

Teste industrial de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de vidro de lâmpada fluorescente

(Industrial test of heavy clay ceramic incorporated with fluorescent lamp waste)

C. M. F. Vieira^{1*}, A. S. C. Moraes², S. N. Monteiro³, G. C. G. Delaqua¹

¹Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Av. Alberto Lamego, 2000, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil 28013-602

²Instituto Federal Fluminense, R. Dr. Siqueira, 273, Campos dos Goytacazes, RJ 28030-130

³Instituto Militar de Engenharia, Departamento de Ciência dos Materiais, Praça General Tibúrcio, 80, Rio de Janeiro, RJ 22290-270

*carlos.vieira@pq.cnpq.br

Resumo

O crescente consumo e descarte de lâmpadas fluorescentes tem despertado preocupações relacionadas à disposição do resíduo gerado. Uma possibilidade de destinação ambientalmente correta do vidro da lâmpada é a sua incorporação em cerâmica vermelha. Neste sentido, este trabalho teve por objetivo avaliar o efeito da utilização de 30% em massa de um resíduo de vidro de lâmpada fluorescente na forma de pó, descontaminada de mercúrio, nas propriedades físicas e mecânicas de cerâmica vermelha produzida em escala industrial. A avaliação ambiental das cerâmicas queimadas foi realizada por meio de testes de lixiviação e solubilização. Os resultados indicaram que o resíduo melhora significativamente as propriedades avaliadas. Com respeito à avaliação ambiental, o vidro de lâmpada fluorescente não altera uma eventual classificação da cerâmica quando esta se tornar um material descartado.

Palavras-chave: cerâmica vermelha, resíduo, teste industrial, vidro de lâmpada fluorescente.

Abstract

The increasing consumption and disposal of fluorescent lamps has raised concerns about the disposal of generated waste. One possibility for environmentally correct disposal of lamp glass is its incorporation into heavy clay ceramics for civil construction. Thus, this study aims to evaluate the effect of using 30 wt% of a fluorescent lamp glass powder, decontaminated of mercury, on the physical and mechanical properties of heavy clay ceramic produced in an industrial scale. The environmental assessment of the fired ceramics was carried out by leaching and solution tests. The results indicated that the waste significantly improves the evaluated properties. With respect to the environmental assessment, the fluorescent lamp glass does not change an eventual classification of the ceramic when it becomes a waste material.

Keywords: heavy clay ceramic, waste, industrial test, fluorescent lamp glass.

INTRODUÇÃO

Lâmpadas fluorescentes usam mercúrio como componente vital para seu funcionamento. Este metal altamente tóxico pode contaminar o solo, os animais e a água. O problema se agrava em proporções muito maiores se levarmos em consideração a quantidade de lâmpadas comercializadas e descartadas no Brasil [1]. Uma alternativa tecnológica para a reciclagem deste tipo de resíduo é a incorporação em cerâmica vermelha. O setor cerâmico utiliza a argila como matéria-prima principal para a obtenção de seus produtos como blocos de vedação (tijolos comuns), tijolos aparentes, blocos estruturais, telhas, pisos rústicos e manilhas. A argila é constituída pelos

argilominerais, apresentando como impurezas mais comuns o quartzo e os hidróxidos de alumínio e ferro, além de mineral micáceo e matéria orgânica [2, 3].

O município de Campos dos Goytacazes, localizado no norte do Estado do Rio de Janeiro, Brasil, apresenta, devido às suas características geológicas, uma grande reserva de argilas [4, 5], o que motivou o desenvolvimento de um polo de cerâmica vermelha há cerca de 40 anos. Atualmente, em torno de 120 indústrias extraem diariamente cerca de 8 mil toneladas de argilas para produzir 4 milhões de peças/dia. Mais de 5000 empregos diretos estão associados às indústrias cerâmicas locais. As empresas de cerâmica vermelha de Campos dos Goytacazes utilizam argilas locais que são altamente plásticas e

de granulometria fina. Além disso, estas argilas são predominantemente cauliniticas, com elevada perda ao fogo e baixo percentual de óxidos fundentes [6-8]. Estas características conferem às argilas da região um comportamento refratário durante a queima o que dificulta a diminuição da porosidade ao nível desejado. Com isso, grande parte dos produtos apresenta porosidade excessiva o que acarreta elevados valores de absorção de água. Uma alternativa tecnológica para reduzir a refratariedade das massas de cerâmica vermelha de Campos dos Goytacazes e, conseqüentemente, diminuir a porosidade e melhorar a qualidade do produto final, seria incorporar matérias-primas denominadas de fundentes. Os fundentes são ricos em óxidos alcalinos e alcalino-terrosos, os quais propiciam a ocorrência de reações eutélicas com a sílica em temperaturas típicas de queima de cerâmica vermelha (700 a 1000 °C) [9, 10].

Estudos recentes [11-25] mostraram que a adição de resíduos de vidro em cerâmica vermelha é uma alternativa viável, devido à boa compatibilidade entre a argila e componentes do vidro sodo-cálcico atuando como fonte de sílica, além de óxidos fundentes, como de sódio e potássio. A elevação dos teores de óxidos considerados fundentes, responsáveis pela densificação da estrutura durante a queima, apresenta-se como uma possibilidade de melhoria da qualidade da cerâmica com a utilização de vidro de lâmpadas fluorescentes, além da possibilidade de dar um destino ambientalmente correto para este tipo de resíduo. Na etapa de queima da cerâmica o vidro pode contribuir para a redução da porosidade, por meio da formação de fase líquida, reduzindo a absorção de água e aumentando a resistência mecânica. Baseado em resultados de testes de laboratório, o objetivo do presente trabalho foi estender a investigação, a uma escala industrial, avaliando as propriedades físicas e mecânicas de telhas do tipo francesas incorporadas com 30% em massa de resíduo de vidro de lâmpada fluorescente.

