

LUIZ IAMA PEREIRA FILHO

ADIÇÃO DE PÓ DE VIDRO EM CERÂMICA VERMELHA

**Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Engenheiro de Materiais**

**São Paulo
2004**

LUIZ IAMA PEREIRA FILHO

ADIÇÃO DE PÓ DE VIDRO EM CERÂMICA VERMELHA

**Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Engenheiro de Materiais**

**Área de Concentração:
Engenharia de Materiais**

**Orientador:
Prof. Dr.: Samuel M. Toffoli**

**São Paulo
2004**

AGRADECIMENTOS

Ao meu professor e orientador Samuel Toffoli pela paciência e perseverança ao me orientar.

À Ticiane por ter me oferecido a oportunidade de iniciar este trabalho.

À Valquíria pela suas inestimáveis ajuda e boa vontade.

Ao Cláudio pelo auxílio no laboratório.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, programa PIBIC.

RESUMO

Neste trabalho é investigada uma aplicação do pó de vidro, em escala de laboratório, na fabricação de materiais cerâmicos estruturais. Pó de vidro soda-cal foi adicionado a um taguá da região de Jundiaí, SP, sendo que duas granulometrias foram testadas para o taguá. Os materiais empregados foram inicialmente caracterizados quanto às fases presentes (difração de raios-X) e quanto às suas distribuições granulométricas (dispersão de laser) e corpos de prova foram então preparados por prensagem uniaxial da mistura, posterior queima a 950°C e as propriedades cerâmicas (retração linear, absorção de água, porosidade, massa específica aparente e resistência mecânica à flexão em 3 pontos) das amostras com e sem adição de vidro foram determinadas e comparadas. As microestruturas obtidas foram comparadas através de observação microscópica em estereoscópio.

ABSTRACT

The changes in the technological properties of a structural ceramic obtained from a shale of Jundiaí, State of São Paulo, Brazil, when soda-lime glass powder is added were studied. The ceramic properties and the microstructures of the materials obtained comparing the effect of the amount of glass and two different particle sizes of the shale in the microstructures of the ceramics in the shale-glass system are compared. The specimens were examined with a stereoscope, and the raw-materials were analyzed by XRD, and the particle size distribution curves were determined by laser dispersion.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DA LITERATURA	4
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	11
3.1. Pó de vidro.....	11
3.2. Taguá.....	12
3.3. Preparação dos corpos de prova	12
3.4. Resistência mecânica.....	13
3.5. Propriedades cerâmicas	13
3.6. Distribuição granulométrica.....	14
3.7. Análise da microestrutura.....	14
3.7.1. Difração de raios-x	14
3.7.2. Microscopia	15
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
4.1. Propriedades cerâmicas	16
4.2. Resistência mecânica.....	21
4.3. Resumo – efeito da adição de pó de vidro sobre o comportamento da cerâmica	25
4.4. Distribuição granulométrica.....	26
4.5. Análise da microestrutura.....	28
4.5.1. Difração de raios-x	28
4.5.2. Microscopia	33
4.5.3. Resumo – avaliação microestrutural.....	35
5. CONCLUSÕES	37
6. REFERÊNCIAS	38
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	40

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ABSORÇÃO DE ÁGUA E POROSIDADE EM FUNÇÃO DA MASSA DE VIDRO PARA O TAGUÁ #200.	19
FIGURA 2 - ABSORÇÃO DE ÁGUA E POROSIDADE EM FUNÇÃO DA MASSA DE VIDRO PARA O TAGUÁ #50.	20
FIGURA 3 - COMPARAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA PARA AS GRANULOMETRIAS DE TAGUÁ ESTUDADAS	21
FIGURA 4 - GRÁFICO DA TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO EM FUNÇÃO DA MASSA DE VIDRO.	22
FIGURA 5 - GRÁFICO DE WEIBULL PARA OS CORPOS DE PROVA OBTIDOS COM TAGUÁ #50.	24
FIGURA 6 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO TAGUÁ PASSADO EM MALHA #200.	27
FIGURA 7 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO VIDRO PASSADO EM MALHA #200.	27
FIGURA 8 - CURVAS DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X PARA AS GRANULOMETRIAS ESTUDADAS.	29
FIGURA 9 - CURVA DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X DO TAGUÁ BRUTO COM AS FASES MINERALÓGICAS IDENTIFICADAS.	30
FIGURA 10 - CURVAS DE DRX DAS CERÂMICAS OBTIDAS COM O TAGUÁ #200.	31
FIGURA 11 - DETALHE DAS CURVAS DE DRX DAS CERÂMICAS OBTIDAS COM O TAGUÁ #200.	32
FIGURA 12 - MICROESTRUTURA CERÂMICA, TAGUÁ #50, 0% DE VIDRO.	34
FIGURA 13 - MICROESTRUTURA CERÂMICA, TAGUÁ #200, 0% DE VIDRO.	34
FIGURA 14 - MICROESTRUTURA CERÂMICA, TAGUÁ #50, 15% DE VIDRO.	34
FIGURA 15 - MICROESTRUTURA CERÂMICA, TAGUÁ #200, 15% DE VIDRO.	34
FIGURA 16 - MUDANÇA NA COLORAÇÃO EM FUNÇÃO DA ADIÇÃO DE VIDRO	35

LISTA DE TABELAS

TABELA I - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO VIDRO UTILIZADO NOS ENSAIOS.	11
TABELA II - MÉDIA DOS VALORES OBTIDOS EM FUNÇÃO DA PORCENTAGEM DE VIDRO ADICIONADA, PARA O TAGUÁ #200. UP: UMIDADE DE PRENSAGEM, RS: RETRAÇÃO DE SECAGEM, RLQ: RETRAÇÃO LINEAR APÓS QUEIMA, RLT: RETRAÇÃO LINEAR TOTAL, DG: DENSIDADE GEOMÉTRICA, DGQ: DENSIDADE GEOMÉTRICA APÓS QUEIMA.	16
TABELA III - MÉDIA DOS VALORES OBTIDOS EM FUNÇÃO DA PORCENTAGEM DE VIDRO ADICIONADA, PARA O TAGUÁ #50. UP: UMIDADE DE PRENSAGEM, RS: RETRAÇÃO DE SECAGEM, RLQ: RETRAÇÃO LINEAR APÓS QUEIMA, RLT: RETRAÇÃO LINEAR TOTAL, DG: DENSIDADE GEOMÉTRICA, DGQ: DENSIDADE GEOMÉTRICA APÓS QUEIMA.	17
TABELA IV - VALORES MÉDIOS DAS PROPRIEDADES CERÂMICAS EM FUNÇÃO DA PORCENTAGEM DE VIDRO ADICIONADA, PARA O TAGUÁ #200. PF: PERDA AO FOGO, AA: ABSORÇÃO DE ÁGUA, MEA: MASSA ESPECÍFICA APARENTE, MEAS: MASSA ESPECÍFICA APARENTE DA PARTE SÓLIDA.	18
TABELA V - VALORES MÉDIOS DAS PROPRIEDADES CERÂMICAS EM FUNÇÃO DA PORCENTAGEM DE VIDRO ADICIONADA, PARA O TAGUÁ #50. PF: PERDA AO FOGO, AA: ABSORÇÃO DE ÁGUA, MEA: MASSA ESPECÍFICA APARENTE, MEAS: MASSA ESPECÍFICA APARENTE DA PARTE SÓLIDA.	19
TABELA VI - CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS CERÂMICOS DE REVESTIMENTO SEGUNDO NBR 13817 .23	
TABELA VII - VALORES DO MÓDULO DE WEIBULL PARA AS ADIÇÕES DE VIDRO EM PÓ, PARA TAGUÁ #50	25

1. INTRODUÇÃO

Diversos trabalhos apresentados na literatura reportam a utilização de inúmeros resíduos industriais empregando-os como aditivos em peças cerâmicas, podendo levar inclusive a melhorias significativas em suas características ou condições de processamento. Alguns exemplos desses resíduos reutilizados como adições em cerâmica são: lamas industriais, cinzas resultantes de diversos processos e uma grande diversidade de resíduos industriais. O vidro e seu pó mostram-se como resíduos de emprego potencialmente interessante para a indústria cerâmica, pois podem, em alguns casos, levar a obtenção de uma cerâmica de melhor qualidade e/ou de menor custo.

No processo industrial de reaproveitamento de pára-brisas automotivos, ocorre a separação do vidro da película de PVB – poli(vinil butiral). Após a separação, as partículas desse vidro, do tipo soda-cal comum, apresentam-se dentro de uma larga distribuição granulométrica, indo desde cacos grandes até partículas bem finas. Os cacos maiores são facilmente recicláveis pela Indústria Vidreira. Entretanto, o pó fino encontra poucas formas de reutilização industrial, uma vez que nos grandes fornos de fusão de vidro evita-se o uso desse material de modo a evitar-se principalmente o fenômeno de arraste do pó pela chaminé, além da possível deposição de vidro fundido nas paredes internas do forno e do regenerador.

Mesmo os cacos grandes que podem ser reutilizados facilmente pela indústria vidreira geralmente não podem retornar ao processo diretamente, pois é necessário

que sejam submetidos a uma triagem primeiro, o que acaba por gerar ainda mais rejeito que não poderá ser reutilizado de maneira adequada.

