materiais. O resultado é representado pela energia absorvida pelo corpo-de-prova, não fornecendo indicações seguras sobre o comportamento de toda uma estrutura em serviço. Entretanto, permite a observação de diferenças de comportamento entre materiais sob certas condições, que o ensaio de tração não permite. Os dois tipos de ensaios de impacto padronizados mais utilizados são: Charpy e Izod (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2008).

A carga é aplicada pelo impacto de um martelo pendular, de massa padronizada, que é liberado a partir de uma posição padronizada e uma altura fixa (H_q). Após o pêndulo ser liberado, sua ponta choca-se e fratura o corpo de prova, com dimensões padronizadas, no entalhe (quando este existir), que continua seu movimento após o choque, até uma altura (h_r) menor que a altura inicial do pêndulo (H_q). A energia absorvida no impacto é determinada a partir da diferença entre H_q e h_r . Dependendo do equipamento de ensaio, a medição da energia absorvida é realizada analogicamente (por uma escala graduada e um ponteiro) ou digitalmente.

No ensaio do tipo Charpy, o corpo de prova fica apoiado horizontalmente, já no ensaio do tipo Izod, o corpo de prova fica preso verticalmente (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2008). Pode-se observar na Figura 14 o desenho esquemático do equipamento utilizado no ensaio de impacto Izod.

Figura 14- Desenho esquemático do equipamento utilizado no ensaio de impacto Izod

Fonte: Adaptado de AMIRKABIR UNIVERSITY OF TECHNOLOGY (2016).

2.8.3. Flexão em quatro pontos

Os compósitos abrasivos sofreram ensaio de flexão em virtude de os rebolos e discos de corte, em serviço, também sofrerem esforços flexionais, precisando, pois, avaliar a capacidade deles de suportá-los (KLOCKE, 2009).

O ensaio de flexão consiste na aplicação de uma carga P no centro de um corpo de prova com dimensões padronizadas, sobre dois pontos de apoio. A carga exercida sobre a amostra inicia com um valor igual a zero e aumenta lentamente até a ruptura do corpo de prova. O valor da carga aplicada versus o deslocamento do ponto central é a resposta do ensaio. Há dois tipos de aplicação de carga no ensaio de flexão: Quando uma carga é aplicada no centro da distância entre os apoios, o ensaio será chamado de ensaio de flexão em três pontos; quando a carga é aplicada em dois pontos equidistantes dos apoios, o ensaio será chamado de ensaio de flexão em quatro pontos.

O ensaio de flexão é bastante aplicado em materiais frágeis ou de elevada dureza, como no caso do ferro fundido, aços ferramenta, cerâmicos estruturais, polímeros frágeis, entre outros, pois estes materiais, devido à baixa ductilidade, não permitem ou dificultam o uso de outros tipos de ensaios mecânicos, como é o caso da tração, por exemplo. O ensaio de flexão, assim como o de tração e de compressão, é dependente de parâmetros relativos aos corpos-de-prova, como direção de laminação, dimensões, microestrutura, tensões residuais, tratamentos térmicos, processos de manufatura, entre outros (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2008).

A Figura 15 ilustra o tipo de distribuição de cargas realizado neste trabalho e a simbologia das dimensões do corpo de prova.

Figura 15 - Diagrama de cargas e dimensões do corpo de prova para ensaio de flexão de 4 pontos

Fonte: Próprio autor.

Os valores de resistência à flexão, ou seja, a máxima tensão na extremidade inferior do corpo de prova (nas fibras externas) no momento da ruptura, deixando P igual à carga no momento da ruptura, são calculados segundo a equação:

$$\sigma_R = 3PL/4bd^2 \quad (3)$$

na qual, σ_R é tensão na fibra externa ao longo da distância de carga (em MPa), P é a carga em um dado ponto na curva carga-deflexão (em N), L é a distância de apoio (em mm), b é a largura do corpo de prova (em mm) e d é a espessura do corpo de prova (em mm) (ASTM, 2010a).

A máxima deformação nas fibras externas também ocorre na metade da amostra ($L/2$), e pode ser calculada para o caso de a distância de carga ser a metade da distância de suporte, como é o caso deste trabalho, pela equação:

$$\varepsilon_R = 4,36Dd/L^2 \quad (4)$$

na qual ε_R é a máxima deformação nas fibras externas (em mm/mm), D é a máxima deflexão na metade da amostra (em mm), L é a distância de apoio (em mm) e d é a espessura da amostra (em mm) (ASTM, 2010a).

O módulo de elasticidade, ou módulo de elasticidade tangente, é a razão, dentro do limite elástico, entre a tensão e a deformação correspondente. Ele é calculado desenhando-se uma tangente do ponto mais íngreme do início da região linear da curva carga-deflexão e usando uma equação que, para o caso deste trabalho, em que a distância entre as cargas é igual à metade da de apoio, será usada a equação:

$$E_f = 0,17L^3m/bd^3 \quad (5)$$

na qual E_f é o módulo de elasticidade por flexão (em MPa), L é a distância de apoio (em mm), b é a largura do corpo de prova (em mm), d é a espessura do corpo de prova (em mm) e m é a inclinação da tangente do início da porção linear da curva carga-deflexão (em N/mm) (ASTM, 2010a).

2.8.4. Dureza por *Sand Blasting Penetration* (SBP)

O ensaio de dureza por jateamento de areia chamado de *Sand Blasting Penetration* (SBP) é baseado no jateamento de quartzo de determinado tamanho de partícula sobre a superfície a ser testada por meio de ar comprimido. A dureza do compósito abrasivo é medida através da profundidade (a) da cratera gerada, conforme está ilustrado na Figura 16. Devem-se levar em conta que a pressão, a quantidade de quartzo e o tempo de jateamento precisam ser os mesmos para cada ensaio (KLOCKE, 2009).

Este ensaio possui algumas restrições, como o fato de ele não ser aconselhado para o uso em rebolos com superabrasivos e de ser necessária a execução de ensaios frequentes devido à grande dispersão dos resultados (KLOCKE, 2009).

Figura 16 – Representação esquemática do ensaio de dureza por SBP

Fonte: (KLOCKE, 2009).

2.8.5. Porosidade pelo método de Arquimedes

A porosidade é dividida em dois tipos: poro aberto, o qual permite o fluxo de líquidos ou voláteis; e poro fechado, o qual não permite este fluxo. A porosidade dos materiais pode ser medida por vários métodos, como por exemplo, a picnometria de hélio, a porosimetria por intrusão de mercúrio, a adsorção de gás (BET), o método de Arquimedes, microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e por microtomografia de raios X (ANOVITZ; COLE, 2015; BRUCKSCHEN et al., 2005).

O método de medição de porosidade utilizado no presente trabalho foi o método de Arquimedes segundo a norma ASTM C20-00.2015 (ASTM, 2015).

Por este método, as amostras, se não estiverem secas, devem ser secadas a fim de medir a massa a seco (D), em gramas, depois, devem ser colocadas em um recipiente e cobertas por água a fim de serem aquecidas imersas, tomando-se cuidado para que as amostras não entrem em contato com o fundo aquecido do recipiente. A partir do momento em que a água começar a ferver, deve-se iniciar a contagem das 2h de fervura. Após este tempo, as amostras devem continuar cobertas por água e deixadas resfriar naturalmente por no mínimo 12 horas, segundo a norma ASTM C20-00.2015 (ASTM, 2015).