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para o desenvolvimento da presente pesquisa utilizou-se o resíduo de vidro de lâmpada fluorescente, RVL, proveniente do processo de descontaminação de mercúrio. Durante o processo de descontaminação, as lâmpadas são trituradas em

um equipamento denominado de “Papa-lâmpadas” (Fig. 1), que realiza a absorção do mercúrio por um sistema de filtros contendo carvão ativado. Os demais componentes da lâmpada são depositados em um tambor metálico. O resíduo de vidro gerado já foi caracterizado em trabalho anterior [25], apresentando uma composição típica de vidro sodo-cálcico e temperatura de amolecimento próxima a 800 °C. Este resultado indica que este tipo de resíduo pode contribuir para reduzir a absorção de água e incrementar a resistência mecânica da cerâmica em temperaturas típicas de queima de cerâmica vermelha. De acordo com avaliação realizada pela empresa fornecedora do resíduo, este é classificado pela NBR 10004/04 como Classe II - A [26], portanto, não perigoso e não inerte. A Tabela I apresenta os resultados do ensaio de massa bruta do resíduo de lâmpada fluorescente, previamente realizados [27]. É possível observar que os elementos analisados, Be, Cr, Hg, Pb, Se, As e V, estão presentes em teores bem abaixo dos limites máximos permitidos por norma [28].

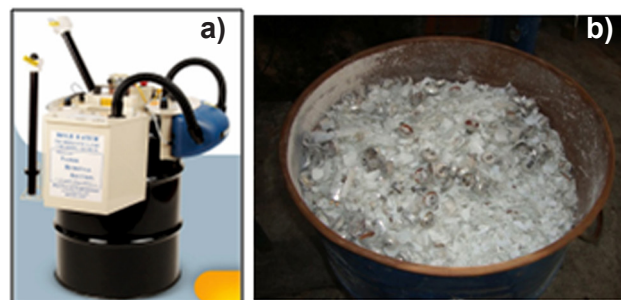


Figura 1: Estágio inicial do processo de descontaminação de mercúrio de tubos de lâmpada fluorescente: (a) equipamento “Papa-lâmpadas”, e (b) fragmentos da lâmpada triturada.

[Figure 1: Initial stage of mercury decontamination process of fluorescent lamp tubes: (a) lamp crushing machine, and (b) crushed lamp fragments.]

As telhas francesas foram produzidas em escala industrial na Cerâmica Rodolfo de Azevedo Gama, localizada na cidade de Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil. Para este teste foram preparadas duas composições, uma massa argilosa sem adição de resíduo (usada como referência) e com adição de 30%

Tabela I - Resultados quantitativos da massa bruta do resíduo.

[Table I - Gross mass test results of the waste.]

Elemento	Unidade	Teor médio na amostra	Anexo I da NBR 10004 (limite máximo)
Berílio	mg/kg	0,1	100 mg/kg
Cromo total	mg/kg	4,6	100 mg/kg
Mercúrio	mg/kg	1	100 mg/kg
Chumbo	mg/kg	33,6	1000 mg/kg
Selênio	mg/kg	<2	100 mg/kg
Arsênio	mg/kg	1	1000 mg/kg
Vanádio	mg/kg	<5	1000 mg/kg

em massa de RVL, em função dos resultados positivos no teste laboratorial [29]. As formulações preparadas foram umedecidas com 33% de umidade. As etapas do teste industrial consistiram na dosagem das matérias-primas, desagregação e mistura da massa, prensagem manual, secagem e queima. O processo de secagem ocorreu no pátio da cerâmica, e as telhas foram acomodadas em prateleiras protegidas da ação do vento e mudança brusca de temperatura.

As propriedades foram avaliadas tanto com as peças secas quanto após a queima na indústria. De acordo com os resultados de dilatométrica óptica [25], o RVL exibe uma faixa de trabalho, correspondente aos limites de operação de um vidro de 868 a 1049 °C, apresentando temperatura de amolecimento (Ts), temperatura máxima que o resíduo de vidro pode ser manuseado sem causar alterações dimensionais significativas, a 868 °C e fundindo totalmente a 1117 °C. A temperatura de queima utilizada neste teste foi de aproximadamente 900 ± 50 °C. Esta temperatura foi escolhida com o intuito de diminuir gastos de energia durante a queima do produto, por estar dentro da faixa de trabalho do resíduo e por ter apresentado resultados satisfatórios no teste laboratorial [29]. As peças foram colocadas em fornos do tipo abóboda, em forma de camadas

na parte superior do forno e a temperatura de patamar permaneceu em torno de 900 °C.

As telhas produzidas foram submetidas a ensaios físicos e mecânicos para determinação da retração linear, absorção de água e carga de ruptura. As medidas para cálculo da retração foram realizadas com trena de dimensão máxima 2 m da Tramontina. Tanto a absorção de água quanto a carga de ruptura foram determinadas de acordo com procedimentos descritos na norma técnica [30]. A avaliação ambiental foi realizada por meio da determinação da massa bruta e testes de lixiviação e de solubilização da cerâmica argilosa pura e incorporada com 30% de resíduo de acordo com procedimentos estabelecidos por normas técnicas [26, 31, 32].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Propriedades físicas e mecânicas

A Tabela II apresenta os valores de retração linear de queima, absorção de água e da carga de ruptura à flexão das telhas francesas obtidas a partir das formulações sem resíduo e com 30% de RVL. Nota-se que a incorporação do resíduo pratica-

Tabela II - Propriedades físicas e mecânicas das telhas.