Outra fonte geradora de pó de vidro como um resíduo são as indústrias que trabalham com a lapidação de vidro, fabricação de vidros automotivos, vidros laminados e temperados para uso como portas e janelas de segurança e em box box de banheiros. Nestes processos, o pó de vidro é gerado a partir do desbaste de peças de vidro através de rebolos adiamantados, o que produz uma enorme quantidade de pó de granulometria extremamente fina. Esse material é então transportado através de correntes de água até o ponto será realizado um tratamento de floculação para remoção do vidro da água. Devido a esse tratamento, o pó de vidro encontra-se aglutinado em aglomerados compactos, prontos para serem descartados em aterros sanitários, que são sua destinação final hoje em dia.

A literatura ^[1,2] mostra que há uma urgência no mundo moderno em encontrar uma alternativa para o descarte destes resíduos, principalmente devido à alarmante velocidade em que os aterros vêm sendo utilizados. Órgãos relacionados à política de reciclagem e de qualidade do meio ambiente vêm pressionando produtores e consumidores, forçando-os a descartar os produtos de maneira ambientalmente responsável.

A granulometria dos pós empregados em qualquer processo, seja ele cerâmico ou não, desempenha papel fundamental e determinante no resultado a ser obtido. A granulometria e sua distribuição são variáveis que podem regular outros parâmetros do processo, como por exemplo, o tempo e a temperatura de queima, além de estarem ligadas intimamente a algumas propriedades de decisiva importância, como, a porosidade e sua distribuição na peça final. No entanto, é importante ressaltar que

nem sempre a granulometria mais adequada para um processo por motivos técnicos será a mais vantajosa em termos econômicos, visto que é custosa e difícil a obtenção de pós muito finos, ou com uma distribuição de tamanho de partículas bem controlada. Posto isso, é importante estudar como mudarão as características do material obtido ao mudar-se a granulometria das matérias-primas utilizadas, já que em laboratório é muito mais simples realizar um controle rigoroso dessa variável do que industrialmente, o que poderia levar a obtenção de resultados interessantes, mas não condizentes com a realidade dos lugares onde deveriam ser empregados.

Desse modo, o objetivo deste trabalho foi o de investigar as alterações provocadas nas propriedades tecnológicas de uma cerâmica vermelha (obtida a partir de um taguá do estado de São Paulo) pela adição de vidro em pó, mantidas constantes as outras variáveis, como temperatura de queima, mas alterando-se o teor de vidro presente (de 0 a 25%) e a granulometria do taguá (duas granulometrias foram estudadas: material abaixo de malha ABNT 50 e abaixo de ABNT 200).

2. REVISÃO DA LITERATURA

O termo “argilas para finalidades diversas” é um termo genérico usado pelo U.S. Bureau of Mines que é aplicado a argilas e folhelhos de uso industrial. Geralmente são argilas sedimentares que queimam em várias tonalidades de vermelho, contendo caulinita, montmorilonita e principalmente illita (nos folhelhos argilosos – shales), às vezes em camadas mistas, como argilominerais predominantes, além de outras impurezas, como matéria orgânica, quartzo, calcário, pirita e outros. Grandes quantidades dessas argilas são usadas em cerâmica vermelha (em inglês heavy-clay products), isto é, na fabricação de tijolos de alvenaria de vários tipos, telhas cerâmicas, placas cerâmicas para revestimento, manilhas, conduítes e agregados leves.

Folhelhos argilosos ou “shales” são argilas sedimentares que, no passado geológico foram submetidos a pressões que as transformaram em uma rocha compacta e dura, com tendência à clivagem lamelar, dando o nome de folhelo; illita ou argilominerais de camadas mistas illita-montmorilonita e clorita-montmorilonita são os componentes essenciais dos folhelhos argilosos ou *shales*, além da caulinita. Um folhelo argiloso, pela ação de temperatura e maior pressão, se transforma em ardósia (slate); se a temperatura for suficientemente elevada, transformar-se-á em um micaxisto.

Os folhelhos argilosos são de granulometria muito fina (porque são sedimentos); geralmente apresentam estratificação em camadas horizontais e são de coloração variada. Após uma moagem fina, readquirem plasticidade quando

umedecidos com água: são usados na fabricação de telhas e ladrilhos de piso pela resistência mecânica e pelas cores vermelhas intensas que adquirem após a queima; têm o nome usual de “taguás”. Os folhelhos argilosos são comuns especialmente em formações carboníferas. Os folhelhos do vale do Paraíba, Jundiaí, Itú e Mogi-Guaçu (SP), e do Recôncavo Baiano, são exemplos no Brasil desses materiais ^[3-5].

Apesar de 100% reciclável nem todo o vidro produzido consegue ser efetivamente reciclado pela indústria vidreira, como mostra ^[6]. Alguns números contidos nessa referência podem ilustrar o quanto de rejeito de vidro é produzido atualmente que não é reciclado na fabricação de artigos de vidro e acaba por muitas vezes sendo despejados em aterros. A Alemanha, que foi o país que em 2001 mais coletou vidro para reciclagem, coletou 2.666.000 toneladas de vidro doméstico, das quais reciclou 87% do total, de modo que 346.580 toneladas permaneceram sem destino apropriado.

Mais expressivo ainda é o número associado ao descarte de tubos de raios catódicos (TRC). Considerando-se apenas a Europa Ocidental, 300.000 toneladas/ano de vidro na forma TRC são descartadas, das quais apenas 10% são usadas na produção de novos TRC's, devido à composição química destes, que é muito específica e não permite contaminações. Devido a esse fato, só na Europa Ocidental, são descartadas todo ano 270.000 toneladas que são despejadas em aterros.

No caso dos vidros automotivos a produção anual de rejeitos também é grande e a porcentagem reciclada é ainda menor do que no caso dos TRC's. Em média existem 30 kg de vidro plano em um carro e algo entre 5 e 7 milhões de carros são desmontados na Europa a cada ano, o que resulta em uma produção de 2.400.000

toneladas de vidro que atualmente não estão sendo reutilizados ou reciclados de alguma maneira. A dificuldade em reaproveitar esse vidro deve-se aos contaminantes que ele carrega como metais presentes nas pinturas (ferro, prata, chumbo e etc.) e resíduos de PVB no caso dos vidros laminado e blindado. Esses contaminantes podem resultar em efeitos indesejados se utilizados na fabricação de novo vidro, ocasionando, por exemplo, uma maior geração de defeitos ou alterações nas cores e propriedades do vidro.

Para os tipos de vidro mencionados anteriormente que não encontram reutilização na indústria vidreira são sugeridas algumas maneiras de reaproveitamento, atuando como: componente inerte em para tijolos, componente fluxante em porcelanas, componente fluxante em esmaltes cerâmicos, carga em concreto e etc. Em várias aplicações estudadas até hoje além de não prejudicar o material no qual é adicionado o vidro ainda atua melhorando algumas de suas propriedades, como em o apresentado por Yugai e Loginov ^[7].

Em ^[7] é apresentado um desenvolvimento onde é estudada uma cerâmica do tipo majolica, de Gzhel' na região de Vladimir na Rússia, que tem como principal desvantagem sua alta porosidade e conseqüente absorção de água elevada. Para tentar contornar o problema da alta porosidade são analisadas duas alternativas, a adição da própria argila em granulometria mais fina e com uma distribuição controlada e também a introdução de rejeitos de vidro na forma de cacos. A introdução da própria argila levou a obtenção de uma cerâmica bem menos porosa, chegando a promover uma redução de 12% para 7% de porosidade quando adicionada 40% em massa de argila de granulometria mais fina. A introdução de cacos de vidro resulta em dois efeitos distintos, uma redução na porosidade e

também um decréscimo na temperatura de sinterização, que com uma adição de caco de vidro entre 40 e 50% em massa pode chegar até 800 °C. Esse efeito é extremamente vantajoso para esse tipo de cerâmica, pois permite que uma sinterização completa do material seja alcançada em queimas de um estágio apenas e em temperaturas abaixo de 1000 °C.

O outro efeito obtido com a adição de vidro, a redução da porosidade, é ainda mais acentuado quando se utiliza na mistura a própria argila de granulometria mais fina. Com essa combinação é possível atingir uma porosidade de até 6%, metade daquela obtida normalmente para esse tipo de argila. A redução na porosidade obtida com a adição da argila mais fina é proporcional à temperatura de queima, maior tanto quanto maior é a temperatura de queima. Introduzindo-se o caco de vidro no sistema, além da argila mais fina, é possível obter-se uma cerâmica de porosidade mais baixa a uma temperatura de queima também mais baixa, que passa a ser de aproximadamente 900 °C ao invés dos 1000 °C que são normalmente necessários.

Em trabalho posterior do mesmo autor ^[8] determinou-se que além das vantagens descritas em ^[7] a adição de vidro também proporciona um aumento na resistência mecânica da cerâmica obtida. Nesse trabalho mais recente também se determinou que a adição de vidro resultou em uma cerâmica mais homogênea, com poros distribuídos de forma mais uniformes. Porém, a retração linear na queima aumenta com o teor de vidro adicionado, principalmente quando a cerâmica é queimada em temperaturas mais baixas (850 – 900 °C).

Rejeitos de vidro doméstico, garrafas, pratos, copos e outros podem tornar-se um problema, uma vez que para indústria vidreira reutilizar esse material é necessário que uma separação cuidadosa seja realizada quanto ao tipo e cor do vidro,

o que nem é sempre possível. Este é o caso estudado por Leshina e Pivnev em ^[9], onde procura-se uma destinação para rejeitos domésticos de vidros diversos na região de Vladimir na Rússia.