As amostras, após o resfriamento, precisam ser suspensas por um fio, o qual precisa ter a massa contrabalanceada dentro da água na mesma profundidade como se estivesse segurando uma amostra, e colocadas dentro de um béquer com água a fim de se pesar a massa suspensa (S). Após esta pesagem, o excesso de água que estiver envolvendo as amostras precisa ser retirado por um pano de algodão úmido, sendo então pesadas as amostras a fim de se obter a massa saturada (W) delas (ASTM, 2015).

As equações utilizadas para calcular a porosidade aparente (P) e a massa específica aparente (ρ_{ap}) dos compósitos abrasivos são:

$$V_e = (W - S)/\rho_{\text{Água}} \quad (6)$$

$$V_p = (W - D)/\rho_{\text{Água}} \quad (7)$$

$$P(\%) = [V_p/V_e] \times 100 \quad (8)$$

$$\rho_{ap} = D/V_e \quad (9)$$

Para se calcular o volume exterior, ou volume aparente (V_e), em cm^3 , das amostras, o qual representa o volume do material em si mais o volume dos poros fechados e abertos, usa-se a Equação 1. A fim de se obter o volume dos poros abertos (V_p), em cm^3 , usa-se a Equação 2. O valor da porosidade aparente (P), por sua vez, é obtido a partir da Equação 3, e a massa específica aparente (ρ_{ap}), em g/cm^3 , das amostras é calculada a partir da Equação 4. Os cálculos citados estão baseados nas normas ASTM C20-00.2015 e ABNT NBR 6220:2011 (ASTM, 2015; ABNT, 2011).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Matérias-primas

3.1.1. Alumina virgem e reciclada

A alumina marrom virgem de granulometria 60 (ALOMAX R60) foi fornecida pela empresa Elfusa geral de eletrofusão Ltda (São João da Boa Vista, SP), cuja distribuição granulométrica é definida por um processo de peneiramento realizado a própria empresa, conforme as normas ANSI-B-74.12.1992 R-2001 e FEPA-42.GB.1984 R-1993 (ELFUSA, 2016). As aluminas recicladas foram fornecidas pela empresa Ascontec Abrasivos, sendo uma alumina oriunda de rebolos e discos de corte resinoides (ALO RR), outra alumina oriunda de rebolos vitrificados (ALO RV), e uma alumina branca oriunda de rebolos vitrificados refugados ou usados (ALO BR). Todas as partículas recicladas utilizadas neste trabalho têm granulometria 60, cuja separação granulométrica é realizada pela própria empresa, conforme a norma ANSI-B-74.12.1992 R-2001, que têm um diâmetro médio aproximado de 253 μm . Este valor médio pode ser estimado a partir de uma relação aproximada entre o diâmetro médio da partícula (d_p) e o tamanho de malha desta (M), conforme pode ser observado pela equação (ROWE, 2014):

$$d_p \text{ (mm)} = 15,2/M \quad (10)$$

As amostras de alumina reciclada foram quarteadas a fim de se ter amostras homogêneas e representativas para a produção das amostras. Os tipos de alumina utilizados neste trabalho, assim como as amostras produzidas com cada uma delas, receberam códigos, os quais estão elencados na Tabela 11.

Tabela 11 - Códigos de cada tipo de compósito e de alumina usados no presente trabalho

Alumina utilizada	Código da alumina	Código do compósito
Alumina branca reciclada de rebolos vitrificados refugados ou usados	ALO BR	BR
Reciclada de rebolos vitrificados usados	ALO RV	RV
Reciclada de ferramentas abrasivas resinoides usadas	ALO RR	RR
Alumina marrom virgem	ALO VG	VG

Fonte: Próprio autor.

3.1.2. Resinas fenólicas

As resinas fenólicas RI-1192 (CR-2745) e CR-2211, ambas destinadas à produção de abrasivos, foram fornecidas pela empresa SI Group Crios Resinas S.A. (Rio Claro, SP). A resina RI-1192 é líquida, tipo resol, diluída em álcool furfurílico, cujo percentual de álcool furfurílico livre fica entre 30 e 40%. Ela é recomendada como agente umectante na fabricação de rebolos, discos de corte e desbaste e segmentos abrasivos em geral. A resina CR-2211 é em pó, tipo novolaca, com teor de hexametilenotetramina (HMTA) entre 14 e 15% e é recomendada na fabricação de rebolos, discos de corte e discos de desbaste.

3.2. Preparação dos compósitos

A formulação dos compósitos abrasivos resinoides foi feita segundo a fração mássica indicada na Tabela 12.

Tabela 12 – Fração mássica de cada componente do compósito abrasivo resinoide

Componente	Fração mássica (%)
Alumina	90
Resina resol	4
Resina novolaca	6

Fonte: Próprio autor.

A preparação dos compósitos abrasivos foi feita da seguinte forma:

A resina novolaca CR-2211 foi resfriada a aproximadamente 5°C a fim de diminuir a sua plasticidade, favorecendo assim, a sua dispersão na mistura. A resina resol RI-1192 foi aquecida em uma estufa a aproximadamente 40°C a fim de ficar mais fluida, favorecendo assim, a sua capacidade de umectar as partículas de alumina. É importante salientar que a pesagem e mistura das resinas e da alumina foi realizada em um ambiente com ar condicionado ligado a fim de garantir um ar mais seco e de manter o laboratório em temperatura entre 20 e 24°C. As frações mássicas das resinas resol e novolaca e das aluminas foram pesadas conforme indicado anteriormente. A resina resol RI-1192 foi adicionada sobre a alumina e revolvida até que a mistura ficasse homogênea, a fim de que a alumina fosse umectada, de maneira que, com a adição e mistura da resina novolaca CR-2211 sobre esta

mistura, fosse obtida a ancoragem entre as partículas de alumina para se formar um corpo coeso.

A quantidade de corpos-de-prova produzidos para cada tipo de amostra (BR, RV, RR e VG) por ensaio e as massas aproximadas podem ser observadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Quantidade e massa dos corpos-de-prova produzidos por tipo de amostra e de ensaio

Quantidade	Tipo de ensaio	Massa (g)
10	Impacto Izod e técnica de excitação por impulso	30,72
10	Flexão	4,60
2	DMTA	4,60
2	SBP e Porosidade	110,30

Fonte: Próprio autor.

As amostras destinadas aos ensaios de SBP e de porosidade foram prensadas na forma uniaxial de ação simples, dentro de uma matriz de aço temperado com dimensões de 114 x 25 mm, na prensa de marca Prenmar, modelo PHB 40x20, com capacidade de até 103 toneladas.

As amostras destinadas aos ensaios de flexão e DMTA foram prensadas na forma uniaxial de ação simples, dentro de uma matriz de aço temperado com dimensões de 50 x 10 mm, na prensa de marca Marcon, modelo MPH-30, com capacidade de até 30 toneladas, já as de impacto (que também foram utilizadas para a medição do módulo de elasticidade pela técnica de excitação por impulso) foram prensadas dentro de uma matriz de aço temperado com as dimensões de 63,5 x 12,7 mm, na mesma prensa de marca Marcon. O tempo de aplicação da pressão foi de 15 s aproximadamente, estando dentro da faixa de tempo de prensagem normalmente utilizada, que é de 5 a 30 s (KLOCKE, 2009).