[Table II - Physical and mechanical properties of the roof tiles.]

Propriedade	Telha sem resíduo	Telha com 30% de resíduo	Limite recomendável/ admissível pela norma
Retração linear de secagem (%)	1,9 ± 0,5	1,8 ± 0,3	4 a 6
Retração linear de queima (%)	2,3 ± 0,7	2,2 ± 0,4	1
Absorção de água (%)	24,1 ± 0,5	15,7 ± 0,9	< 20
Carga de ruptura à flexão (N)	712 ± 203	1361 ± 278	> 1000

Tabela III - Resultados do ensaio de massa bruta da cerâmica sem resíduo.

[Table III - Gross mass test results of the ceramic without waste.]

Parâmetro	[CAS]	Unid	LQ	LQA	VMP	Incerteza (±)	Resultado
pH	----	NA	Faixa: 1-13	Faixa: 1-13	2,0 a 12,5	1,33	9,38*
Sulfeto	18496-25-8	mg S ²⁻ /kg	12,7	12,8	500	0,74	< LQ
Cianeto	57-12-5	mg CN ⁻ /kg	0,04	0,04	250	0,0016	< LQ
Ponto de fulgor	---	°C	5	5	> 60	10,32	> 100
Teor de sólidos	---	%	Faixa: 1-100	Faixa: 1-100	NA	10,50	99,53

Legenda: CAS: número de referência de compostos e substâncias químicas adotado pelo Chemical Abstract Service; Unid: unidade; LQ: limite de quantificação; LQA: limite de quantificação da amostra; VMP: valor máximo permitido; NA: não aplicável; * - medido em água a 22,0 °C.

Tabela IV - Resultados da massa bruta da cerâmica com 30% de RVL.

[Table IV - Ceramic gross mass results with 30% of fluorescent glass lamp residue.]

Parâmetro	[CAS]	Unid	LQ	LQA	VMP	Incerteza (±)	Resultado
pH	----	NA	Faixa: 1-13	Faixa: 1-13	2,0 a 12,5	1,33	9,38*
Sulfeto	18496-25-8	mg S ²⁻ /kg	12,7	12,8	500	0,74	< LQ
Cianeto	57-12-5	mg CN ⁻ /kg	0,04	0,04	250	0,0016	< LQ
Ponto de fulgor	---	°C	5	5	>60	10,32	> 100
Teor de sólidos	---	%	Faixa: 1-100	Faixa: 1-100	NA	10,50	99,55

Tabela V - Resultados do teste de lixiviação, inorgânicos, da cerâmica sem resíduo.

[Table V - Inorganic leaching test results of ceramic without residue.]

Parâmetro	[CAS]	Unid	LQ	LQA	VMP	Incerteza (\pm)	Resultado
Arsênio	7440-38-2	mg/L	0,005	0,005	1,0	0,00035	< LQ
Bário	7440-39-3	mg/L	0,005	0,005	70	0,037	0,471
Cádmio	7440-43-9	mg/L	0,003	0,003	0,5	0,000045	< LQ
Chumbo	7439-92-1	mg/L	0,005	0,005	1,0	0,00050	< LQ
Cromo	7440-47-3	mg/L	0,005	0,005	5,0	0,00097	< LQ
Fluoreto	16984-48-8	mg F/L	0,100	0,100	150,0	0,0064	< LQ
Mercúrio	7439-97-6	mg/L	0,0002	0,0002	0,1	0,0000067	< LQ
Prata	7440-22-4	mg/L	0,005	0,005	5,0	0,00047	< LQ
Selênio	7782-49-2	mg/L	0,005	0,005	1,0	0,00018	< LQ

Tabela VI - Resultados do teste de lixiviação, inorgânicos, da cerâmica com 30% de RVL.

[Table VI - Inorganic leaching test results of ceramic with 30% of fluorescent glass lamp residue.]

Parâmetro	[CAS]	Unid	LQ	LQA	VMP	Incerteza (\pm)	Resultado
Arsênio	7440-38-2	mg/L	0,005	0,005	1,0	0,00035	< LQ
Bário	7440-39-3	mg/L	0,005	0,005	70	0,036	0,459
Cádmio	7440-43-9	mg/L	0,003	0,003	0,5	0,000045	< LQ
Chumbo	7439-92-1	mg/L	0,005	0,005	1,0	0,00050	< LQ
Cromo	7440-47-3	mg/L	0,005	0,005	5,0	0,00097	< LQ
Fluoreto	16984-48-8	mg F/L	0,100	0,100	150,0	0,034	0,525
Mercúrio	7439-97-6	mg/L	0,0002	0,0002	0,1	0,0000067	< LQ
Prata	7440-22-4	mg/L	0,005	0,005	5,0	0,00047	< LQ
Selênio	7782-49-2	mg/L	0,005	0,005	1,0	0,00018	< LQ

Tabela VII - Resultados do teste de lixiviação, pesticidas, da cerâmica sem resíduo.

[Table VII - Pesticide leaching test results of ceramic without residue.]

