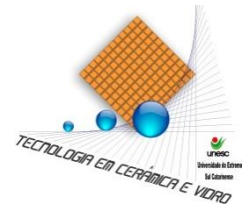




UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL
CATARINENSE

Curso de Tecnologia em Cerâmica
Trabalho de Conclusão de Estágio



REUTILIZAÇÃO de resíduos de indústria têxtil como matéria-prima em cerâmica vermelha

Suélen Michels Zanoni

Adriano Michael Bernardin, Dr. Eng.¹

Resumo: Este trabalho teve por objetivo a utilização de rejeitos gerados no tratamento de água e beneficiamento de jeans de uma indústria têxtil. Na estação de tratamento de efluentes desta empresa são gerados dois tipos de resíduos, o lodo da ETE e o lodo de valo e no processamento do jeans é gerado como resíduo óxido de alumínio, usado para desgaste dos jeans. Os resíduos foram caracterizados para determinação de sua composição química (EDS FRX), composição mineralógica (DRX) e distribuição de tamanho de partículas (difração laser). Foi utilizada uma massa padrão de cerâmica vermelha já extrudada para incorporação dos resíduos e esta massa também foi caracterizada (FRX, DRX e DTP). Os resíduos foram incorporados à massa em frações mássicas de 5%, 10% e 15% e as misturas foram homogeneizadas, prensadas, secas e queimadas em ciclo de 40 min com temperatura máxima de 1050 °C. Após queima, as formulações foram caracterizadas para determinação da densidade aparente, retração dimensional, absorção de água e resistência mecânica. A incorporação de 5% de lodo de ETE à massa cerâmica resultou em diminuição da absorção de água e aumento da resistência mecânica, sendo uma alternativa viável para reduzir o impacto ambiental da disposição de resíduos sólidos da indústria têxtil, além de melhorar as propriedades de lajotas prensadas.

Palavras-chave: Resíduos, indústria têxtil, reciclagem, cerâmica vermelha.

1. Introdução

As atividades industriais produzem uma determinada quantidade de resíduos não inerentes aos objetivos da produção em si. Tendo em vista que a redução da geração de resíduos, apesar de prioritária, é tecnicamente limitada, o melhor caminho a ser seguido é o da reciclagem. Uma das maiores dificuldades para se empreender uma ação concreta de beneficiamento e destinação de resíduos, além de problemas econômicos, políticos e administrativos, está na ausência de técnicas de processamento e beneficiamento compatíveis com as dimensões e

¹ Professor orientador

características das localidades interessadas na solução destes problemas (DELLA et al., 2005; CASAGRANDE et al., 2008; DUARTE, 2008).

A busca pela melhoria da qualidade ambiental está intimamente relacionada à redução de resíduos gerados pela atividade industrial, originando assim o movimento mundial pela reciclagem. A geração de resíduos tende a diminuir tanto no Brasil quanto no mundo. As empresas estão se conscientizando de que a geração de resíduos está associada a custos, pois requer seu tratamento e/ou disposição adequados. A tendência é atuar preventivamente, alterando o processo produtivo e usando tecnologias mais limpas. Devido à ausência de estrutura adequada ou dos altos custos para deposição final em locais previamente preparados, os lodos geralmente são depositados em locais inadequados. Isso provoca um aumento de perdas e dos custos de produção, além da geração de impactos ambientais significativos (FERNANDES et al., 2003; COSTA, 2002; MARTINS, 2005).

Com o aumento das restrições impostas pela legislação ambiental, bem como pelas exigências do mercado em direção a processos e produtos ambientalmente corretos, estudos vêm sendo desenvolvidos para promover a redução de geração, o tratamento, a reutilização e a disposição correta de resíduos. Alguns destes estudos demonstraram, com sucesso, que a indústria cerâmica pode atuar como grande aliada para consumir alguns tipos de resíduos, incorporando-os na massa das peças cerâmicas (FERRARI et al., 2002).

