



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Rosane Felice de Oliveira**

**CONFECÇÃO DE DISCOS DE DESBASTE A PARTIR DE  
 $Al_2O_3$  E PÓ DE VIDRO.**

**Belém  
2009**

Rosane Felice de Oliveira

**CONFECÇÃO DE DISCOS DE DESBASTE A PARTIR DE  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> E PÓ DE VIDRO.**

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais e Processos de Fabricação pelo Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará.  
Orientadora Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Carmen Gilda B. T. Dias

Belém  
2009

Rosane Felice de Oliveira

## CONFECÇÃO DE DISCOS DE DESBASTE A PARTIR DE $Al_2O_3$ E PÓ DE VIDRO

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais e Processos de Fabricação pelo Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará.  
Orientadora Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Carmen Gilda B. T. Dias

Data da aprovação:

Banca Examinadora:

\_\_\_\_\_ - Orientador

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> . Carmen Gilda Barroso Tavares Dias  
Doutora em Engenharia de Materiais  
PPGEM / UFPA

\_\_\_\_\_

Prof<sup>a</sup> .Dr<sup>a</sup> Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia.  
Doutora em Engenharia Mecânica  
DEM/FEM/ UNICAMP

\_\_\_\_\_

Prof Dr Roberto de Freitas Neves  
Doutor em Engenharia Química.  
CPGG / UFPA

“Aos meus pais, João Evangelista de Oliveira Neto e Sonie Felice de Oliveira, pelo amor incondicional.”

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus por iluminar minha vida e direcionar os meus passos.

À Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Carmen Gilda pela orientação, paciência e incentivo ao decorrer do trabalho.

Aos professores, funcionários e colegas do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Tecnológico da UFPA, pela colaboração, amizade e apoio na conquista deste ideal.

Ao Prof. Dr. Hilton Costi do Centro de Pesquisa do Museu Emílio Goeldi, pela realização das micrografias obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura.

À Alunorte pelo fornecimento de hidróxido de alumínio e dados técnicos.

Aos amigos e mestres Aline Corecha, Junilce Lobato, Nátali Pantoja, Rosa Laura e Vera Dias pela contribuição acadêmica e amizade no decorrer do projeto.

Aos colegas do grupo de Eco-compósitos pelo apoio, paciência e opiniões na realização dos experimentos no laboratório.

Aos amigos que fiz em Belém e em Barcarena, que na ausência da minha família, se tornaram uma segunda e grande família.

Aos meus familiares que mesmo distantes compartilharam comigo este sonho.

À Capes pelo apoio financeiro.

“Concedei-me, Senhor, a serenidade necessária,  
Para aceitar as coisas que não podemos modificar,  
Coragem para modificar aquelas que podemos,  
E sabedoria para distinguir umas das outras.”

“Oração da Serenidade”

## RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento de discos abrasivos e de corte confeccionados com  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e pó de vidro reciclado para aplicação em ferramenta de corte. Os discos são utilizados para micromizar termoplásticos pós-consumo rígidos e levá-los a diversos tipos de processamento, como por exemplo, a rotomoldagem. Este disco abrasivo utiliza pó de vidro como um aditivo ligante e fundente, e pó de poli(tereftalato de etileno) pós-consumo como plastificante, facilitando um melhor preenchimento do molde. As proporções de pó de vidro reciclado foram analisadas a partir de estudos anteriores com outros minerais, como o diopsídio e o feldspato, já que os estudos com o pó de vidro reciclado substituindo os minerais naturais são recentes. O desenvolvimento dos discos acontece em duas etapas. A primeira é de homogeneização dos componentes com os percentuais calculados. Posteriormente é prensado e levado a mufla até uma temperatura de 900 °C para obter a percolação da resina e a consequente degradação do poli (tereftalato de etileno), pré-sinterização e amolecimento dos silicatos . Após a obtenção destes compostos verdes acontece a segunda e última etapa, que consiste na sinterização dos corpos de prova para a diminuição da porosidade e consequente aumento da resistência mecânica, seguida de acabamento superficial e testes de corte.

Palavras-chave: alumina, reciclagem, poli (tereftalato de etileno), aditivo ligante, material cerâmico e sinterização

## ABSTRACT

This article describes the development of abrasive and cutting disks made of alumina and waste glass powder to apply in cutting tools. These disk mills are used to micromize rigid post-consumed thermoplastics and let its use in a lot of recycling process, as rotomolding. This cutting disk uses glass powder as a fluxing agent and poly(ethylene terephthalate) post-consumed to give a plastic behavior to the powder, making it easier to fill in the mold. The amounts of glass powder were analyzed from previous studies with different minerals, as diopside and feldspar, since the studies with waste glass powder substituting natural minerals are recent. The development of the disks occurs in two steps. The first one is the homogeneization of the compounds with the calculated amounts. Afterwards it's pressed and taken to the mufla to get the percolation of the resin and its complete degradation up to a temperature of 900°C, pre-sintering and soften the silicates. After getting these green composites, it happens the second and final step, when the disks are sintered to decrease the porosity and improve its strength, followed by a superficial finish and cutting tests.

Key-words: alumina, recycling, poly (ethylene terephthalate), fluxing agent, ceramic materials and sintering.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

	p.
Figura 2.1 - Distribuição dos materiais que compõem o resíduo sólido urbano	19
Figura 2 -2 Termoplásticos mais encontrados no resíduo sólido urbano brasileiro.	20
Figura 2.3 Sequência da transformação térmica dos hidróxidos de alumínio	29
Figura 2.4 Variação da dureza de alguns materiais de ferramentas de corte com a temperatura.	32
Figura 3.1 – Garrafas de Poli(tereftalato de etileno)	33
Figura 3.2 – Vidro alcalino – plano.	34
Figura 3.3 - a) Moinho de facas RONE, (b) Moinho de facas TECNAL, (c) Moinho manual	37
Figura 3.4 – Molde em aço inox	40
Figura 3.5 – Corpo de prova pré-sinterizado	41
Figura 3.6 – Discos abrasivos sinterizados.	41
Figura 4.1. MEV do PET. (a)100X; (b) 500X.	42
Figura 4.2 – EDS do vidro plano	44
Figura 4.3. MEV do Vidro Plano. (a)250 X; (b) 1Kx.	44
Figura 4.4 – MEV da Alumina Calcinada.	47
Figura 4.5 – Máquina de tração e compressão	49
Figura 4.6 – Disco cerâmico acoplado ao dispositivo.	49
Figura 4.7 – Análise termogravimétrica do material abrasivo	50
Figura 4.8 – DRX do disco abrasivo	51
Figura 4.9 – EDS do corpo de prova - Oligoclásio	52
Figura 4.10 – EDS do corpo de prova – Alumina	53
Figura 4.11 – MEV do disco abrasivo	55

Figura 4.12 – Ensaio de desbaste de materiais poliméricos com disco cerâmico.	56
Figura 4.13 - Tiras desbastadas com disco cerâmico e disco 146	57
Figura 4.14 - Peso dos discos abrasivos ao longo de 15 testes	58

## **LISTA DE FLUXOGRAMAS**

Fluxograma 1 - Fluxograma de processo de fabricação dos discos abrasivos. 35

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição aproximada de alguns vidros comerciais	p. 24
Tabela 2.2 - Composição típica do vidro alcalino	25
Tabela 2.3 – Composição típica do vidro chumbo	25
Tabela 2.4 – Composição típica do vidro boro	26
Tabela 3.1 Formulação dos constituintes	39
Tabela 3.2 - Correlação dos percentuais do mineral diopsídio e do pó de vidro utilizados.	39
Tabela 4.1 – Concentração dos elementos obtidos por EDS para vidro plano.	43
Tabela 4.2 – Análise química da alumina calcinada.	45
Tabela 4.3 – Análise granulométrica da alumina calcinada	46
Tabela 4.4 – Área específica das aluminas	46
Tabela 4.5 Fases presentes no disco de corte	51
Tabela 4.6 – Concentração dos elementos obtidos por EDS	52
Tabela 4.7 - Concentração dos elementos obtidos por EDS	53
Tabela 4.8 - Diferença de peso dos discos após teste de abrasão	57

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ASTM	American Society for Testing and Materials
ALUNORTE	Alumina do Norte S/A
CP	Corpo de prova
DRX	Difratograma de raios X
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MPa	Mega Pascal
N	Newton
%	Percentual
PE	Polietileno
PET	Poli(tereftalato de etileno)
PP	Polipropileno
PVC	Poli(cloreto de vinila)
rpm	rotações por minuto
TGA	Termogravimetria
UFPA	Universidade Federal do Pará

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>19</b>
2.1 RECICLAGEM	19
2.1.1 RECICLAGEM DE POLÍMEROS	19
2.1.1.1 PROCESSO DE RECICLAGEM DE POLÍMEROS	21
2.1.1.1.1 Reciclagem Mecânica	21
2.1.1.1.2 Reciclagem Energética	21
2.1.1.1.3 Reciclagem Química	22
2.1.2 RECICLAGEM DE VIDRO	22
2.2 PET	23
2.3 VIDRO	23
2.3.1 Composição do vidro	24
2.3.2 Principais tipos de vidros	25
2.3.2.1 Vidro alcalino	25
2.3.2.2 Vidro chumbo	25
2.3.2.3 Vidro boro-silicato	26
2.4 ALUMINA	27
2.4.1 Processo Bayer de extração de alumina	27
2.4.2 Formas cristalográficas da alumina	28
2.5 MATERIAIS CERÂMICOS	29
2.5.1 Classificação dos materiais cerâmicos	29
2.5.2 Processamento de materiais cerâmicos	31
2.5.3 Materiais cerâmicos para desbaste	31
2.5.4 Grês porcelanato	32
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>33</b>
3.1 MATERIAIS	33
3.1.1 Plastificante orgânico – PET.	33
3.1.2 Vidro	34
3.1.3 Alumina	34
3.2 MÉTODOS	34

<b>3.2.1 Aquisição do material polimérico e do vidro</b>	<b>36</b>
<b>3.2.2 Lavagem e secagem das garrafas Pet e do vidro</b>	<b>36</b>
<b>3.2.3 Moagem do PET e do vidro</b>	<b>36</b>
<b>3.2.4 Classificação do PET e do vidro</b>	<b>37</b>
<b>3.2.5 Análise química da alumina calcinada</b>	<b>37</b>
<b>3.2.6 Granulometria da alumina calcinada</b>	<b>38</b>
<b>3.2.7 Área Específica</b>	<b>38</b>
<b>3.2.8 Formulação e homogeneização dos materiais</b>	<b>38</b>
<b>3.2.9 Moldagem por compressão a frio dos materiais</b>	<b>38</b>
<b>3.2.10 Pré-sinterização dos corpos de prova</b>	<b>40</b>
<b>3.2.11 Sinterização dos corpos de prova</b>	<b>40</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>42</b>
<b>4.1 CARACTERIZAÇÃO DO POLI (TEREFTALATO DE ETILENO)</b>	<b>42</b>
<b>4.1.1 Análise Granulométrica</b>	<b>42</b>
<b>4.1.2 Avaliação do tamanho e forma das partículas do PET</b>	<b>42</b>
<b>4.1.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) do PET</b>	<b>42</b>
<b>4.2 CARACTERIZAÇÃO DO VIDRO</b>	<b>43</b>
<b>4.2.1 Caracterização do vidro</b>	<b>43</b>
<b>4.2.2 Análise granulométrica</b>	<b>44</b>
<b>4.2.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) do vidro</b>	<b>44</b>
<b>4.3 CARACTERIZAÇÃO DA ALUMINA</b>	<b>45</b>
<b>4.3.1 Caracterização da alumina</b>	<b>45</b>
<b>4.3.2 Análise Granulométrica</b>	<b>45</b>
<b>4.3.3 Área Específica (BET)</b>	<b>45</b>
<b>4.3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da alumina</b>	<b>45</b>
<b>4.4 PREPARAÇÃO DO DISCO ABRASIVO</b>	<b>48</b>
<b>4.4.1 Avaliação dos parâmetros de processamento em moldagem por compressão a frio.</b>	<b>48</b>
<b>4.4.2 Efeito da formulação e homogeneização das misturas</b>	<b>48</b>
<b>4.4.3 Montagem do aparato experimental</b>	<b>49</b>
<b>4.4.4 Confeção do disco abrasivo</b>	<b>49</b>

<b>4.5 CARACTERIZAÇÃO DO DISCO ABRASIVO</b>	<b>50</b>
<b>4.5.1 Análise Termogravimétrica do disco abrasivo</b>	<b>50</b>
<b>4.5.2 DRX do disco abrasivo</b>	<b>51</b>
<b>4.5.3 EDS do disco abrasivo</b>	<b>52</b>
<b>4.5.4 Análise por MEV do disco abrasivo</b>	<b>54</b>
<b>4.5.5 Teste de corte dos discos abrasivos</b>	<b>56</b>
<b>5 CONCLUSÕES</b>	<b>59</b>
<b>6 SUGESTÕES</b>	<b>60</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>61</b>
<b>8 – APÊNDICE I</b>	<b>66</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O sistema cerâmico  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - pó de vidro é de grande interesse tecnológico por apresentar propriedades mecânicas superiores a de aluminas comerciais puras, que apresentam alta dureza, contudo também possuem fragilidade, o que limita suas aplicações <sup>[30][33][45]</sup>; podendo ser melhorado através de fases secundárias cristalinas <sup>[34][51][52]</sup>. Esses materiais são usados onde elevada resistência à abrasão e alta resistência térmica é requisito indispensável <sup>[49]</sup>.

Neste contexto se inserem aplicações de disco para corte, desbaste e acabamento de chapas, dutos e peças ocas de polímeros oriundos de diversos tipos de processamento, como moldagem por compressão, extrusão e rotomoldagem. O grupo de Eco-Compósitos da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará recicla polímeros usando essas técnicas de processamento e este trabalho é de alta relevância técnica e científica para essa linha de pesquisa. Os discos serão constituídos de alumina doada pela Alunorte, pó de vidro obtido por trituração manual de vidro alcalino e grãos de poli (tereftalato de etileno) pós-consumo (PET) como elemento orgânico que irá conferir plasticidade ao pó para o melhoramento do preenchimento do molde <sup>[16]</sup>. Para obtenção dos compostos  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – pó de vidro é importante a realização de duas etapas; a pré-sinterização da alumina com o vidro como elemento ligante e fundente a  $900^\circ\text{C}$  <sup>[47][28]</sup>, quando ocorre a total degradação do PET; e por último a sinterização do corpo de prova a  $1150^\circ\text{C}$  por 3 horas para a eliminação dos poros, aumento da resistência mecânica, formação de uma fase vítrea, que atuará como aglomerante da fase cristalina e para a realização de uma tentativa de formação de uma fase cristalina de extrema importância devido às suas características abrasivas, fase esta denominada de mulita <sup>[55][36]</sup>.

Como o material apresenta elementos e características polifásicas semelhantes ao grês porcelanato, o qual apresenta em sua composição vidro, quartzo e mulita <sup>[48]</sup>; o seu processamento foi realizado tomando por base parâmetros de processo deste porcelanato,

O grês porcelanato é caracterizado por apresentar altíssima resistência à abrasão, resistência química, impermeabilidade, além de possuir amplas possibilidades de composições. Devido a isto se assemelha à pedra natural, mas com algumas características superiores ao granito e mármore <sup>[46]</sup>.

