



## INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE VIDRO DE EMBALAGEM EM CERÂMICA VERMELHA

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.6.23.IV-009>

Geovana C.G Delaqua, G.C.G.\*, Carlos Alberto O. Guimarães, Henry A. L. Colorado, Carlos Maurício F.Vieira

\* Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) - Laboratório de Materiais Avançados.

E-mail: geovanagirondi@pq.uenf.br

### RESUMO

Os resíduos de componentes industrializados, regularmente descartados pela sociedade, estão contribuindo cada vez mais para a poluição ambiental, e um deles é o vidro de embalagem pós-consumo. Muitas formas estão sendo estudadas para a reutilização deste resíduo, e uma possível solução é a de ser incorporada em produtos de cerâmica vermelha, que além de retirar grande quantidade de vidro descartado de forma incorreta, contribui para melhoria das peças objetivo encontrar uma aplicação útil e ambientalmente viável às embalagens de múltiplo-uso, avaliando a influência da incorporação do pó de vidro em diferentes granulometrias nas propriedades físico-mecânicas de uma massa argilosa utilizada na produção de cerâmica vermelha. As matérias-primas foram caracterizadas por meio das análises química (FRX). Foram produzidos corpos de prova por prensagem uniaxial, com incorporação de 10, 20 e 30% de resíduo de vidro em forma de pó, nas granulometrias de 40, 100, 200 e 325#, queimados na temperatura de 900°C. Após isto, foram determinadas propriedades, como: densidade aparente a seco, absorção de água, retração linear e tensão de ruptura à flexão. Com os resultados obtidos, foi possível afirmar que a incorporação de resíduo de vidro nas contribui significativamente nas propriedades avaliadas, tendo uma redução significativamente na absorção de água e um aumento na resistência das peças. Além de melhoria na qualidade da cerâmica vermelha, a incorporação de resíduo de vidro é uma alternativa viável e tecnicamente vantajosa para a reciclagem desse tipo de resíduo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resíduo; Embalagens Pós-Consumo; Vidro; Incorporação; Cerâmica Vermelha.

### ABSTRACT

Waste from industrialized components, regularly discarded by society, are increasingly contributing to environmental pollution, and one of them is post-consumer packaging glass. Many ways are being studied for the reuse of this waste, and a possible solution is to incorporate it into red ceramic products, which, in addition to removing a large amount of incorrectly discarded glass, contributes to the improvement of the pieces in order to find a useful application and environmentally viable to multiple-use packaging, evaluating the influence of the incorporation of glass powder in different particle sizes on the physical-mechanical properties of a clayey mass used in the production of red ceramics. The raw materials were characterized through chemical analysis (FRX). Specimens were produced by uniaxial pressing, with the incorporation of 10, 20 and 30% of glass waste in powder form, in granulometries of 40, 100, 200 and 325#, fired at a temperature of 900°C. After that, properties were determined, such as: dry bulk density, water absorption, linear shrinkage and flexural strength. With the results obtained, it was possible to state that the incorporation of glass residue in the pieces contributes significantly to the evaluated properties, with a significant reduction in water absorption and an increase in the resistance of the pieces. In addition to improving the quality of red ceramics, the incorporation of glass waste is a viable and technically advantageous alternative for recycling this type of waste.

**KEYWORDS:** Waste; Post-Consumer Packaging; Glass; Incorporation; Red ceramic.

### INTRODUÇÃO

Devido aos padrões da sociedade moderna e novas tecnologias, tem aumentado significativamente a extração de recursos naturais, e o consumo de produção, o que leva a uma vasta produção de resíduos sólidos (LANDIM, 2016).



Esse aumento na quantidade de resíduos gerados tanto pelas atividades industriais, urbanas e agrícolas tem causado preocupações quanto à disposição final dos resíduos (MONTEIRO, 2008), e devido às exigências de órgãos ambientais, alternativas tem sido estudadas para a disposição correta dos resíduos (RIBEIRO & MORELLI, 2009; MORAIS, 2016, 2013), visto que são difíceis de serem reciclados naturalmente, e o descarte de forma incorreta pode causar graves problemas ambientais.

O mercado da reciclagem vem crescendo, pois praticamente todo tipo de processo gera resíduo, conseqüentemente novas estratégias de tratamento, incorporação e inertização são necessárias. Em 2010, no Brasil, foi criada a Lei nº 12.305/10 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que são diretrizes relacionadas à gestão, bem como a responsabilidade na destinação adequada dos resíduos dos diversos setores da sociedade. Aterros, embora apresentem uma concepção ambiental correta, não resolvem a questão, sendo a opção menos favorável na pirâmide de priorização do gerenciamento de resíduos sólidos (Lei 12.305/2010).