As tecnologias utilizadas para a fabricação de revestimentos cerâmicos têm sido objeto de importantes processos de inovação, e não há dúvida de que a necessidade da redução dos impactos ambientais faça com que a indústria de revestimento cerâmico seja uma forte aliada na utilização dos mais variados tipos de resíduos industriais, e a reciclagem de resíduos que apresentam valor econômico é a forma mais atraente para a solução dos problemas de tratamento e destino final, tanto na opinião dos industriais como do ponto de vista dos órgãos estaduais de proteção e fiscalização ambiental, principalmente por ser vista como um fator importante para a redução do consumo dos recursos naturais e uma maneira de reduzir a carga de poluentes lançados no meio ambiente (PALMONARI e TIMELLINI, 2002).

A grande produção nacional de telhas e tijolos consome um volume enorme de matérias-primas retiradas do meio ambiente. Essa retirada constante causa sérios danos ao meio ambiente e indiretamente ao ser humano. Atualmente existem vários processos alternativos que visam à substituição destas matérias-primas naturais por subprodutos industriais, a utilização destes resíduos pode diminuir o impacto ambiental causado pela extração diária. A ideia de utilizar matérias-primas alternativas vem ao encontro com os interesses de muitas indústrias que buscam um destino ecologicamente correto para seus subprodutos industriais. Todo esse trabalho de substituição dos componentes naturais e essenciais do processo de fabricação de tijolos e telhas pode ser associado à busca de alternativas para a melhoria das propriedades destes materiais, ou seja, desenvolvimento de novos produtos (DELLA et al., 2005; CASAGRANDE et al., 2008; DUARTE, 2008).

Neste contexto muitos estudos buscam melhorar as propriedades das peças cerâmicas produzidas com esta adição de resíduos industriais. Muitas vezes essa incorporação busca também a inertização dos resíduos que podem trazer riscos ao meio ambiente e à saúde humana se forem depositados de forma inadequada. Os resíduos industriais utilizados provêm de diversos setores como a indústria vidreira, de curtumes, de siderurgia, de beneficiamento de pedras ornamentais, de derivados de petróleo, entre outros. Vale a pena ressaltar ainda que uma grande parcela dos resíduos reutilizados em cerâmica vermelha é proveniente das próprias indústrias cerâmicas. Desta forma consegue-se diminuir as perdas do processo produtivo e diminuir custos com matéria-prima, uma vez que os resíduos apresentam uma composição química semelhante a dos materiais usados para a produção de peças cerâmicas (FERNANDES et al., 2003; COSTA, 2002; MARTINS, 2005).

A cerâmica vermelha absorve grande parte destas incorporações. Existem vários trabalhos científicos que mostram o desenvolvimento de formulações alternativas, utilizando resíduos industriais, e assim contribuindo efetivamente na diminuição do impacto ambiental que estes resíduos causariam se fossem depositados de forma inadequada no meio ambiente. A principal matéria-prima utilizada na fabricação de cerâmica vermelha são as argilas. Argilas são materiais naturais, quimicamente compostas por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio, podendo também apresentar metais alcalinos e alcalino terrosos em sua composição. Apresentam uma textura fina, adquirindo plasticidade em contato com água. São essencialmente

compostas por cristais de um número restrito e conhecido de argilominerais, podendo também conter cristais de natureza não argilosa (como por exemplo, quartzo, mica, calcita, dolomita e gipsita) além de material não cristalino. A classificação das argilas é realizada com base em seu emprego tecnológico, origem geológica e, argilominerais constituintes (SOUZA SANTOS, 1992).

De acordo com o *Comité International pour l'Étude des Argiles*, recomenda-se que os argilominerais cristalinos sejam divididos em duas classes gerais: silicatos cristalinos com estrutura lamelar ou em camadas, e, silicatos cristalinos com estrutura fibrosa, sendo estes últimos compostos por apenas dois argilominerais, pargorsquita e sepiolita. Os silicatos de estrutura lamelar podem ainda ser divididos em duas famílias: camadas com uma lâmina tetraédrica e uma octaédrica (1:1), ou difórmicos e, camadas com duas lâminas tetraédricas e uma octaédrica (2:1), ou trifórmicos. Dentro destas famílias existem ainda os grupos de argilominerais, que podem ser divididos diferentemente de acordo com o autor. Por exemplo, a caulinita pertence ao grupo da caulinita, tem estrutura dioctaédrica, sendo da família dos minerais difórmicos (1:1) com estrutura lamelar. A montmorilonita pertence ao grupo da esmectita, tem estrutura dioctaédrica, é um mineral trifórmico (2:1) também com estrutura lamelar (SOUZA SANTOS, 1992).