Utilizou-se PET como precursor de plasticidade ao pó; assim como o vidro, caracterizado como alcalino, foi usado como precursor de sílica, fundamental para a formação da mulita <sup>[7]</sup>, e também ter a função de um aditivo ligante e fundente, diminuindo assim a temperatura de sinterização, o que torna o processo mais econômico e viável nas instalações do laboratório da universidade.

O uso de pó de vidro já vem sendo estudado e usado como aditivo, pois assim pode substituir minerais que podem entrar em escassez na natureza, como por exemplo, o feldspato <sup>[54]</sup><sup>[47]</sup>, além de contribuir para a reciclagem deste material.

Hidróxidos de alumínio ocorrem na natureza como componente de muitas rochas e minerais. A bauxita é o mineral mais comum para a obtenção de alumina, iniciando-se com a mineração e seguida pelo processo Bayer <sup>[42]</sup>, que se baseia na diferença de solubilidade dos hidróxidos de alumínio na solução de soda cáustica, denominada licor <sup>[3]</sup>. A alumina é uma das matérias-primas mais utilizadas nas indústrias de cerâmicas refratárias e abrasivas por muitas razões. Dentre elas podem ser destacadas: alta dureza, excelente consistência, alta pureza, alta resistência ao ataque químico, boa resistência ao desgaste e alta resistência mecânica a altas e baixas temperaturas <sup>[21]</sup><sup>[43]</sup>.

A grande diversidade de aplicações e os benefícios decorrentes de suas propriedades estão estreitamente relacionados ao seu adequado processamento e à escolha correta do tipo de alumina, que é caracterizada, principalmente, em função da distribuição, tamanho e forma das partículas, estado de aglomeração, fases cristalográficas presentes e composição química do hidróxido precursor <sup>[6]</sup>. Devido a estas propriedades, a alumina é utilizada em uma série de processos industriais. As aplicações principais são ferramentas de corte na usinagem de metais, guia-fios e freia-fios na indústria têxtil, substratos para microeletrônica, bolas de moinhos e peças isolantes na indústria química e equipamentos de laboratório para altas temperaturas, tais como, cadinhos e material de revestimento de forno <sup>[18]</sup><sup>[55]</sup>. A alumina além de ser a matéria-prima para a produção de alumínio primário <sup>[3]</sup> é também utilizada em compósitos para blindagem leve de proteções balísticas <sup>[50]</sup>.

Este trabalho aborda a reciclagem de materiais cerâmicos e poliméricos no processamento e conformação de materiais cerâmicos, com ênfase na substituição de aditivos naturais por pó de vidro reciclado.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

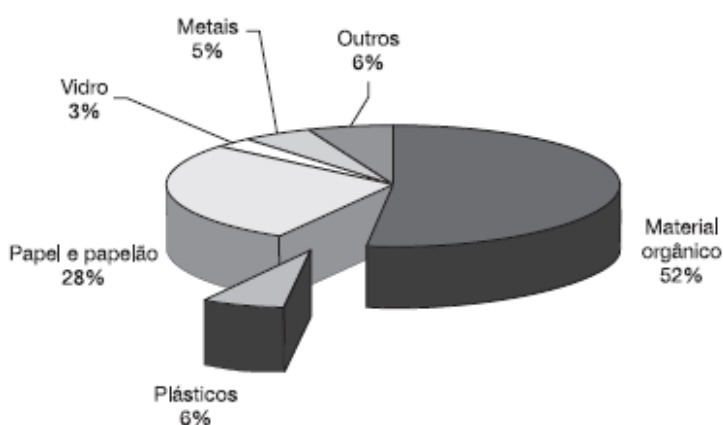
### 2.1 RECICLAGEM

Pode se definir reciclagem como o reprocessamento de resíduos provenientes de descarte de materiais, obtendo-se como resultado, matéria-prima para a fabricação de novos produtos, recuperando assim seu valor econômico através da coleta seletiva que separa e classifica estes materiais <sup>[1]</sup>.

O conceito de reutilização difere de reciclagem, pois reutilizar não implica em reintroduzir o produto no processo, simplesmente significa ter uma nova utilização, sem o considerar lixo, nem tão pouco, se desfazer do mesmo. O vidro é um claro exemplo sobre esta diferença, pois quando uma peça de vidro é reutilizada várias vezes, não acontece a reciclagem. Isto só ocorre quando esta mesma peça é quebrada e seus cacos sofrem reprocessamento para a obtenção de um novo produto.

#### 2.1.1 RECICLAGEM DE POLÍMEROS

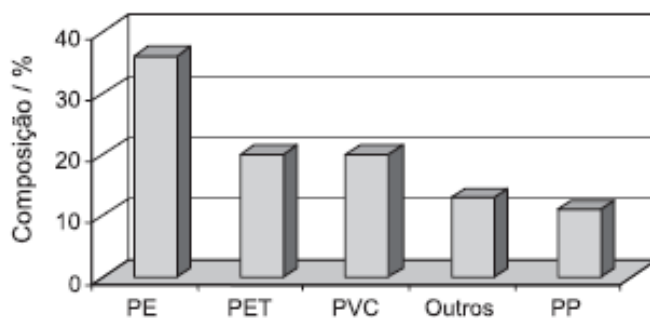
O material plástico apresenta crescente uso na sociedade atual devido às propriedades como leveza, resistência mecânica razoável, boa moldabilidade a baixas temperaturas, além do preço baixo. Na área de embalagens, o seu descarte é mais rápido quando comparado ao de outros produtos, levando assim a um grande e crescente problema relacionado à situação dos depósitos de lixo, pois apresentam baixa degradabilidade. A figura 2.1 apresenta o perfil da distribuição dos resíduos sólidos urbanos <sup>[2]</sup>.



**Figura 2.1 - Distribuição dos materiais que compõem o resíduo sólido urbano. Fonte: Spinacé (2005).**

Apesar da existência de uma grande variedade de termoplásticos, apenas cinco deles, ou seja, o polietileno (PE), o polipropileno (PP), o poliestireno (PS), o poli (tereftalato de etileno) (PET), e o poli (cloreto de vinila) (PVC) representam cerca de 90% do consumo nacional. No Brasil, em 1997, os principais termoplásticos foram utilizados em embalagens primárias (31%), descartáveis (22%), construção civil (14%), produtos ao consumidor (6%), filmes (5%), eletrodomésticos (5%), fibras (3%) e setor automotivo (1%) [2].

Dentre os resíduos sólidos urbanos das grandes cidades brasileiras, os principais polímeros encontrados são: o polietileno de alta e baixa densidade (PEAD e PEBD), o PET, o PVC e o PP. Outros tipos de polímeros encontrados correspondem a apenas 11% do total, como ilustrado na figuras abaixo [4].



**Figura 2 -2 Termoplásticos mais encontrados no resíduo sólido urbano brasileiro**  
Fonte: Oliveira (2008).

Os polímeros são considerados os grandes vilões ambientais, pois podem demorar séculos para se degradar e ocupam grande parte do volume dos aterros sanitários, interferindo de forma negativa nos processos de compostagem e de estabilização biológica [2]. Além disto, os resíduos poliméricos quando descartados em lugares inadequados, como lixões, rios, encostas, etc., causam um impacto ainda maior ao meio ambiente. Portanto, a reciclagem de forma sistemática é uma das soluções mais viáveis para minimizar o impacto causado pelos polímeros ao meio ambiente. Vários aspectos motivam a reciclagem dos resíduos poliméricos contidos nos resíduos sólidos urbanos, como a economia de energia, a preservação de fontes esgotáveis de matéria-prima, a redução de custos com disposição final do resíduo, a economia com a recuperação de áreas impactadas pelo mau acondicionamento dos resíduos, o aumento da vida útil dos aterros sanitários, a redução de gastos com a limpeza e a saúde pública e a geração de emprego e renda [4].

O reaproveitamento de resíduos de material plástico, tanto os provenientes de processo industrial quanto os resíduos sólidos urbanos, tem se estabelecido de forma expressiva em três processos básicos que possibilitam a sua reciclagem após prévia triagem. Dependendo da técnica utilizada, estes processos são conhecidos como reciclagem química, mecânica, ou energética. Qualquer um dos processos de reciclagem citados não resolveria o problema da disposição final de resíduos na cidade, no entanto, podem contribuir para a minimização, reduzindo a quantidade de resíduos a ser disposto.

## 2.1 1.1 PROCESSOS DE RECICLAGEM DE POLÍMEROS

A reciclagem de polímeros trata das reações de degradação que ocorrem durante o processo, onde os polímeros são submetidos ao calor, oxigênio e tensões mecânicas, e durante a vida útil dos materiais quando o oxigênio e a luz do sol são os principais agentes degradantes <sup>[9]</sup>.

### 2.1.1.1.1 Reciclagem mecânica

Consiste no reprocessamento por extrusão, injeção, termoformagem, moldagem por compressão, etc. É uma conversão física dos materiais plásticos que serão transformados novamente em outros produtos <sup>[9]</sup>. Para que ocorra de forma adequada este tipo de reciclagem, é necessário incluir as etapas de separação de resíduo polimérico, moagem, lavagem, secagem, reprocessamento e por fim, transformação do material polimérico no produto final <sup>[2]</sup>.

### 2.1.1.1.2 Reciclagem energética

Consiste em recuperar a energia química contida nos resíduos sólidos urbanos em energia elétrica ou térmica. A presença de material polimérico na composição dos resíduos urbanos é positiva, pois possuem alto poder calorífico, liberando grande quantidade de calor quando submetidos às temperaturas elevadas, como na incineração <sup>[2]</sup>. Os gases gerados nesse processo são tratados para reduzir o impacto sobre a atmosfera.

### 2.1.1.1.3 Reciclagem química

Consiste em processos tecnológicos de conversão do resíduo de materiais poliméricos em matérias-primas petroquímicas básicas, como óleos, gases e monômeros <sup>[9]</sup>. Ocorrem através de processos de despolimerização por solvólise (hidrólise, alcoólise, amilose e glicólise), ou por processos térmicos (pirólise à baixa e alta temperatura, gaseificação, hidrogenação) ou ainda métodos térmico/catalíticos (pirólise e a utilização de catalisadores seletivos) <sup>[2]</sup>.

### 2.1.2 RECICLAGEM DE VIDRO

Para preservar o meio ambiente, há projetos que visam eliminar os resíduos sólidos. E com relação ao vidro, há muito se aproveita o caco de vidro para a produção de novas peças, voltando ao forno e economizando 22% no consumo de energia <sup>[8]</sup>. O vidro é 100% reciclável e pode ser reciclado inúmeras vezes. Quanto a sua reutilização pode ocorrer inúmeras vezes, não só sendo retornadas para as indústrias de bebidas, como também são utilizadas para guardar diversos artigos, objetos e alimentos.

A reciclagem de vidro, referindo-se aos cacos, gera benefícios que podem ser: diminuição do volume dos lixões, já que se retira um material que não é perecível <sup>[10]</sup>; redução da poluição atmosférica, já que os fornos operam a temperaturas mais baixas, reduzindo assim a emissão de dióxido de carbono, dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio. Além de aumentar a vida útil dos fornos, pois em temperaturas mais baixas o desgaste do refratário é reduzido.

Para o vidro ser reciclado, ou seja, fundindo novamente, seus cacos não pode apresentar materiais estranhos, como papel, plástico, madeira, louça, tijolos, cerâmicas, ferro, alumínio e cobre <sup>[8]</sup>.

Além disso, vidros de composições diferentes, como os vidros usados em frascarias, não podem ser misturados com o vidro plano, com vidraria de laboratório ou peças borossilicato conhecidas como pyrex. O vidro de cor não pode ser misturado com o vidro incolor <sup>[10]</sup>.

O beneficiamento do caco apresenta várias etapas: lavagem, separação granulométrica, separação magnética, trituração, aspiração e separação por cor. Este beneficiamento se justifica já que cada impureza está associada a uma

dificuldade técnica na fabricação do vidro: as partículas refratárias diminuem a resistência mecânica do vidro; as substâncias orgânicas alteram o equilíbrio Redox do banho fundido, causando alterações no processo; os metais e ligas metálicas causam variação de cor e em alguns casos contribuem para aumentar o ataque aos refratários do forno <sup>[8]</sup>.

O vidro que não pode voltar ao forno pelos motivos citados, pode ainda ter outros usos. Já que apresenta durabilidade infinita e grande resistência mecânica, pode ser utilizado no capeamento de estradas, aditivo fundente, agregado a cimento e pode até ser usado em artesanato <sup>[10] [47]</sup>.

## 2.2 POLI (TEREFTALATO DE ETILENO)

O PET [poli (tereftalato de etileno)] é um poliéster termoplástico semicristalino, geralmente obtido pela reação de transesterificação de tereftalato de dimetila com o etileno glicol ou etilênico <sup>[9][38]</sup>. É amplamente usado na manufatura de garrafas de refrigerantes <sup>[39]</sup>, fitas eletrônicas, embalagens de alimentos, além de ser bastante empregado na indústria têxtil. Na indústria automobilística é utilizado em partes estruturais grandes, carcaças de bombas, carburadores, limpadores de pára-brisa e componentes elétricos <sup>[12]</sup>. É um dos polímeros semicristalinos mais usados no mundo <sup>[31]</sup>.

Existem duas temperaturas de extrema importância para os polímeros, que são as temperaturas de fusão “T<sub>m</sub>”, onde passam de um estado de cristalinidade relativa para o estado amorfo; e a temperatura de transição vítrea “T<sub>g</sub>”, que é relacionada apenas as regiões amorfas. O PET como um polímero semicristalino possui temperatura de transição vítrea acima da temperatura ambiente, T<sub>g</sub> igual a 86 ° C; e temperatura de fusão igual a 230 ° C <sup>[5]</sup>.

## 2.3 VIDRO

O vidro é considerado um sólido amorfo <sup>[10]</sup>, que ao se fundir torna-se líquido viscoso, e que ao ser resfriado se solidifica sem cristalizar, isto é, sem que seus átomos se liguem formando estruturas bem definidas, ordenadas e repetitivas.

É também considerado uma substância inorgânica numa condição contínua e análoga ao estado líquido daquela substância, a qual porém como resultado de

uma mudança reversível na viscosidade durante o resfriamento, atingiu um alto grau de viscosidade de modo a ser para todos os fins práticos rígido.

O vidro apresenta algumas propriedades semelhantes a dos cristais, como capacidade calorífica, condutividade térmica, índice de refração, propriedades mecânicas e elétricas. Em outras propriedades o vidro é diferente dos cristais, não tem ponto de fusão, não desvia o plano da luz polarizada e não é estável a altas temperaturas.

O vidro também apresenta muitas propriedades semelhantes às dos líquidos e alguns autores o definem como um líquido super-resfriado. Como os líquidos, os vidros formam soluções contínuas, isto é, suas propriedades podem variar continuamente.

A variação contínua das propriedades do vidro é útil no caso dos vidros coloridos. Do mesmo modo que nas soluções líquidas as cores podem ser modificadas continuamente nos vidros pela adição de corantes, possibilitando o surgimento de várias tonalidades <sup>[8] [10]</sup>.