O vidro é um material 100% reciclável, que pode ser reutilizado infinitas vezes sem mudar sua composição inicial, ou também aplicado em outros materiais. Segundo o Compromisso Empresarial Para Reciclagem – CEMPRE (2019), o Brasil produz em média 1,3 milhões de toneladas de embalagens de vidro por ano, utilizando cerca de 40% de matéria-prima reciclada na forma de cacos. A reutilização de embalagens pode contribuir diretamente para a preservação do meio ambiente, pois além de consumir menos matéria-prima e energia, evita a emissão de CO<sub>2</sub>.

Mesmo sendo totalmente reaproveitada no processo produtivo de novos produtos, segundo dados da Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro – ABIVIDRO, ainda é baixo a reciclagem de vidro, isto devido ao alto custo do transporte e da coleta. Outro grande problema é a falta de gestão adequada, o que faz com que grande quantidade deste produto seja descartada incorretamente em aterros sanitários, sendo muito prejudicial ao ambiente, principalmente por não ser biodegradável (BRASIL, 2010).

Diante do exposto, é fundamental encontrar formas de reaproveitamento deste resíduo, e uma alternativa seria a incorporação deste resíduo na indústria cerâmica. Devido às características heterogêneas das argilas, a incorporação de resíduos de atividades industriais em produtos cerâmicos, além de reduzir impactos ambientais gerados pela utilização de recursos naturais (VIEIRA & MONTEIRO, 2009), pode ter um reaproveitamento de resíduos como matéria-prima, proporcionando melhorias nas propriedades das peças.

Alguns resíduos incorporados em cerâmicas atuam de modo a introduzir elementos não plásticos, ou inertes, ao material, enquanto outros atuam na redução do gasto energético da etapa de queima, que pode ser pelo fornecimento de energia (reações exotérmicas) (VIEIRA & MONTEIRO, 2009), ou através da redução de temperatura de queima de materiais cerâmicos. A incorporação de resíduo de vidro em produtos à base de argila é uma alternativa considerada muito viável, isto devido à compatibilidade entre a composição química da argila e do vidro, que são basicamente formados por sílica (SiO<sub>2</sub>), com um pequeno percentual de sódio (Na<sub>2</sub>O) e cálcio (CaO) (ABIVIDRO). Com isto, além da possibilidade de dar um destino ambientalmente correto para este tipo de resíduo, TEIXEIRA et al., (2008), afirmam que com a adição de vidro em cerâmica vermelha ocorre um aumento nos teores de óxidos fundentes, que são responsáveis pela formação da fase líquida e pela densificação das massas cerâmicas durante o processo de queima, contribuindo na melhoria das propriedades.

## OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo encontrar uma aplicação útil e ambientalmente viável às embalagens de múltiplo-uso, avaliando a influência da incorporação do pó de vidro em diferentes granulometrias nas propriedades físico-mecânicas de uma massa argilosa utilizada na produção de cerâmica vermelha.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Materiais

No desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados como matérias-primas: uma massa argilosa e vidro de embalagens múltiplo uso na forma de pó. A massa cerâmica analisada, cuja formulação foi elaborada empiricamente pela Cerâmica Sardinha, é constituída por 14% de areia amarela de Campos dos Goytacazes – RJ, 29% de argila amarela da mesma região e 57% de argila vermelha de Itaboraí- RJ. Já o vidro das embalagens foi doado e coletado em uma empresa de reciclagem (RECICAMPOS), em Campos dos Goytacazes



### Métodos

#### Beneficiamento das matérias-primas

Após coletadas as matérias-primas foram encaminhadas para o Laboratório de Materiais Avançados da UENF, onde passaram por beneficiamento. Inicialmente a massa argilosa foi seca em estufa 110°C por aproximadamente 24h para retirar a umidade do material, e a fim de diminuir o tamanho das partículas, foi desagregada com o auxílio de um triturador de mandíbula, e então com o auxílio de almofariz e pistilo de porcelana, até passagem completa em peneira granulométrica de 40#

O vidro inicialmente foi quebrado com um triturador de mandíbula, e posteriormente, com o auxílio de um moinho de bolas tiveram seu tamanho de partículas diminuído até obter-se a granulometria, o que variou de acordo com a granulometria utilizada. Neste trabalho foram utilizadas as granulometrias de 40, 100, 200, 325 mesh.

#### Caracterização das matérias-primas

##### Análise Química - Fluorescência de Raios X (FRX)

Através desta técnica, foi realizada a análise química semi-quantitativa, tanto na argila como no resíduo de vidro. Para isso, foi utilizado um espectrofotômetro de fluorescência de raios-X da marca UNICAM, modelo Solar 969, do SENAI - Unidade de Criciúma/SC - Centro de Tecnologia em Materiais - Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais. A perda ao fogo foi determinada através da obtenção do peso das massas antes e depois.