Nesse trabalho estudou-se a possibilidade de adicionar-se rejeito de vidro doméstico a uma massa para tijolos, sem que com isso fossem alteradas suas propriedades técnica. Os resultados obtidos mostraram que não só as propriedades do material mantiveram-se dentro das normas técnicas, como algumas sofreram melhorias significativas.

Em laboratório, foram preparadas misturas contendo de 5 a 30 % de adição de vidro em massa, com quatro granulometrias diferentes de vidro: Abaixo de 0,14mm, entre 0,14 - 0,315mm, entre 0,315 – 0,63 mm e entre 0,63 – 1,4mm. Determinou-se, baseado nos resultados obtidos, que o tamanho de partícula ótimo era entre 0,14 - 0,315mm, principalmente devido ao aumento da resistência à compressão obtido com essa granulometria. Também foi estabelecido que adição ideal era de 20% em massa, de maneira que a porosidade final do material ainda permanecesse dentro do estabelecido pela norma.

Das propriedades analisadas foram obtidos os seguintes resultados: aumento da resistência à compressão, da condutividade térmica e da densidade geométrica e decréscimo da absorção de água. Após os testes de laboratório foi testada em escala industrial a produção de um lote de tijolos com a adição de 20% em massa de cacos, contendo várias granulometrias diferentes, inclusive fragmentos de vidro que variavam entre 5-10 mm de tamanho. Os resultados obtidos foram semelhantes aos de laboratório, produzindo um tijolo significativamente superior em suas características físico-mecânicas, incluindo a resistência ao frio, que se mostrou

aproximadamente 4,5 vezes maior do que a exigida pela norma aplicável ao tipo de tijolos que foram fabricados no teste.

Uma outra solução para o uso de rejeitos diversos de vidro é apresentada em ^[10], onde foi estudada a possibilidade de aplicar-se cacos de vidro para produzir um revestimento vítreo para tijolos. O intuito desse revestimento é atuar como uma decoração que agrega mais valor ao produto e não melhorar o desempenho técnico do mesmo. Determinou-se neste trabalho que é possível produzir de maneira relativamente simples revestimentos vítreos de várias espessuras, bastando para tanto se variar a granulometria do vidro depositado sobre o tijolo. Além de poder resultar em camadas de espessuras e cores diferentes de acordo com o tipo de vidro utilizado o revestimento obtido é durável, resistente a água e apresenta uma boa adesão à superfície do tijolo.

Mas não só em cerâmica vermelha os rejeitos de vidro podem ser empregados de maneira bem sucedida. Como é mostrado em ^[11] a adição de vidro em cerâmicas do tipo *stoneware* também aparenta ser uma solução interessante. Essas cerâmicas são obtidas a partir de massas triaxiais nas quais, além da argila, estão presentes o quartzo e o feldspato. Alguns dos motivos para as melhorias são: compatibilidade química entre o vidro soda cal e a cerâmica, abundância de fase vítrea nos produtos acabados, flexibilidade do processo de fabricação que permite a adição de outras matérias primas sem que seja necessário alterar-se significativamente a rota de produção e etc.

Os resultados obtidos nesse trabalho mostraram que o vidro soda-cal pode substituir agentes fluxantes convencionais sem que sejam necessárias grandes mudanças no processo de fabricação. A introdução de vidro como fluxante traz

algumas vantagens técnicas para o produto final como, por exemplo, a aceleração do processo de densificação durante a queima. Segundo o autor, o vidro soda-cal adicionado parece modificar o equilíbrio entre as fases vítrea e cristalina coexistentes, melhorando a cinética da etapa de sinterização. Em ^[12] o autor conduz um estudo semelhante, com o mesmo objetivo e chega à resultados semelhantes: redução na absorção de água, redução da temperatura de queima e aumento da resistência mecânica. Contudo, neste trabalho, testes em escala industrial também foram realizados adicionando-se 10% em massa de pó de vidro e atingindo-se resultados semelhantes aos de laboratório.

Também trabalhando com adição de vidro em porcelana, Bragança e Bergmann ^[13] relatam os resultados obtidos na tentativa de se substituir o feldspato em porcelanas por pó de vidro. A porcelana tradicional é composta basicamente de quartzo, feldspato e caulim, sendo o feldspato a mais cara das três matérias primas. A fase vítrea formada na porcelana após a queima é formada a partir da decomposição do feldspato e da interação com as fases cristalinas presentes e sua composição lembra a de um vidro soda-cal. O estudo concluiu que a utilização de pó de vidro para substituir o feldspato é viável e traz vantagens, como a redução em 100 °C da temperatura de queima. O vidro adicionado levou a melhorias significativas no módulo de ruptura do material e também a uma redução expressiva na absorção de água. A análise microestrutural do material revelou que a temperatura ideal de queima era aquela na qual a fase vítrea conseguia molhar toda a amostra e tinha tempo suficiente de reagir com as fases cristalinas presentes.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Pó de vidro

O vidro soda-cal é composto basicamente de sílica (mais de 70%), sendo que a origem do nome está ligada à sua composição, onde a sílica somada aos óxidos de sódio (Na_2O) e cálcio (CaO), totalizam pelo menos 90-95% dos óxidos presentes ^[14]. A composição química do vidro utilizado na confecção dos corpos de prova está descrita na tabela I, segundo análise do próprio fornecedor.

Tabela I - Composição química do vidro utilizado nos ensaios.

Óxido	%
MgO	3,82
Na_2O	13,7
Fe_2O_3	0,010
TiO_2	0,015
SiO_2	72,0
CaO	8,69
K_2O	0,34
Al_2O_3	0,72

O pó de vidro utilizado nos ensaios foi obtido a partir de duas moagens consecutivas de vidros automotivos (vidro soda-cal plano), incolor (industrialmente chamados de “brancos”) e com graus de verde. Primeiramente em moinho de martelos, para reduzir as placas de vidro a cacos e depois em moinho planetário de laboratório Fritsch Pulverisette 7, de modo a transformar esses cacos em um pó com a granulometria desejada, passando em malha ABNT 200 (abertura 75 μm)

3.2. Taguá

Foi utilizado nos ensaios o taguá “samarone”, que é uma mistura das quatro primeiras camadas de taguá extraídas na jazida situada no km 11,5 da estrada Jundiá-Jarinú, no município de Jundiá, Estado de São Paulo. As amostras de taguá coletadas nessa jazida foram secas ao sol até conterem aproximadamente 10% de umidade (referida à amostra seca a 110°C). As amostras foram então moídas em moinho de martelos até passarem totalmente na peneira ABNT 50 (abertura 300 µm). A caracterização desse material já foi anteriormente apresentada ^[4,5].

O taguá “samarone” passou por outro processo de moagem, em meio úmido, em moinho oscilatório de laboratório de jarro de porcelana (do tipo excêntrico) e seco posteriormente em estufa a 110°C. Depois de seco o taguá foi desagregado em almofariz de porcelana, para que fosse obtido o pó a ser utilizado na confecção dos corpos de prova. Foram empregadas duas granulometrias de taguá, malha ABNT 200 e ABNT 50.

3.3. Preparação dos corpos de prova

Com cada uma das granulometrias de taguá empregadas (#50 e #200) foram preparadas seis misturas com pó de vidro, variando a porcentagem deste último desde 0% até 25%, com incrementos de 5%. Essas misturas foram agitadas

manualmente em recipientes de vidro durante dez minutos, de modo a homogeneizá-las.

Para cada composição foram preparados seis corpos de prova nas dimensões de $(60 \times 20 \times 3) \text{ mm}^3$. Esses corpos de prova foram prensados em prensa uniaxial com compressão de 25 MPa. Os corpos de prova após a prensagem foram pesados e depois medidos com paquímetro digital, registrando-se comprimento, largura e espessura de cada um.

Os corpos de prova foram então secos em estufa a 110°C durante 15 horas, sendo medidos e pesados também logo após deixarem a estufa. Os corpos de prova foram queimados com patamar de 1 hora a 950°C e velocidade de aquecimento de $5^\circ\text{C}/\text{min}$. Ao sair do forno foram novamente pesados e medidos para se obter os valores de retração linear, densidade geométrica e perda ao fogo.

3.4. Resistência mecânica

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de flexão em três pontos em uma máquina universal de teste Panambra Versat 500, determinando-se sua tensão de ruptura à flexão.

3.5. Propriedades cerâmicas

Posteriormente, estes foram imersos em água destilada durante 72 horas, para que fossem realizadas as pesagens de massa seca, úmida e imersa, para se determinar as propriedades cerâmicas do material: absorção de água, porosidade aparente, retração linear, massa específica aparente e massa específica aparente da parte sólida.

3.6. Distribuição granulométrica

As curvas de distribuição granulométrica foram levantadas utilizando-se um granulômetro laser Malvern Mastersizer E com os dados tendo sido tratados em planilha de Microsoft Excel. Para a realização destes ensaios as amostras foram diluídas em água destilada, sem adição de dispersantes, e sob agitação constante.

3.7. Análise da microestrutura

Para a análise das características microestruturais das matérias primas e dos corpos cerâmicos estudados foram empregadas basicamente duas técnicas: análise de difração de raios-X, microscopia óptica em lupa estereoscópica

3.7.1. Difração de raios-X

Para a análise de difração de raios-X pelo método do pó, foi utilizado um difratômetro Philips MPD X'Pert, com radiação do Cu K α , operando no modo de

varredura por passos (step) com variação de 0.02° por passo, indo desde 3 até $90^\circ(2\theta)$.