### 2.3.1 Composição dos vidros

A composição do vidro é obtida por análise química. Ao ser analisado, o vidro é caracterizado por seus respectivos óxidos e a soma do peso desses óxidos é igual ao peso da amostra analisada dentro dos limites dos erros experimentais, o que evidencia que os vidros são compostos por óxidos <sup>[8]</sup>.

**Tabela 2.1 – Composição aproximada de alguns vidros comerciais <sup>[8]</sup>**

Vidro	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	PbO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	F <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO
Frascarias	72,7	2,0	0,06	10,4	-----	-----	13,6	0,4	0,3	0,2	-----	-----
Vidraçaria verde	71,7	0,2	0,1	9,6	4,4	-----	13,1	-----	0,4	----	-----	-----
Vidro plano	71,6	1,0	-----	9,8	4,3	-----	13,3	-----	0,2	----	-----	-----
Pote opalino	71,2	7,3	-----	4,8	-----	4,2	-----	-----	12,2	2,0	-----	-----
Rubi	72,0	2,0	0,04	9,0	-----	-----	16,6	0,2	----	----	-----	0,05
Boro-silicato	76,2	3,7	-----	0,8	-----	-----	5,4	0,4	----	----	13,5	-----
Fibra de vidro	54,5	14,5	0,4	15,9	4,4	-----	0,5	-----	-----	0,3	10,0	-----
Chumbo técnico	56,3	1,3	----	----	----	29,5	4,7	7,2	-----	0,6	-----	-----
Bulbo	72,9	2,2	-----	4,7	3,6	-----	16,3	0,2	0,2	----	0,2	-----



## 2.3.2 TIPOS PRINCIPAIS DE VIDROS

### 2.3.2.1 Vidro alcalino

É também denominado de vidro cal e é o mais usado no mundo, contém como componentes principais além do  $\text{SiO}_2$ , o  $\text{Na}_2\text{O}$  e o  $\text{CaO}$ . Com ele são confeccionadas as garrafas, baixelas e frascarias, vidro plano de construção civil e da indústria automobilística.

**Tabela 2.2 – Composições típicas <sup>[8]</sup>**

<b><math>\text{SiO}_2</math></b>	72%	70%	71%
<b><math>\text{Na}_2\text{O}</math></b>	16	15	17
<b><math>\text{Al}_2\text{O}_3</math></b>	2	2	1
<b><math>\text{CaO}</math></b>	6	11	11
<b><math>\text{MgO}</math></b>	4	-----	-----

### 2.3.2.2 Vidro chumbo

Também conhecido como Cristal, sendo caracterizado por teores altos de  $\text{PbO}$ . A presença deste óxido faz com que este vidro possua um índice de refração mais elevado e mais brilho que os outros, devido a isso, são usados para a fabricação de peças artísticas. O  $\text{PbO}$  também provoca um amolecimento no vidro, facilitando a sua lapidação.

**Tabela 2.3 – Composições típicas <sup>[8]</sup>**

<b><math>\text{SiO}_2</math></b>	60%	60%
<b><math>\text{PbO}</math></b>	29	20
<b><math>\text{K}_2\text{O}</math></b>	8	14
<b><math>\text{Na}_2\text{O}</math></b>	3	6

### 2.3.2.3 Vidro boro-silicato

Tem como característica quantidade significativa de  $B_2O_3$ , grande resistência ao choque térmico e ao ataque de agentes químicos, por isso são amplamente utilizados na fabricação de ampolas de injetáveis, frascos de vacinas e aparelhagem de laboratório [8].

**Tabela 2.4 – Composições típicas [8]**

<b>SiO<sub>2</sub></b>	81%	74%	70%
<b>B<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	13	10	7
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2	5	6
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	4	6	6
<b>BaO</b>	-----	1	3
<b>CaO</b>	-----	2	-----

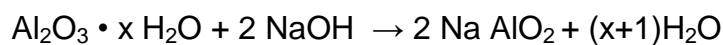
## 2.4 ALUMINA

A alumina,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , produzida industrialmente é um pó branco, não tóxico, que além de alta pureza química, apresenta importantes características para a sua utilização como material de engenharia. É um importante material cerâmico, devido sua resistência à abrasão, a elevada temperatura, ao ataque químico mesmo em elevadas temperaturas, alta resistividade elétrica, resistência ao choque térmico e alta dureza <sup>[18] [19]</sup>.

### 2.4.1 Processo Bayer de extração da alumina

A alumina é produzida pelo Processo Bayer a partir da bauxita, e pode ser dividido em três estágios <sup>[3]</sup>.

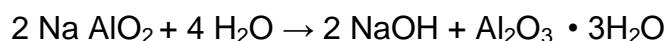
1º - O primeiro estágio, extração, é expresso pela equação:



A alumina é removida dos outros óxidos insolúveis pela dissolução em uma solução de soda cáustica, em um processo denominado de digestão que ocorre a altas temperaturas, entre 140°C e 160°C, sendo este valor para a bauxita do tipo gibbítica, que apresenta  $x = 3$ , o que torna mais fácil e rápido a sua dissolução, em apenas sessenta minutos.

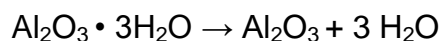
Para a bauxita do tipo boehmita e a diásporo, tem-se somente  $x = 1$ , tornando-as difícil de dissolver e em um maior tempo, nunca menor que duas horas.

2º - O segundo estágio, decomposição, é expresso pela equação:



Também chamada de precipitação, este segundo estágio requer uma carga de sementes, hidróxido de alumínio em granulação fina, que age como núcleo de cristalização. Esta reação é lenta, levando de trinta a setenta e cinco horas para ocorrer.

3º – O terceiro e último estágio, calcinação, consiste em converter o precipitado em uma mistura de várias formas cristalográficas pela reação:



Este processo ocorre entre 300 ° C e 600 ° C, obtendo-se finalmente a alumina em várias formas cristalográficas. Excedendo a temperatura de 1150 °C, tem-se a formação de  $\alpha$ - alumina <sup>[6]</sup>, fase cristalina termicamente mais estável <sup>[44]</sup>.

A alumina calcinada é uma mistura de formas cristalográficas diferentes do óxido de alumínio <sup>[3]</sup>

#### **2.4.2 Formas cristalográficas da alumina**

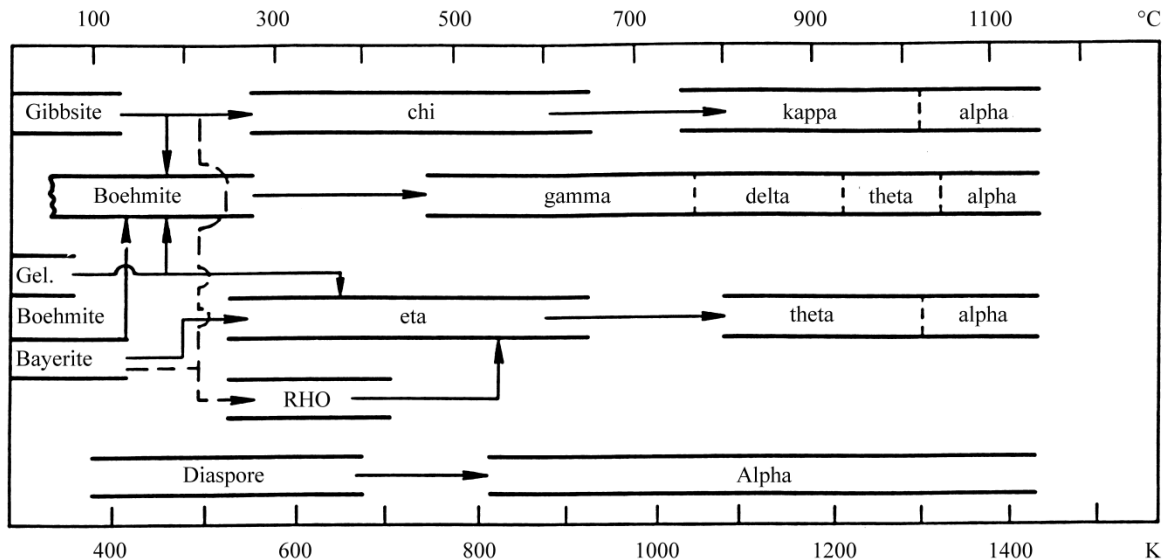
As aluminas aquecidas abaixo de 1100 °C são consideradas pelo método de Difração de Raio X como amorfa e materiais não cristalinos, apesar de terem importantes propriedades catalíticas e de absorção, ou melhor, são consideradas inadequadamente definidas e materiais complexos, que acima de 1000°C mudam para a fase cristalina da  $\alpha$ -alumina <sup>[27][37]</sup>.

É conhecida a existência de 5 formas cristalinas de hidróxidos de alumínio: gibbsite; bayerite; nordstrandite; diaspore e boemite. Todos possuem cristais variando entre tamanho macro a milimétricos; suas perdas de hidroxilas acontecem pelo aquecimento entre 300 ° C e 600 °C.

Entre as temperaturas de perda de hidroxilas dos hidróxidos de alumínio e a primeira cristalização da  $\alpha$ -alumina, um número de estruturas cristalinas de alumina bem caracterizado é formado, cada um com uma estrutura cristalina diferente em dada temperatura. O tipo ou a estrutura de cada alumina e sua escala de temperatura de existência é determinado pela estrutura do hidróxido precursor; elas são diferentes para a gibbsite; bayerite; nordstrandite; diaspore e boemite. Contudo existe extensa literatura para a perda de hidroxilas dos hidróxidos cristalinos, em especial do gibbsite, por que é a fase formada no Processo Bayer <sup>[6]</sup>.

Essas 7 aluminas são chamadas “Aluminas de Transição” e receberam letras gregas para serem identificadas: gamma; delta; theta; kappa; chi; eta; e rho. Assim segue a sequência de transformação térmica:

Hidróxido de alumínio → aluminas de transição →  $\alpha$  – alumina.



**Figura 2.3 – Sequência da transformação térmica dos hidróxidos de alumínio.**  
**Fonte: Santos (2000).**

## 2.5 MATERIAIS CERÂMICOS

A cerâmica é considerada um material inorgânico e não-metálico. As estruturas cerâmicas são compostas normalmente por dois ou mais elementos, um elemento metálico e outro elemento não metálico normalmente. Existe uma exceção, os materiais carbonosos com um único elemento (C). Apresentam ligações completamente iônicas, ou parcialmente iônicas com alguma participação covalente.

Estes materiais são caracterizados pela resistência a altas temperaturas, por serem isolantes de calor e eletricidade; e em se tratando de resistência mecânica, são duros, contudo frágeis <sup>[14] [16] [34]</sup>.

### 2.5.1 Classificação dos materiais cerâmicos

Os materiais cerâmicos são classificados na sua maioria com base na sua aplicação, como é apresentado a seguir:

Vidros, este grupo se sub-divide em vidros e vitro-cerâmica. Os vidros são silicatos não cristalinos que apresentam alguns óxidos, como  $\text{Na}_2\text{O}$ , que mudam

suas propriedades. Já a vitro-cerâmica é caracterizada pela mudança de um estado não cristalino para um estado cristalino devido a um tratamento térmico a alta temperatura.

Os produtos argilosos se subdividem em dois grupos: em produtos argilosos estruturais, que são abundantes na natureza e apresentam facilidade de conformação quando misturados corretamente com água; e em louças brancas, que são materiais cerâmicos que se tornam brancos após um tratamento térmico denominado cozimento, que ocorre a altas temperaturas. Neste segmento encontram-se as louças brancas, louça vitrificada e sanitária.

Refratários, as principais subdivisões desta classificação são: as argilas refratárias são compostas principalmente de alumina e sílica. Os tijolos de argilas refratárias são usados em fornos como isolantes térmicos. Os refratários à base de sílica são denominados também de refratários ácidos e conhecidos por suportar temperaturas elevadas e por apresentarem resistência à escória rica em sílica. Já os refratários básicos, são materiais refratários ricos em Magnesita, MgO, ou periclásio. Esses refratários são resistentes ao ataque por escórias que contém MgO e CaO em grandes concentrações. Por último, têm-se os refratários especiais, que são utilizados em situações específicas. Alguns apresentam óxidos com alta pureza e que podem ser produzidos com pouquíssima porosidade. Alguns desses refratários apresentam compostos à base de carbetto, carbono e grafita. Porém, nos dois últimos casos, a sua aplicação é limitada devido à facilidade de oxidação quando expostos a altas temperaturas, além de serem caros.

Abrasivos são materiais utilizados para desbastar ou cortar materiais. Logo a principal qualidade é a dureza e a tenacidade para que não sejam frágeis. Além de ser necessária a propriedade refratária, pois devido à força de atrito abrasiva, tem-se um aumento de temperatura.

Os cimentos apresentam como característica primordial o fato de poderem ser misturados com água e formarem uma pasta que posteriormente endurece. Neste grupo o mais consumido é o cimento Portland, pois é usado principalmente em argamassa e em concreto.

Cerâmicas avançadas, ou denominadas novas cerâmicas, apresentam um elevado valor agregado, composição química e microestrutura rigorosamente controladas e aplicações específicas em blindagem, aplicações em motores a combustão interna e embalagens de componentes eletrônicos <sup>[16]</sup><sup>[17]</sup>.

## 2.5.2 Processamento de materiais cerâmicos

Devido à fragilidade e complexidade microestrutural dos materiais cerâmicos, as suas técnicas de processamento são de extrema importância. Um dos processos mais conhecidos é a prensagem dos pós, que pode ser usada para a fabricação de peças de argila, assim como peças não-argilosas, cerâmicas eletrônicas e magnéticas e produtos à base de refratários. Sabe-se ainda que 53% da produção brasileira de revestimento cerâmico é obtido através do processo via seca <sup>[48]</sup>. Neste processo, há a necessidade de compactação na forma final, com uso de aglutinantes ou água, cuja função é lubrificar as partículas que se movem durante o processo.

As subdivisões deste processo de prensagem do pó são: a prensagem uniaxial e isostática, que podem ou não ocorrer a quente e a prensagem a quente isostática. Quando os processos ocorrem a frio necessitam de um cozimento posterior ao processo, onde o corpo de prova ou peça sofrerá uma contração volumétrica e logicamente, uma diminuição em sua porosidade e melhoria de suas propriedades mecânicas. Esse processo é conhecido como sinterização, que é a chave para a obtenção de materiais com bom desempenho <sup>[16] [48]</sup>.