Deve-se destacar que a prensa da marca Marcon foi utilizada para a compactação dos corpos-de-prova dos ensaios de flexão, DMTA e impacto Izod em virtude de ela possibilitar um melhor controle da pressão a ser aplicada neles, aproximando-se da aplicada sobre as amostras destinadas à confecção dos corpos-de-prova dos ensaios de SBP e de porosidade.

É importante salientar que cada pressão indicada no manômetro da prensa de marca Prenmar, a qual está em psi, e cada força indicada na prensa de marca Marcon, a qual está em tonelada-força (tf), está correlacionada com as forças aplicadas pelo êmbolo (em kN) e com as pressões aplicadas sobre cada tipo de matriz (em MPa), conforme a Tabela 14.

Tabela 14 – Relação dos tipos de corpos-de-prova com a pressão no manômetro e pressão aplicada sobre a amostra

Corpo-de-prova	Pressão ou força indicada no manômetro (Tipo de prensa)	Força real aplicada pela prensa (kN)	Pressão aplicada sobre a amostra (MPa)
SBP e porosidade	1900 psi (Prenmar)	473,9	166,3
Impacto	14 tf (Marcon)	132,54	164,4
Flexão	9 tf (Marcon)	82,2	164,4

Fonte: Próprio autor.

As prensas foram aferidas por um dinamômetro a fim de se saber a real relação entre a pressão indicada no manômetro e a força aplicada pelo êmbolo sobre a amostra, através da matriz que a contém, sendo feitos cálculos posteriores, a fim de se identificar a pressão aplicada sobre cada amostra.

As amostras foram submetidas, em seguida, a um tratamento térmico na estufa de secagem com circulação e renovação de ar SPlabor, modelo SP-102/64, com a finalidade de realizar a cura do ligante. As etapas de execução do tratamento térmico e o diagrama de temperatura em função do tempo de tratamento térmico estão elucidadas na Tabela 15 e na Figura 17.

Tabela 15 - Etapas do tratamento térmico para cura do ligante

Etapas	Condição	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Taxa de aquecimento (°C/min)
1	Rampa	30 a 60	10	3
2	Isoterma	60	360	0
3	Rampa	60 a 80	20	1
4	Isoterma	80	360	0
5	Rampa	80 a 110	30	1
6	Isoterma	110	360	0
7	Rampa	110 a 180	60	1,2
8	Isoterma	180	240	0
9	Rampa	180 a 30	105	-1,4

Fonte: Próprio autor.

Figura 17 - Diagrama da temperatura em função do tempo do tratamento térmico de cura

Fonte: Próprio autor.

O referido tratamento térmico levou em consideração as reações que ocorrem nas resinas resol e novolaca em função da temperatura a que elas são submetidas, devendo-se destacar que quase todo o álcool furfúrico adicionado à resina resol RI-1192 volatiliza na temperatura de 60°C e que a resina novolaca CR-2211 funde à 80°C.

É importante salientar que, após o tratamento térmico, as amostras produzidas com as dimensões aproximadas de 114 x 25 x 13 mm, após serem tratadas, foram cortadas em uma serra de precisão Buehler modelo Isomet 1000, usando disco diamantado, com 150 rpm de velocidade e sem uso de fluido de corte, com a finalidade de serem produzidos corpos-de-prova para os ensaios de dureza por SBP com as dimensões aproximadas de 53 x 25 x 13 mm e de porosidade pelo método de Arquimedes com as dimensões aproximadas de 57 x 25 x 13 mm.

O fluxograma da produção dos compósitos abrasivos realizada no presente trabalho e dos ensaios realizados nas matérias-primas e nos corpos-de-prova está ilustrado na Figura 18.

Figura 18 - Fluxograma da preparação e caracterização dos compósitos abrasivos

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 19, podem-se observar os formatos e as dimensões aproximadas em milímetros das amostras e dos corpos-de-prova obtidos.

Figura 19 - Representação da amostra e dos corpos-de-prova produzidos

Fonte: Próprio autor.

3.3. Análise das partículas abrasivas

As amostras de alumina reciclada (ALO BR; ALO RV e ALO RR) e de alumina marrom virgem (ALO VG) foram caracterizadas por meio das técnicas de fluorescência de raios X (FRX), difratometria de raios X (DRX), microscopias óptica (MO) e eletrônica de varredura (MEV). Todas estas análises foram realizadas no Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAR) da EEL-USP.

3.3.1. Fluorescência de raios X (FRX)

As amostras de alumina destinadas ao ensaio de espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX) foram preparadas por fusão, após a análise de perda ao fogo. Esta análise química foi realizada semi-quantitativamente sem padrões no equipamento Axios MAX, da marca PANalytical.

3.3.2. Difratometria de raios X (DRX)

As amostras de alumina foram cominuídas em um almofariz de ágata para se gerar difratogramas com menos ruídos. As análises por difratometria de raios X foram feitas no

equipamento da empresa PANalytical, modelo Empyrean, com radiação Mo-K α , sob tensão de 40 kV, corrente de 30 A, com varredura entre 10° e 90°, passo angular de 0,02° e tempo de contagem de 15 s/ponto na temperatura ambiente.

3.3.3. Microscopia óptica e eletrônica

A análise morfológica e de coloração das amostras de alumina virgem e recicladas foi realizada no microscópio estéreo ZEISS, modelo Discovery V12, e a análise morfológica foi realizada no microscópio eletrônico de varredura de bancada da marca HITACHI, modelo TM 3000, no modo elétrons retroespalhados (BSE), o qual gera imagens com contrastes de cinza relacionados com o número atômico do material ou da fase, além da topografia da superfície da amostra.

3.4. Análise do ligante por calorimetria exploratória diferencial (DSC)

As resinas fenólicas resol RI-1192 e novolaca CR-2211 foram caracterizadas por meio da calorimetria exploratória diferencial (DSC) a fim de analisar a temperatura de início da cura e a energia de pico da cura destas resinas. Estas análises foram realizadas no Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAR) da EEL-USP.

Amostras de 10 mg das resinas fenólicas resol RI-1192 e novolaca CR 2211 foram analisadas termicamente por meio do calorímetro exploratório diferencial da marca TA Instruments, modelo Q10, dentro de cadinhos de alumínio com tampa, sob atmosfera de ar seco com vazão de 50 mL/min, com rampa de aquecimento de 40°C a 280°C e razão de aquecimento de 10°C/min.

Antes da análise das resinas, foi feita a calibração da linha base na faixa de 50°C a 200°C, sob atmosfera de ar seco com vazão de 50 mL/min, seguida pela rampa de aquecimento de 30 a 280°C, com razão de aquecimento de 10°C/min a fim de se eliminar possíveis contaminações vindas de outros experimentos.

3.5. Análise dos compósitos

As amostras de compósitos abrasivos produzidos (VG, BR, RV e RR) foram caracterizadas por meio das técnicas de excitação por impulso, impacto Izod, flexão em quatro pontos, análise térmica dinâmico-mecânica (DMTA), análise de dureza por SBP, porosimetria pelo método de Arquimedes, microscopias óptica (MO) e eletrônica de varredura (MEV). Todas estas análises foram realizadas no Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAR) da EEL-USP, com exceção da análise de dureza por SBP, que foi realizada na unidade da empresa Saint Gobain situada em Vinhedo (SP).