Desta forma, tendo em vista o uso de resíduos sólidos na composição de uma massa de cerâmica vermelha, pensou-se na possibilidade de utilizar os rejeitos gerados em uma estação de tratamento de efluentes de uma indústria têxtil. A água utilizada na indústria têxtil deve ser tratada antes de seu lançamento nos cursos de água, segundo as seguintes etapas de tratamento: decantação, peneiração, homogeneização, tratamento físico-químico, prensagem, aeração, leito de raízes e descarte nos cursos de água. Na lavanderia é utilizada uma rocha denominada pomita (pedra-pomes) para beneficiamento do jeans. Quando a água dessa lavagem é conduzida para a estação de tratamento de efluentes a pomita decanta em um valo especialmente construído para este fim, formando um resíduo.

Após decantação, a água segue para tratamento de homogeneização, sendo depositada em um tanque de equalização onde é adicionado o esgoto líquido gerado na empresa. Desta forma, muita matéria orgânica presente no efluente começa a ser eliminada, pois as bactérias presentes no esgoto se alimentam dela, sendo este o tratamento físico-químico, onde são adicionados produtos químicos para o

tratamento do efluente. Inicialmente é adicionado sulfato de alumínio, um floculante, e em seguida um polímero catiônico, um coagulante.

A água, por meio de agitação, passa por tanques e os flocos de lodo decantam, separando assim o lodo da água. O lodo é retirado do tanque por válvulas e a água segue para o tratamento em aeração. Cal virgem é adicionada ao lodo em um tanque, para uma boa prensagem, e através de bombas essa mistura é conduzida até um filtro-prensa de placas, que prensa o lodo e gera outro resíduo, o lodo de ETE.

No processo de aeração a água recebe oxigênio para degradar toda a matéria orgânica residual presente na água. Finalmente, o tratamento em leito de raízes consiste em seis lagoas com plantas de junco que auxiliam na retirada de metais presente na água. A etapa final é o descarte em curso de água. Após o tratamento, a água é analisada segundo normas para tratamento de efluentes (CONAMA, 2011; Código Estadual do Meio Ambiente de Santa Catarina, 2009; CONAMA 2005). As análises são encaminhadas para a FATMA, órgão fiscalizador ambiental de Santa Catarina.

Atualmente, a produção de lodo no Brasil está estimada entre 150 mil e 220 mil toneladas de matéria seca por ano. Devido aos baixos índices de coleta e tratamento de esgoto ainda existentes no país e à pressão da sociedade por melhores condições ambientais, há uma potencial tendência de ocorrer um incremento substancial na quantidade de lodo a ser disposto na próxima década. A população urbana brasileira está estimada em 116 milhões de habitantes, porém apenas 32 milhões têm seu esgoto coletado, o qual, se integralmente tratado, acarretaria uma produção de 325 mil a 473 mil toneladas por ano de lodo (ANDREOLI, 2001).

Desta forma, este trabalho teve por objetivo a utilização dos rejeitos gerados no tratamento de água e beneficiamento de jeans da Indústria e Comércio de Confecções Damyller Ltda. Na estação de tratamento de efluentes desta empresa são gerados dois tipos de resíduos, o lodo da ETE e o lodo de valo e no processamento do jeans é gerado como resíduo óxido de alumínio, usado para desgaste dos jeans. O lodo de ETE é composto pelos flocos gerados no tratamento físico-químico da água, basicamente é composto por matéria orgânica e cal, adicionada ao lodo para melhor prensagem. O lodo do valo é composto pela areia

da pedra-pomes. São gerados anualmente, na Damyller, 150 toneladas do resíduo lodo de ETE, 150 toneladas do resíduo lodo do valo e 30 toneladas do resíduo óxido de alumínio. Os três resíduos secos foram incorporados em uma massa para produção de lajotas conformadas por extrusão, utilizada pela empresa Cerâmica Forgiarini. As formulações utilizando os resíduos foram processadas em laboratório e suas propriedades foram medidas e comparadas com a massa padrão da empresa cerâmica.