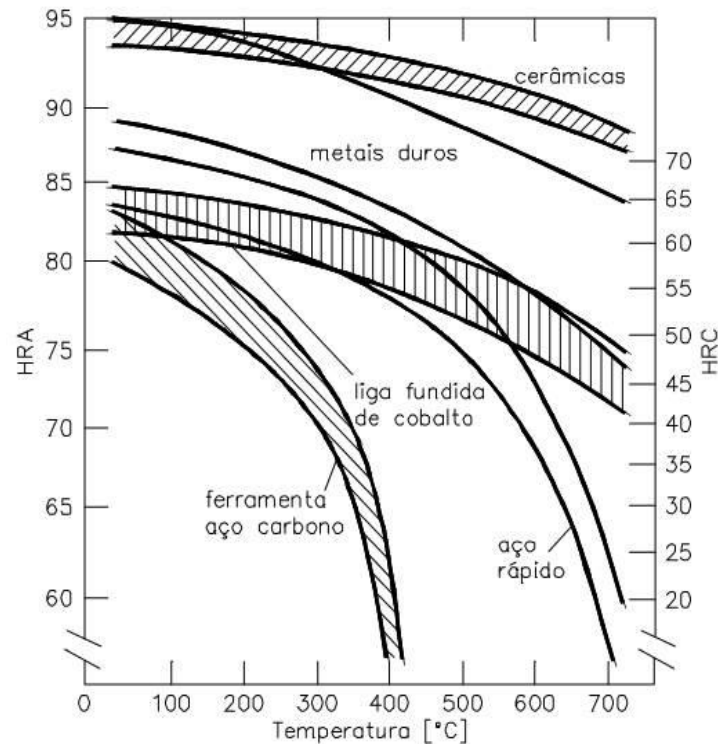
## 2.5.3 Materiais cerâmicos para desbaste

Devido a alta dureza e inércia química, os materiais cerâmicos são excelentes para aplicações tribológicas <sup>[21]</sup>, o que pode levar à redução de gastos com manutenção de máquinas e em um aumento de produtividade <sup>[22]</sup>, já que a vida dessas ferramentas pode ser aumentada, se bem empregada.

As ferramentas de cerâmica para desbaste podem atingir elevadas velocidades de corte, evidenciando vantagem sobre o material de metal duro <sup>[11]</sup>.

O diamante é usado para corte de alta precisão, mas o seu elevado preço torna caro o processo. Sendo então, utilizada a alumina corundum, forma cristalográfica mais estável, para ser sinterizada quase pura (98%), ou com elementos de adição <sup>[13]</sup>. O carbeto de silício também é geralmente utilizado como abrasivo <sup>[16]</sup>.

A figura a baixo apresenta uma comparação da dureza de vários materiais de corte com relação à temperatura atingida com a velocidade de corte.



**Figura 2.4 - Variação da dureza (Rockwell Hardness Scale) de alguns materiais de ferramentas de corte com a temperatura.**

Fonte: Freire (1977).

#### 2.5.4 Grês porcelanato

O Grês porcelanato é um material polifásico, ou seja, apresenta uma mistura de vidro, quartzo e mulita. É considerado um revestimento cerâmico impermeável e homogêneo, apresentando excelentes características técnicas como resistência mecânica, química e ao congelamento. Apresenta baixo nível de porosidade, menor que 0,5%.

Seu processo de fabricação segue a rota da tecnologia dos pós, que consiste em preparação da massa cerâmica, prensagem uniaxial, secagem e sinterização em altas temperaturas, utilizando ciclos rápidos de queima, inferiores a sessenta minutos <sup>[48]</sup>.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para a confecção de discos cerâmicos abrasivos foram as garrafas PET como precursoras de plasticidade ao pó, vidro plano como aditivo fundente <sup>[47]</sup> e precursor de óxido de silício; e alumina hidratada como constituinte principal.

##### 3.1.1 Plastificante orgânico – PET.

Foram utilizadas garrafas de refrigerante pós-consumo, sendo todas transparentes e somente a sua parte central utilizada devido à menor densidade da mesma.



**Figura 3.1 – Garrafas de Poli (tereftalato de etileno).**

### 3.1.2 Vidro

O vidro utilizado foi o vidro alcalino, plano, por apresentar maior percentual de óxido de silício e ser mais facilmente obtido por doação. A figura abaixo mostra o vidro plano, transparente e sem identificação de fabricante.



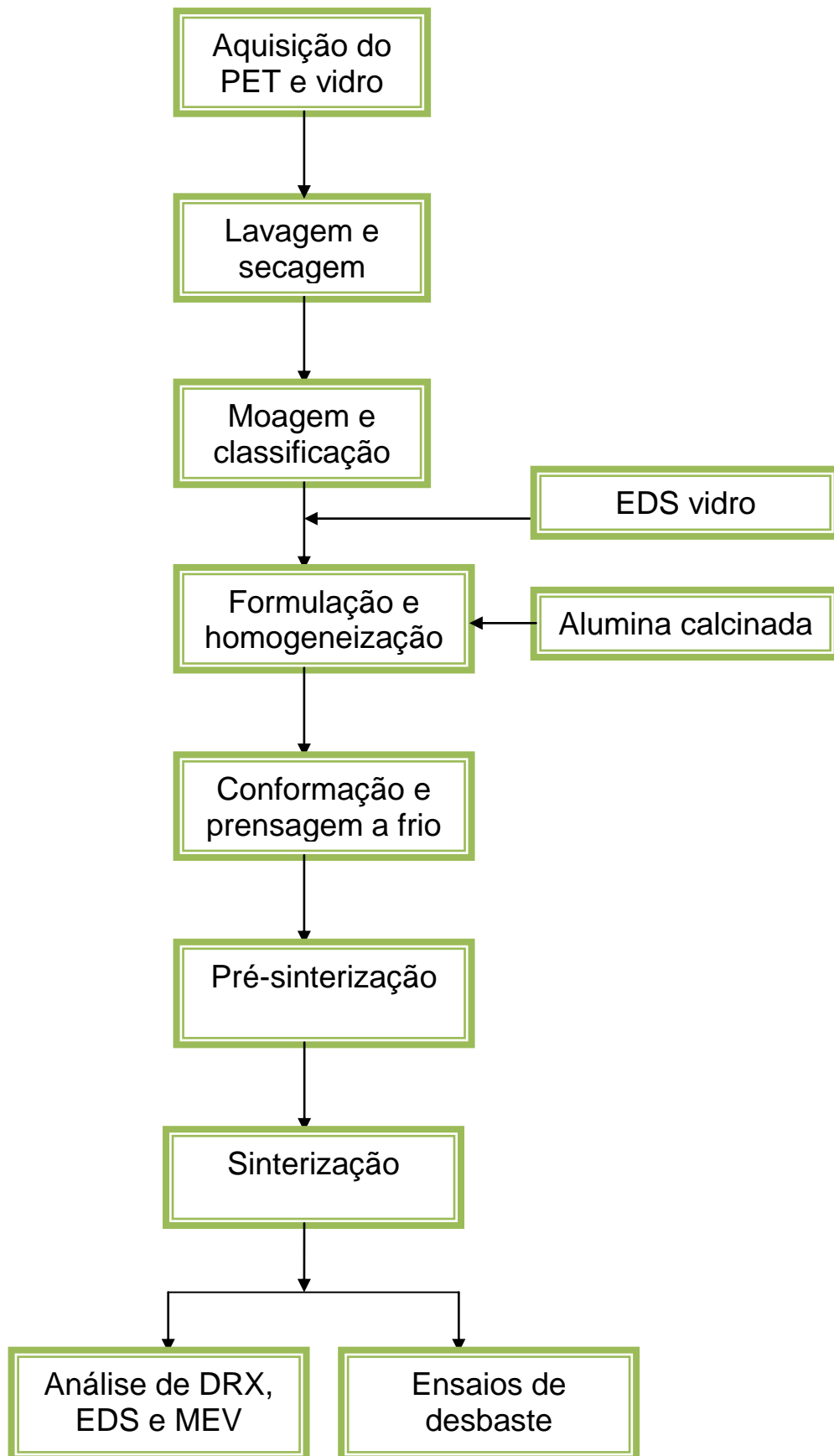
**Figura 3.2 – Vidro alcalino – plano.**

### 3.1.3 Alumina

A alumina calcinada utilizada foi doada pela empresa ALUNORTE – Alumina do Norte S.A, caracterizada por ser alumina de transição, menos estável do que a alumina- $\alpha$ . Este tipo de alumina é a utilizada como matéria-prima para o processo de produção de alumínio por gastar menos energia do que a sua forma mais estável, denominada alumina- $\alpha$ .

## 3.2 MÉTODOS

O processo de produção dos discos abrasivos seguiu as seguintes etapas: aquisição das garrafas plásticas pós-consumo e do vidro plano; beneficiamento destes materiais, caracterização físico-química dos materiais; misturas dos materiais constituintes; compactação, pré-sinterização e sinterização dos corpos de prova; análises de DRX, EDS e a Microscopia Eletrônica de Varredura dos corpos de prova, e por final os testes abrasivos.



Fluxograma 01 – Fluxograma de processo de fabricação dos discos abrasivos.

### **3.2.1 Aquisição do material polimérico (PET) e do vidro.**

As garrafas PET foram doadas ao grupo de pesquisa Eco-Compósitos do Laboratório de Engenharia Mecânica da UFPA, oriundos das residências e estabelecimentos que estavam colaborando com projetos de reciclagem. O vidro foi doado pela própria instituição, decorrente da troca de vidro das janelas dos laboratórios.

### **3.2.2 Lavagem e secagem das garrafas PET e do vidro.**

A limpeza do material reciclável foi feita manualmente em água corrente e com sabão neutro para a eliminação das impurezas dos materiais e também retiraram-se as partes que apresentavam os adesivos. A secagem ocorreu ao ar livre ou por papel toalha.

### **3.2.3 Moagem do PET e do vidro.**

As garrafas foram cortadas em pequenos pedaços e posteriormente foram triturados por 10 vezes em um moinho de facas modelo NFA -1533 da RONE, apresentado na figura 3.3 - a, para a obtenção de partículas cada vez menores. Como a granulometria desejada era passante 100 e 200 mesh, tornou-se necessário o uso de outro moinho de facas modelo Cróton TE-625 da TECNAL, figura 3.3 - b, para diminuir a granulometria.

O vidro foi moído manualmente por moinho manual, figura 3.3 – c, e depois peneirado para a obtenção do pó de vidro, passante pela peneira de 200 mesh.



Figura 3.3 - a) Moinho de facas RONE, (b) Moinho de facas TECNAL, (c) Moinho manual

#### 3.2.4 Classificação do PET e do vidro.

A classificação do PET foi feita apenas através de peneiramento manual em peneiras padronizadas da série Tyler Mesh Size, com aberturas variando de 14 a 200 mesh (1,18 mm a 75  $\mu$ m) pertencentes ao Laboratório de Engenharia Mecânica da UFPA. Foi utilizada a fração passante pela peneira de 100 e 200 mesh, pois forneciam as menores granulometrias, resultando em poros menores após a pré-sinterização <sup>[56]</sup>.

A classificação do vidro consistiu do peneiramento nas mesmas peneiras usadas para o PET, utilizando para a formulação a fração passante pela peneira de 200 mesh.

#### 3.2.5 Caracterização da alumina calcinada.

A caracterização da alumina foi obtida pela técnica de difração de raios X em aparelho Phillips PW 3710 e goniômetro PW 1050 utilizando o método do pó, em lâmina escavada de vidro com radiação K-alfa do cobre, no laboratório do Centro de Geociências da UFPA.

### **3.2.6 Granulometria da alumina calcinada.**

A análise granulométrica da alumina calcinada foi fornecida pela empresa Alunorte Alumina do Brasil S. A, em seus Laboratórios por peneiras da série Tyler Mesh Size.

### **3.2.7 Área específica (BET)**

Foi determinada a área específica da alumina calcinada e da alumina hidratada. Ambas fornecidas pela empresa Alunorte – Alumina do Norte S.A.

Esta medida é de muita importância, pois está relacionada à perda de água durante a calcinação. À medida que o material perde água e passa pela transformação cristalina, a área superficial cresce. O que indica que o diâmetro da partícula do pó de alumina diminuiu <sup>[3]</sup>.

Esta análise é de extrema importância, pois está relacionada com o comportamento do pó quando está em processos como, fricção, absorção, prensagem e sinterização.

### **3.2.8 Formulação e homogeneização dos materiais.**

O percentual de vidro utilizado como aditivo deste material cerâmico, foi determinado com base em experimentos em que os aditivos não incluíam o pó de vidro, mas outros minerais que apresentavam a função de diminuir a temperatura de sinterização e formar novas fases. Destes minerais, o mineral diopsídio apresenta como seus constituintes o óxido de silício, óxido de magnésio e o óxido de cálcio; também presentes no vidro em quantidades significativas <sup>[29]</sup> <sup>[30]</sup>. Também como o vidro plano usado no experimento, o mineral diopsídio apresenta como seu maior constituinte, o óxido de silício. Devido a isto, o percentual relativo ao SiO<sub>2</sub> do mineral diopsídio utilizado está relacionado com o percentual de SiO<sub>2</sub> do vidro plano. Através do cálculo estequiométrico, o valor de 55% de SiO<sub>2</sub> do mineral diopsídio <sup>[30]</sup> foi correlacionado ao valor de 70% de SiO<sub>2</sub> do vidro, determinando assim o percentual de vidro a ser usado. Sendo este percentual de formulação do vidro, menor que o percentual usado com o mineral diopsídio. O que é melhor, pois o uso de pó de vidro causa aumento na porosidade <sup>[47]</sup>.

O percentual do mineral diopsídio utilizado para estudo foi de 20%, 40% e 60% para cerâmicas de baixa temperatura (950 – 1050 °C), e de 15% e 35% para média temperatura (1050 - 1150 °C), respectivamente <sup>[29]</sup>. Isto devido à limitação do forno mufla do Laboratório de Engenharia Mecânica da UFPA, que aquece somente até a temperatura de 1200 °C. Contudo foi observado que com o aumento de percentual de vidro, principalmente valores de aditivo de 60 % do mineral diopsídio, que correlacionando ao percentual de pó de vidro utilizado, corresponde a 47,14 %, obteve-se melhor conformação e agregação dos constituintes na sua retirada durante a etapa de pré-sinterização. Ver apêndice para os cálculos das correlações mineral diopsídio e pó de vidro.

A formulação dos componentes e a concentração de cada um estão apresentadas na tabela abaixo.

**Tabela 3.1 - Formulação dos constituintes**

<b>Componentes</b>	<b>Polímero</b>	<b>Material Cerâmico</b>
Classificação	PET	Alumina e pó de vidro
Percentual	10 %	90 % ( 53 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 47% vidro correlacionando a 100% de material cerâmico)

**Tabela 3.2 - Correlação dos percentuais do mineral diopsídio e do pó de vidro**

<b>Aditivos</b>	<b>Percentuais</b>		
<b>Diopside</b>	20 %	40%	60%
<b>Pó de vidro</b>	15,7%	31,48%	47,14%

A homogeneização dos materiais foi feita através da diluição dos materiais cerâmicos e do PET em uma solução de álcool etílico e agitado manualmente por dez minutos, e posteriormente decantado a temperatura ambiente por um dia.

### 3.2.9 Moldagem por compressão a frio dos materiais.

O método de compressão a frio foi executado no Laboratório de Engenharia Mecânica, sob compactação de 32 MPa para eliminação dos vazios, em prensa hidráulica MARCON com capacidade de 15 tons. O molde em aço inox com dimensões de 12,5 x 10,5 cm, foi confeccionado segundo a norma ABNT NBR 7143, para uso de materiais poliméricos, devido à presença do PET, como mostra a figura 3.4.