#### Preparo das composições

Depois de peneiradas as matérias-primas, foram preparadas formulações contendo a massa cerâmica e vidro, que para uma melhor homogeneidade das massas, foram misturadas à seco por 20 minutos em um moinho, para posterior umidificação da massa. Uma formulação contendo apenas a matéria-prima argilosa foi utilizada como referência.

#### Dilatometria linear

A determinação do coeficiente de dilatação linear é caracterizada pelo aumento ou retração do comprimento de um corpo ao ser submetido a um aumento de temperatura. Para isso, foram preparados corpos de prova cilíndricos com aproximadamente 10mm de altura, das formulações contendo 30% de resíduo nas granulometrias investigadas (40, 100, 200 e 325#). Para isto, foi utilizado um dilatômetro da marca NETZSCH - Modelo DIL 402, no Laboratório de Materiais Avançados- LAMAV, da UENF

#### Processamento dos corpos de prova

Depois do preparo das composições contendo 10%, 20% e 30% de resíduo nas granulometrias 40, 100, 200 e 325#, as massas foram umedecidas com spray de água com 8% da massa, de modo a possibilitar a conformação. Após, para uma melhor uniformidade da umidade, as massas foram novamente passadas em peneira 40 mesh, e acondicionadas em sacos plásticos por um período de 24 h.

Os corpos de prova foram conformados por prensagem uniaxial, utilizando uma matriz de aço retangular com dimensões 114 X 25,0 X 11,0 mm, utilizando uma pressão de compactação de 35 MPa. Após a conformação, as dimensões e massas dos corpos de prova foram medidas utilizando-se um paquímetro digital da marca MITUTOYO (resolução  $\pm 0,01$ mm), e balança digital INSTRUTHERM, modelo Bd-600 (precisão 0,1g), respectivamente. Para a perda da água adsorvida, os corpos de prova foram secos em estufa a 110°C por 24 horas até peso constante. Após a secagem, os corpos de prova foram queimados em forno laboratorial tipo mufla, com taxa de aquecimento de 2°C/min, até atingir as temperaturas de patamar (900°C), onde foram mantidos na temperatura por 180 min. O resfriamento foi por convecção natural, desligamento do forno, até atingir a temperatura ambiente. Quando retirados do forno, os corpos de prova foram novamente medidos e pesados, utilizando a mesma balança e paquímetro já citados, para a determinação das características físicas e mecânicas das amostras.

#### Determinação das propriedades físicas e mecânicas



Após a sinterização, os corpos de prova das composições elaboradas foram submetidos à determinação de propriedades físicas e mecânicas como: densidade a seco, retração linear, absorção de água e resistência à flexão uniaxial por três pontos.

Foram realizadas medições do comprimento dos corpos de prova utilizando um paquímetro digital da marca MITUTOYO (de resolução de  $\pm 0,01$  mm) e através da balança digital Shimadzu modelo S3000 (precisão de 0,01 g), foi determinada a massa. A densidade aparente a seco das peças foi determinada pelo método dimensional, seguindo as normas ASTM C 373-72 (1977a) calculada pela seguinte expressão:

$$\rho \left( \frac{g}{cm^3} \right) = \frac{m}{V} \quad \text{equação (1)}$$

Onde:  $\rho$  é a densidade bulk da peça seca ( $g/cm^3$ )

m é a massa (g)

V é o volume ( $cm^3$ ) dos corpos de prova secos.

### Retração Linear de Queima (RLq)

Para a determinação da retração linear, neste trabalho foi de acordo com a norma ASTM C326 – 09 (2018), onde os corpos de prova tiveram suas dimensões medidas antes e após a queima, utilizando-se um paquímetro digital marca MITUTOYO (resolução  $\pm 0,01$ mm). Posteriormente, a retração linear das peças foram calculadas utilizando a Equação 2. Segundo Santos (1989), se o resultado for negativo, significa que houve retração, caso contrário, expansão.

$$Rq (\%) = \frac{Ls - Lq}{Lq} \times 100 \quad \text{equação (2)}$$

Sendo:

Rq -Variação da retração linear após a queima (em porcentagem);

Ls -Comprimento do corpo de prova seco;

Lq-Comprimento do corpo de prova após a queima.

### Absorção de Água (AA)

Esta característica está diretamente relacionada à porosidade da peça e também a outras características como resistência mecânica, resistência ao gelo, dentre outras. Este ensaio foi executado de acordo com a NBR 15270/17, onde os corpos de prova foram secos em estufa a  $110^\circ C$  até que a massa num intervalo de 24h seja menor que 0,1%. Após, foram retirados e mantidos em um dessecador com sílica gel até atingirem temperatura ambiente, para então ser medida a massa. Os corpos de prova foram imersos em um recipiente contendo água deionizada, e mantidos em ebulição por 2horas. Em seguida, foram resfriados e submersos em água corrente até que entrem em equilíbrio. Com uma flanela ligeiramente úmida, a água superficial de cada peça foi retirada e as massas registradas.