As curvas levantadas pelo difratômetro para as amostras foram analisadas através de software para que os picos fossem identificados, utilizando para isso as fichas fornecidas pelo JCPDS – International Centre for Diffraction Data. Os resultados levantados pelo difratômetro foram convertidos em tabela de pontos de modo que fosse possível traçar as curvas finais através do software Microsoft Excel.

3.7.2. Microscopia

As amostras de cerâmica analisadas por microscopia óptica foram obtidas cortando-se, com uma serra de disco diamantado de baixa velocidade, os corpos de prova resultantes dos ensaios de flexão em três pontos realizados. As amostras foram então embutidas em resina de embutimento a frio, deixados para curar a temperatura ambiente durante 24 horas.

Os corpos embutidos foram lixados sucessivamente com lixas d'água de: 100, 180, 220, 340, 400 e 600 mesh e após isso foram polidos com pasta de diamante com granulometria decrescente de: $6\mu\text{m}$, $3\mu\text{m}$ e $1\mu\text{m}$. Após o polimento as amostras foram lavadas e secas sob ar quente.

A microscopia óptica das peças obtidas foi realizada com uma lupa estereoscópica Lambda LET2. As imagens, digitalizadas em computador, foram coletadas por uma câmera acoplada ao estereoscópio e conectada a um microcomputador.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Propriedades Cerâmicas

As Tabelas II e III abaixo mostram, para cada uma das granulometrias de taguá empregadas, #200 e #50 respectivamente, os valores médios (com os respectivos desvios padrão) obtidos para retração linear na secagem e também depois da queima, para cada composição. Nessas tabelas também estão relacionadas a umidade de prensagem e as densidades geométricas antes e depois da queima..

A tabela II mostra que a adição de vidro leva a um aumento mais acentuado na densidade geométrica depois da queima, excetuando-se as duas últimas composições.

Tabela II - Média dos valores obtidos em função da porcentagem de vidro adicionada, para o taguá #200. UP: umidade de prensagem, RS: retração de secagem, RLQ: retração linear após queima, RLT: retração linear total, DG: densidade geométrica, DGQ: densidade geométrica após queima.

% de Vidro	UP (%)	RS (%)	RLQ (%)	RLT (%)	DG (g/cm ³)	DGQ (g/cm ³)
0	3,3 ± 0,4	0,2 ± 0,1	6,8 ± 0,7	7,0 ± 0,7	1,67 ± 0,04	1,95 ± 0,07
5	3,0 ± 0,2	0,2 ± 0,1	8,0 ± 0,8	8,2 ± 0,8	1,68 ± 0,03	2,05 ± 0,07
10	3,6 ± 0,1	0,3 ± 0,1	7,4 ± 0,5	7,6 ± 0,4	1,77 ± 0,02	2,10 ± 0,03
15	3,9 ± 0,1	0,2 ± 0,1	9,5 ± 0,2	9,7 ± 0,2	1,81 ± 0,03	2,27 ± 0,02
20	3,1 ± 0,3	0,2 ± 0,1	3,3 ± 0,3	3,5 ± 0,3	1,70 ± 0,02	1,81 ± 0,02
25	2,3 ± 0,1	0,2 ± 0,1	3,3 ± 0,2	3,5 ± 0,2	1,72 ± 0,02	1,84 ± 0,03

Os resultados obtidos para a densidade geométrica após a queima mostrados na tabela III mostram-se consoantes com os registrados para o taguá de granulometria mais fina, exibindo uma tendência de aumento em função da adição de pó de vidro.

Tabela III - Média dos valores obtidos em função da porcentagem de vidro adicionada, para o taguá #50. UP: unidade de prensagem, RS: retração de secagem, RLQ: retração linear após queima, RLT: retração linear total, DG: densidade geométrica, DGQ: densidade geométrica após queima.

% de Vidro	UP (%)	RS (%)	RLQ (%)	RLT (%)	DG (g/cm ³)	DGQ (g/cm ³)
0	4,8 ± 0,2	0,3 ± 0,1	2,7 ± 0,2	3,0 ± 0,2	1,79 ± 0,04	1,84 ± 0,03
5	4,3 ± 0,3	0,3 ± 0,1	3,6 ± 0,2	3,9 ± 0,2	1,78 ± 0,02	1,90 ± 0,02
10	3,9 ± 0,2	0,3 ± 0,1	4,2 ± 0,5	4,5 ± 0,5	1,79 ± 0,02	1,93 ± 0,05
15	3,5 ± 0,1	0,2 ± 0,1	4,9 ± 0,2	5,2 ± 0,3	1,80 ± 0,01	1,98 ± 0,03
20	3,5 ± 0,1	0,2 ± 0,1	5,5 ± 0,1	5,7 ± 0,1	1,79 ± 0,02	2,01 ± 0,02
25	3,3 ± 0,2	0,3 ± 0,1	5,4 ± 0,2	5,7 ± 0,2	1,76 ± 0,02	1,98 ± 0,02

Como evidenciam as tabelas, quase toda a retração linear sofrida se deve ao processo de queima e a retração na secagem não é influenciada pela carga de vidro em ambas as granulometrias, bem como os valores de densidade geométrica antes da queima são pouco influenciados pela adição de vidro quando comparadas as diferentes composições.

Comparando-se as tabelas II e III é interessante notar que a cerâmica obtida com o taguá passado em malha ABNT 50 mostrou uma retração linear após a queima menor do que a obtida com o taguá passado em malha ABNT 200 além de exibir um aumento dessa característica em função da adição de pó de vidro, fato que não pode ser observado na tabela II.

As Tabelas IV e V relacionam, para as granulometrias de taguá #200 e #50 respectivamente, as médias (com os respectivos desvios padrão) das propriedades cerâmicas estudadas em função das composições de vidro utilizadas. Nestas tabelas também estão os valores médios para a massa perdida durante a queima (perda ao fogo).

Os resultados na tabela IV mostram claramente uma grande redução na absorção de água, conforme se aumenta a adição de vidro, o que é acompanhado por uma redução igualmente grande na porosidade. Isso mostra que a adição de vidro leva à obtenção de uma cerâmica bem menos porosa com uma adição razoável de pó de vidro, já que uma adição de 15% de pó de vidro reduz a porosidade e a absorção de água à aproximadamente um quarto da inicial.

Tabela IV - Valores médios das propriedades cerâmicas em função da porcentagem de vidro adicionada, para o taguá #200. PF: perda ao fogo, AA: absorção de água, MEA: massa específica aparente, MEAS: massa específica aparente da parte sólida.

% de Vidro	PF (%)	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm ³)	MEAS (g/cm ³)
0	6,3 ± 0,1	10,5 ± 2,8	21,9 ± 4,6	2,11 ± 0,11	2,70 ± 0,01
5	6,0 ± 0,1	7,3 ± 2,3	16,2 ± 4,4	2,23 ± 0,11	2,66 ± 0,02
10	5,7 ± 0,1	6,1 ± 1,8	14,9 ± 5,1	2,45 ± 0,88	2,91 ± 1,31
15	5,8 ± 0,1	2,0 ± 1,0	5,0 ± 2,4	2,48 ± 0,05	2,61 ± 0,01
20	4,8 ± 0,2	8,8 ± 0,5	17,6 ± 0,1	2,01 ± 0,02	2,43 ± 0,02
25	5,3 ± 0,1	8,5 ± 0,7	17,1 ± 0,1	2,04 ± 0,03	2,41 ± 0,01

A Tabela V mostra, também, uma queda na absorção de água e na porosidade, apesar de exibir um resultado menos pronunciado do que o apresentado na tabela II.

Tabela V - Valores médios das propriedades cerâmicas em função da porcentagem de vidro adicionada, para o taguá #50. PF: perda ao fogo, AA: absorção de água, MEA: massa específica aparente, MEAS: massa específica aparente da parte sólida.

% de Vidro	PF (%)	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm³)	MEAS (g/cm³)
0	6,2 ± 0,2	8,5 ± 0,6	17,2 ± 1,1	2,02 ± 0,03	2,44 ± 0,01
5	6,2 ± 0,3	6,5 ± 0,3	13,7 ± 0,6	2,09 ± 0,01	2,42 ± 0,01
10	6,1 ± 0,2	5,3 ± 1,1	11,3 ± 2,2	2,14 ± 0,04	2,41 ± 0,02
15	6,1 ± 0,2	3,9 ± 0,6	8,6 ± 1,3	2,18 ± 0,03	2,61 ± 0,01
20	5,4 ± 0,1	3,5 ± 0,1	7,8 ± 0,3	2,21 ± 0,01	2,39 ± 0,01
25	5,2 ± 0,2	4,5 ± 0,3	9,8 ± 0,6	2,17 ± 0,02	2,40 ± 0,01

A Figura 1 mostra o gráfico da absorção de água e da porosidade em função da massa de vidro adicionada para o taguá passante em malha ABNT 200, indicando que talvez exista uma porcentagem de adição de pó de vidro em torno de 15% para qual se obteria a menor porosidade e conseqüentemente a menor absorção de água possível.