Figura 3.4 – Molde em aço inox

### 3.2.10 Pré-sinterização dos corpos de prova.

Os corpos de prova foram pré-sinterizados em um forno mufla até 900° C e permanecendo por 1 hora para ocorrer a degradação do PET e o amolecimento do vidro em pó. Após ser desligado o forno, o molde permaneceu em seu interior até o seu total resfriamento, que ocorreu após 24 horas. A retirada do corpo de prova do molde foi a parte que necessitou de mais cuidados para não danificar o CP, ocorrendo algumas perdas de algumas amostras devido à baixa resistência mecânica a verde <sup>[40]</sup>, pois ainda apresentavam porosidades que os fragilizavam, somente após a sinterização que a resistência mecânica do material aumentou significativamente.



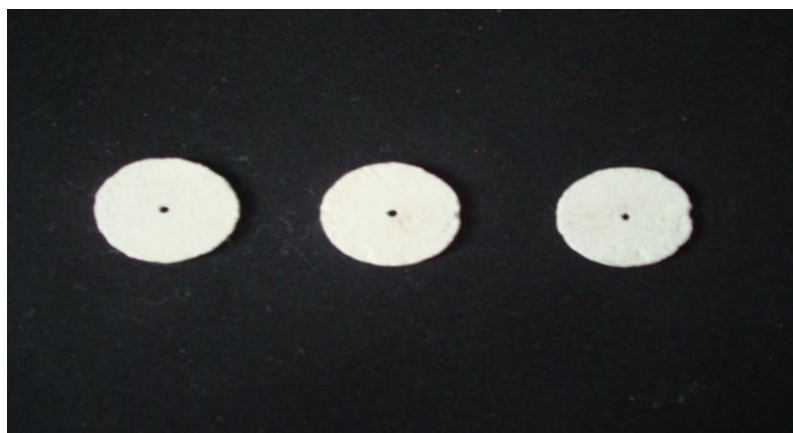


**Figura 3.5 – Corpo de prova pré-sinterizado**

### **3.2.11 Sinterização dos corpos de prova.**

Na sinterização dos corpos de prova <sup>[55]</sup>, para a formação de fases duras como a mulita, que apresenta grande influência na resistência à abrasão, os corpos de prova a verde foram sinterizados a temperatura de 1150°C por 3 horas <sup>[54]</sup> a uma taxa inicial de aquecimento de 20° C/min e ao final a 2 ° C/min. Os corpos de prova foram resfriados naturalmente dentro do próprio forno mufla e após 24 horas os CP's foram retirados do forno para ser desbastado na parte lateral e para a confecção do furo central com um esmeril ROTOMATIC, com velocidade de 10.000 rpm, e peça abrasiva com ponta de diamante.

A cada 3 discos pré-sinterizados, realizava-se a sinterização como mostra a figura abaixo, em que os mesmos encontram-se prontos para o ensaios de desbaste.



**Figura 3.6 – Discos abrasivos sinterizados.**

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO POLI TEREFTALATO DE ETILENO

#### 4.1.1 Análise granulométrica

Durante a etapa de classificação do PET, notou-se que a maioria das partículas permanecia entre as peneiras 14, 28 e 48 mesh, o que levou ao uso de outro moinho para diminuir a sua granulometria até o valor desejado, passante 100 e 200 mesh <sup>[56]</sup>. Como o valor desejado de PET era muito pequeno, 10% do peso do corpo de prova, foi descartado as amostras superiores a esses valores, e ocorrendo a cominuição quase que exclusivamente dos valores passantes pela peneira 48 mesh.

#### 4.1.2 Avaliação do tamanho e forma das partículas de PET

O tamanho médio das partículas analisado no microscópio eletrônico de varredura está entre 50 e 250  $\mu\text{m}$ , como pode ser observado nas figuras abaixo, 4.1 a e 4.1 b. As partículas apresentam-se de formas irregulares, longitudinal e com dimensões diversas.

#### 4.1.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do PET

As partículas de PET se apresentam de formas irregulares e longitudinais.

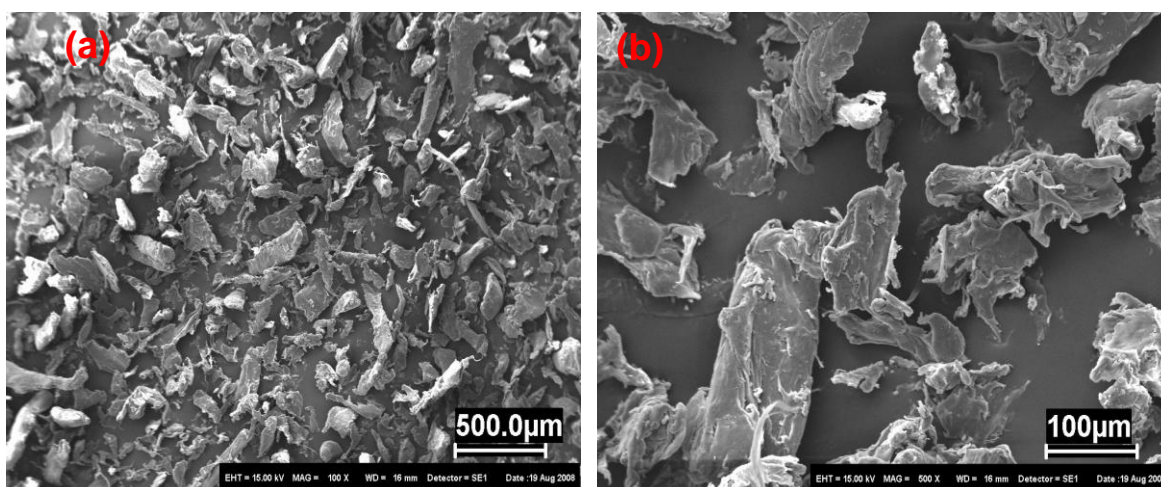


Figura 4.1. MEV do PET. (a)100X; (b) 500X.

## 4. 2 CARACTERIZAÇÃO DO VIDRO

### 4.2.1 Caracterização do vidro

Os resultados das concentrações dos elementos no vidro plano obtidos por EDS estão apresentados na tabela 4.1. Através do cálculo estequiométrico, confirmou-se que este vidro é tipo alcalino com valor de SiO<sub>2</sub> igual a 70%.

**TABELA 4.1 – Concentração dos elementos obtidos por EDS para vidro plano.**

	Espectro 1	Espectro 2	Espectro 3
Elemento	Concentração (wt%)	Concentração	Concentração
O	47,923	55,975	54,594
Na	6,057	7,816	7,691
Mg	1,603	2,130	2,155
Al	0,475	0,609	0,611
Si	32,766	28,080	28,777
S	0,767	0,878	0,916
K	0,330	0,337	0,407
Ca	8,295	3,661	3,966
Cr	0,313	0,141	0,178
Fe	0,859	0,202	0,251
Co	0,611	0,160	0,222
Sn	0,00	0,010	0,125
Total	100%	100%	100%

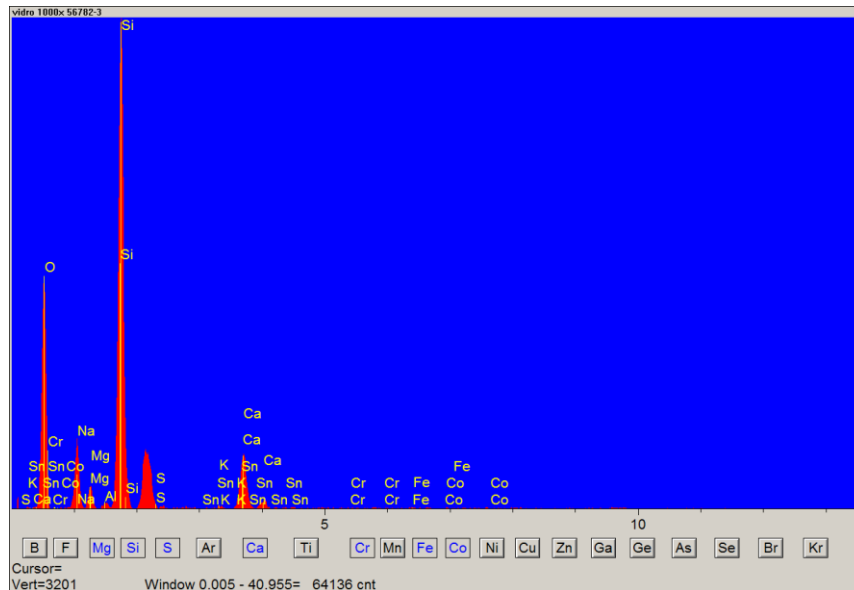


Figura 4.2 – EDS do vidro plano

#### 4.2.2 Análise granulométrica

Não foi feita uma análise minuciosa do vidro em termos de percentual passante pelas peneiras da série Tyler Mesh, pois qualquer granulometria ao continuar no moinho manual podia ser transformada em pó dependendo da força e do tempo de permanência no processo. Foi usado o percentual passante pela peneira 200 mesh (75 $\mu$ m).

#### 4.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do vidro

As partículas de vidro apresentam formas pontiagudas conforme pode ser observado nas figuras 4.3a e 4.3b.

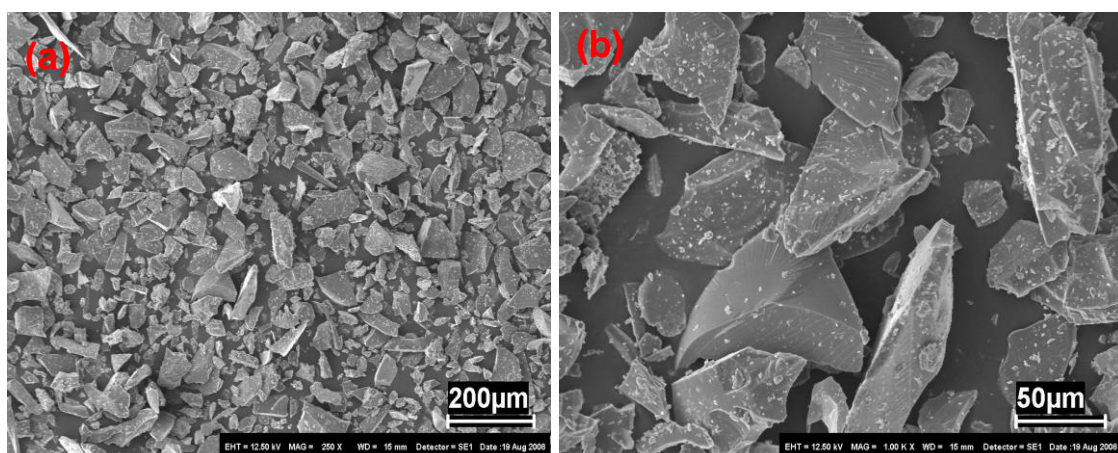


Figura 4.3. MEV do Vidro Plano. (a)250 X; (b) 1Kx.

## 4.3 CARACTERIZAÇÃO DA ALUMINA

### 4.3.1 Caracterização da alumina

Os resultados da caracterização da alumina estão apresentados na tabela 4.2. O valor da análise química obtido refere-se à amostra composta dos horários de 14, 22 e 06 horas dos calcinadores em operação. Dados fornecidos pela Alunorte – Alumina do Norte S.A.

**Tabela 4.2 – Análise química da alumina calcinada.**

<b>TEORES (%)</b>	<b>ALUMINA CALCINADA</b>
SiO <sub>2</sub>	0,012
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,012
Na <sub>2</sub> O	0,36
TiO <sub>2</sub>	0,005
ZnO	0,001
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,001
CaO	0,008
Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,011
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,0007
TiO <sub>2</sub>	0,005
SO <sub>3</sub>	0,040

O Na<sub>2</sub>O aparece como principal impureza; isto se deve ao Processo Bayer, que utiliza soda cáustica na digestão para solubilizar a alumina presente na bauxita.

### 4.3.2 Análise granulométrica

A tabela 4.3 apresenta o resultado da análise granulométrica da alumina calcinada feita pela empresa Alunorte.

**Tabela 4.3 – Análise granulométrica da alumina calcinada**

Peneiras	mesh 100	mesh 150	mesh200	mesh 270	Mesh325	Mesh-325
Massa	3,2	25,9	61,6	81,1	90,9	9,1
retida (%)	1,6	22,6	63,4	85,0	90,6	9,4
	1,7	27,0	66,3	82,9	92,2	7,8
Média (%)	2,2	25,2	63,8	83,0	91,3	8,7

Pode observado que a alumina calcinada apresenta tamanhos de partículas bastante significativos que variam de 200 a 325 mesh (diâmetro médio de 0,058mm).

#### **4.3.3 Área específica (BET)**

Os dados da área específica das aluminas antes e após calcinação estão apresentados na tabela abaixo.

**Tabela 4.4 – Área específica das aluminas**

<b>ALUMINA</b>	<b>ÁREA ESPECÍFICA (m<sup>2</sup>/g)</b>
Antes da calcinação	4,56
Calcinada	76,4

Os valores de menor área específica podem ser atribuídos as partículas porosas que constituem o pó da alumina hidratada <sup>[3]</sup>.

#### 4.3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da alumina

A figura 4.4 mostra as micrografias eletrônicas de varredura da alumina hidratada em diferentes aumentos. Observam-se diferentes tamanhos e formas esféricas.

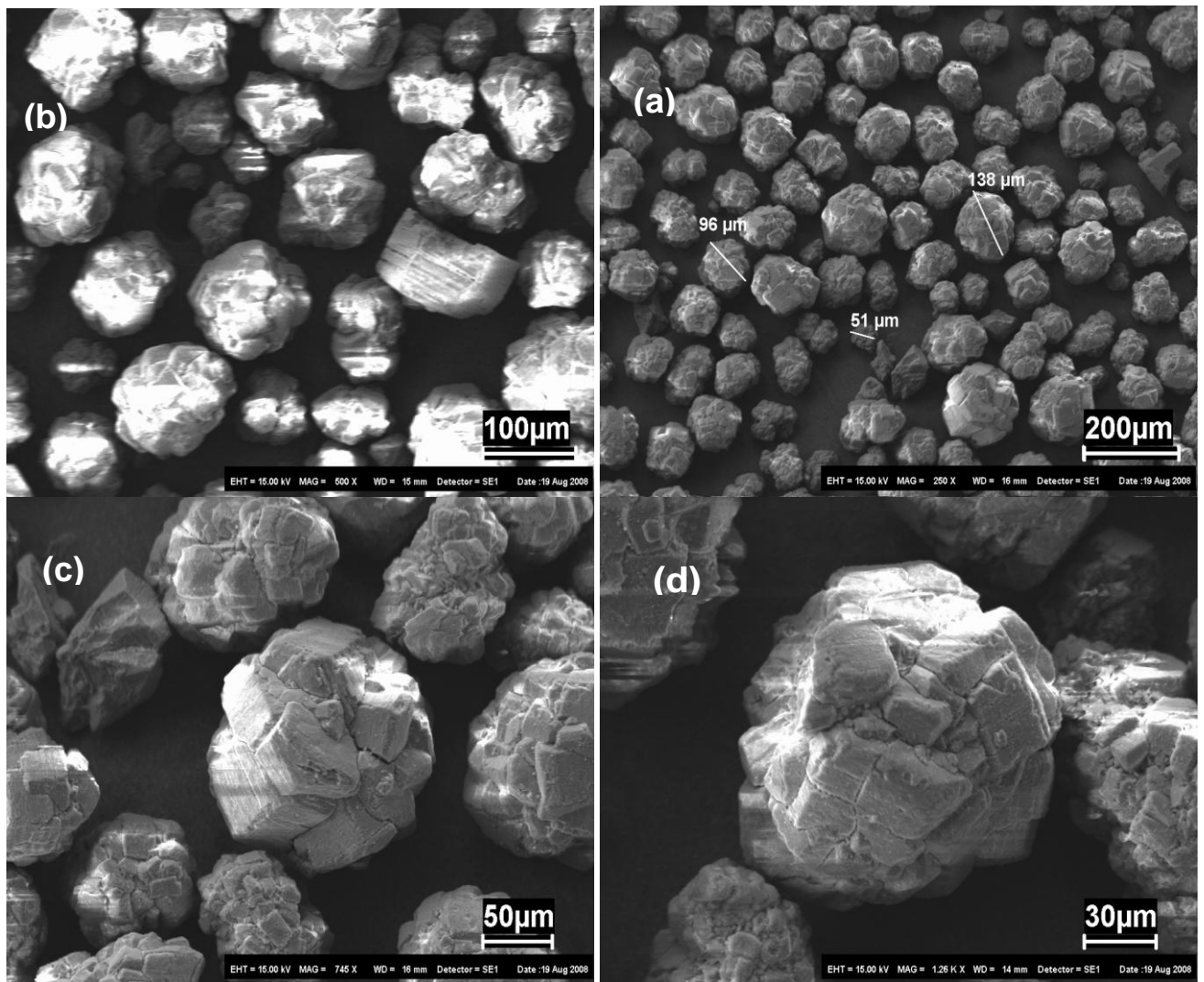


Figura 4.4 – MEV da Alumina Calcinada : (a)250X; (b) 500X; (c)745X; (d)1260X.