O índice de absorção de água (AA) foi calculado com o auxílio da Equação 3:

$$AA (\%) = \frac{Pu - Ps}{Ps} \times 100 \quad \text{equação (3)}$$

Onde:

AA = Índice de absorção de água (em porcentagem);

Pu = Peso da peça saturada em água; úmida (g);

Ps = Peso da peça seca (g).

### Tensão de ruptura à flexão

Para a determinação da carga de ruptura e módulo de resistência à flexão por três pontos foi de acordo com a norma ASTM C674-77, utilizando uma máquina universal de ensaios de marca Instron e modelo 5582. A distância entre os



cutelos de apoio foi de 90 mm, aplicando uma carga pelo cutelo superior com velocidade de 1 mm/min. Para determinar a carga de ruptura da placa, foi utilizando a Equação 4:

$$\sigma_f = \frac{3 * L * P}{2 * b * d^2} \quad \text{Equação ( 4 )}$$

Onde :

$\sigma$ : tensão de ruptura à flexão, (MPa);

P: carga aplicada no corpo de prova no momento da ruptura, (Newton);

L: distância entre os cutelos de apoio, (mm);

b: largura do corpo de prova, (mm);

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os resultados das composições químicas das matérias-primas estudadas no desenvolvimento deste trabalho. A massa argilosa utilizada é composta essencialmente de óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) com 56,10% e óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) com 24,26% em massa, o que corresponde à 80,3% em massa. Esses estão combinados, em sua maior parte, formando aluminossilicatos como a mica muscovita/ilita e a caulinita, que podem estar presentes em quantidades representativas da composição. O  $\text{Al}_2\text{O}_3$  também pode estar presente na forma de gibsitita, que é um mineral do hidróxido de alumínio e o  $\text{SiO}_2$  também pode estar presente na forma de quartzo (MONTEIRO E VIEIRA, 2002).

Tabela 1: Composição química das matérias-primas (% em peso).

Componentes	Matérias-Primas	
	Massa Cerâmica	Vidro de embalagens
$\text{Al}_2\text{O}_3$	24,26	1,81
$\text{CaO}$	0,28	9,31
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	7,31	0,25
$\text{K}_2\text{O}$	1,1	2,23
$\text{MgO}$	0,96	0,37
$\text{MnO}$	<0,05	0,013
$\text{Na}_2\text{O}$	0,37	14,49
$\text{SiO}_2$	56,10	69,34
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,12	-
$\text{TiO}_2$	1,06	0,04
$\text{SO}_3$	0,10	0,43
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	-	0,070
$\text{SrO}$	-	0,042
$\text{Rb}_2\text{O}$	-	0,018
$\text{ZrO}_2$	-	0,014
$\text{CuO}$	-	0,011
$\text{PbO}$	-	<0,005
$\text{ZnO}$	-	<0,004
PF*	7,91	3,55

PF\* Perda ao Fogo

A razão  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  é um parâmetro indicativo da quantidade de argilomineral e quartzo presentes, sendo quanto mais próximo for esta relação de 1,18, que é o valor correspondente à caulinita teórica, maior será a quantidade de caulinita presente na argila. A argila utilizada em questão apresenta uma razão de 2,31 o que indica uma maior quantidade de  $\text{SiO}_2$  livre na forma de quartzo em comparação das quantidades de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ligados na forma de caulinita. É notável o baixo percentual de compostos alcalinos ( $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$ ). Estes óxidos estão geralmente associados à presença de carbonato de cálcio ou calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), carbonato de magnésio ( $\text{MgCO}_3$ ) ou carbonato duplo de cálcio e magnésio ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), portanto, nota-se que a concentração de carbonatos na argila estudada é baixo (MONTEIRO E VIEIRA, 2002). Os alcalinos terrosos ( $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$ ) contribuem para à formação de fase líquida durante a sinterização entre 950



e 1000°C, promovendo um aumento na densificação do corpo de prova e conseqüentemente uma maior retração linear, aumentando assim a resistência mecânica do material. (CARGNIN et al., 2011).

Nota-se a presença elevada de óxido de ferro III ( $Fe_2O_3$ ), que é responsável pela coloração avermelhada da maioria das cerâmicas após a queima, isso se o teor for superior a 2,5%. A massa cerâmica utilizada possui um percentual de 7,31%, fazendo com que após a queima as peças cerâmicas adquiram uma coloração avermelhada após o processo de sinterização.

É observada ainda uma considerável perda ao fogo de 7,91%, que está associado à perda de massa do material devido ao aumento da temperatura. Segundo Vieira e Pinheiro (2011), esta perda ao fogo (PF) ocorre principalmente devido à eliminação de água de constituição da caulinita, bem como, a desidratação de hidróxidos e oxidação de matéria orgânica presentes nas argilas. Uma perda ao fogo excessiva acarreta retração e porosidade durante a queima, o que pode levar a defeitos nas peças.