Parâmetro	[CAS]	Unid	LQ	LQA	VMP	Incerteza (\pm)	Resultado
Aldrin + Dieldrin	309-00-2/ 60-57-1	mg/L	0,00002	0,00002	0,003	0,0000020	< LQ
Clordano (soma isômeros)	57-74-9	mg/L	0,00005	0,00005	0,02	0,0000060	< LQ
DDT (p,p'-DDT + p,p'-DDD + p,p'-DDE)	50-29-3/ 72-54-8/ 72-55-9	mg/L	0,00005	0,00005	0,2	0,0000059	< LQ
2,4 D	94-75-7	mg/L	0,00005	0,00005	3	0,0000036	< LQ
Endrin	72-20-8	mg/L	0,00003	0,00003	0,06	0,0000030	< LQ
Heptacloro e seus epóxidos	76-44-8/ 1024-57-3	mg/L	0,00002	0,00002	0,003	0,0000028	< LQ
Lindano(g-BHC)	58-89-9	mg/L	0,00005	0,00005	0,2	0,0000032	< LQ
Metoxicloro	72-43-5	mg/L	0,00003	0,00003	2	0,0000032	< LQ
Pentaclorofenol	87-86-5	mg/L	0,00005	0,00005	0,9	0,0000065	< LQ
Toxafeno	8001-35-2	mg/L	0,00001	0,00001	500	0,00000046	< LQ
2,4,5-T	93-76-5	mg/L	0,00005	0,00005	0,2	0,0000054	< LQ
2,4,5-TP	93-72-1	mg/L	0,00005	0,00005	1	0,0000042	< LQ

mente não alterou a retração linear de secagem e de queima das telhas francesas em comparação às telhas sem resíduo. Nota-se que ocorreu variação significativa tanto da retração linear de secagem quando da retração de queima nas cerâmicas com e sem resíduo. De acordo com os valores apresentados por [33], os valores de retração de secagem apre-

sentados pelas cerâmicas são considerados baixos. Por outro lado, os valores de retração de queima de 2,3% e 2,2% para as cerâmicas sem resíduo e com 30% de RVL, respectivamente, são considerados elevados. Isto ocorre, sobretudo, em função da elevada perda de massa das argilas de Campos [34].

Com relação à absorção de água, o valor máximo permi-

Tabela VIII - Resultados do teste de lixiviação, pesticidas, da cerâmica com 30% de RVL.

[Table VIII - Pesticide leaching test results of ceramic with 30% of fluorescent glass lamp residue.]

Parâmetro	[CAS]	Unid	LQ	LQA	VMP	Incerteza (\pm)	Resultado
Aldrin + Dieldrin	309-00-2/ 60-57-1	mg/L	0,00002	0,00002	0,003	0,0000020	< LQ
Clordano (soma isômeros)	57-74-9	mg/L	0,00005	0,00005	0,02	0,0000060	< LQ
DDT (p,p'-DDT + p,p'-DDD + p,p'-DDE)	50-29-3/ 72-54-8/ 72-55-9	mg/L	0,00005	0,00005	0,2	0,0000059	< LQ
2,4 D	94-75-7	mg/L	0,00005	0,00005	3	0,0000036	< LQ
Endrin	72-20-8	mg/L	0,00003	0,00003	0,06	0,0000030	< LQ
Heptacloro e seus epóxidos	76-44-8/ 1024-57-3	mg/L	0,00002	0,00002	0,003	0,0000028	< LQ
Lindano (g-BHC)	58-89-9	mg/L	0,00005	0,00005	0,2	0,0000032	< LQ
Metoxicloro	72-43-5	mg/L	0,00003	0,00003	2	0,0000032	< LQ
Pentaclorofenol	87-86-5	mg/L	0,00005	0,00005	0,9	0,0000065	< LQ
Toxafeno	8001-35-2	mg/L	0,00001	0,00001	500	0,00000046	< LQ
2,4,5-T	93-76-5	mg/L	0,00005	0,00005	0,2	0,0000054	< LQ
2,4,5-TP	93-72-1	mg/L	0,00005	0,00005	1	0,0000042	< LQ

Tabela IX - Resultados do teste de lixiviação, outros orgânicos, da cerâmica sem residuo.

[Table IX - Solution test results of ceramic without residue.]

Parâmetro	[CAS]	Unid	LQ	LQA	VMP	Incerteza (\pm)	Resultado
Benzeno	71-43-2	mg/L	0,001	0,001	0,5	0,00012	< LQ
Benzo (a) pireno	50-32-8	mg/L	0,00005	0,00005	0,07	0,0000049	< LQ
Cloreto de vinila	75-01-4	mg/L	0,0005	0,0005	0,5	0,000069	< LQ
Clorofórmio	67-66-3	mg/L	0,001	0,001	6,0	0,0090	0,063
Cresol total	108-39-4/ 106-44-5/ 95-48-7	mg/L	0,0005	0,0005	200	0,000060	< LQ
o-Cresol	95-48-7	mg/L	0,0005	0,0005	200	0,000060	< LQ
m+P Cresol	108-39-4/ 106-44-5	mg/L	0,001	0,001	200	0,00010	< LQ
1,4-Diclorobenzeno	106-46-7	mg/L	0,0005	0,0005	7,5	0,000060	< LQ
1, 2-Dicloroetano	107-06-2	mg/L	0,001	0,001	1,0	0,00016	< LQ
1, 1-Dicloroetano	75-35-4	mg/L	0,001	0,001	3,0	0,00011	< LQ
2,4-Dinitrotolueno	121-14-2	mg/L	0,0005	0,0005	0,13	0,000053	< LQ
Hexaclorobenzeno	118-74-1	mg/L	0,00003	0,00003	0,1	0,0000036	< LQ
Hexaclorobutadieno	87-68-3	mg/L	0,0005	0,0005	0,5	0,000063	< LQ
Hexacloroetano	67-72-1	mg/L	0,0005	0,0005	3	0,000061	< LQ
Metiletilcetona	78-93-3	mg/L	0,001	0,001	200,0	0,00015	< LQ
Nitrobenzeno	98-95-3	mg/L	0,0005	0,0005	2	0,000065	< LQ
Piridina	110-86-1	mg/L	4	4	5,0	0,38	< LQ
Tetracloroeto de carbono	56-23-5	mg/L	0,001	0,001	0,2	0,00012	< LQ
Tetracloroetileno*	127-18-4	mg/L	0,001	0,001	4,0	0,00013	< LQ
Tricloroetano	79-01-6	mg/L	0,001	0,001	7,0	0,00011	< LQ
2,4,5-Triclorofenol	95-95-4	mg/L	0,00005	0,00005	400	0,0000059	< LQ
2,4,6-Triclorofenol	88-06-2	mg/L	0,00005	0,00005	20	0,0000069	< LQ
Clorobenzeno	108-90-7	mg/L	0,001	0,001	100	0,00014	< LQ

* - Ensaio de tetracloroetileno refere-se a tetracloroetano conforme escopo CRL0267.