3.5.1. Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico pela técnica de excitação por impulso

A fim de se obter o módulo de elasticidade dinâmico de cada tipo de compósito abrasivo, os corpos-de-prova destinados ao ensaio de impacto foram previamente ensaiados no equipamento Sonelastic, com suporte para amostras de pequeno porte e engastadas, modelo SB-AP, captador acústico CA-DP, o qual pode captar vibrações sonoras entre 20 Hz e 96 kHz, pulsador RT Leve e *software* Sonelastic para análise e determinação dos módulos elásticos.

3.5.2. Impacto Izod

A fim de medir a resistência ao impacto de cada tipo de compósito, o ensaio de impacto Izod foi realizado segundo a norma ASTM D256-10 (ASTM, 2010), à temperatura ambiente, em um equipamento Time Testing Machines, modelo XJU-11, com um martelo de 2,75 J. Foram ensaiados dez corpos-de-prova de cada tipo de compósito (VG, BR, RV e RR), sem entalhe.

3.5.3. Flexão em quatro pontos

O ensaio de flexão de quatro pontos foi realizado, a fim de se obter a resistência à flexão e o módulo de elasticidade por flexão dos compósitos, segundo a norma ASTM D6272-10

(ASTM, 2010a), à temperatura ambiente, em um equipamento INSTRON/EMIC, modelo DL 3000 com célula de carga de 5 kN e velocidade de avanço de 1,5 mm/min. Foram submetidos ao ensaio dez corpos de prova para cada composição (VG, BR, RV e RR). A distância entre os apoios (L) foi de 40 mm, e entre os aplicadores de carga foi de 20 mm. A distância entre as cargas aplicadas neste trabalho foi igual à metade da distância de apoio.

3.5.4. Análise térmica dinâmico-mecânica (DMTA)

As amostras foram analisadas por DMTA, a fim de se determinar a temperatura de transição vítrea do ligante pelo pico do fator de perda ($\tan \delta$) e obter uma estimativa do módulo de elasticidade da região elástica pelo valor do módulo de armazenamento (E') a, aproximadamente, 30°C, no equipamento NETZSCH, modelo DMA 242 E Artemis, no modo de flexão em três pontos, com distância entre apoios de 40 mm, na faixa de temperatura de +30 a +280°C, com razão de aquecimento de 2°C/min e frequência de 1 Hz, amplitude de 10 μm , força estática constante de 4 N, fator proporcional igual a zero e modo de deformação constante.

3.5.5. Sand Blasting Penetration (SBP)

O ensaio de dureza pelo método *Sand Blasting Penetration* (SBP) foi realizado pela unidade da empresa Saint Gobain em Vinhedo (SP). As amostras (duas de cada tipo) foram jateadas com grãos de quartzo com granulometrias de 20/30 em duas regiões distintas na mesma face. As condições utilizadas neste ensaio foram: pressão de 0,128 MPa e tempo de jateamento de 30 s.

3.5.6. Método de Arquimedes

A porosidade aparente das amostras foi determinada pelo método de Arquimedes segundo a norma ASTM C20-00 (2015) (ASTM, 2015).

As amostras tiveram as suas massas a seco (D) medidas, depois, foram colocadas em um béquer, sendo cobertas por água, o béquer foi colocado sobre uma chapa de aquecimento a fim de se ferver a água. A partir do momento em que a água começou a ferver, iniciou-se a

contagem das 2 horas de fervura. Após este tempo, o sistema foi deixado resfriar naturalmente por mais de 12 horas, e então as amostras foram suspensas por um fio de Nylon, o qual teve a outra extremidade pendurada em um gancho, e foram colocadas dentro de um béquer com água a fim de ser feita a pesagem da massa suspensa (S). Após isso, as amostras tiveram o excesso de água que as envolvia retirado por um pano de algodão úmido, sendo então pesadas a fim de se obter a sua massa saturada (W).

3.5.7. Microscopia eletrônica

A análise da microestrutura das amostras dos compósitos foi realizada sobre a superfície de fratura por impacto no microscópio eletrônico de varredura de bancada HITACHI, modelo TM3000, no modo elétrons retro-espalhados (BSE).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização das partículas

Estão apresentados a seguir os resultados dos ensaios de caracterização das partículas abrasivas de alumina.

4.1.1. Análise por fluorescência de raios X (FRX)

Foi feita análise química semi-quantitativa por fluorescência de raios X das aluminas recicladas e da alumina marrom virgem, podendo-se observar os resultados desta análise, em percentual em massa, na Tabela 16.

Tabela 16 - Composição química (%m) das amostras de partículas de alumina virgem e recuperadas obtida por FRX

Composto	ALO VG	ALO BR	ALO RV	ALO RR
Al ₂ O ₃	95,37	91,49	87,22	72,76
SiO ₂	1,24	6,49	7,99	8,20
Fe ₂ O ₃	0,25	0,33	0,22	4,34
ZrO ₂	0,63	0,11	0,42	2,09
TiO ₂	1,63	ND	1,89	2,06
CaO	0,37	0,33	0,57	2,70
Na ₂ O	ND	0,68	0,72	0,47
MgO	ND	ND	0,17	0,50
P ₂ O ₅	ND	ND	0,12	0,08
SO ₃	ND	ND	0,19	1,06
K ₂ O	ND	0,45	0,50	0,98
ZnO	ND	ND	ND	0,86
MnO	0,17	ND	ND	0,14
PbO	ND	0,12	ND	ND
Cl	0,33	ND	ND	ND
Perda ao fogo	ND	ND	ND	3,74

Fonte: Próprio autor.

Pode-se observar, dos resultados da fluorescência de raios X (FRX), um decréscimo no percentual em massa da alumina na sequência VG-BR-RV-RR, o qual é acompanhado de um acréscimo no percentual de SiO_2 na mesma sequência. O percentual de 6,49% de SiO_2 presente na alumina do tipo ALO BR é originário da matriz vítrea, levando em conta que a alumina branca não contém sílica, já o percentual de 7,99% de SiO_2 na alumina do tipo ALO RV é devido à matriz vítrea e devido à provável presença de sílica na própria alumina. A presença de 8,20% de SiO_2 na alumina do tipo ALO RR é devido ao reforço de fibra de vidro que é adicionado aos discos de corte de matriz resinoide. Foi encontrado também um percentual em massa de 3,74 de perda ao fogo na amostra de alumina reciclada RR, indicando assim a presença de materiais voláteis, os quais são totalmente ou majoritariamente originários da matriz resinoide.

Os percentuais abaixo de 1% de Fe_2O_3 nas aluminas dos tipos ALO VG, ALO BR e ALO RV têm origem na composição das próprias aluminas e dos processos de britagem e moagem pelos quais passaram estas aluminas durante a produção ou reciclagem. A considerável presença de 4,34 %m de Fe_2O_3 na amostra de alumina RR é resultado da adição de limalha de ferro na produção de rebolos e discos de corte resinoides, além da presença de Fe_2O_3 na própria alumina e dos já citados processos de britagem e moagem.

4.1.2. Análise por difração de raios X (DRX)

As partículas de alumina recicladas e virgem foram caracterizadas por difração de raios X, cujos picos foram identificados como pertencentes somente à fase $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, não sendo identificada, pois, a presença de uma fase amorfa (que seria originária da fase vítrea ou da fibra de vidro) e da sílica cristalina, conforme pode ser observado na Figura 20.