Nesta mesma tabela 1 é apresentada a composição química do vidro de embalagens múltiplo-uso. É possível observar que o principal componente do vidro é a sílica ( $SiO_2$ ), com 69,34%, seguido pelo óxido de sódio ( $Na_2O$ ) e óxido de cálcio ( $CaO$ ), representando 14,49 e 9,31%, respectivamente. A sílica é importante para constituir a estrutura de vidro, já os óxidos de sódio, cálcio e potássio são utilizados como modificadores de rede cristalina e estabilizantes, contribuindo na dissolução da sílica, além de baixar a viscosidade e reduzirem a resistência ao ataque hidrolítico (JANETTI e JAIME, 2022; SCHAEFFER; LANGFELD, 2020).

O óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) está na composição do vidro para conferir maior resistência a choques mecânicos. Os óxidos Mg e Sr são encontrados em menores percentuais, e são adicionados para aumentar a resistência do vidro suportando mudanças bruscas de temperaturas. Outros óxidos, como  $Fe_2O_3$ , MnO,  $TiO_2$ ,  $Cr_2O_3$ , CuO são adicionados como matérias-primas nos fornos para dar cor ao vidro, e são utilizados de acordo com a finalidade final.

Embora possam estar presentes vários tipos de vidros, a composição química do vidro de embalagem é típica de vidro sodo-cálcico, o vidro comercial mais comum e o mais barato, o que representa cerca de 90% da produção. Eles são usados principalmente na produção de embalagens, como garrafas, potes e frascos, e também para produção de copos, vidro de janela, na indústria automobilística e em eletrodomésticos.

Na Figura 1 são apresentados os resultados da dilatometria linear reversível das formulações contendo 30% de resíduo de vidro, nas granulometrias estudadas (40, 100, 200 e 325#), e a massa referência. Inicialmente não se observa uma variação dimensional significativa das composições até aproximadamente a temperatura de 500°C. Por volta de 500 – 600°C pode-se notar a primeira retração das curvas. Esta retração inicial está associada à eliminação de água de constituição dos argilominerais, e à transformação da caulinita em metacaulinita em temperaturas superiores a 540°C, bem como a uma sinterização inicial das partículas (MARTELLI et al., 2021; MONTEIRO e VIEIRA, 2004).

A segunda retração ocorre entre 800 - 900°C e pode estar associada ao início da sinterização da argila. Em temperaturas superiores a 1000°C aproximadamente, a massa cerâmica e com incorporação de vidro, apresentam uma retração ainda mais significativa. O aumento na retração pode ser atribuído à recristalização de novas fases cerâmicas, assim como ao processo de vitrificação (PINHEIRO & HOLANDA, 2010). As argilas caulínicas têm o início da formação de fase líquida por volta de 695°C, sendo mais intensificada em temperaturas superiores a 1000°C. Este ponto indica que as amostras estão parcialmente fundidas e que o líquido formado irá escoar para os interstícios das partículas mais refratárias que ainda não se fundiram. Este evento provoca a aproximação das partículas o que resulta em uma retração bem significativa. Isto significa que o resíduo entra no estado víçoso e passa a atuar no fechamento dos poros. No caso das amostras com resíduo, a retração ocorre em temperatura mais baixa, mostrando que o resíduo do vidro atua como material fundente, diminuindo a temperatura de sinterização. Outro ponto importante é o tamanho de partícula do resíduo, onde quanto menor foi o tamanho da partícula, maior foi a retração da peça.

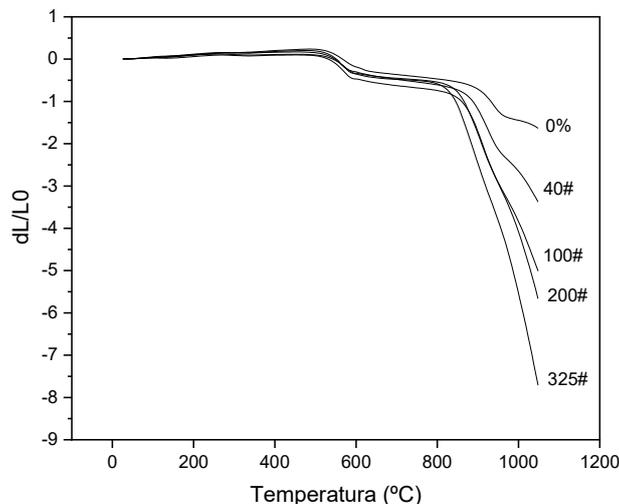
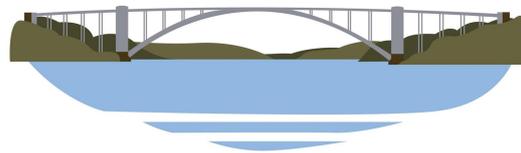


Figura 1: Dilatometria Linear das formulações estudadas

### Densidade aparente a seco

A Figura 2 apresenta a densidade a seco das formulações estudadas. A densidade a seco foi determinada pelo método geométrico com auxílio de paquímetro e balança. A densidade real do resíduo de vidro de embalagens é de 2,46 g/cm<sup>3</sup> enquanto a massa cerâmica é de 2,60g/cm<sup>3</sup>. Observa-se um grande decréscimo da densidade aparente para todas as composições em relação à massa cerâmica. Somente por meio da densidade relativa, pode-se verificar o efeito do resíduo no empacotamento da massa, já que as matérias-primas apresentam densidades reais próximas, mas com diferentes entre elas.