Tabela X - Resultados do teste de lixiviação, outros orgânicos, da cerâmica com 30% de RVL.

[Table X - Solution test results of ceramic with 30% of fluorescent glass lamp residue.]

Parâmetro	[CAS]	Unid	LQ	LQA	VMP	Incerteza (±)	Resultado
Benzeno	71-43-2	mg/L	0,001	0,001	0,5	0,00012	< LQ
Benzo (a) pireno	50-32-8	mg/L	0,00005	0,00005	0,07	0,0000049	< LQ
Cloreto de vinila	75-01-4	mg/L	0,0005	0,0005	0,5	0,000069	< LQ
Clorofórmio	67-66-3	mg/L	0,001	0,001	6,0	0,00014	< LQ
Cresol total	108-39-4/ 106-44-5/ 95-48-7	mg/L	0,0005	0,0005	200	0,000060	< LQ
o-Cresol	95-48-7	mg/L	0,0005	0,0005	200	0,000060	< LQ
m+P Cresol	108-39-4/ 106-44-5	mg/L	0,001	0,001	200	0,00010	< LQ
1,4-Diclorobenzeno	106-46-7	mg/L	0,0005	0,0005	7,5	0,000060	< LQ
1, 2-Dicloroetano	107-06-2	mg/L	0,001	0,001	1,0	0,00016	< LQ
1, 1-Dicloroetano	75-35-4	mg/L	0,001	0,001	3,0	0,00011	< LQ
2,4-Dinitrotolueno	121-14-2	mg/L	0,0005	0,0005	0,13	0,000053	< LQ
Hexaclorobenzeno	118-74-1	mg/L	0,00003	0,00003	0,1	0,0000036	< LQ
Hexaclorobutadieno	87-68-3	mg/L	0,0005	0,0005	0,5	0,000063	< LQ
Hexacloroetano	67-72-1	mg/L	0,0005	0,0005	3	0,000061	< LQ
Metiletilcetona	78-93-3	mg/L	0,001	0,001	200,0	0,00015	< LQ
Nitrobenzeno	98-95-3	mg/L	0,0005	0,0005	2	0,000065	< LQ
Piridina	110-86-1	mg/L	4	4	5,0	0,38	< LQ
Tetracloroeto de carbono	56-23-5	mg/L	0,001	0,001	0,2	0,00012	< LQ
Tetracloroetileno*	127-18-4	mg/L	0,001	0,001	4,0	0,00013	< LQ
Tricloroetano	79-01-6	mg/L	0,001	0,001	7,0	0,00011	< LQ
2,4,5-Triclorofenol	95-95-4	mg/L	0,00005	0,00005	400	0,0000059	< LQ
2,4,6-Triclorofenol	88-06-2	mg/L	0,00005	0,00005	20	0,0000069	< LQ
Clorobenzeno	108-90-7	mg/L	0,001	0,001	100	0,00014	< LQ

* - Ensaio de tetracloroetileno refere-se a tetracloroetano conforme escopo CRL0267.

tido por norma para este parâmetro é de 20% [30]. É possível observar que as telhas sem resíduo apresentaram valor médio de absorção de água 20,7% superior ao valor máximo permitido por norma. Já as telhas com resíduo apresentaram valor médio de 15,7%, que corresponde a 21,7% menor que o valor máximo de norma e 35,1% menor que as telhas sem resíduo. No teste laboratorial, a cerâmica com 30% de resíduo, queimada a 950 °C, apresentou valor de absorção de água em torno de 26% menor que a cerâmica sem resíduo incorporado [29]. A diferença entre os valores obtidos no teste laboratorial e industrial é resultado da variação dos parâmetros de processamento do teste industrial para a condição laboratorial, como grau de empacotamento das peças, tempo de permanência das peças no interior do forno, variação na temperatura, dentre outros. Com relação à carga de ruptura à flexão média, observa-se que as telhas sem resíduo apresentaram carga máxima de 712 N, valor inferior ao estipulado por norma técnica que é de 1000 N [30]. Por outro lado, a incorporação do resíduo possibilitou um incremento de 91,2% na carga de ruptura das telhas francesas, superando com folga o valor mínimo de

1000 N. Vale ressaltar que os resultados obtidos são bastante satisfatórios e indicam que este tipo de resíduo melhora significativamente as propriedades físicas e mecânicas das telhas.

Aspectos ambientais

As Tabelas III e IV apresentam os resultados de massa bruta das cerâmicas sem resíduo e com 30% de RVL, respectivamente. Nota-se que os resultados são similares e que nenhum dos parâmetros avaliados apresenta-se fora dos valores permitidos.

As Tabelas V a X apresentam os resultados de lixiviação das cerâmicas estudadas. Nota-se que para todos os parâmetros, inorgânicos, pesticidas e outros orgânicos, ambas as cerâmicas apresentaram valores dentro dos limites estabelecidos por norma.