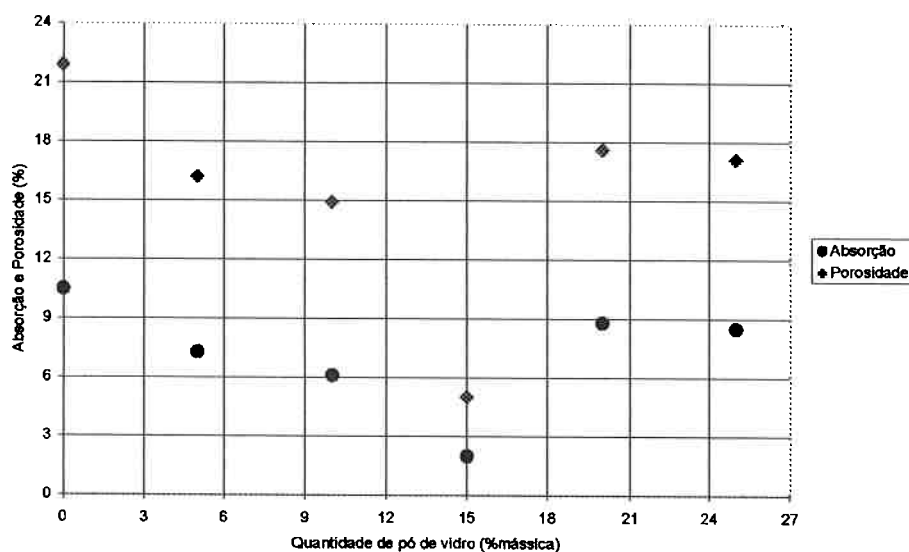


Figura 1 - Absorção de água e porosidade em função da massa de vidro para o taguá #200.

A Figura 2 mostra o gráfico da absorção de água e da porosidade em função da massa de vidro adicionada, para a granulometria #50 do taguá. Foi traçada, pelo software Microsoft Excel, a linha de tendência (polinômio do 2º grau) para cada uma das seqüências de pontos, mostrando a possibilidade de que a porcentagem de adição de pó de vidro para qual se obtém a menor porosidade e conseqüentemente a menor absorção de água possível seja em torno de 20%. O valor das correlações foi para a curva da porosidade e para a da absorção de água, respectivamente, 0,9742 e 0,9801.

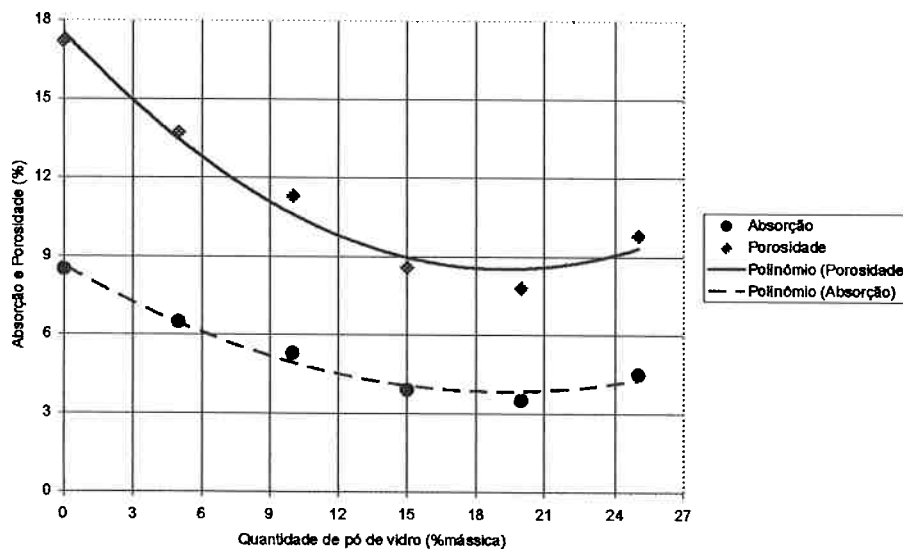


Figura 2 - Absorção de água e porosidade em função da massa de vidro para o taguá #50.

O gráfico da figura 3 compara os resultados de absorção de água para as duas granulometrias de taguá estudadas. A curva obtida para o taguá de granulometria mais fina mostra uma redução mais brusca na absorção de água com 15% de adição de pó de vidro, enquanto que a cerâmica obtida com o taguá passante em malha ABNT 50 apresenta um comportamento mais suave.

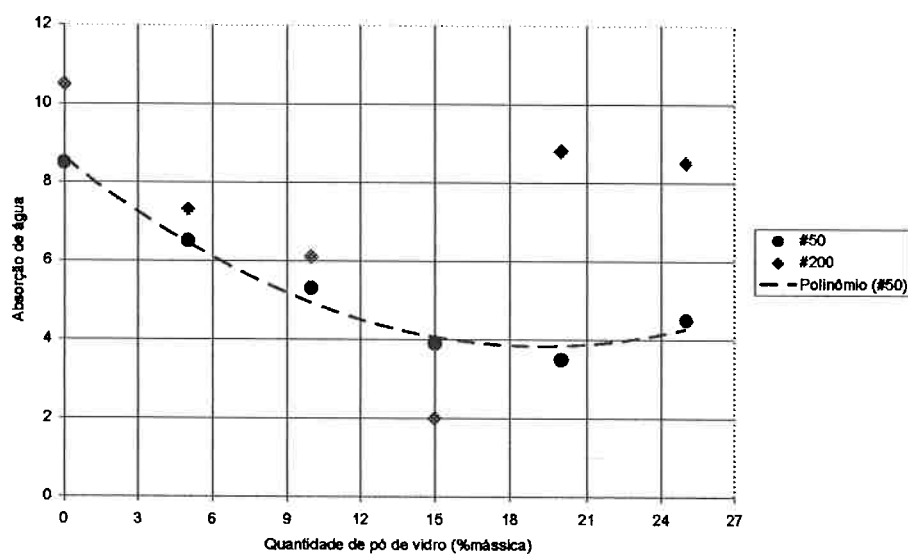


Figura 3 - Comparação da absorção de água para as granulometrias de taguá estudadas

4.2. Resistência mecânica

A figura 4 apresenta os valores médios resultantes do ensaio de resistência a flexão em três pontos (traçados pelo software Microsoft Excel), em função da porcentagem de pó de vidro adicionada, para as cerâmicas obtidas com as granulometrias #200 e #50. O gráfico mostra que a resistência mecânica do taguá carregado com vidro aumenta a partir da adição de 5% de vidro (em massa).

A cerâmica obtida com o taguá de granulometria mais fina apresentou uma melhoria muito mais acentuada na resistência mecânica, o que é coerente com os

resultados encontrados para porosidade e absorção de água nas tabelas IV e V. Essa cerâmica apresentou seu máximo de resistência mecânica coincidente com o ponto de menor porosidade e absorção de água, enquanto que aquela obtida com o taguá mais grosseiro apresentou já para 10% de adição de pó de vidro o seu valor máximo, em torno do qual oscilou para as demais composições.

Essa melhoria na resistência à flexão condiz com os resultados obtidos nos outros ensaios realizados, já que, como foi evidenciado nas tabelas anteriores, a adição de pó de vidro resultou em uma cerâmica menos porosa, ou seja, mais bem sinterizada, levando a se esperar por esse motivo uma peça mais resistente.

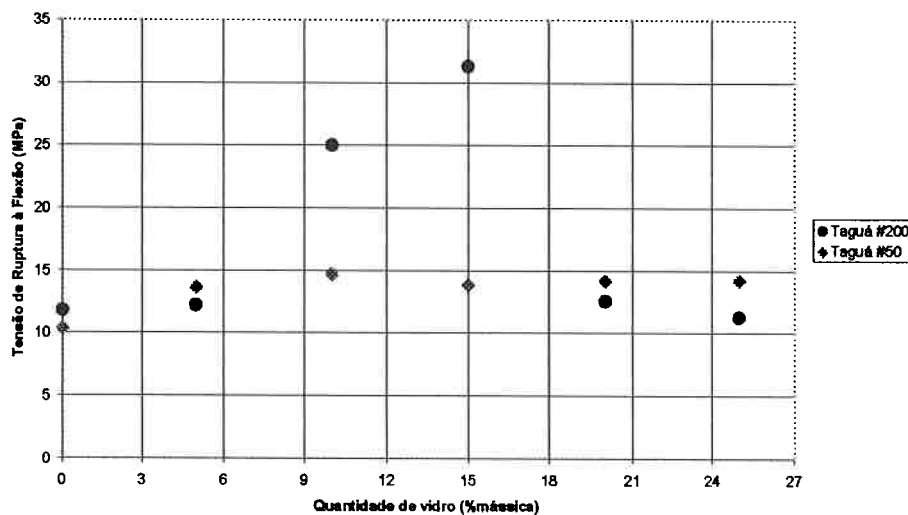


Figura 4 - Gráfico da tensão de ruptura à flexão em função da massa de vidro.

Como referência para comparação e de acordo com os resultados mostrados na Figura 4 e os valores obtidos para absorção de água (Tabelas IV e V), verifica-se que o material cerâmico obtido a partir de taguá puro passante em malha ABNT 50, o qual poderia ser enquadrado como semi-poroso (absorção de água <10%) segundo

a norma NBR 13817 (a qual trata da classificação de materiais cerâmicos de revestimento, tabela VI), quando carregada com pó de vidro (20%) passaria a ser enquadrada como cerâmica do tipo semi-grês (absorção <6%). Essa comparação serve apenas para relacionar de forma mais prática as alterações que ocorreram nas propriedades do taguá quando aditivado com pó de vidro. Já o material cerâmico obtido a partir de taguá puro passante em malha ABNT 200, passaria, segundo a mesma norma, de poroso (absorção de água >10%) a cerâmica do tipo grês (absorção <3%), quando carregada com 15% de pó de vidro.