A partir dos resultados obtidos com a difratometria de raios X (DRX), pode-se afirmar que as amostras de alumina queimadas continuam com a fase $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ por esta ser a fase mais estável. Deve-se destacar que a temperatura de transição da fase $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ a partir da gibbsita, boehmita e bayerita é superior a 1100°C e que a temperatura de sinterização dos rebolos vítreos ocorre entre 1000 e 1350°C (GITZEN, 1970; KLOCKE, 2009).

Figura 20 - Difratoograma de raios X das amostras de alumina: (a) ALO BR; (b) ALO RR; (c) ALO RV e (d) ALO VG

Fonte: Próprio autor.

4.1.3. Análises por microscopia óptica e eletrônica de varredura

As amostras de alumina eletrofundidas marrom virgem e recicladas foram caracterizadas tanto por microscopia óptica como eletrônica de varredura.

As micrografias produzidas pelo microscópio estéreo, com ampliação de 60x, podem ser observadas nas Figuras 21 e 22, e as geradas pelo microscópio eletrônico de varredura, com ampliação de 60x, podem ser observadas nas Figuras 23 e 24.

Na Figura 21a, pode ser observado que a amostra de alumina marrom virgem possui majoritariamente a mesma coloração. A Figura 21b mostra que a amostra de alumina branca reciclada de rebolo vitrificado refugado ou usado é composta majoritariamente por partículas brancas ou translúcidas, podendo-se inferir que estas sejam partículas de alumina branca.

Figura 21 - Micrografia por microscopia óptica das partículas de alumina: (a) ALO VG e (b) ALO BR

Fonte: Próprio autor.

Figura 22 - Micrografia por microscopia óptica das partículas de alumina: (a) ALO RV e (b) ALO RR

Fonte: Próprio autor.

A Figura 22a mostra que as partículas recicladas de rebolo vitrificado usado são compostas por partículas brancas ou translúcidas, podendo ser inferido que estas sejam partículas de alumina branca, mas também são compostas por partículas marrons, azuladas

(sendo possivelmente formadas devido à queima da alumina marrom na presença de TiO_2) (PASSOS, 2014), rosadas (possível presença de Cr_2O_3), esverdeadas (possível presença de V_2O_5) (LINKE, 2016b) e até escuras, as quais podem ser partículas de alumina recobertas por fuligem oriunda da queima do ligante resinoide.

Já a Figura 22b mostra que as partículas de alumina reciclada de rebolo resinoide possuem majoritariamente partículas escuras (que podem ser partículas de alumina recobertas com fuligem ou agregadas a alguma impureza de fabricação e/ou processo de reciclagem) e partículas marrons e cinza (que podem ser partículas de alumina recobertas por alguma impureza de fabricação e/ou processo de reciclagem ou podem ser alguma carga), e compostas minoritariamente por partículas brancas e azuladas.

As micrografias das partículas de alumina recicladas e virgem produzidas pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV), com ampliação de 60x, podem ser observadas nas Figuras 23 e 24. A partir da observação da Figura 23a, pode-se constatar que praticamente todas as partículas de alumina marrom virgem (ALO VG) possuem arestas anguladas, as quais são úteis para a aplicação como abrasivo, pois propicia a retirada de material dos materiais que forem usinados, cortados ou lixados.

Na Figura 23b, por sua vez, são observadas as partículas de alumina branca reciclada de ferramentas vitrificadas refugadas ou usadas (ALO BR), podendo ser observadas partículas porosas (indicadas por setas), muitas partículas abauladas (com poucas arestas anguladas), as quais não são muito apropriadas para o uso como abrasivos, e algumas partículas com arestas anguladas.

A Figura 24a mostra que as partículas recicladas de rebolo vitrificado usado (ALO RV) são compostas majoritariamente por partículas com arestas anguladas, e minoritariamente, por partículas com arestas pouco anguladas (indicadas por setas), as quais podem não ser eficientes como abrasivos em virtude de não apresentarem arestas de corte.

Podem ser observadas, na Figura 24b, que as partículas de alumina recicladas de rebolos e discos de corte resinoides (ALO RR) possuem uma quantidade considerável de partículas com superfícies ásperas ou irregulares (indicadas por setas), as quais podem não ser eficientes como abrasivos em virtude de não apresentarem arestas de corte, uma fibra (provavelmente oriunda da tela de fibra de vidro usada como reforço em discos de corte, por exemplo), além de partículas com arestas anguladas.

Figura 23 - Micrografia por MEV das amostras: (a) ALO VG e (b) ALO BR

Fonte: Próprio autor.

Figura 24 - Micrografia por MEV das amostras: (a) ALO RV e (b) ALO RR

Fonte: Próprio autor.

4.2. Caracterização do ligante

4.2.1. Análise por calorimetria exploratória diferencial (DSC)

As curvas no DSC referentes à cura das resinas fenólicas resol RI-1192 da novolaca CR 2211 e da blenda destas resinas na razão, em massa, de resol/novolaca igual a 1/7, reforçada com partículas de alumina marrom fundida com granulometria 60, cuja proporção da blenda é de 20% do compósito, enquanto as partículas de alumina compõem 80%, estão nas Figuras 25a, 25b e 25c, respectivamente.

Figura 25 - Termograma das amostras: (a) resina RI-1192; (b) resina CR-2211 e (c) compósito da blenda produzida com as resinas RI-1192 e CR-2211 reforçado com partículas de alumina marrom de granulometria 60

Fonte: (MARINS, 2014).

O termograma de cura da resina resol, apresentado na Figura 25a, exibe um único pico exotérmico na faixa de 130 a 190 °C, o qual pode ser devido à formação de formaldeído oriundo da dissociação do grupo álcool benzílico, de modo a propiciar mais sítios para formação de pontes metilênicas (MARINS, 2014).

A Figura 25b mostra dois picos exotérmicos, os quais podem ser atribuídos aos dois estágios de cura da resina do tipo novolaca. O primeiro deles pode ser atribuído à decomposição do HMTA, formando formaldeído e amino-metilóis que contribuirão para a reticulação das pontes metilênicas. O segundo pico corresponde ao final da reação de cura; por isso, na faixa de temperatura entre 160 e 200°C pode ser realizado um tratamento de pós-cura para vitrificar a resina, tornando-a mais dura (MARINS, 2014; GARDZIELLA; PILATO; KNOP, 1999).

Outra interferência acerca da natureza do segundo pico pode ser devido à presença da função maleimida na estrutura química da novolaca, pois nas faixas de temperatura compreendidas entre 200-250°C é atribuída à reação de polimerização dos grupos de maleimida (MARINS, 2014).

Conforme pode ser observado, na Figura 25c, são gerados dois picos exotérmicos, cujo primeiro inicia a aproximadamente 100°C, o que pode ter sido provocado pela grande fração de novolaca e por uma possível reação catalítica entre as resinas resol e novolaca.

O segundo pico ocorre na faixa de temperatura entre 175 e 225°C aproximadamente, podendo ser devido à polimerização dos grupos de maleimida presentes na novolaca (MARINS, 2014). Além disso, há a redução do fluxo de calor dos picos, a qual pode ter sido provocada pela interação entre as resinas resol e novolaca.

4.3. Caracterização do compósito

São apresentados, neste item, os resultados da caracterização dos compósitos abrasivos preparados neste trabalho.