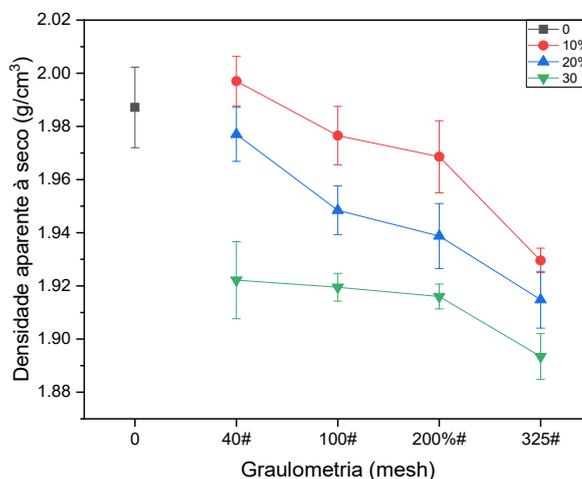
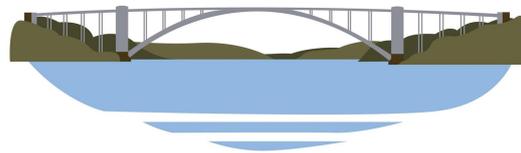


Figura 2: Densidade aparente à seco das formulações.

A densidade a seco é um parâmetro tecnológico de muita importância, devido à sua influência direta em propriedades como absorção de água e resistência à flexão. O material apresentará uma menor quantidade de porosidade aberta, o que reduzirá a absorção de água. Esta menor concentração de porosidade aumentará a área superficial efetiva do material submetido a ensaios mecânicos, como o de flexão, resultando em valores maiores dessa propriedade. Além disso, quanto menor a concentração de porosidade, menor a probabilidade de ocorrência de uma falha, isto devido a menor quantidade de concentradores de tensão (CALLISTER, 2013).

A Figura 3 apresenta os resultados das médias e desvio padrão de retração linear de queima (RLq) das peças com incorporação de 10, 20 e 30% resíduo de vidro de embalagens múltiplo-uso, nas formulações e temperatura estudada. É possível observar que houve um aumento da retração quando aumentou o percentual de resíduo incorporado, e a diminuição do tamanho de partícula do resíduo. Para Monteiro e Vieira (2002) o mecanismo de RL deve-se, sobretudo, à aproximação e coalescência das partículas ante o processo de sinterização, mas que também a perda ao fogo contribui



para o aumento desta propriedade. Durante a sinterização ocorrem as transformações de fases, e o fechamento dos poros, fazendo com que ocorra a retração e diminuição da peça.

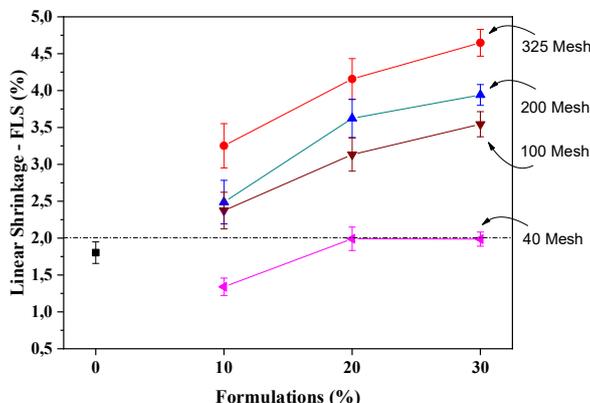


Figura 3. Retração linear em função do teor de resíduo incorporado

A retração linear de queima e a absorção de água se correlacionam até certo ponto, onde quanto menor absorção de água, maior será a retração, pois a menor porosidade aberta pode significar maior retração da estrutura. A absorção de água representa apenas a porosidade aberta, não tendo correlação com a porosidade fechada, enquanto a retração linear está correlacionada à porosidade total.

Más (2002) recomenda que a retração máxima não seja superior a 2%, com intuito de evitar excessivas variações dimensionais dos produtos, bem como evitar trincas devido às tensões geradas durante a queima. Desta forma, quando se avaliou o percentual de resíduo incorporado, em todas as granulometrias, considerando a barra de erro, apenas as formulações com atenderiam o recomendado.