Observa-se que as partículas encontram-se entre os tamanhos de 51 e 138 µm, sendo necessário uma boa distribuição e dispersão das partículas durante a sinterização, o que levará a um melhoramento das propriedades mecânicas da matriz cerâmica.

#### 4.4. PREPARAÇÃO DO DISCO ABRASIVO

##### 4.4.1 Avaliação dos parâmetros de processamento em moldagem por compressão a frio.

Sabe-se que em moldagem por compressão a frio, a pressão é extremamente importante, logo foram empregadas pressões acima de 30 MPa <sup>[26]</sup>, mas mesmo assim a compactação do material nem sempre ocorre de maneira homogênea e uniforme. Alguns grãos finos podem formar aglomerados, o que torna necessário a utilização de um material orgânico de elevado peso molecular para conferir maior plasticidade ao pó, melhorando e homogeneizando o preenchimento do molde metálico <sup>[16]</sup>. Os gases liberados durante a degradação do PET são responsáveis pelas porosidades no corpo pré-sinterizado, que são diminuídas durante a etapa seguinte de sinterização com temperatura acima de 1000° C <sup>[53]</sup>.

##### 4.4.2 Efeito da formulação e homogeneização das misturas

O corpo de prova que possuía PET na sua formulação, quando prensado e posteriormente pré-sinterizado, apresentou maior fragilidade que o corpo de prova sem o PET ao ser retirado do molde, devido à porosidade resultante da liberação dos gases do material orgânico. Contudo após a sinterização a 1150° C por 3 horas, não mais se observou porosidades e diferenças entre ambos, já que a porosidade aparente decresce com o aumento de temperatura até ficar próximo de zero a 1100° C e permanecendo a zero a temperaturas acima desta <sup>[53]</sup>.

##### 4.4.3 Montagem do aparato experimental

O ensaio de desbaste foi realizado em uma Máquina Universal de Ensaio de Tração e Compressão, EMIC, modelo DL-500 – capacidade máxima 5KN. Nela foi acoplado um dispositivo tipo garra para fixação do material polimérico, como mostram as figuras 4.5 e 4.6.





Figura 4.5—Máquina Universal de ensaios mecânicos com o dispositivo adicionado.



Figura 4.6 – Disco cerâmico acoplado ao dispositivo.

#### 4.4.4 Confeção do disco abrasivo.

Os discos abrasivos foram confeccionados em molde de aço inox, apresentando diâmetro de 4 cm e espessura de 2 mm. Devido à perda de material durante a retirada do disco do molde metálico, que era feita com a ajuda de um estilete, e do desbaste lateral para retiradas de pontas; a sua dimensão final foi diminuída até o diâmetro de 3 cm.

Durante a sua sinterização, a temperatura foi determinada com o intuito de formar fases cristalinas que apresentem características abrasivas e de alta resistência mecânica, como a mulita ( $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ ), que é formada a partir de elevado percentual de alumina e elevada temperatura de sinterização <sup>[26]</sup>. Com a limitação do mufla, a queima foi realizada a  $1150^\circ\text{C}$  por um tempo de 3 horas <sup>[25]</sup>.

## 4.5. CARACTERIZAÇÃO DO DISCO ABRASIVO

### 4.5.1 Análise Termogravimétrica do disco abrasivo.

A análise termogravimétrica foi utilizada para caracterizar o perfil de degradação do PET. Pode ser definida como um processo de medida de variação de massa de uma amostra em função da temperatura, ou do tempo se a temperatura for constante.

Esta análise foi realizada até a temperatura de pré-sinterização. Nota-se que acima da temperatura de 400° C ocorreu a total degradação do PET. O que indica que os voláteis percorreram todo o espaço do molde, proporcionando assim, uma melhor homogeneização da mistura.

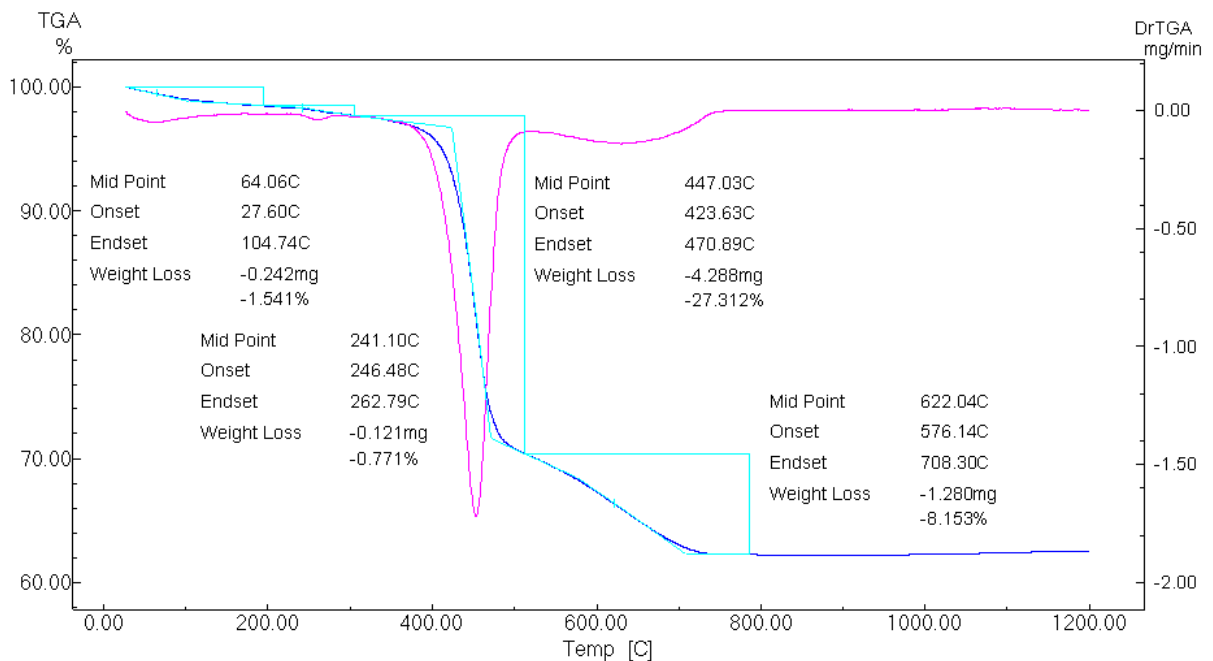


Figura 4.7 – Análise termogravimétrica do material abrasivo

#### 4.5.2 DRX do disco de corte

As fases encontradas nos discos de desbaste são a Anortita e a Albita, que são subdivisões do grupo mineral feldspato. Este mineral apresenta dois grupos: os plagioclásios e os feldspatos alcalinos. As fases presentes nos discos pertencem ao grupo dos plagioclásios [23].

Devido a este material apresentar uma mistura de feldspatos e alumina, ou seja, apresentar um perfil polifásico com fases cristalinas diferentes e apresentar uma mistura de vidro, quartzo e mulita o mesmo assemelha-se a um grês porcelanato [48], com boas características abrasivas, resistência mecânica e química .

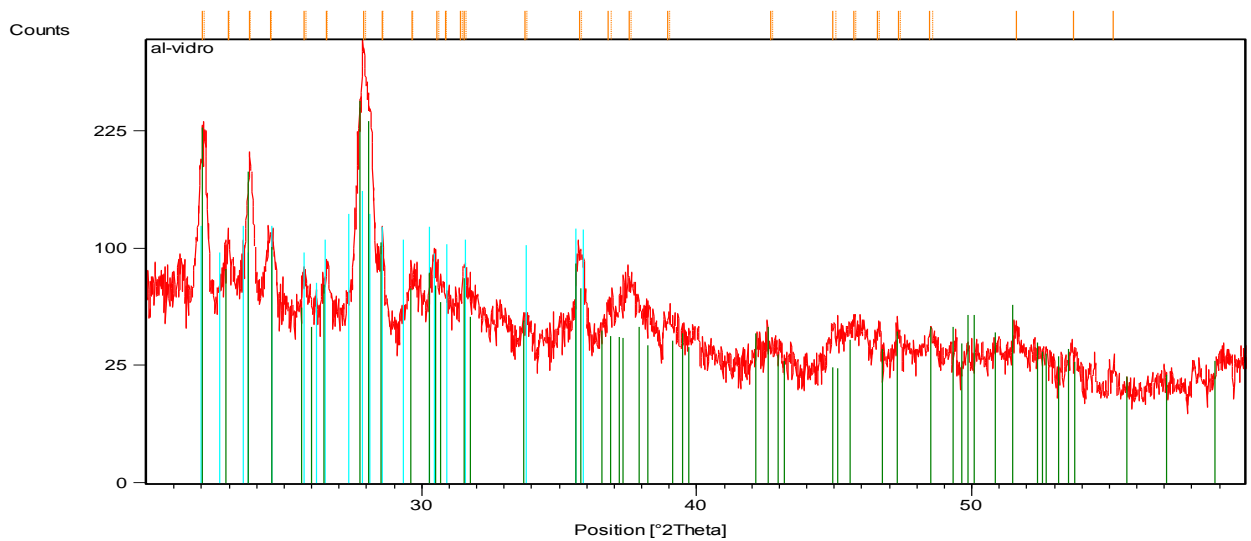


Figura 4.8 – DRX do disco abrasivo

Tabela 4.5 Fases presentes no disco abrasivo.

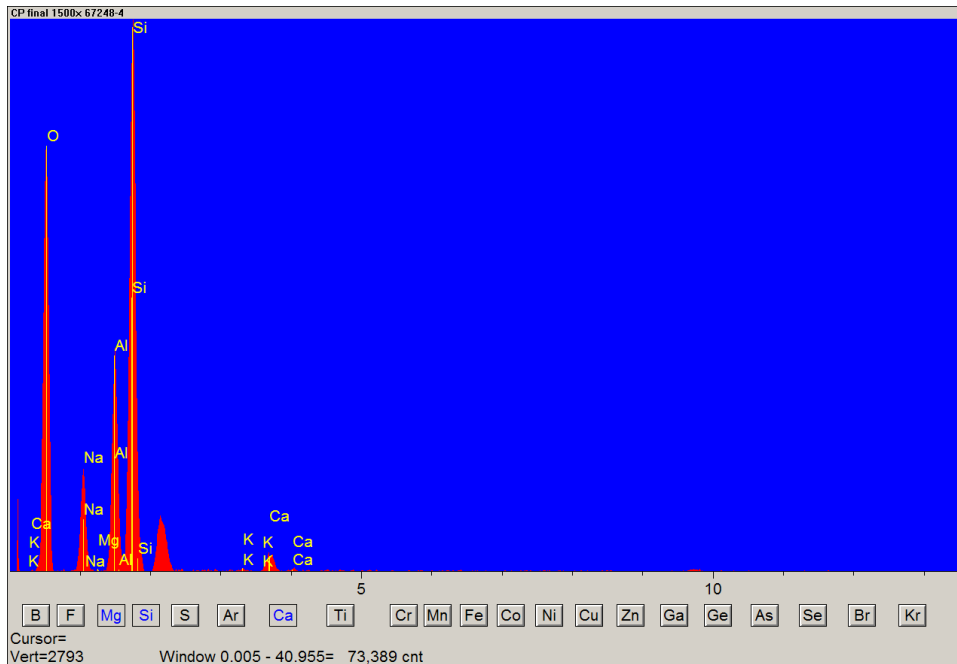
N o.	Perce-ntagem.	Código de referência	Nome do composto	Fórmula química
1	64	00-009-0464	Anortita	Ca Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>
2	68	00-020-0572	Albita	Na Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>

### 4.5.3 EDS do disco abrasivo

Os resultados obtidos das análises de EDS dos CP classificam dois tipos de fases cristalinas, feldspatos do tipo oligoclásio e alumina respectivamente.