2. Procedimento Experimental

Todo o trabalho foi desenvolvido no laboratório de cerâmica do Parque Científico e Tecnológico da UNESC, iParque. Foram coletados aproximadamente 10 kg de cada resíduo (lodo de valo, lodo de ETE e óxido de alumínio) na empresa Damyller e 10 kg da massa cerâmica da Cerâmica Forgiarini. Os resíduos e a massa cerâmica foram secos em estufa (100 ± 5 °C) por 48 h e moídos a seco durante 30 min em moinho excêntrico de laboratório com jarro de porcelana e elementos moedores de alumina, utilizando uma carga (volume) de 70% de bolas pequenas e 30% de bolas grandes. Após secagem foi determinada a umidade natural dos resíduos e da massa cerâmica.

Após preparação, amostras de cada resíduo e da massa cerâmica foram encaminhadas para análise no Laboratório de Pesquisas e Inovações Tecnológicas da empresa COLORMINAS Colorifício e Mineração. As amostras foram analisadas para determinação da composição química quantitativa por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), distribuição de tamanho de partículas por difração a laser e composição mineralógica por difração de raios X (DRX). Para a análise química por FRX as amostras foram preparadas como pérola fundida, utilizando espectrometria por dispersão de energias (EDS, Bruker S2 Ranger). Para a determinação da distribuição de tamanho de partículas (CILAS 909) as amostras foram preparadas como suspensão defloculada. Finalmente, para a análise por difração de raios X (Bruker D2 Phaser) as amostras foram analisadas como pó, utilizando radiação incidente tipo $\text{CuK}\alpha$ em intervalo 2θ de 0° a 80° com passo de $0,2^\circ/\text{s}$.

Após caracterização dos resíduos e da massa cerâmica os resíduos foram incorporados à massa padrão formando dez composições de massa, Tabela 1. As matérias-primas (resíduos e massa cerâmica) foram misturadas manualmente a seco segundo a composição de cada formulação (Tabela 1). Após mistura, 7% em massa de água foram acrescentados em cada formulação para conformação e as formulações foram granuladas passando-se a mistura úmida por uma peneira de malha 40 ABNT (420 µm). As formulações foram mantidas em repouso por 24 h para homogeneização.

Tabela 1: Planejamento das formulações (% em massa)

Formulação	Massa	Lodo de ETE	Lodo do valo	Óxido de alumínio
A	100%	0%	0%	0%
B	95%	5%	0%	0%
C	90%	10%	0%	0%
D	85%	15%	0%	0%
E	95%	0%	5%	0%
F	90%	0%	10%	0%
G	85%	0%	15%	0%
H	95%	0%	0%	5%
I	90%	0%	0%	10%
J	85%	0%	0%	15%

Em seguida, foram confeccionados 10 corpos-de-prova por prensagem em prensa hidráulica de laboratório para cada formulação, com pressão específica de 30 MPa, formando compactos com 40 mm de diâmetro e 10 mm de altura. Os compactos foram secos em estufa a 100 ± 5 °C por 24 h. As peças prensadas foram pesadas e medidas para determinação de retração de secagem e densidade aparente.

Após secagem, as amostras foram queimadas a uma máxima temperatura de 1050 °C em ciclo de 40 min em forno a rolo de laboratório operando com gás natural. Após queima, as amostras foram medidas e pesadas novamente para determinação da retração de queima, densidade aparente, absorção de água e resistência mecânica por compressão diametral.

Para análise da densidade aparente foi utilizado o princípio de Arquimedes (empuxo), utilizando-se mercúrio. Para análise de absorção de água as amostras

foram mergulhadas em água fria por 24 h, determinando-se a diferença de massa antes e após o ensaio. Finalmente, para o ensaio de resistência mecânica por compressão diametral foi utilizada uma máquina de ensaio universal (Emic DL 10000) com velocidade de ensaio de 10 mm/min, sendo as amostras ensaiadas pelo seu diâmetro. Todos os ensaios foram realizados segundo a norma com base na norma NBR 13818 (1997).

3. Resultados e Discussão

A reutilização dos resíduos da Indústria e Comércio de Confecções Damyller Ltda como matéria-prima para cerâmica vermelha tem o potencial de diminuir os custos para envio a aterro sanitário em até R\$ 50.000,00 por ano. Desta forma, o objetivo do trabalho foi obter uma formulação que utilizasse o máximo dos resíduos e cujo produto acabado – lajotas prensadas – estivesse de acordo com a norma específica.