4.3.1. Análise do módulo de elasticidade dinâmico pela técnica de excitação por impulso e da massa específica

A Figura 26 mostra os valores da massa específica obtidos a partir da massa e das dimensões dos corpos-de-prova destinados ao ensaio de impacto Izod. Já o módulo de

elasticidade dinâmico das amostras, obtido no equipamento Sonelastic, pode ser observado na Figura 27.

Figura 26 - Resultado da massa específica das amostras de compósito abrasivo

Fonte: Próprio autor.

A Figura 26 mostra que a massa específica para cada tipo de amostra decresce na sequência VG-BR-RV-RR. A massa específica média das amostras do tipo BR é aproximadamente 6,90% menor que a média das amostras do tipo VG. A massa específica média das amostras do tipo RV é aproximadamente 8,18% menor que a média das amostras do tipo VG. A massa específica média das amostras do tipo RR é aproximadamente 11,37% menor que a média das amostras do tipo VG. Uma das possíveis causas deste decréscimo na massa específica é a queda na pureza dos grãos de alumina, haja vista que, ao mesmo tempo em que há a diminuição da fração de alumina na sequência VG-BR-RV-RR, cuja massa específica média é de $3,96 \text{ g/cm}^3$, há o aumento da fração de sílica, cuja massa específica média é de $2,65 \text{ g/cm}^3$ (GCC TECHNOLOGY AND PROCESSES S.A., 2006), contribuindo assim, com a queda da massa específica média das partículas abrasivas e, por consequência, dos compósitos nesta sequência.

Figura 27 - Resultado do módulo de elasticidade das amostras de compósito abrasivo

Fonte: Próprio autor.

Pode-se observar, por meio dos resultados obtidos pela técnica de excitação por impulso, que, para cada tipo de amostra, o módulo de elasticidade decresce na sequência VG-BR-RV-RR. As amostras VG, BR e RV possuem valores do módulo de elasticidade muito próximos (dentro do desvio). O módulo de elasticidade médio das amostras do tipo BR é aproximadamente 4,19% menor que o das amostras do tipo VG. O módulo de elasticidade médio das amostras do tipo RV é aproximadamente 6,59% menor que o das amostras do tipo VG. O módulo de elasticidade médio das amostras do tipo RR é aproximadamente 19,38% menor que o das amostras do tipo VG. Esta tendência de decréscimo no módulo de elasticidade por tipo de compósito está relacionada com a queda na massa específica.

4.3.2. Análise da resistência ao impacto pelo ensaio de impacto Izod

A Figura 28 mostra as resistências ao impacto de cada tipo de amostra obtidas por meio do ensaio de impacto Izod.

Figura 28 - Resultado da resistência ao impacto das amostras

Fonte: Próprio autor.

Dos resultados mostrados na Figura 28, pode-se constatar que, ao contrário dos altos módulos de elasticidade apresentados pelos compósitos (Figura 27), a resistência ao impacto deles é baixa indicando assim baixa tenacidade, a qual é provavelmente devido à estrutura do compósito abrasivo (composto por 90% m de alumina) e ao tratamento térmico de cura do ligante.

4.3.3. Análise do módulo de elasticidade e da resistência à flexão pelo ensaio de flexão em quatro pontos

A resistência à flexão e o módulo de elasticidade por flexão, para cada tipo de amostra, estão representadas nas Figuras 29 e 30, respectivamente.

O gráfico com o resultado da resistência à flexão para cada tipo de compósito (Figura 29) mostra que, além de o compósito do tipo RR apresentar o menor resultado desta propriedade entre os outros tipos de compósito, a resistência à flexão destes compósitos é aproximadamente 50% menor que a da resina fenólica não reforçada (90 MPa), que pode ser devido à proporção de alumina no compósito (90% m), à interface entre a resina e o grão abrasivo e/ou ao tratamento térmico de cura da matriz.

Figura 29 - Resultado da resistência à flexão das amostras

Fonte: Próprio autor.

Figura 30 - Resultado do módulo de elasticidade por flexão das amostras

Fonte: Próprio autor.

O gráfico com o resultado do módulo de elasticidade para cada tipo de compósito mostra que, além de o compósito do tipo RR apresentar o menor resultado desta propriedade entre os outros tipos de compósito, o módulo de elasticidade por flexão destes compósitos está entre 4 e 6 vezes maior que o da resina fenólica não reforçada (4 GPa) (VAN KRAVELEN, 1990), que pode ser devido à proporção de alumina no compósito (90%*m*) e/ou ao tratamento térmico de cura da matriz, o qual pode ter produzido uma cura excessiva e a consequente fragilização da matriz.

4.3.4. Análise do módulo de armazenamento e da tangente δ por DMTA

Os resultados do módulo de armazenamento (E') e da tangente δ obtidos para cada tipo de amostra, por meio dos ensaios realizados por DMTA, podem ser observados na Figura 31.

Fonte: Próprio autor.

Os resultados dos picos da tangente δ , da temperatura de pico (T_p) e do módulo de armazenamento (E') a aproximadamente 30°C estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Tangente δ , da temperatura de pico e do módulo de armazenamento (E') por tipo de amostra

Amostra	$\tan \delta$	T_p (°C)	E' (GPa)
VG	0,11	241,5	33,5
RV	0,11	236,3	34,3
BR	0,10	225,2	24,0
RR	0,10	231,4	18,3

Fonte: Próprio autor.

Pode-se observar, a partir da intensidade do pico da $\tan \delta$, que ela não sofreu mudança significativa por qualquer que seja a diferença entre os tipos de alumina utilizada como reforço. Pode-se inferir, a partir da temperatura de pico da $\tan \delta$, que a temperatura de transição vítrea no ligante para os compósitos do tipo VG é maior que para os do tipo RV, e estes possuem temperaturas de transição vítrea maiores que para os compósitos dos tipos BR e RR, sendo que os compósitos do tipo RR possuem valor de T_g maior que os do tipo BR, parecendo não haver uma relação direta entre a pureza da alumina e a T_g da matriz do compósito resinoide. O módulo de elasticidade da região elástica pode ser estimado a partir do módulo de armazenamento dos corpos-de-prova, sendo assim, o módulo de elasticidade da região elástica dos compósitos do tipo VG possui valor bem próximo da dos compósitos do tipo RV, os quais são maiores que o do compósito do tipo BR, e o compósito RR apresenta o menor valor de módulo de elasticidade em sua região elástica, parecendo não haver uma relação direta entre a pureza da alumina e o módulo de elasticidade do compósito a partir desta técnica.

4.3.5. Porosidade pelo método de Arquimedes

A porosidade aparente e a massa específica aparente por tipo de amostra, determinadas pelo método de Arquimedes, podem ser observadas nas Figuras 32 e 33, respectivamente.

Pode-se constatar, na Figura 32, que a porosidade aparente aumenta para cada tipo de compósito na sequência VG-BR-RV-RR. Todos os compósitos apresentam porosidade devido aos voláteis liberados pela matriz resinoide durante o tratamento térmico de cura, mas o acréscimo na porosidade aparente das amostras do tipo BR e RV, por exemplo, pode ter sido gerada também pelas partículas porosas, as quais podem ser observadas nas micrografias

por MEV destas amostras de alumina. A porosidade aparente dos compósitos do tipo RR é gerada também pelos voláteis encontrados nas amostras de alumina do tipo ALO RR, por FRX.

Figura 32 - Resultado da porosidade aparente das amostras

Fonte: Próprio autor.

Figura 33 - Resultado da massa específica aparente para cada tipo de amostra

Fonte: Próprio autor.