**Tabela 4.6 – Concentração dos elementos obtidos por EDS com classificação Oligoclásio**

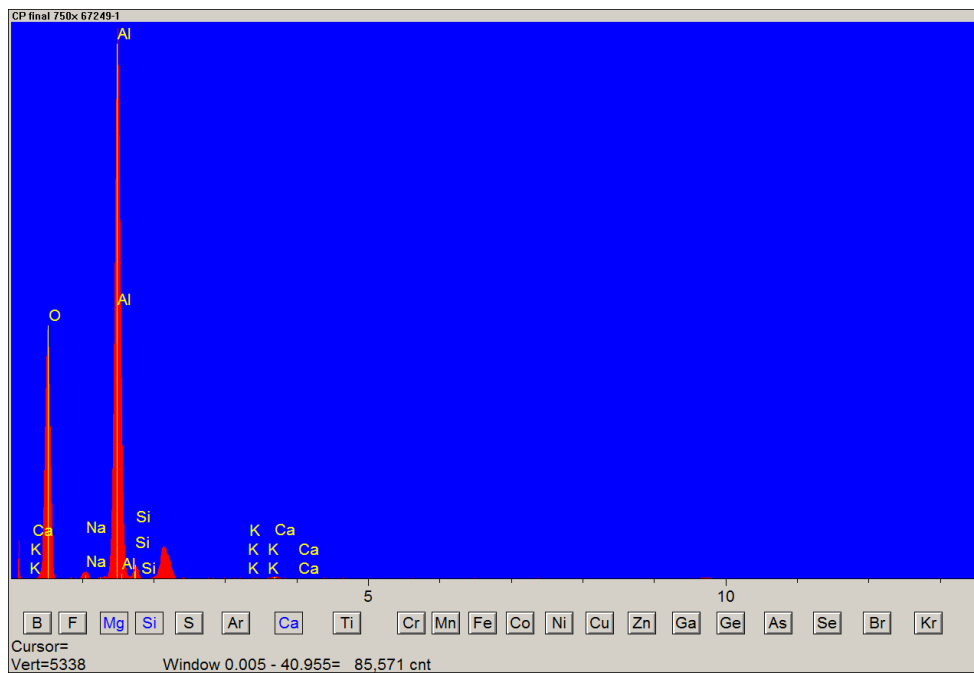
Elemento	Concentração
O	48,261
Na	7,753
Mg	0,392
Al	10,114
Si	30,749
K	0,881
Ca	1,850
<b>Total</b>	<b>100</b>



**Figura 4.9 – EDS do corpo de prova com classificação Oligoclásio.**

**Tabela 4.7 - Concentração dos elementos obtidos por EDS – Alumina**

Elemento	Concentração
O	53,714
Na	0,936
Mg	0,155
Al	43,202
Si	1,538
K	0,077
Ca	0,378
<b>Total</b>	100



**Figura 4. 10 – EDS do corpo de prova – Alumina**

#### 4.5.4 Análise por MEV do corpo de prova

As micrografias do material cerâmico estão apresentadas na figura 4.11. A figura 4.11(C) apresenta a superfície interna do disco abrasivo aumentado 750 X, onde se observa a fase cristalina alumina e o feldspato como segunda fase cristalina. A figura 4.11 (D) apresenta uma fase cristalina denominada mulita no início de sua formação.

Os cristais aciculares de mulita cresceram em várias direções, se entrelaçando em rede tridimensional. Essa rede de agulhas reforça a matriz vítrea, o que leva a um aumento da resistência mecânica. <sup>[15] [41] [55]</sup>.

A figura 4.11 - C mostra bem claramente a fase cristalina secundária que contorna a alumina, tornado o corpo de prova menos frágil. Esta fase é responsável pela tenacidade do corpo de prova.

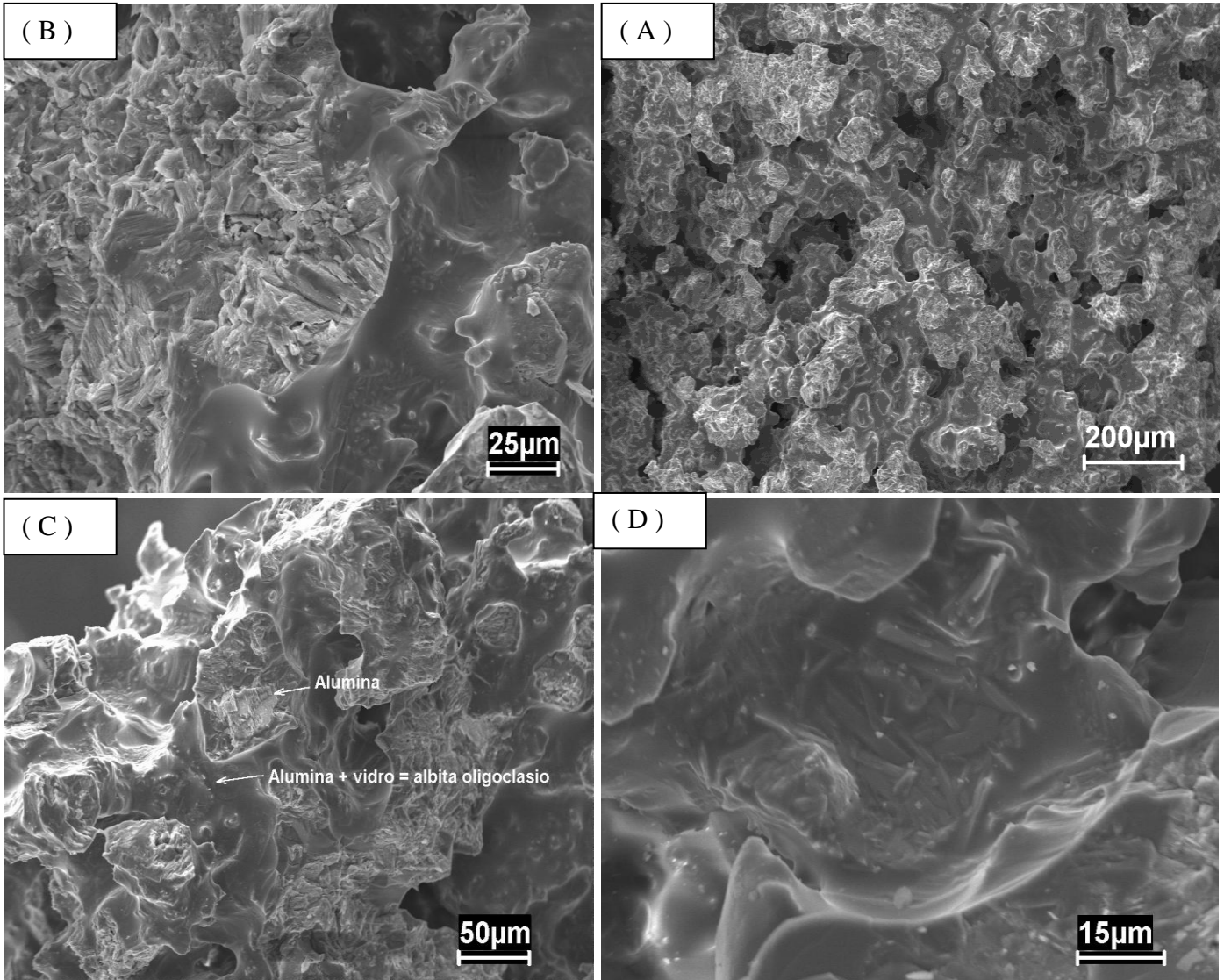


Figura 4.11 MEV das partículas do disco: A – 250X; B -1500X; C -750X; D – 3000X

#### 4.5.5 Teste de corte dos corpos de prova

Os testes foram realizados com cinco tipos de materiais poliméricos cortados em tiras de 20 mm x 70 mm e espessura entre 0,2 e 0,9 mm. São tiras de PE, PP, PS, PVC e PET. A velocidade de corte foi de 1mm/s e a micro retifica, marca DREMEL, 300-N/10 apresenta velocidade de rotação de 33000rpm. O ensaio foi executado como mostra a figura 4.12. A força utilizada foi aplicada a todos os tipos de tiras, 0,17 KN, assim como aos dois tipos de discos, cerâmico confeccionado no laboratório e o comercial 146, marca Dremel.



**Figura 4.12 – Ensaio de corte de materiais poliméricos com disco cerâmico.**

A tabela 4.8 fornece os dados que são necessários para se determinar se ocorreu perda nos discos de material cerâmico durante os cortes, o que fica evidenciado no próximo gráfico. É importante mencionar que o peso do disco cerâmico é menor que o disco revestido com fibra de vidro, marca DREMEL.

Todas as tiras foram cortadas e não houve perda de nenhum disco durante os testes.



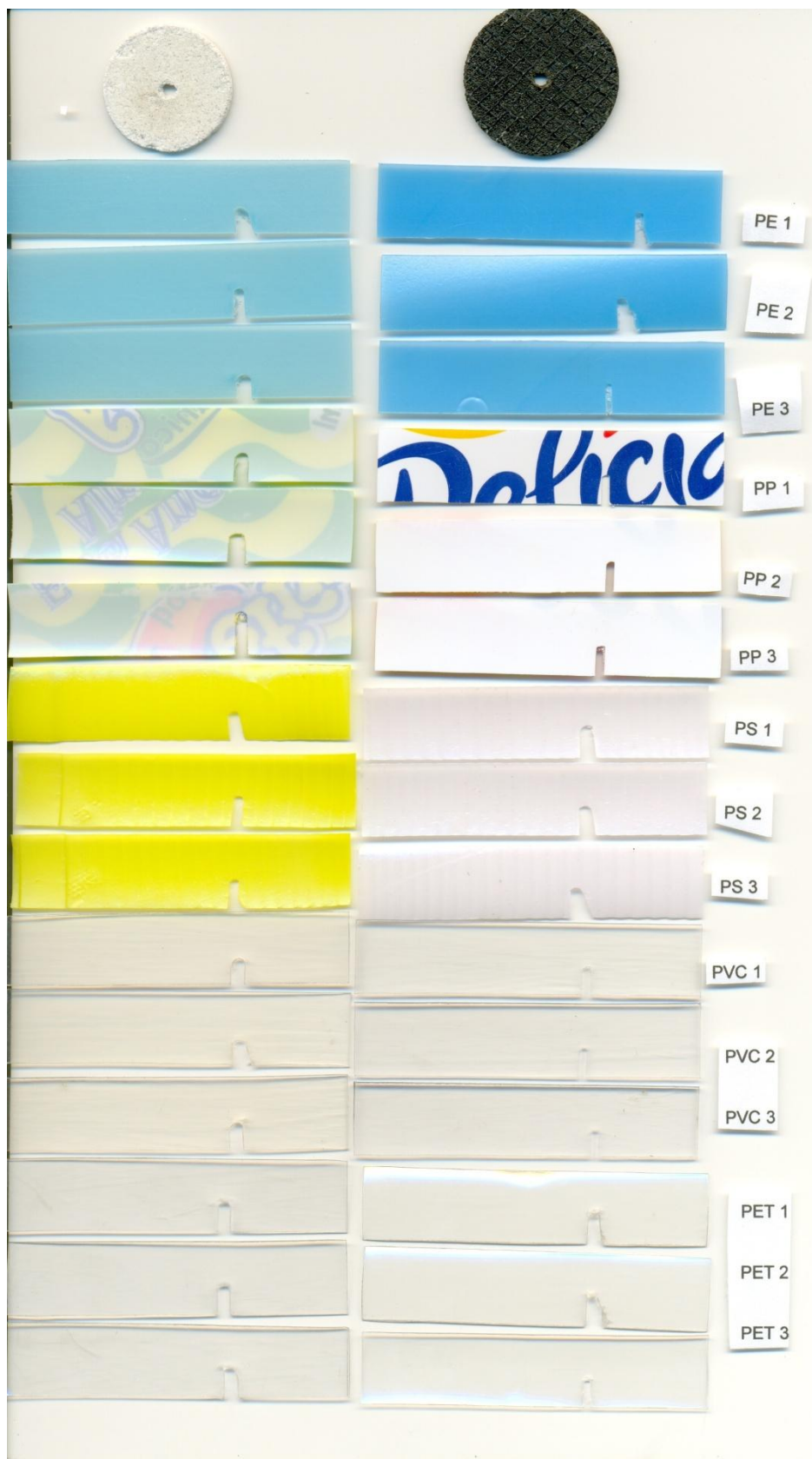
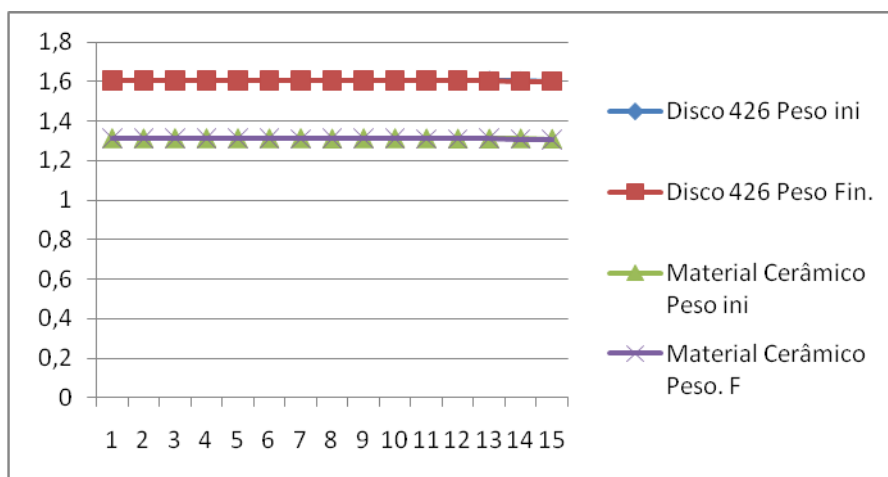


Figura 4.13 - Tiras desbastadas com disco cerâmico e disco 146.

**Tabela 4.8 - Diferença de peso dos discos após teste de abrasão**

Disco Comercial Dremel 426		Material Cerâmico	
P inicial	P final	P inicial	P. final
1,607	1,607	1,312	1,311
1,607	1,606	1,311	1,312
1,606	1,606	1,312	1,312
1,606	1,605	1,312	1,312
1,605	1,605	1,312	1,311
1,605	1,605	1,311	1,312
1,605	1,605	1,312	1,31
1,605	1,604	1,31	1,312
1,604	1,604	1,312	1,312
1,604	1,605	1,312	1,311
1,605	1,605	1,311	1,31
1,605	1,605	1,31	1,31
1,605	1,603	1,31	1,311
1,603	1,602	1,311	1,309
1,602	1,602	1,309	1,308



**Figura 4. 14 Peso dos discos abrasivos ao longo 15 testes**

Nota-se que não houve perda de peso do disco cerâmico, o que é uma afirmação de que o seu desempenho foi tão bom quanto ao do disco comercial 146 revestido com vibra de vidro. O que nos leva a ficar motivados com a substituição de minerais como o dióxido e o feldspato pelo pó de vidro reciclado, auxiliando a reciclagem de materiais cerâmicos.

Estes dados de reciclagem de polímeros e do vidro contribuirão com as futuras pesquisas do grupo de eco-compósito, utilizando o vidro como fundente, aditivo ou adicionando-o a polímeros para aumento de sua resistência mecânica [32][57].

## 5 CONCLUSÕES.

- O vidro mostrou-se um ótimo aditivo fundente, sendo responsável pela diminuição da temperatura de sinterização, levando a uma economia de energia essencial nos dias de hoje.

-O uso do pó de vidro com alumina para a fabricação de discos de desbaste apresentou excelente desempenho, apesar de ser uma material mais leve que o disco comercial 146.

- As diferentes proporções de pó de vidro causaram mais impacto na etapa de pré-sinterização, pois os poros ainda estavam presentes.

-As análises de EDS e DRX evidenciam a presença de uma fase secundária cristalina importante para minimizar a fragilidade comum dos materiais cerâmicos.

- A formação da mulita não foi completa, ou melhor, ocorreu uma incipiente formação, já que aos outros constituintes de vidro inibiram este crescimento, pois formaram feldspato, além da baixa temperatura que não era ideal para a mesma.

- O uso do vidro como fundente é importante para a substituição de minerais como o feldspato que pode entrar em escassez no futuro, além da logística não simples para a sua obtenção.

## 6 SUGESTÕES

Devido à importância da reciclagem, seria de grande contribuição o estudo de outros tipos de vidro para uso como aditivos em materiais cerâmicos e de materiais compósitos; principalmente vidros com alto teor de sílica, que seria o mais indicado para a formação mulítica, já que os outros apresentam constituintes que formam o feldspato.

Poderiam ser usados outros materiais poliméricos, para obtenção da plasticidade, como o polipropileno.