A umidade dos resíduos (% em massa) da ETE (72,6%) e do valo (28,7%) mostra que estes resíduos devem ser inicialmente processados para incorporação na massa cerâmica, pois apresentam umidade muito elevada. Por sua vez o óxido de alumínio, com 3,9%, apresenta baixa umidade para processamento de cerâmica vermelha, devendo também ser corrigida.

A análise química das matérias-primas, Tabela 2, mostra que a massa cerâmica apresenta composição típica de argilas refratárias, com 2,2% de óxidos fundentes (K_2O , CaO e MgO). O teor de óxido de ferro, 4,9%, resulta na cor vermelha característica deste tipo de produto.

O resíduo de óxido de alumínio apresenta composição típica deste material, com 98,3% de Al_2O_3 , sendo um material tipicamente refratário. O lodo de ETE, além de sílica (42,0%) e alumina (24,5%), apresenta elevado teor de CaO (23,8%), podendo ser considerado um material fundente, para temperaturas acima de 1000 °C. Finalmente, o lodo de valo apresenta elevado teor de sílica, alumina intermediária e um menor teor de óxidos fundentes (K_2O e Na_2O).

Outra análise realizada, a difração de raios X, visou determinar quais os minerais estão presentes nos resíduos e na massa cerâmica. A Figura 1 mostra os difratogramas destes materiais. O resíduo denominado óxido de alumínio, como era de se esperar, apresenta apenas óxido de alumínio em sua composição, bem

cristalizado em função da forma dos picos de difração, não apresentando um halo típico de material amorfo.

Tabela 2: Análise química quantitativa por FRX da massa cerâmica e dos resíduos

Compostos	Óxido de alumínio	Lodo do valo	Lodo de ETE	Massa
SiO ₂	0,4%	73,4%	42,0%	66,0%
Al ₂ O ₃	98,1%	14,6%	24,5%	18,0%
Fe ₂ O ₃	0,1%	1,0%	1,4%	4,9%
CaO	0,1%	1,0%	23,8%	0,1%
K ₂ O	-	4,2%	2,3%	1,6%
MgO	0,6%	0,2%	0,5%	0,5%
Na ₂ O	0,6%	2,1%	0,6%	-
MnO	-	0,1%	0,1%	-
P ₂ O ₅	-	-	1,6%	0,1%
TiO ₂	-	0,2%	0,2%	1,1%
PF	0,1%	3,2%	2,9%	7,7%

Fonte: COLORMINAS, 2013.

O resíduo lodo de valo apresenta-se majoritariamente amorfo devido à forma do espectro de difração, com picos mal formados. Porém, nota-se a presença como fases minoritárias, além da fase amorfa, dos minerais albita (NaAlSi₃O₈) e anortoclásio ((Na,K)AlSi₃O₈), dois feldspatos, e quartzo (SiO₂).

O lodo da ETE também se apresenta majoritariamente amorfo, com presença das fases volastonita (CaSiO₃), um silicato de cálcio, quartzo e anortita (CaAl₂Si₂O₈), este um feldspato cálcico. Finalmente, o difratograma da massa cerâmica mostra que esta é composta majoritariamente por quartzo e pelos argilominerais caulinita (Al₂Si₂O₅(OH)₄) e ilita (KAl₂(AlSi₃O₁₀)(F,OH)₂). A ilita é o material responsável pela plasticidade da massa cerâmica.