As Tabelas XI e XII apresentam os resultados de solubilização das cerâmicas estudadas. Nota-se que na cerâmica sem resíduo, Tabela XI, somente o parâmetro alumínio apresenta valor superior, 0,884 mg/L, que o

estipulado por norma, 0,2 mg/L. Já a cerâmica com 30% de RVL apresenta alumínio e fluoreto com valores superiores aos valores máximos permitidos. Os valores de Al e fluoretos obtidos foram de 0,212 e 0,353 mg/L, respectivamente. A questão do Al em cerâmica é questionável, já que sua presença

se dá na forma de óxido, sobretudo, como aluminossilicato. Já o fluoreto, é proveniente do próprio resíduo, já que o F pode estar presente como um dos constituintes do pó fosfórico utilizado nas lâmpadas fluorescentes.

De acordo com os resultados obtidos e pelos parâmetros

Tabela XI - Resultados do teste de solubilização da cerâmica sem resíduo.

[Table XI - Solution test results of ceramic without residue.]

Parâmetro	[CAS]	Unid	LQ	LQA	VMP	Incerteza (±)	Resultado
Aldrin + Dieldrin	309-00-2/ 60-57-1	mg/L	0,00002	0,00002	0,00003	0,0000020	< LQ
Alumínio	7429-90-5	mg/L	0,050	0,050	0,2	0,059	0,884
Arsênio	7440-38-2	mg/L	0,005	0,005	0,01	0,00035	< LQ
Bário	7440-39-3	mg/L	0,005	0,005	0,7	0,00017	0,209
Cádmio	7440-43-9	mg/L	0,003	0,003	0,005	0,000045	< LQ
Chumbo	7439-92-1	mg/L	0,005	0,005	0,01	0,00050	< LQ
Cianeto	57-12-5	mg CN/L	0,002	0,002	0,07	0,000081	< LQ
Clordano (soma isômeros)	57-74-9	mg/L	0,00005	0,00005	0,0002	0,0000060	< LQ
Cloreto	16887-00-6	mg/L	0,500	0,500	250	0,022	< LQ
Cobre	7440-50-8	mg/L	0,005	0,005	2	0,00035	< LQ
Cromo	7440-47-3	mg/L	0,005	0,005	0,05	0,00097	< LQ
2,4 D	94-75-7	mg/L	0,00005	0,00005	0,03	0,0000036	< LQ
DDT (todos os isômeros)	50-29-3/ 72-54-8/ 72-55-9	mg/L	0,00005	0,00005	0,002	0,0000058	< LQ
Endrin	72-20-8	mg/L	0,00003	0,00003	0,0006	0,0000030	< LQ
Fenóis totais	-----	mg fenol/L	0,001	0,001	0,01	NA	0,002
Ferro	7439-89-6	mg/L	0,050	0,050	0,3	0,038	0,249
Fluoreto	16984-48-8	mg/L	0,100	0,100	1,5	0,0054	< LQ
Heptacloro e seus epóxidos	76-44-8/ 1024-57-3	mg/L	0,00002	0,00002	0,00003	0,0000028	< LQ
Hexaclorobenzeno	118-74-1	mg/L	0,00003	0,00003	0,001	0,0000036	< LQ
Lindano (γ-BHC)	58-89-9	mg/L	0,00005	0,00005	0,002	0,0000032	< LQ
Metoxicloro	72-43-5	mg/L	0,00003	0,00003	0,02	0,0000032	< LQ
Manganês	7439-96-5	mg/L	0,005	0,005	0,1	0,00030	0,0091
Mercúrio	7439-97-6	mg/L	0,0002	0,0002	0,001	0,0000067	< LQ
Nitrato (expresso em N)	7727-37-9	mg/L	0,114	0,114	10	0,0038	< LQ
Prata	7440-22-4	mg/L	0,005	0,005	0,05	0,00047	< LQ
Selênio	7782-49-2	mg/L	0,005	0,005	0,01	0,00018	< LQ
Sódio	7440-23-5	mg/L	1,000	1,000	200	0,28	3,85
Sulfato	14808-79-8	mg/L	0,500	0,500	250	0,061	1,181
Surfactantes	-----	mg MBAS/L	0,250	0,250	0,5	0,010	< LQ
Toxafeno	8001-35-2	mg/L	0,00001	0,00001	5,0	0,00000046	< LQ
2,4,5-T	93-76-5	mg/L	0,00005	0,00005	0,002	0,0000054	< LQ
2,4,5-TP	93-72-1	mg/L	0,00005	0,00005	0,03	0,0000042	< LQ
Zinco	7440-66-6	mg/L	0,005	0,005	5,0	0,0038	0,110

Tabela XII - Resultados do teste de solubilização da cerâmica com 30% de RVL.
 [Table XII - Solution test results of ceramic with 30% of fluorescent glass lamp residue.]