Tabela VI - Classificação dos materiais cerâmicos de revestimento segundo NBR 13817

Grupo	Faixa de Absorção	Equivalente à
Bla	0 a 0,5%	Porcelanato
BIb	0,6 a 3,0%	Gres
BIIa	3,0 a 6,0%	Semi-Gres
BI Ib	6,0 a 10,0%	Semi-poroso
BIII	≥ 10,0%	Poroso

Inicialmente, apenas com o taguá puro, a cerâmica obtida com o taguá mais fino mostra-se mais porosa e com uma resistência mecânica próxima à da outra cerâmica. No entanto, ao se adicionar esta se torna bem mais resistente e muito menos porosa, exibindo uma melhoria em função do pó de vidro adicionado mais acentuada.

Devido ao fato de apresentar quase todo o ganho de resistência mecânica apenas com 5% de pó de vidro decidiu-se fazer a estatística de Weibull para a cerâmica obtida com taguá de maior granulometria. A análise estatística de Weibull foi aplicada para os resultados de resistência mecânica dos corpos de prova de todas as composições ensaiadas. As curvas evidenciam que a adição de vidro leva, já com

a adição de 5% em massa, a uma cerâmica mais forte, e que o material não apresenta ganho ou perda significativa na resistência mecânica para maiores adições de vidro em pó. A figura indica também que, para as adições de 5 e 10% de vidro em pó é possível que o vidro esteja introduzindo o surgimento de uma segunda família de defeitos, uma vez que para essas duas composições a distribuição de pontos não pode ser aproximada por uma única reta, o que não acontece com as composições com 15-25% de vidro.

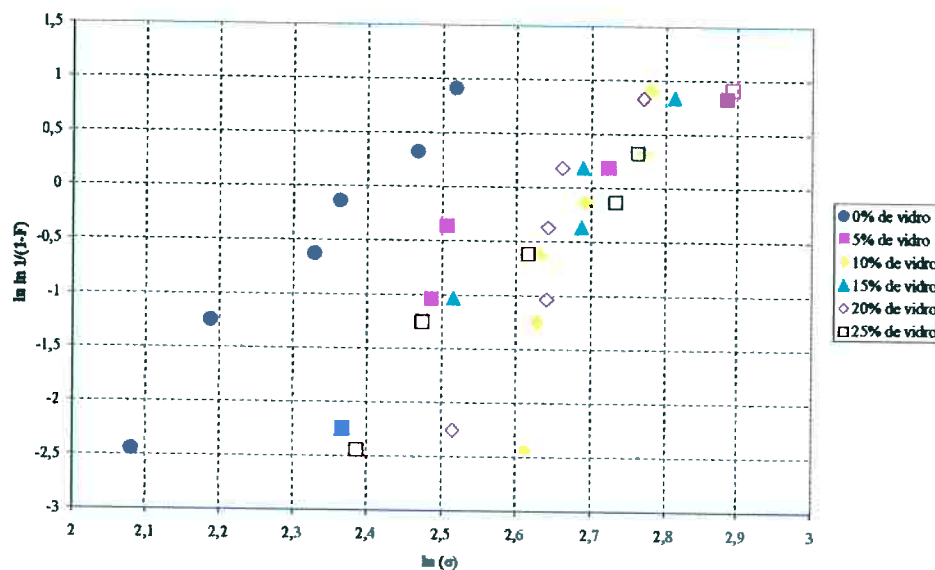


Figura 5 - Gráfico de Weibull para os corpos de prova obtidos com taguá #50

A tabela VII mostra os valores do módulo de Weibull (m) para as amostras estudadas confeccionadas com o taguá de granulometria mais grossa (#50). O valor desse módulo mostra-se variando dentro de uma faixa, com valores entre 6 e 9, uma vez que são descartadas da análise as amostras mais fracas dentro das composições de 5 e 10% de vidro (as amostras que introduzem uma inclinação de reta diferente, as

quais devem ter-se fraturado pelo novo tipo de defeito introduzido pelo vidro). A única exceção encontrada quanto ao valor do módulo de Weibull é para o grupo de amostras com 20% de adição de vidro em pó, o qual não apresenta um valor dentro da faixa citada acima e sim um valor substancialmente maior ($m = 12,4$). Esse valor diferenciado de módulo de Weibull corresponde justamente à composição para a qual se encontrou os menores valores de porosidade e absorção de água. Dessa maneira, pode-se concluir que a introdução do vidro na composição das peças não altera significativamente a dispersão dos resultados de resistência mecânica, segundo o valor de m , com exceção feita à composição contendo 20% de vidro em pó.

Tabela VII - Valores do módulo de Weibull para as adições de vidro em pó, para taguá #50

% de Vidro	m
0	7,1
5	6,5
10	8,9
15	6,7
20	12,4
25	6,2

4.3. Resumo – efeito da adição de pó de vidro sobre o comportamento da cerâmica

Foram estudadas as características cerâmicas e resistência mecânica à flexão de cerâmica vermelha de taguá quando carregada com pó de vidro, em porcentagens mássicas de 0, 5, 10, 20 e 25%. Os resultados indicaram que quando se aumenta o teor de vidro obtém-se uma redução sensível na absorção de água e na porosidade do material, bem como um aumento na resistência à flexão, mais acentuado para a

cerâmica onde se utilizou o taguá de granulometria mais fina. Fato que se deve provavelmente à maior área de contato dessa granulometria mais fina, o que por sua vez possivelmente permitiu que se obtivesse uma cerâmica mais bem sinterizada e homogênea.

Os resultados obtidos mostram que se alterando a granulometria do taguá utilizado ainda são conseguidas expressivas melhorias nas propriedades da cerâmica, no entanto, um pouco menos acentuadas do que aquelas encontradas quando o taguá encontrava-se com uma granulometria mais fina. Segundo mostra a figura 2 é provável que exista uma adição de pó de vidro máxima onde se conseguem melhorias nas propriedades do material, que neste caso seria em torno de 20% de adição em massa de pó de vidro.

4.4. Distribuição granulométrica

Os resultados dos ensaios de distribuição granulométrica nas figuras 6 e 7 mostram que o taguá passado em malha #200 apresenta um tamanho médio de partícula de $5,57\mu\text{m}$, menor do que o pó de vidro passado na mesma malha ($14,41\mu\text{m}$). É interessante notar que o pó de vidro mostra uma distribuição mais concentrada em torno da média, devido a uma distribuição de tamanhos de partícula mais homogênea.

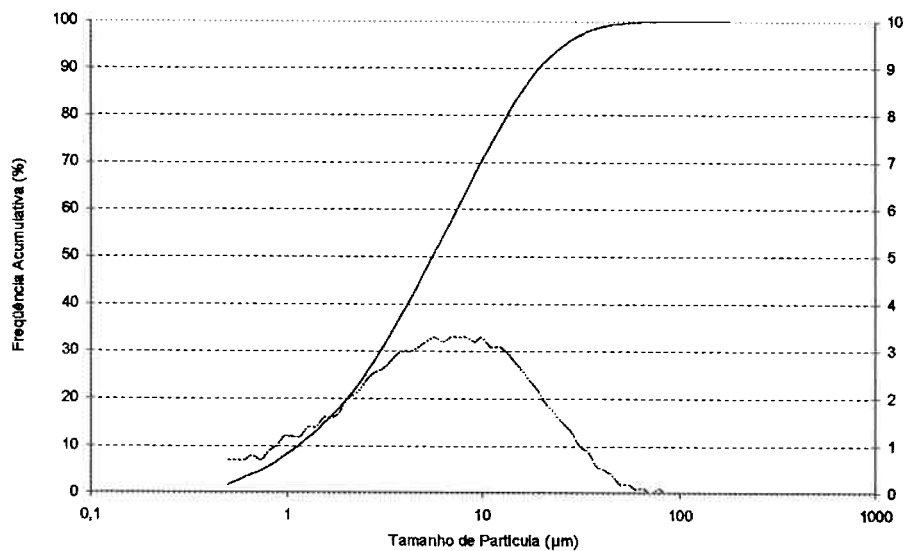


Figura 6 - Distribuição granulométrica do taguá passado em malha #200.

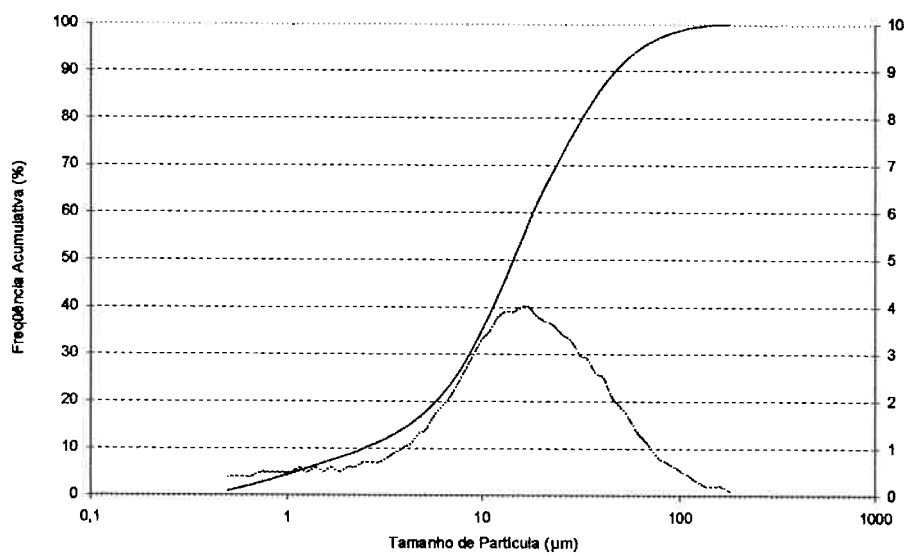


Figura 7 - Distribuição granulométrica do vidro passado em malha #200

4.5. Análise da microestrutura

4.5.1. Difração de raios-X

A análise por difração de raios-X (DRX) foi realizada nas amostras de taguá em três granulometrias diferentes (amostra bruta, #50 e #200) com dois objetivos principais. O primeiro deles era determinar se alguma fase mineral estava sendo retida por alguma das duas peneiras empregadas nos trabalhos anteriores. Para tanto uma curva de difração de raios-X foi levantada para o taguá em cada uma das malhas usadas e comparada com uma curva obtida para o taguá na granulometria entregue pelo fornecedor da matéria prima.