Outro molde cerâmico poderia ser usado se o material polimérico não for utilizado, pois durante a sua degradação os gases levantam as partículas de alumina e vidro, sendo necessária pressão para as partículas permanecerem compactadas.

Fazer a sinterização a temperaturas maiores para formação da mulita, já que a alumina e a sílica apresentam as maiores temperaturas de fusão, não volatilizando como os outros. Isto aumentaria a atuação dos discos abrasivos com relação a outros materiais.

Fazer análises químicas dos materiais estudados por espectroscopia de fluorescência de raios X.

## REFERÊNCIAS

- [1] - OLIVEIRA, N. A. D. S. **As alternativas para o gerenciamento dos resíduos sólidos em Curitiba-PR, e sua contribuição com a melhoria de qualidade.** Dissertação de Mestrado do Instituto de Geografia da Universidade Federal do Paraná, 2008.
- [2] - SPINACÉ, M., AURELIO DE PAOLI, M. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Química Nova**, v. 28, n. 1, p. 65-72, 2005.
- [3]- GRJOTHEIM, K.; WELCH, B.J. **Aluminium Smelter Technology** – A Pure and Applied Approach. Aluminium-Verlag, Dusseldorf, 1988.
- [4] PIVA, A.M., BAHIANSE NETO, M., WIEBECK H. A reciclagem de PVC no Brasil. **Polímeros: Ciência e tecnologia**, out/dez, 1999.
- [5]- MANRICH, Silvio. **Processamento de termoplásticos.** Artliber Editora Ltda., 2005.
- [6]- SANTOS, P. S.; SANTOS, H. S.; TOLEDO, S.P. Standard Transition Aluminas. Electron Microscopy Studies. **Materials Research**, v. 3, p. 104-114, 2000.
- [7]- NETO, P.B.; STUART, A.R.; SUSTER, M.; PANDOLFELLI, V.C. Processing of zero-cement refractory castables containing alumina and microsilica. **Cerâmica**, v.46, n. 297, 2000.
- [8]- MAIA, SAMUEL B. **O vidro e sua fabricação.** Editora Interciência, 2003.
- [9]- ZECK, S.E. C. **Utilização de Espumas Uretânicas no tratamento de óleo mineral isolante contaminado com PCB.** Dissertação de Mestrado em Química- Universidade Federal do Paraná, 2004.
- [10]- SHI, C.; ZHENG, K. A review on the use of waste glasses in the production of cement and concret. **Resources, Conservation and Recycling**.v.52, 234-247, 2007.
- [11]- PANTOJA, Geraldo Junior Garcia. **Materiais Cerâmicos para ferramentas de corte.** 2004. 72f. TCC (Trabalho de conclusão de curso).- Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará. Belém, 2004.
- [12] – PEGORETTI, Alessandro; PENATI, Amabile. Recycled poly(ethylene terephthalate) and its short glass fibres composites: effects of hygrothermal aging on thermo-mechanical behavior. **Polymer**, 45, 7995-8004, 2004.

- [13]- FREIRE, José Mendonça. **Tecnologia do Corte**. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, 1977.
- [14] JIANXIN, D.; TAICHIU, L.; Ultrasonic machining of alumina-based ceramic composites. **Journal of the European Ceramic Society**, 22, 1235-1241, 2002.
- [15]- SILVA, H.C.; SILVA, N.S.; HOTZA, D. Influência do Quartzo na deformação Piroplástica de Porcelanas Triaxiais. **Cerâmica Industrial**. V.9, p. 42-46, 2004.
- [16]- SANTOS, M. L. P. ; . IGARASHI, A. **Materiais Cerâmicos**. 2002. 56f. TCC ( Trabalho de conclusão de curso).- Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará. Belém, 2004.
- [17]-CALLISTER JR, W.D. **Ciência de Engenharia de Materiais: uma introdução**. 5.ed. Rio de Janeiro:LTC Editora, 2002.
- [18]- MIMAROGLU, A.; TAYMAZ, I.; OZEL, A.; ARSLAN, S.; Influence of the addition of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub> on the tribological performance of alumina ceramics. **Surface&Coatings Technology**,169-1701, 405-407, 2003.
- [19]- ZHAO, SU.; ZHANG, J.; ZHAO, S.; LI,W.; LI, H. Effect of inorganic–organic interface adhesion on mechanical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/polymer laminate composites. **Composites Science and Technology**, 63, 1009-1014, 2003.
- [20]- GRANGER, B. G.; MONCHALIN, N.; GUIZARD, C. Sintering of ceramic powders: Determination of the densification and grain growth mechanisms from the “grain size/relative density” trajectory. **Scripta Materialia**, 57, 137-140, 2007.
- [21]- PORTU, G.; MICELE, L.; PRANDSTRALLER, D.; PALOMBARINI, G.; PEZZOTTI,G. Abrasive wear in ceramic laminated composites. **Wear**, 260, 1104-1111, 2006.
- [22]- KUMAR , A. S.;DURAI, A. R.; SORNAKUMAR, T. Wear behaviour of alumina based ceramic cutting tools on machining steels. **Tribology International**, 39, 191-197,2006.
- [23]- TAVARES, S. T.P.; Castaneda, C. A importância da Caracterização Química e Mineralógica do Feldspato para a sua Utilização na Indústria Cerâmica e Vidreira. **Cerâmica Industrial**. V 10,n 4, 2005.
- [24]- KIM, H. G.; GILLIA, O.; BOUVARD, D. A phenomenological constitutive model for the sintering of alumina powder. **Journal of the European Ceramic Society**, 23, 1675-1685, 2003.
- [25] RODRIGUEZ, A.M., PIANARO, S.A., BERG,E.A.T.;SANTOS,A.H. Propriedades de Matérias-primas selecionadas para a produção de Grês Porcelanato. **Cerâmica Industrial**, v 9, n 1, 2004.
- [26] ROSSO, J.; CUNHA, E.S.; RAMIREZ, R.A.R. Características Técnicas e Polimento de Porcellanatos. **Cerâmica Industrial**, v 10, n 4, 2005.

- [27]- HÜBERT, T.; SVOBODA, S.; OERTEL, B. Wear resistant alumina coatings produced by a sol-gel process. **Surface & Coatings Technology**, 201, 487-491, 2006.
- [28]- PAPAKONSTANTINOY, C. G.; BAGURU, P.; LYON, R. E. Comparative study of high temperature composites. **Composites**, 32, 637-649, 2001.
- [29]- MASLENNIKOVA, G. N.; Prospects in the development of aluminosilicate ceramics. **Glass and Ceramics**. 58, 46-50, 2001.
- [30]- CHANGXIA, L.; JIANHUA, Z.; JUNLONG, S.; XIHUA, Z. Pressureless sintering of large-scale fine structural alumina matrix ceramic guideway materials. **Materials Science and Engineering A**, 444, 58-63, 2007.
- [31]- BHIMARAJ, P.; BURRIS, D. L.; ACTION, J.; SAWYER, W.G.; TONEY, C.G.; SIEGEL, R. W.; SCHADLER, S. L. Effect of matrix morphology on the wear and friction behavior of alumina nanoparticle/poly(ethylene) terephthalate composites. **Wear**, 258, 1437-1443, 2005.
- [32]- HAMMELL, J. A.; BALAGURU, P. N.; LYON, R. E. Strength retention of fire resistant aluminosilicate-carbon composites under wet-dry conditions. **Composites**, 31, 107-111, 2000.
- [33]- SCHMÜCKER, M.; KANKA, B. SCHNEIDER, H. Temperature-induced fibre/matrix interactions in porous aluminosilicate ceramic matrix composites. **Journal of the European Ceramic Society**. 20, 2491-2497, 2000.
- [34]- SGLAVO, V. M.; BERTOLDI, M. Design and production of ceramic laminates with high mechanical reliability. **Composites**, 37, 481-489, 2006.
- [35]- LING, Z.; HOU, J. A nanoindentation analysis of the effects of microstructure on elastic properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC composites. **Composites Science and Technology**, 2007.
- [36]- MEHRMAN, J.M.; RUGGLES-WRENN, M. B.; BAEK, S. S. Influence of hold times on the elevated-temperature fatigue behavior of an oxide-oxide ceramic composite in air and in steam environment. **Composites Science and Technology**, 67, 1425-1438, 2007.
- [37]- KOSTOPOULOS, V.; VLACHOS, D. E.; PAIPETIS, A.; SOTIRIADIS, G. Anisotropic damage of alumina/alumina CFCCs under long term high temperature exposure: Investigations by ultrasonic stiffness measurements and quasi-static tests. **Composites Science and Technology**, 66, 3221-3229, 2006.
- [38]- OCHI, T.; OKUBO, S.; FUKUI, K. Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. **Cement & Concrete Composites**, 29, 448-455, 2007.

- [39]- MAHDI, F.; KHAN, A. A.; H. ABBAS, H. Physicochemical properties of polymer mortar composites using resins derived from post-consumer PET bottles. **Cement & Concrete Composites**, 29, 241-248, 2007.
- [40]- BELTRÃO, Marília Sérgio da Silva. **Sinterização em estado sólido de carbetos de silício em presença de carbetos de boro, carbono e zircônia**. 2005. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2003.
- [41]- SCHULLER, D.; BIANCHI, E.C.; AGUIAR, P.R.; Influência de defeitos e diferentes processos de fabricação nas propriedades mecânicas finais de cerâmicas. **Cerâmica**, São Paulo, 54, n 332, Oct. / Dez. 2008.
- [42]- CONSTANTINO, V.R.L.; ARAKI, K.; SILVA, D.O.; OLIVEIRA, W. Preparação de compostos de alumínio a partir de bauxite: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático. **Química Nova**. São Paulo, v25, n3, 2002.
- [43]- OLIVEIRA, I. R.; STUART, A.R.; PANDOLFELLI, V.C. Projetos da reologia de concretos refratários zero-cimento no sistema  $Al_2O_3$ -SiC-C. **Cerâmica**. São Paulo, n304, Nov./Dez. 2001.
- [44]- HWANG, M.K. **Desenvolvimento, caracterização microestrutural e mecânica de cerâmicas de SiC aditivadas com alumina e óxidos de terras raras**. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologias Espaciais) – INPE. São Paulo, 2006.
- [45]- PARIS, J. Y.; VINCENT, L.; DENAPE, J. High-speed tribological behaviour of a carbon/silicon-carbide composite. **Composites Science and Technology**, 62, 417-423, 2001.
- [46]- HECK, C., Grês Porcelanato. **Cerâmica Industrial**, V.1, n.4/5, 1997.
- [47]- LUZ, A.P.; Uso de pó de vidro como fundente para a produção de grês porcelanato. **Matéria**, V.13, n.1, 2008.
- [48]- SAMPAIO, V.G.; PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA, J. N. F. Granulação a seco de uma massa cerâmica para grês porcelanato. **Cerâmica**, V.53, n.327, 2007.
- [49]- TOMBA, A. G.; CAVALIERI, A. L. Alumina disks with different surface finish: thermal shock behavior. **Journal of the European Ceramic Society**, 20, 889-893, 2000.
- [50]- SOUSA, A.N.; THAUMATURGO, C. **Geopolímeros para aplicações balísticas**. Disponível em: [http://www.materia.coppe.ufrj.br/mirror/sarra/artigos/artigo\\_10070/index.htm](http://www.materia.coppe.ufrj.br/mirror/sarra/artigos/artigo_10070/index.htm), Acesso em: 10 ago. 2007.
- [51] - DOGAN, C.P.; HAWK, J.A. Role of composition and microstructure in the abrasive wear of high-alumina ceramics. **Wear**, 225 - 229, 1050-1058, 1999.



- [52]- ZHANG, F.C.; LUO, H.H.; WANG, T.S.; ROBERTS, S.G.; TODD, R.I. Influence factors on wear resistance of two alumina matrix composites. **Wear**, XX, XX – XX, 2008.
- [53]- ZAWRAH, M.F.; HAMZAWY, E.M.A.; Effect of cristobalite formation on sinterability, microstructure and properties of glass/ceramic composites. **Ceramics Internacional**, 28, 123-130, 2002.
- [54]- RODRIGUEZ, A. M.;PIANARO,S.A.; Propriedades de Matérias-primas selecionadas para a produção de Grês porcelanato. **Cerâmica Industrial**, 9, 41-46, 2004.
- [55]- ROSSO,J.; CUNHA, E.S.;RAMIREZ, R.A. Características Técnicas e Polimento de Porcellanatos. **Cerâmica Industrial**, 10, 11-14, 2005.
- [56] - M.O. Carlos, J.R. Garcia, I.R. Oliveira, R.Salomão, V.C. Pandolfelli. Heterocoagulação como técnica para obtenção de cerâmicas porosas. **Cerâmica**, 51, 78 – 84, 2005.
- [57] - LIN, J.C. Investigation of impact behavior of various silica-reinforced polymeric matrix nanocomposites. **Composite Structure**, xxxx, xxxx-xxxx, 2007.

## APÊNDICE A – MEMÓRIA DE CÁLCULO

Cálculo do percentual de vidro:

1 - Para 15% de diopsídio:

Peso do disco = 3,6g ( medido com 100% de  $Al_2O_3$ )

Percentual do PET = 10% → 0,36g

Percentual do material cerâmico = 90% → 3,24g

3,24g → 100 % de material cerâmico

X g → 15% de diopsídio                      X = 0,486g de aditivo

Em 0,486g de aditivo, tenho 55% de  $SiO_2$ , valor = 0,2673g

Correlacionando este valor a 70% de  $SiO_2$  do vidro plano.

Tem-se : 0,2673g → 70% de  $SiO_2$

X g → 100% de vidro

X = 0,382g de vidro, que corresponde a 11,78% de vidro

2 - Para 20% de diopisídio:

3,24g → 100% de material cerâmico

X g → 20% de diopisídio →                      X = 0,648g de aditivo

Em 0,648g de aditivo, tenho 55% de  $SiO_2$ , valor = 0,3564 g

Correlacionando este valor a 70% de  $SiO_2$  do vidro plano.

Tem-se: 0,3564g → 70% de  $SiO_2$

X g → 100% de  $SiO_2$

X = 0,5091g, que corresponde a 15,7% de vidro.

3 – Para 40% de diopsídio:

3,24g → 100% de material cerâmico

X g → 40% de diopisídio →                      X = 1,296 g de aditivo

Em 1,296g de aditivo, tem-se 55% de  $SiO_2$ , valor = 0,7128 g

Correlacionando este valor a 70% de  $SiO_2$  do vidro plano.

Tem-se : 0,7128 g → 70% de  $SiO_2$

X g → 100% de vidro

X = 1,02 g, que corresponde a 31,48 % de vidro.

4 – Para 60% de diopsídio:

3,24g → 100% de material cerâmico

X g → 60% de diopsídio → X = 1,944 g de aditivo

Em 1,944g de aditivo, tem-se 55% de SiO<sub>2</sub>, valor = 1,0692 g

Correlacionando este valor a 70% de SiO<sub>2</sub> do vidro plano.

Tem-se : 1,0692 g → 70% de SiO<sub>2</sub>

X g → 100% de vidro

X = 1,527 g, que corresponde a 47,14 % de vidro.