Parâmetro	[CAS]	Unid	LQ	LQA	VMP	Incerteza (\pm)	Resultado
Aldrin + Dieldrin	309-00-2/ 60-57-1	mg/L	0,00002	0,00002	0,00003	0,0000020	< LQ
Alumínio	7429-90-5	mg/L	0,050	0,050	0,2	0,014	0,212
Arsênio	7440-38-2	mg/L	0,005	0,005	0,01	0,00035	< LQ
Bário	7440-39-3	mg/L	0,005	0,005	0,7	0,00040	< LQ
Cádmio	7440-43-9	mg/L	0,003	0,003	0,005	0,000045	< LQ
Chumbo	7439-92-1	mg/L	0,005	0,005	0,01	0,00050	< LQ
Cianeto	57-12-5	mg CN/L	0,002	0,002	0,07	0,000081	< LQ
Clordano (soma isômeros)	57-74-9	mg/L	0,00005	0,00005	0,0002	0,0000060	< LQ
Cloreto	16887-00-6	mg/L	0,500	0,500	250	0,022	< LQ
Cobre	7440-50-8	mg/L	0,005	0,005	2	0,00035	< LQ
Cromo	7440-47-3	mg/L	0,005	0,005	0,05	0,00097	< LQ
2,4 D	94-75-7	mg/L	0,00005	0,00005	0,03	0,0000036	< LQ
DDT (todos os isômeros)	50-29-3/ 72-54-8/ 72-55-9	mg/L	0,00005	0,00005	0,002	0,0000058	< LQ
Endrin	72-20-8	mg/L	0,00003	0,00003	0,0006	0,0000030	< LQ
Fenóis totais	-----	mg fenol/L	0,001	0,001	0,01	NA	0,002
Ferro	7439-89-6	mg/L	0,050	0,050	0,3	0,0076	< LQ
Fluoreto	16984-48-8	mg/L	0,100	0,100	1,5	0,019	0,353
Heptacloro e seus epóxidos	76-44-8/ 1024-57-3	mg/L	0,00002	0,00002	0,00003	0,0000028	< LQ
Hexaclorobenzeno	118-74-1	mg/L	0,00003	0,00003	0,001	0,0000036	< LQ
Lindano (γ -BHC)	58-89-9	mg/L	0,00005	0,00005	0,002	0,0000032	< LQ
Metoxicloro	72-43-5	mg/L	0,00003	0,00003	0,02	0,0000032	< LQ
Manganês	7439-96-5	mg/L	0,005	0,005	0,1	0,00017	< LQ
Mercúrio	7439-97-6	mg/L	0,0002	0,0002	0,001	0,0000067	< LQ
Nitrato (expresso em N)	7727-37-9	mg/L	0,114	0,114	10	0,0038	< LQ
Prata	7440-22-4	mg/L	0,005	0,005	0,05	0,00047	< LQ
Selênio	7782-49-2	mg/L	0,005	0,005	0,01	0,00018	< LQ
Sódio	7440-23-5	mg/L	1,000	1,000	200	1,46	19,94
Sulfato	14808-79-8	mg/L	0,500	0,500	250	1,99	38,354
Surfactantes	-----	mg MBAS/L	0,250	0,250	0,5	0,010	< LQ
Toxafeno	8001-35-2	mg/L	0,00001	0,00001	5,0	0,00000046	< LQ
2,4,5-T	93-76-5	mg/L	0,00005	0,00005	0,002	0,0000054	< LQ
2,4,5-TP	93-72-1	mg/L	0,00005	0,00005	0,03	0,0000042	< LQ
Zinco	7440-66-6	mg/L	0,005	0,005	5,0	0,00052	0,015

de avaliação contidos na Norma NBR 10004, as telhas sem ou com RVL quando se tornarem um resíduo, de descarte de peças defeituosas ou resíduo de demolição, seriam classificadas como Resíduo Classe II A - Resíduo não perigoso não inerte.

CONCLUSÕES

A incorporação de resíduo de vidro de lâmpada fluorescente para fabricação de telhas melhorou significativamente

as propriedades físicas e mecânicas avaliadas. A utilização de 30% em massa do resíduo em mistura com argilas propiciou uma redução de 35,1% na absorção de água das telhas e um incremento de 91,2% na carga de ruptura à flexão. Já os testes ambientais demonstraram que a cerâmica com 30% de resíduo apresenta um valor de fluoreto, no teste de solubilização, acima do valor máximo estipulado por norma, além do Al, também acima do valor de norma para as telhas sem resíduo. Entretanto, tanto a cerâmica com resíduo quanto a cerâmica com 30% de resíduo seriam enquadradas como resíduo não inerte não perigoso, quando descartadas. Finalmente, o resíduo investigado apresenta potencial uso em cerâmica vermelha, que pode ser ainda considerado como uma alternativa ambientalmente correta de reciclagem que é sempre preferível à disposição final.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, proc. n. 302930/2014-0, à FAPERJ, proc. n. E-26/201.192/2014, e ao Instituto Idea Cíclica.