A Figura 4 apresenta o resultado da absorção de água das cerâmicas queimadas nas composições estudadas. É possível observar, comparando com a massa referência, que em todas as formulações estudadas, o aumento da incorporação de resíduo houve uma diminuição na absorção de água. Nota-se uma menor absorção na composição com 30% de resíduo e granulometria 325mesh, que considerando a barra de erro, foi de 6%. Os óxidos alcalinos e alcalinos terrosos presentes no resíduo são importantes para cerâmica devido à formação de fase líquida durante a fase de sinterização, ocasionando o preenchimento dos poros existentes, ocorrendo então uma redução na absorção de água.

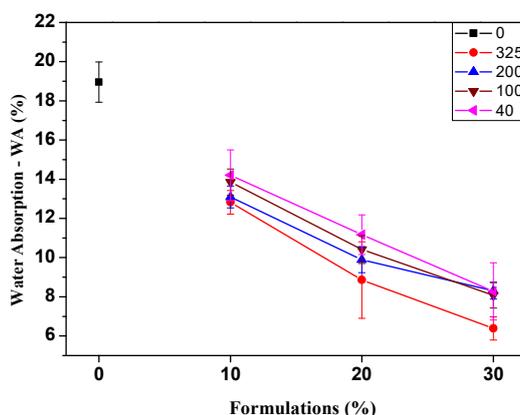
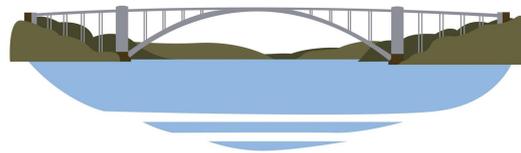


Figura 4. Absorção de água em função do teor de resíduo de vidro incorporado.

Segundo a NBR15270/2017, os valores ideais de absorção de água para blocos cerâmicos então compreendidos entre 8 e 25%, garantindo assim no limite inferior que a argamassa tenha a possibilidade de se aderir nas paredes do bloco, e no limite superior que água não transpasse o bloco cerâmico. Já a norma NBR 15310/2009 indica que o limite máximo de absorção de água para telhas cerâmicas é de 20%. É possível observar que todas as formulações e temperaturas investigadas neste trabalho, se enquadraram na norma para fabricação de telhas.



Na Figura 5 são apresentados os resultados da resistência de ruptura à flexão por três pontos. É possível observar que comparando com a massa padrão, ocorreu um aumento da resistência mecânica das peças de acordo com o teor de resíduo incorporado, e considerando a barra de erro, chegando a 17MPa na massa com maior percentual de resíduo (30%) e granulometria com menor tamanho de partículas (325mesh). Isso corresponde aos resultados encontrados para absorção de água, onde a menor absorção de água corresponde a menores volumes de porosidade aberta, contribuindo para um aumento da resistência mecânica. A resistência e absorção de água tendem a ser correlacionar, onde quanto maior a absorção de água, menores serão os valores de resistência mecânica, e vice versa.

Em conformidade com o recomendado por Santos (1989) todas as massas estudadas com incorporação de resíduo atendem a recomendação para a produção de tijolos (2MPa), blocos (5,5MPa) e telhas (6,5MPa), mesmo com o menor teor de resíduo adicionado.

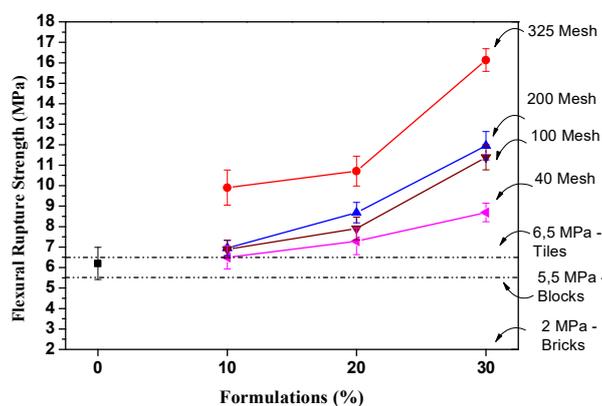


Figura 5 : Tensão de ruptura a flexão em função do teor de resíduo de vidro incorporado

## CONCLUSÕES

O resíduo de vidro de garrafa múltiplo-uso investigado apresenta características favoráveis para utilização em mistura com argilas para a fabricação de cerâmica vermelha, como granulometria fina, e elevado teor de óxidos fundentes. Foi observado que na temperatura de 900°C a adição do resíduo, em todas as composições, diminuiu a absorção de água e proporcionou aumento na resistência à ruptura por flexão, quando comparado a uma massa sem adição de resíduo de vidro preparada e queimada sob as mesmas condições.