A comparação das curvas encontra-se na figura 8, mostrando que não houve alteração significativa na composição de fases mineralógicas presentes em cada uma das amostras. Esse fato indica que as diferenças nos comportamentos cerâmico e mecânico das cerâmicas não se devem a uma alteração na composição das matérias primas empregadas.

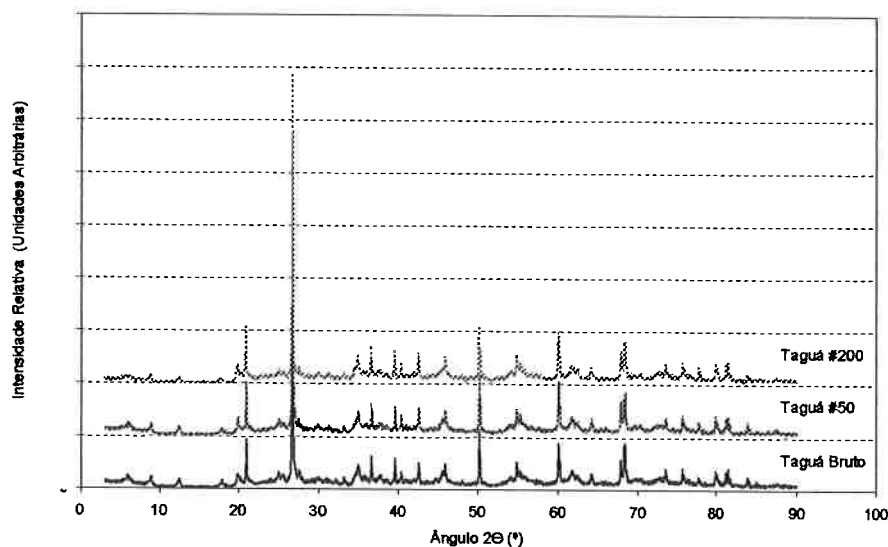


Figura 8 - Curvas de difração de raios-X para as granulometrias estudadas.

O segundo objetivo da análise por difração de raios-X está ilustrado na figura 9, que mostra a curva levantada por DRX para uma amostra de taguá bruto. A identificação dos picos na figura 7 mostra que as fases mineralógicas encontradas estão de acordo com aquilo que foi apontado em outros trabalhos da literatura^[4,5].

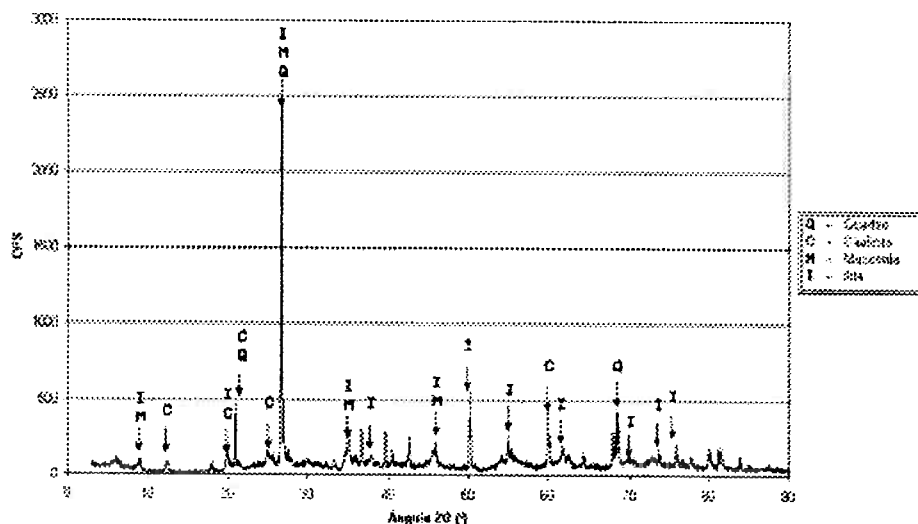


Figura 9 - Curva de difração de raios-X do taguá bruto com as fases mineralógicas identificadas

Com o intuito de se tentar elucidar o motivo das alterações sofridas pela cerâmica em suas propriedades tecnológicas, quando nesta é adicionado pó de vidro, as curvas de difração de raios-X apresentadas na figura 10 foram levantadas para que fosse possível investigar se alguma alteração nas fases cristalinas do material estaria ocorrendo em função da adição do vidro.

Os resultados indicam alterações podem ser notadas à medida que o teor de vidro aumenta na cerâmica, a primeira delas é que ao menos duas novas fases cristalinas começam a surgir. Além disso, pode-se notar que os picos da amostra de 15% de vidro mostram algumas alterações e deformações que não estão presentes nas outras amostras, como arredondamentos de alguns picos que nas demais amostras sofrem pouca ou nenhuma mudança.

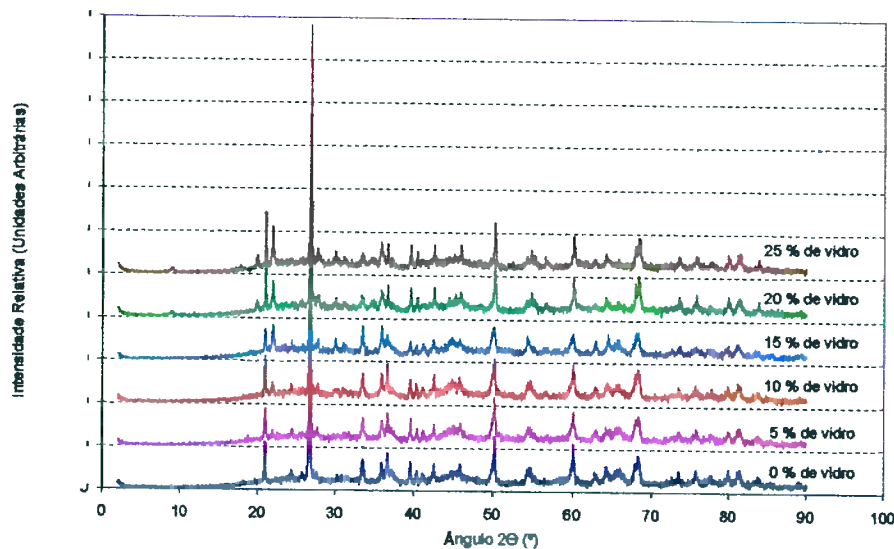


Figura 10 - Curvas de DRX das cerâmicas obtidas com o taguá #200.

A figura 11 mostra um detalhe da faixa de 2θ entre 15 e 30° destacando as alterações comentadas anteriormente. As setas 1 e 2 estão apontando para dois picos que não existiam antes e surgiram conforme foi aumentando-se o teor de vidro adicionado. O pico indicado pela seta 1 começa a manifestar-se apenas a partir da amostra com 20% em massa de vidro e de maneira bem menos pronunciada do que aquele indicado pela seta 2.

Já o pico indicado pela seta 2 mostra um crescimento diretamente proporcional à adição de pó de vidro e mais evidente do que qualquer outra alteração percebida na comparação das curvas. Tentou-se identificar este pico e encontrou-se uma provável correspondência apenas com a fase cristobalita da sílica, apesar dessa fase formar-se, quando isolada, à elevadas temperaturas, da ordem de 1470 °C.

A seta nº 3 mostra um dos picos que sofre um arredondamento e redução de altura na amostra com 15% de pó de vidro e que nas amostras com maior teor de vidro volta a apresentar-se maior e mais alongado. Esse mesmo fato pode ser notado de maneira mais sutil em outros picos do difratograma. É interessante notar que a composição com 15% em massa de pó de vidro é justamente aquela que apresenta o ponto de máximo nas melhorias observadas nas propriedades tecnológicas da cerâmica. Comportamentos semelhantes nos DRX's foram reportados por Tucci e colaboradores ^[11], entretanto para cerâmicas do tipo *stoneware* para piso.