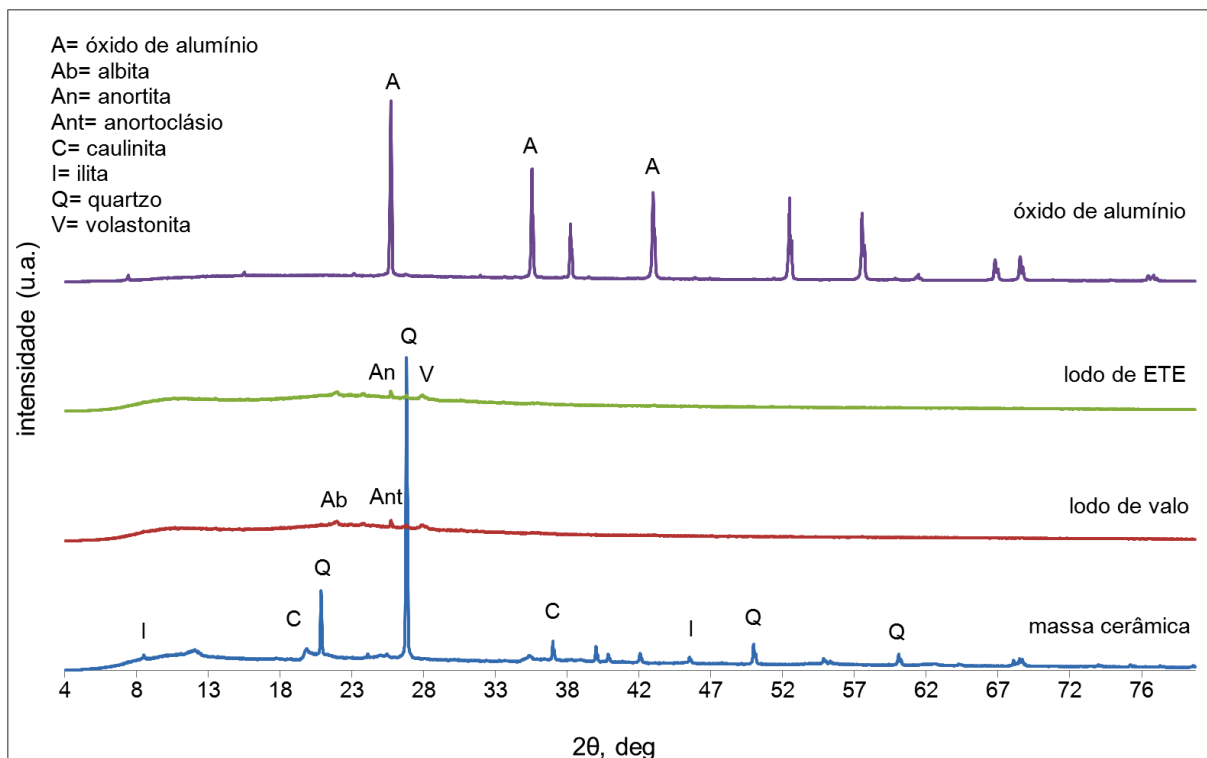


Figura 1: Difratogramas dos resíduos e da massa cerâmica (Fonte: COLORMINAS, 2013.)

Com relação à distribuição de tamanho de partículas das amostras (DTP), Figura 2, pode-se perceber que a massa cerâmica e os resíduos de ETE e de valo apresentam distribuições de tamanhos similares. A massa cerâmica apresenta 90% das partículas com diâmetro equivalente abaixo de 25 μm , enquanto o lodo de ETE apresenta 90% abaixo de 23 μm e lodo de valo 90% abaixo de 42 μm . A massa cerâmica apresenta 50% da distribuição de tamanhos abaixo de 6 μm , para o lodo de ETE abaixo de 7 μm e para o lodo de valo abaixo de 11 μm . 10% da distribuição de tamanhos estão abaixo de 1,3 μm para a massa cerâmica, abaixo de 1,4 μm para o lodo de ETE e abaixo de 2,1 μm para o lodo de valo.