Pode-se constatar, por meio da Figura 33, que a massa específica aparente para cada tipo de compósito tem um decréscimo na sequência VG-BR-RV-RR. A massa específica aparente dos compósitos abrasivos é resultado tanto da sua porosidade aparente como da massa específica média das partículas abrasivas usadas em cada tipo de compósito, a qual está relacionada com a pureza destas partículas e a presença de partículas porosas.

4.3.6. Análise de dureza por SBP

Os resultados da análise de dureza por *Sand Blasting Penetration* (SBP) estão ilustrados na Figura 34.

Figura 34 - Resultado do ensaio de dureza por SBP por tipo de amostra

Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados do ensaio de dureza por SBP, pode-se constatar que a profundidade do orifício (a) erodido pelo quartzo nas amostras vai crescendo na sequência VG-BR-RV-RR, e a dureza do compósito decresce nesta mesma sequência, a qual pode estar diretamente relacionada com o provável decréscimo na dureza média das partículas abrasivas devido à diminuição na sua pureza, conforme é mostrado na Tabela 16. Além disso, fica denotada uma relação inversamente proporcional entre a porosidade aparente e a dureza do compósito.

4.3.7. Análise fractográfica por MEV

As micrografias das superfícies de fratura das amostras VG, BR, RV e RR, podem ser verificadas nas Figuras 35, 36, 37 e 38, respectivamente.

Figura 35 - Micrografia da superfície de fratura da amostra VG com ampliação de 200x

Fonte: Próprio autor.

Podem-se observar, na superfície de fratura da amostra VG, a presença de poros produzidos por voláteis (indicados por setas), os quais agem como concentradores de tensão, favorecendo assim a fratura da matriz resinoide, e a presença das partículas de alumina, expostas pela fratura da resina, não sendo possível afirmar se a carga do impacto foi suficiente para fraturá-las ou não. Pode-se afirmar que a resina é mais frágil que a alumina.

A Figura 36, por sua vez, mostra a superfície de fratura da amostra BR, na qual estão destacados por setas os poros gerados por voláteis, e a partir da diferença de tonalidade de cinza, é possível observar a fratura da resina e o descolamento desta para com algumas faces das partículas de alumina, não sendo possível afirmar que estas partículas fraturaram com a carga do impacto.

Figura 36 - Micrografia da superfície de fratura da amostra BR com ampliação de 200x

Fonte: Próprio autor.

Figura 37 - Micrografia da superfície de fratura da amostra RV com ampliação de 200x

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 37, podem ser observados os poros (indicados por setas) e as partículas de alumina expostas por meio da fratura frágil da resina, não sendo possível novamente afirmar se a carga do impacto foi suficiente para fraturar as partículas.

Figura 38 - Micrografia da superfície de fratura da amostra RR com ampliação de 200x

Fonte: Próprio autor.

Podem-se observar, na Figura 38, a presença de poros (indicados por setas), os quais são maiores que os observados nas outras amostras, das partículas de alumina expostas por meio da fratura frágil da matriz resinoide e o consequente descolamento entre as partículas e a resina, além da presença de uma partícula com a superfície áspera. Os poros atuam como concentradores de tensão, diminuindo assim as resistências à flexão e ao impacto.

As micrografias da superfície de fratura de cada tipo de amostra parecem indicar que a fratura das amostras ocorre majoritariamente no ligante e minoritariamente na partícula abrasiva.

5. CONCLUSÃO

Os resultados dos ensaios mecânicos mostraram que os compósitos de alumina reciclada apresentaram depreciação em todas as propriedades estudadas em relação ao compósito de alumina virgem, exceto a resistência ao impacto Izod, no qual todas as amostras apresentaram baixa resistência. A razão desta baixa resistência ao impacto deveu-se à estrutura formada pelo grão de alumina, ligante (resina fenólica) e porosidade, na qual a baixa proporção de resina fenólica (10% m.) foi a responsável pelo resultado.

Por outro lado, a causa da depreciação nas propriedades mecânicas apresentadas pelos compósitos de alumina reciclada foi a menor concentração em alumina e a presença de impurezas oriundas da produção das ferramentas abrasivas. Neste caso, o compósito de alumina branca reciclada apresentou melhores resultados das propriedades mecânicas em relação aos compósitos de alumina oriunda de rebolos vitrificados e os de alumina oriunda de rebolos e discos resinoides.

Desta forma, o potencial de reciclagem dos grãos de alumina oriundos de ferramentas abrasivas visando o seu reaproveitamento no processo de fabricação destas ferramentas é limitado pela sua pureza, de modo que, se no processo de reciclagem dos grãos for aumentada a concentração de alumina, haverá possibilidade de seu reaproveitamento.

Finalizando, o reaproveitamento dos grãos de alumina reciclados em novas ferramentas abrasivas só será viável se houver um compromisso entre as sustentabilidades ambiental e econômica e a eficiência em serviço das ferramentas abrasivas produzidas com estes grãos.

REFERÊNCIAS

AA ABRASIVES, INC.. **Norton Abrasives - Superabrasives**. 2017. Disponível em: <<https://www.aaabrasives.com/shop-manufacturers/norton-abrasives/norton-abrasives-superabrasives>>. Acesso em: 02 out. 2017.

AMIRKABIR UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. Mechanical Engineering Department, Teerã, Irã. Disponível em: <<http://me.aut.ac.ir/staff/solidmechanics/alizadeh/Impact%20Test.htm>>. Acesso em: 31 mar. 2016.

ANDERSSON, J. M. **Controlling the formation and stability of alumina phases**. 2005. 43 f. Tese (Doutorado) - Linköping University, Suécia, 2005.

ANOVITZ, L., M.; COLE, D., R.. Characterization and Analysis of Porosity and Pore Structures. **Reviews in Mineralogy & Geochemistry**, v. 80, p. 61-164, 2015.

ASCONTEC ABRASIVOS. **Produtos**. 2017. Disponível em: <<http://www.ascontecabrasivos.com.br/produtos.html>>. Acesso em: 30 maio 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6220**: Materiais refratários densos conformados - Determinação do volume aparente, densidade de massa aparente, porosidade aparente, absorção e densidade aparente da parte sólida. 2. ed. Rio de Janeiro, 4. p., 2011.

ASTM INTERNATIONAL **ASTM-C1548-02**: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio of Refractory Materials by Impulse Excitation of Vibration. West Conshohocken, 2012.

ASTM INTERNATIONAL **ASTM-D7028-07**: Standard test method for glass transition temperature (DMA Tg) of polymer matrix composites by Dynamic Mechanical Analysis (DMA). West Conshohocken, 2015.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM-D256-10**: Standard test methods for determining the Izod pendulum impact resistance of plastics. West Conshohocken, 2010b.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM-D6272-10**: Standard test method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials by four-point bending. West Conshohocken, 2010a.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM-C20-00**: Standard test method for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water. West Conshohocken, 2015.

BRUCKSCHEN, B. et al. Comparing different porosity measurement methods for characterisation of 3D printed bone replacement scaffolds. **Biomedizinische Technik**, v. 50, p. 1609–1610, 2005.

CAWLEY, J. D.; LEE, W. E. Oxide ceramics. In: SWAIN, M. (Ed.). **Materials science and technology**. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag, 2005, p. 47–117.

DAVIS, K. Material review: alumina (Al_2O_3). **School of Doctoral Studies (European Union) Journal**, p. 109-114, 2010.