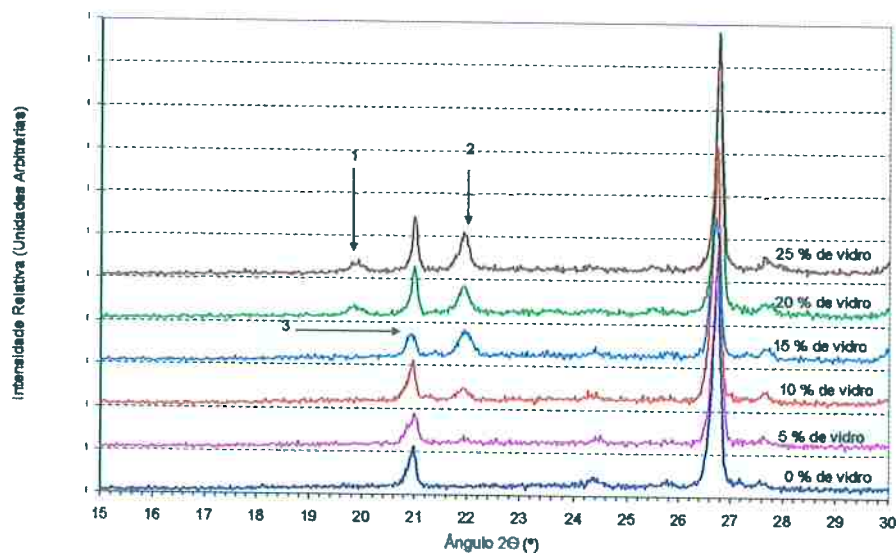


Figura 11 - Detalhe das curvas de DRX das cerâmicas obtidas com o taguá #200.

4.5.2. Microscopia

As imagens obtidas pela microscopia óptica das amostras cerâmicas são mostradas nas figuras 12 a 15. Foram analisadas amostras sem a adição de pó de vidro e com adição de 15% de pó de vidro, em massa, para as duas granulometrias de taguá estudadas.

As fotos mostram principalmente uma diferença na homogeneidade das estruturas obtidas em cada caso. A microestrutura obtida com o taguá passado em malha #50 mostra-se muito menos homogênea do que a com o taguá passado em malha #200, a qual se mostra mais coesa e uniforme, indicando um aparente grau de sinterização maior. A observação visual das amostras obtidas com o taguá mais grosso (#50), na ausência de vidro, indicou a presença de fases de contornos irregulares de cor branca espalhados pela amostra, além da presença de poros esporádicos. Esses destaques desaparecem nas amostras contendo 15% de vidro, apesar dessa diferenciação não poder ser claramente observável nas figuras (por limitações de qualidade no processo de transferência das imagens do estereoscópio para o computador).



Figura 12 - Microestrutura cerâmica, taguá #50, 0% de vidro.



Figura 13 - Microestrutura cerâmica, taguá #200, 0% de vidro.



Figura 14 - Microestrutura cerâmica, taguá #50, 15% de vidro.



Figura 15 - Microestrutura cerâmica, taguá #200, 15% de vidro.

As imagens também mostram que a adição de vidro torna a cerâmica mais escura, fato esse que é mais pronunciado nas peças confeccionadas com o taguá de menor granulometria. Esse efeito também foi observado por Matteucci, Dondi e Guarini^[11], porém em pisos cerâmicos do tipo *stoneware*. Na figura 16 estão colocados de cima para baixo os seis corpos de prova das composições com 0, 5, 10 e 15% em massa de pó de vidro da cerâmica confeccionada com taguá de

granulometria mais fina, mostrando o escurecimento progressivo do material em função da adição de vidro.

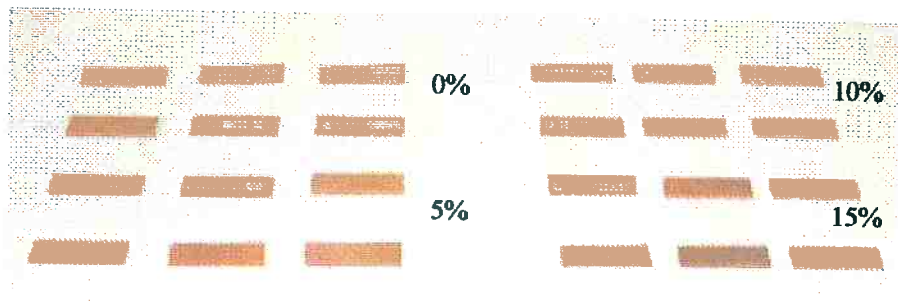


Figura 16 - Mudança na coloração em função da adição de vidro

4.5.3. Resumo – avaliação microestrutural

A mudança na granulometria do taguá empregado como matéria prima para fabricação de peças de cerâmica vermelha aditivadas com pó de vidro soda-cal, causou alterações nas propriedades tecnológicas dos produtos obtidos, as quais se relacionam às microestruturas dos mesmos. A microestrutura observada nas amostras confeccionadas com o pó de taguá mais fino mostrou-se muito mais homogênea e contínua, fato em grande parte responsável pelo melhor desempenho da cerâmica obtida. As curvas de raios-X mostraram que todas as fases presentes no taguá bruto encontram-se nos taguás separados em malhas mais finas, ou seja, a composição manteve-se constante em todas as etapas. As curvas de DRX também permitem verificar que ocorrem mudanças na estrutura cristalina dos corpos queimados

conforme pó de vidro é adicionado, mudanças essas que provavelmente estão relacionadas com as alterações observadas nas propriedades tecnológicas da cerâmica. Outra evidência observada é a de que a coloração torna-se mais escura quanto maior a adição de pó de vidro.

5. Conclusões

- A adição de vidro em pó leva à melhorias nas propriedades cerâmicas e mecânicas do material.
- As melhorias são menos acentuadas na cerâmica confeccionada com o taguá de granulometria de #50
- Na faixa de composições estudada (até 25%) é provável a existência de um ponto máximo de adição de vidro em pó onde ocorra melhoria (redução) na absorção de água e porosidade do material, possivelmente em torno de 20%, em massa, para a cerâmica obtida com o taguá de malha mais grossa (#50) e 15% para a outra (#200)
- Para a resistência mecânica, a melhoria já é atingida com um teor de vidro em torno de apenas 5% no caso da cerâmica obtida com o taguá passado em malha #50.
- A microestrutura observada nas amostras confeccionadas com o pó de taguá mais fino mostrou-se mais homogênea e contínua.
- Uma estrutura mais contínua levou a uma cerâmica de melhor desempenho.
- A composição mineralógica do taguá não se altera mudando-se a sua granulometria.
- Quanto maior a adição de vidro em pó mais escura é a coloração da cerâmica obtida.
- A adição de pó de vidro resulta em alterações nas fases cristalinas do material, principalmente porque a presença de uma fase líquida melhora a sinterização destas.

6. REFERÊNCIAS

1. Boks, C., Tempelman, E. "Future disassembly and recycling technology." *Futures*, v.30, n.5, p. 425-42, 1998.
2. Nakamura, S. "An interindustry approach to analyzing economic and environmental effects of the recycling of waste." *Ecological Economics*, v.28, p.133-45, 1999.
3. Souza Santos, P. "Ciência e tecnologia de argilas." – 2º ed., volume 1, Edgard Blücher, São Paulo, 1989. p. 148 –150.
4. Cosin, S., Souza Santos, H., Souza Santos, P. "Caracterização e propriedades de taguás da região de Jarinú, Jundiaí, SP" – Parte I – Propriedades cerâmicas e análise térmica diferencial. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 37, Curitiba, 1993. Anais. São Paulo, Associação Brasileira de Cerâmica, 1993.
5. Cosin, S., Souza Santos, P. "Caracterização e propriedades de taguás da região de Jarinú, Jundiaí, SP" – Parte II – Algumas propriedades cerâmicas dos taguás "brutos" e extrudados. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 38, Blumenau, 1994. Anais. São Paulo, Associação Brasileira de Cerâmica, 1994.
6. Hreglich, S. "Glass cullet as a strategic resource for glassmakings and other industrial sectors."
7. Yugai, N. S., Loginov, V. M. "Ceramic mixtures with decreased porosity for decorative majolica." *Glass and Ceramics*, vol. 58, n^{os}. 1 - 2, 2001.
8. Yugai, N. S. "Ceramic mixtures containing cullet for decorative majolica." *Glass and Ceramics*, vol. 58, n^{os}. 9 -10, 2001.

9. Leshina, V. A., Pivnev, A. L. "Ceramic wall materials using glass waste." *Glass and Ceramics*, vol. 59, n^o. 9 -10, 2002.
10. Shchepochkina, Yu. A., Akulova, M. V., Fedosov, S. V. "Use of waste in a vitreous coating for a brick." *Glass and Ceramics*, vol. 57, n^o. 11 -12, 2000.
11. Matteucci, F., Dondi, M., Guarini, G. "Effect of soda-lime glass on sintering and technological properties of porcelain stoneware tiles." *Ceramics International*, vol. 28, p. 873 – 880, 2002.
12. Tucci, A., Espósito, L., Rastelli, E., Palmonari, C., Rambaldi, E. "Use of soda-lime scrap-glass as a fluxing agent in a porcelain stoneware tile mix." *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 24, p. 83 – 92, 2004.
13. Bragança, S. R., Bergamann, C. P., "Traditional and glass powder porcelain: Technical and microstructure analysis." *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 24, p. 2383 – 2388, 2004.
14. Doremus, R.H. "Glass Science." 2.ed. New York, Wiley Interscience, 1994.
15. Norma ABNT – NBR 13817

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Confeccionar corpos de prova com as composições acima de 25% de pó de vidro, para que as curvas de DRX sejam levantadas para verificar se as fases cristalinas que surgiram continuam a ser formadas e se realmente sua formação é proporcional à quantidade de vidro adicionada.
- Estudar as composições intermediárias entre 10 e 20% de pó de vidro, de modo que as curvas de absorção de água e resistência mecânica possam ser obtidas com um detalhe e precisão maiores.
- Realizar ensaios que permitam determinar quais fases cristalinas estão sendo formadas.
- Realizar uma microscopia eletrônica de varredura para determinar-se de forma mais clara as alterações provocadas na microestrutura pela adição de pó de vidro.