Com isto, conclui-se então que o resíduo de vidro apresenta grande potencial para ser reaproveitado em cerâmica vermelha, pois apresenta grande quantidade de óxido de silício, além de ser uma alternativa que representa economia e contribuição para preservação ambiental, já que o resíduo poderia ser lançado na natureza por ser um subproduto não reciclável.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a UENF, a CAPES, ao CNPq proc. nº 302976/2022-1, a FAPERJ proc. nº E-26/200.847/2021 pelo apoio financeiro, e a Arte Cerâmica Sardinha pela doação da matéria-prima argilosa utilizadas neste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abividro – Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro. Vidros. Disponível em: <<http://www.abividro.org.br/biblioteca.php>> Acesso em: 10/06/2022.
2. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas .NBR 7180. Solo - Determinação do Limite de plasticidade, 1984
3. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459. Solo - Determinação do limite de liquidez, 1984.
4. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15270. Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria – Parte 1 : Requisitos,2017.



5. ASTM - American Society For Testing And Materials C674-77. Flexural properties of ceramic whiteware Materials, 1977.
6. ASTM - American Society For Testing And Materials C326 -18 - Standard Test Method for Drying and Firing Shrinkages of Ceramic Whiteware Clays, 2018.
7. ASTM - American Society for Testing and Materials. Test method for water absorption, bulk density, apparent porosity and apparent specific gravity of fired whiteware products. C373-72, 1977a.
8. Brasil, Lei N° 12.305 (2010 ) - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato20072010/2010/Lei/L12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato20072010/2010/Lei/L12305.htm).
9. Callister, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais, Uma introdução, 8 ed., Rio de Janeiro, LTC, 2012
10. Cargnin, M., De Souza, S. M. A. G. U., De Souza, A. A. U., De Noni Jr, A. (2011). Determinação de parâmetros cinéticos da sinterização de revestimentos cerâmicos de monoqueima do tipo BIIa (Determination of kinetic parameters of sintering of ceramic type BIIa single firing). *Cerâmica*, 57(344), 461-466.
11. CEBRACE - Composição química. Disponível em: <<http://www.cebrace.com.br/vidro/composicao-quimica>>. Acessado em: 23 de janeiro de 2020.
12. CEMPRES - Compromisso Empresarial com a Reciclagem. Cadernos de Reciclagem - A Contribuição da Indústria. Disponível em: <<http://www.cempre.org.br>. Acessado em: 12 de dezembro 2019.
13. Janetti, P.F. & Jaime, S. (2010). Resistência hidrolítica: Ataque químico do vidro pela água e suas implicações no segmento farmacêutico. *Boletim de Tecnologia e Desenvolvimento de Embalagens*. 22. 1-5.
14. Landim APM, Bernardo, CO, Martins IBA , FRANCISCOMR , SANTOS MB, MELO NR, (2016). Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil. *Polímeros*, 26, 82-92.
15. Más, E. **Qualidade e tecnologia em cerâmica vermelha**. São Paulo: Editora Pólo Produções Ltda, 2002.
16. Monteiro SN, Alexandre J, Margem JI, Sanchez R, Vieira CMF. Incorporation of sludge waste from water treatment plant into red ceramic. *Construction and Building Materials* (2008) 22, p.1281-1287.
17. Monteiro, S. N.; Vieira, C. M. F. . *Tile and Brick*, v. 18, n. 3, p 152 – 157, 2002.
18. Morais ASC, Caldas TCC, Monteiro SN, Vieira CMF. (2013) Characterization of fluorescent lamp glass waste powder, *Mater. Sci. Forum* 727-728, 1579-1584.
19. Morais, ASC, Vieira, CMF, Rodriguez, RJS et al. (2016) Incorporação de resíduos de vidro de lâmpada fluorescente em cerâmica de argila: uma solução perfeita. *JOM* 68, 2425–2434. <https://doi.org/10.1007/s11837-016-1985-z>
20. Ribeiro, DV, Morelli, MR (2009) Resíduos Sólidos- Problema ou oportunidade. Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 135p.
21. Santos, P. S. (1989). *Ciência e Tecnologia de Argilas*. Ed. São Paulo. Edgar Blucher. 408p.
22. Schaeffer, H.A, Langfeld R, *glas: alter werkstoff mit großer Zukunft* Springer, Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg (2020)
23. Teixeira S.R, Costa FB, Souza AE, Santos GTA (2008). Reuse of glass cullet as aggregate for red ceramic clays. *Ciências Exatas*, vol. 2, n. 1.
24. Vieira C.M.F & Monteiro. S.N (2009). Incorporation of solid wastes in red ceramics – an updated review. *Rev. Materia -RJ*, 14, 3- 881-905. <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo11097>
25. Vieira, C. M., Pinheiro, R. M. (2011). Avaliação de argilas caulínicas de Campos dos Goytacazes utilizadas para fabricação de cerâmica vermelha. *Cerâmica* vol.57 no.343, 319-323