DE PORTU, G.; GUICCIARDI, S. Wear of hard ceramics. In: SARIN, V. K.; LLANES, L.; MARI, D. (Ed.). **Comprehensive hard materials**. Kindlington: Elsevier Ltd., 2014, p. 385–412.

DIKSHITH, T. **Handbook of Chemicals and Safety**. Boca Raton: CRC Press, 2016.

DOMPIERI, M.; SZNELWAR, J., J.; SCALABRIN, R.. **RT-73 Perfil de Abrasivos**. Brasília: Ministério das Minas e Energia, 2009. 64 p. Relatório técnico publicado no site do Ministério das Minas e Energia.

ELBE-ABRASIVES GmbH & Co. KG, 2017. **Products:** conventional grinding wheels. Disponível em: <<http://www.elbe-abrasives.com/de/produkte/konventionelle-schleifscheiben/haertegrad-des-schleifkoerpers.html>>. Acesso em: 21 abr. 2017.

ELFUSA GERAL DE ELETROFUSÃO LTDA. **Electrofused aluminum oxide for abrasives.** São Paulo: 2003. Disponível em: <<http://www.abrasivewarehouse.com/portals/0/pdfs/aluminum-2520oxide-2520brochure.pdf>> Acesso em: 24 mar. 2016.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**, Rio de Janeiro: LTC, 2008.

GARDZIELLA, A.; PILATO, L.; KNOP, A. **Phenolic resins:** chemistry, applications, standardization, safety and ecology. Berlin: Springer, 1999.

GAY, D.; HOA, S. V.; TSAI, S. W. **Composite material:** design and applications. Boca Raton: CRC, 2003.

GCC TECHNOLOGY AND PROCESSES S.A. (Switzerland). Armando Garcia Luna; Jaime Valenzuela Grado. **Improved microsilica, its application like pozzolanic material and methods for its obtaining.** WO 2006079875 A1. 6 jul. 2005, 3 ago. 2006. Disponível em: <<http://www.google.fr/patents/WO2006079875A1?cl=en>>. Acesso em: 28 maio 2017.

GITZEN, W.H. (ed.). **Alumina as a ceramic material.** Ohio, EUA: The American Ceramic Society, 1970.

NORTON COMPANY (United States). William C. Howard. **Composite resinoid bonded abrasive wheels.** US3867795 A, 16 Out. 1973, 25 Fev. 1975. Disponível em: <<https://www.google.com/patents/US3867795#backward-citations>>. Acesso em: 23 maio. 2017.

JACKSON, M. J.; HITCHINER, M. P. **High Performance Grinding and Advanced Cutting Tools.** New York, NY: Springer New York, 2013.

JANECKI, J.; DRABIK, J.; WOLSZCZAK, M.; PAWELEC, Z. Tribological tests in the system of steel-composite made of phenol formaldehyde resin and the analysis of the effect of plastic grease in resin on the state of surface layer. **CHEMIK**, Poland, v. 67, n. 4, p. 309-316, 2013.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 2: grinding, honing, lapping**. Berlin: Springer, 2009.

KUHMICHEL Abrasive GmbH. **Recycling**. 2017. Disponível em: <<http://www.kuhmichel.com/70-1-Recycling.html>>. Acesso em: 11 maio 2017.

LB SB GROUP, 2017. **Abrasive products**. Disponível em: <http://www.lbsb.com/content/display/article/site:lbsb-param:abrasive_products-link:8383>. Acesso em: 15 maio 2017.

LINKE, B. S. Manufacturing and sustainability of bonding systems for grinding tools. **Prod. Eng. Res. Devel.**, p. 265–276, 2016a.

LINKE, B. S. **Life cycle and sustainability of abrasive tools**. Aachen: Springer, 2016b.

LINKE, B. S. A review on properties of abrasive grits and grit selection. **Int. J. Abrasive Technology**, v. 7, n. 1, p. 46–58, 2015.

LINKE, B. S. Sustainability concerns in the life cycle of bonded grinding tools. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 7, n. 3, p. 258–263, 2014.

LIU, C. et al. Addition of Al–Ti–C master alloys and diopside to improve the performance of alumina matrix ceramic materials. **Ceramics International**, v. 33, p. 1149-1154, 2007.

MALKIN, S.; GUO, C. **Grinding technology: theory and application of machining with abrasives**, 2nd. ed., New York: Industrial Press Inc., 2008.

MARINS, G. J. Estudo do comportamento cinético de cura de resinas fenólicas do tipo resol e novolaca para aplicação em rebolos abrasivos. 2014. 29 p. Relatório final de iniciação científica (Engenharia Química) - Universidade de São Paulo, Lorena, 2014.

MENARD, J.-C.; THIBAUT, N. W. **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**. 7th. ed. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2011.

NORITAKE Co., Limited. **Product information**. 2017. Disponível em: <<http://www.noritake.co.jp/eng/products/abrasive/ok/other/recycle.html>>. Acesso em: 11 maio 2017.

PASSOS, E. R. **Compreendendo a influência da titânia não processamento da alumina eletrofundida marrom e sua caracterização para aplicações abrasivas**. 2014. 138 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

ROHAN. **Abrasives Market**. Magarpatta: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/abrasives.asp>>. Acesso em: 21 set. 2017.

ROMÃO GOGOLLA. **Produtos**. 2017. Disponível em: <<http://www.rgogolla.com.br/produtos.html#>>. Acesso em: 31 maio 2017.

ROWE, W. B. **Principles of modern grinding technology**. 2nd. ed. Oxford: Elsevier, 2014.

SHIRAI, T. et al. Structural properties and surface characteristics on aluminum oxide powders. **Annual Report of the Advanced Ceramics Research Center Nagoya Institute of Technology**, v. 9, p. 23–31, 2009.

SINO LEGEND (ZHANGJIAGANG) CHEMICAL CO., LTD. (China). Quanhai Yang; Qijun Pu. **PU Modified phenolic tackifying resins for rubber compounding applications**. WO2009155747 A1, 26 jun. 2008, 30 dec. 2009.

SREBRENKOSKA, V.; BOGOEVA-GACEVA, G.; DIMESKI, D. Composite material based on an ablative phenolic resin and carbon fibers. **Journal of the Serbian Chemical Society**, v. 74, n. 4, p. 441-453, 2009.

SUBRAMANIAN, K.; RAMANATH, S. Principles of abrasive machining. In: ASM International, Engineered Materials Handbook, ceramics and glasses. Materials Park: Ohio, 2000. v.4.

TELLE, R. Boride and Carbide Ceramics. In: SWAIN, M. (Ed.). **Materials science and technology**. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2005, p. 173–266.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral Commodities Summaries**. Reston: [s.n.], 2017.

SAINT-GOBAIN. **Recycling of used grinding wheels**. 2017. Disponível em: <<http://www.valoref.com/services/recycling-used-grinding-wheels>>. Acesso em: 11 maio 2017.

VAN KRAVELEN, D. W.. **Properties of polymers**: Their correlation with chemical structure; their numerical estimation and prediction from additive group contributions. 3rd. ed. Oxford: Elsevier Science & Technology, 1990.

ZHANG, Y.; YUAN, Z.; ZHOU, Y. Effect of furfural alcohol/phenol-formaldehyde resin mass ratio on the properties of porous carbon. **Materials Letters**, v. 109, p. 124–126, 2013.