REFERÊNCIAS

- [1] C. Raposo, C.C. Windmoller, W.A.D. Junior, “Mercury speciation in fluorescent lamps by thermal release analysis”, *Waste Manage.* **23**, 10 (2003) 879-886.
- [2] P.S. Santos, *Ciência e Tecnologia das Argilas*, 2ª Ed., Vol. 1, Edgard Blucher, S. Paulo, SP (1989) 4.
- [3] A.G. Verduch, “Características de las arcillas empleadas en la fabricación de ladrillos”, *Técnica Cerâmica* **232** (1995) 214-228.
- [4] A.R. Lamego, *O Homem e o Brejo*, 2ª Ed., Ed. Lidador, Rio de Janeiro, RJ (1974).
- [5] J.R.P. Pinto, *Um Pedaco de Terra Chamado Campos*, Almeida Artes-gráficas, Campos dos Goytacazes, RJ (1987).
- [6] C.M.F. Vieira, J.N.F. Holanda, D.G. Pinatti, “Caracterização de massa cerâmica vermelha utilizada na fabricação de tijolos na região de Campos dos Goytacazes - RJ”, *Cerâmica* **46**, 297 (2000) 14-17.
- [7] S.N. Monteiro, C.M. F. Vieira, “Characterization of clays from Campos dos Goytacazes, North Rio de Janeiro State (Brazil)”, *Tile Brick Int.* **18**, 3 (2002) 152-157.
- [8] J.N.F. Holanda, C.M.F. Vieira, “Análise da situação atual e perspectivas de crescimento do setor de cerâmica estrutural de Campos dos Goytacazes-RJ”, *Mundo Cerâmico* **IX**, 82 (2002) 29-31.
- [9] W.D. Kingery, H.K. Bowen, D.R. Uhlmann, *Introduction to Ceramics*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York, EUA (1975) 299.
- [10] G.P. Emiliani, F. Corbara, *Tecnología Cerámica - Le Materia Prime*, Gruppo Editoriale Faenza Editrice, Faenza, Itália (1999) 98.
- [11] T.C. Shutt, H. Campbell, J.H. Juniro, “New buildings materials containing waste glass”, *Am. Ceram. Soc. Bull.* **51**, 9 (1972) 670-671.
- [12] N.F. Youssef, M.F. Abadir, M.A.O. Shater, “Utilization of soda glass (cullet) in the manufacture of wall and floor tiles”, *J. Eur. Ceram. Soc.* **18** (1998) 1721-1727.
- [13] F. Matteucci, M. Dondi, G. Guarini, “Effect of soda-lime glass on sintering and technological properties of porcelain stoneware tiles”, *Ceram. Int.* **28**, 8 (2002) 873-880.
- [14] A.C. Morelli, J.B. Baldo, “Ceramic slips with soda-lime glass reject for maturation in low temperature”, *Ceram. Ind.* **8**, 3 (2003) 42-46.
- [15] S.R. Bragança, C.P. Bergmann, “Traditional and glass powder porcelain: technical and microstructure analysis”, *J. Euro. Ceram. Soc.* **24** (2004) 2383-2388.
- [16] K.O. Godinho, J.N.F. Holanda, A.G.P. Silva, “Production and evaluation of technological properties of ceramic specimens based on the mix clay-recycled glass”, *Cerâmica* **51** (2005) 419-427.
- [17] Y. Pontikes, A. Christogerou, G.N. Angelopoulos, E. Rambaldi, A. Tucci, L. Espósito, “Use of soda-lime-silica scrap glass in the ceramic industrial”, *Glass Technol.* **46**, 2 (2005) 200-206.
- [18] Y. Pontikes, L. Espósito, A. Tucci, G.N. Angelopoulos, “Thermal behavior of clays for traditional ceramics with soda-lime-silica waste glass mixture”, *J. Euro. Ceram. Soc.* **27** (2007) 1657-1663.
- [19] C.M.F. Vieira, S.N. Monteiro, “Incorporation of solid wastes in red ceramics - an updated review”, *Rev. Matéria* **14**, 3 (2009) 881-905.
- [20] E. Furlani, G. Tonello, S. Maschio, E. Aneggi, D. Minichelli, S. Brucknera, E. Lucchini, “Sintering and characterization of ceramics containing paper sludge, glass cullet and different types of clayey materials”, *Ceram. Int.* **37** (2011) 1293-1299.
- [21] D. Eliche-Quesada, C. Martínez-García, M.L. Martínez-Cartas, M.T. Cotes-Palomino, L. Pérez-Villarejo, N. Cruz-Pérez, F.A. Corpas-Iglesias, “The use of different forms of waste in the manufacture of ceramic bricks”, *Appl. Clay Sci.* **52** (2011) 270-276.
- [22] T.C.C. Caldas, A.S.C. Morais, S.N. Monteiro, C.M.F. Vieira, “Characterization and thermal behavior of red ceramic incorporated with flat glass waste”, *Mater. Sci. Forum* **727-728** (2012) 994-1004.
- [23] N. Marinoni, D. D'Alessio, V. Diella, A. Pavese, F. Francescon, “Effects of soda-lime-silica waste glass on mullite formation kinetics and micro-structures development in vitreous ceramics”, *J. Environ. Manage.* **124** (2013) 100-107.
- [24] L. Zhang, “Production of bricks from waste materials - a review”, *Constr. Build. Mater.* **47** (2013) 643-655.
- [25] A.S.C. Morais, T.C.C. Caldas, S.N. Monteiro, C.M.F. Vieira, “Characterization of fluorescent lamp glass waste powder”, *Mater. Sci. Forum* **727-728** (2012) 1579-1584.
- [26] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 10004 “Resíduos Sólidos-Classificação”, Rio de Janeiro, RJ (2004).
- [27] IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de S. Paulo, “Classificação segundo NBR 10004 de resíduos de lâmpada fluorescente”, Relatório técnico, nº 57 745, S. Paulo, SP (2002).

- [28] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 10004 “Resíduos Sólidos”. Rio de Janeiro - RJ (1987).
- [29] T.M. Louzada, A.S.C. Morais, S.N. Monteiro, C.M.F. Vieira, “Influência da utilização de resíduo de vidro de lâmpada fluorescente em cerâmica vermelha”, *in Anais 57º Congresso Brasileiro de Cerâmica e 5º Congresso Iberoamericano de Cerâmica*, Natal, RN, **1** (2013)1442-1452.
- [30] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 15310 “Componentes cerâmicos - Telhas - Terminologia, requisitos e métodos de ensaios”. Rio de Janeiro, RJ (2009).
- [31] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 10005 “Lixiviação de Resíduos Sólidos - Procedimentos”, Rio de Janeiro, RJ (2004).
- [32] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10006 “Solubilização de Resíduos Sólidos -Procedimentos”, Rio de Janeiro, RJ (2004).
- [33] E. Más, *A queima cerâmica forno a forno. Qualidade e tecnologia em cerâmica vermelha*, Pólo Produções, S. Paulo, SP (2007).
- [34] C.M.F. Vieira, S.N. Monteiro, “Reformulation of a kaolinitic clay ceramic body with sand and flux clay for roofing tiles production”, *Mater. Sci. Forum* **727-728** (2012) 965-970.
(*Rec.* 10/01/2016, *Rev.* 16/02/2016, *06/03/2016*, *Ac.* 10/05/2016)