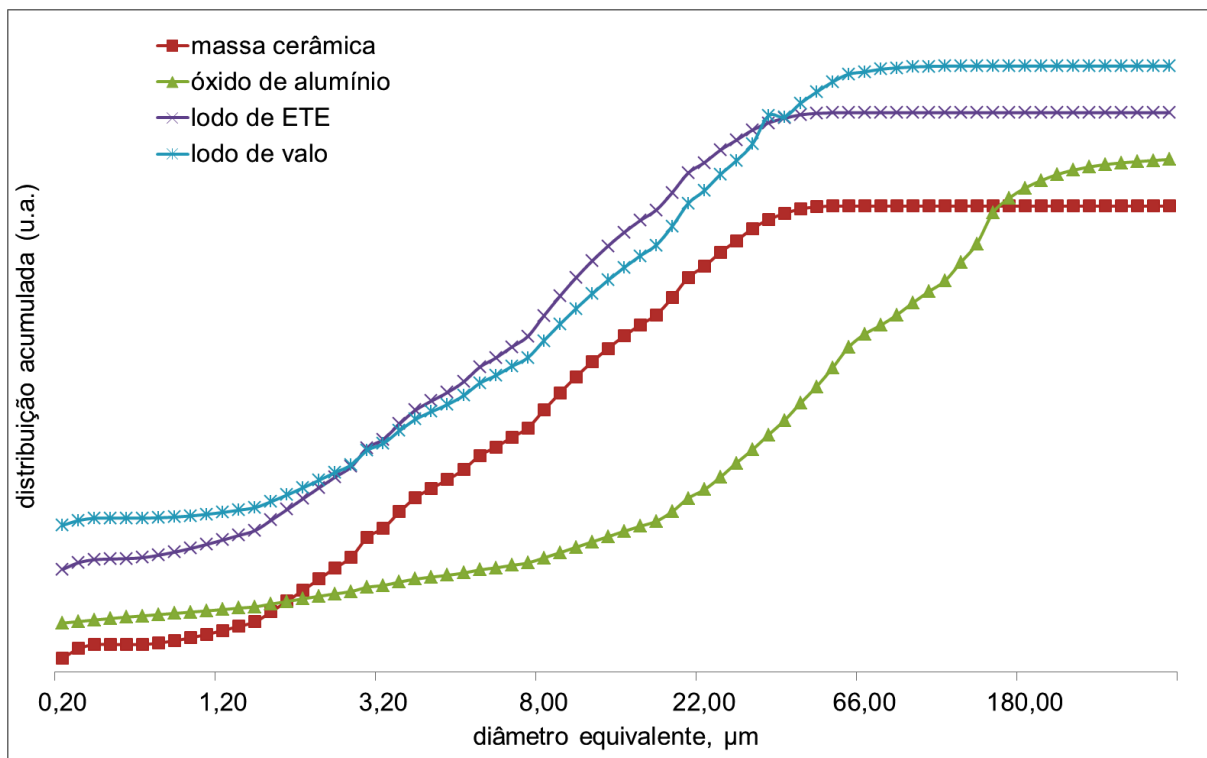


Figura 2: Curvas de distribuição de tamanho de partículas dos resíduos e da massa cerâmica (Fonte: COLORMINAS, 2013.)

Estas distribuições similares não apresentariam problemas para a homogeneização das misturas. Por sua vez, o óxido de alumínio é um resíduo mais grosseiro: 90% da distribuição estão abaixo de 149 μm , 50% está abaixo de 48 μm e 10% abaixo de 4 μm . Este resíduo teria uma tendência à segregação durante homogeneização das misturas. Os diâmetros médios são: 10 μm para a massa cerâmica, 63 μm para o óxido de alumínio, 9,7 μm para o lodo de ETE e 16,5 μm para o lodo de valo.

Após a caracterização das matérias-primas (resíduos e massa cerâmica) foram caracterizadas as composições (Tabela 1 e Figura 3) formuladas tendo por base a massa cerâmica e adicionando-se percentuais variados (5%, 10% e 15% em massa) dos resíduos. A Tabela 3 mostra o resultado das análises de densidade aparente (g/cm^3) das amostras. As análises foram realizadas nas amostras verdes, secas e queimadas a 1050 $^{\circ}\text{C}$ em ciclo de 40 min.

Em relação à formulação padrão sem adição dos resíduos (A), as formulações contendo lodo de ETE (B, C e D) apresentaram redução da densidade aparente tanto para as amostras verdes como para as secas e queimadas, Figura 3. Quanto maior a adição do resíduo menor a densidade das amostras (a exceção para a

amostra verde contendo 5% do lodo de ETE, que apresentou maior densidade que a amostra da massa padrão). Este efeito pode estar relacionado a uma maior dificuldade de compactação das amostras devido a uma redução da plasticidade das formulações com a adição do resíduo. O comportamento das formulações contendo o lodo de valo (E, F e G) é o mesmo daquelas contendo o lodo de ETE, ou seja, diminuição da densidade aparente com a adição crescente do resíduo, Figura 3.

Porém, com relação à adição do óxido de alumínio o efeito é oposto, para todas as adições de resíduo (H, I e J) há um aumento da densidade aparente para as amostras verdes, secas e queimadas, Figura 3. Neste caso o aumento da densidade aparente pode estar ocorrendo devido a um maior empacotamento resultante da diferença de distribuição de tamanho de partículas entre a massa cerâmica e o óxido de alumínio (Figura 2) e também devido à maior densidade do óxido de alumínio em relação à massa padrão (não medida).

Tabela 3: Densidade aparente das amostras verdes, secas e queimadas (1050 °C/ 40 min)

Formulação	d_{verde}	d_{secagem}	d_{queima}
A	2,130±0,114	1,966±0,013	1,981±0,015
B	2,163±0,111	1,953±0,058	1,94±0,038
C	2,063±0,063	1,903±0,007	1,752±0,039
D	1,952±0,034	1,800±0,017	1,677±0,105
E	2,089±0,035	2,015±0,040	1,940±0,040
F	2,050±0,019	1,903±0,010	1,914±0,074
G	2,037±0,017	1,879±0,007	1,914±0,084
H	2,219±0,017	1,979±0,012	1,981±0,046
I	2,279±0,013	2,033±0,012	2,023±0,105
J	2,326±0,018	2,075±0,010	2,067±0,050

Fonte: do autor, 2013.

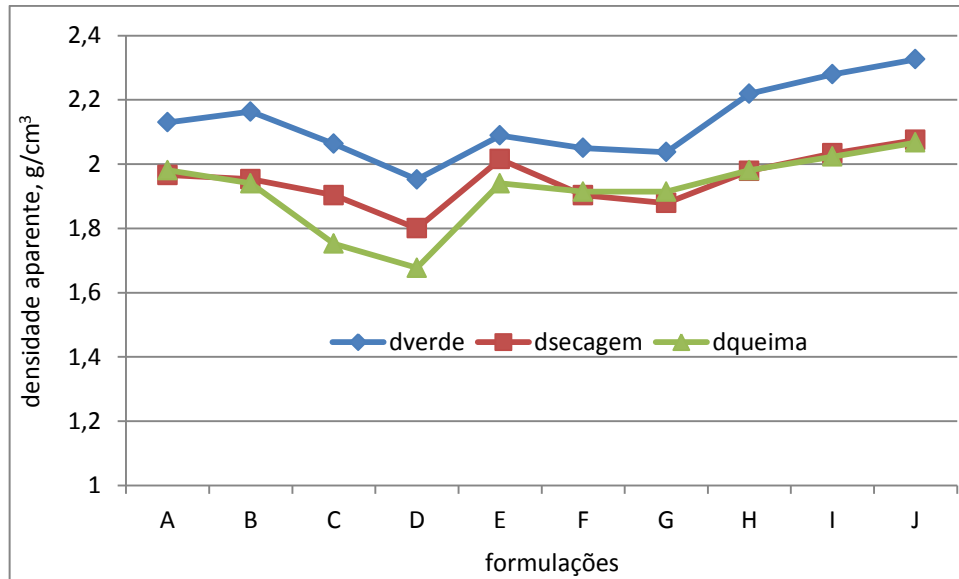


Figura 3: Representa a densidade aparente das amostras verdes, secas e queimadas (1050 °C/ 40 min) (Fonte: do autor, 2013).

A Tabela 4 e a Figura 4 mostram o resultado das análises de retração (%) das amostras após secagem e queima, bem como a retração total. Em relação à massa padrão (A) a adição do lodo de ETE (B, C, D) causou um aumento da retração das amostras tanto na secagem quanto na queima. O aumento do teor de adição de 5% para 15% aparentemente não altera o valor de retração, pois as variações estão dentro do desvio padrão. As amostras contendo lodo de valo (E, F e G) e óxido de alumínio (H, I e J) apresentam valores de retração similares aos da massa padrão, com variações dentro do desvio padrão, mesmo para maiores teores de adição do resíduo, Figura 4.

Com relação à absorção de água, Tabela 4 e Figura 4, a adição de 5% de lodo de ETE diminui a absorção de água e a adição de 15% aumenta o valor desta propriedade para as amostras estudadas. Parece haver um efeito mineralizante da adição do lodo de ETE na massa padrão, porém até 5% de adição deste resíduo à massa padrão. Com relação ao lodo de valo e ao óxido de alumínio não há alteração significativa (variações dentro do desvio padrão) para a absorção de água das formulações mesmo com teores crescentes de adição em relação à absorção de água da massa padrão.

Tabela 4: Retração (%) e absorção de água (%) das amostras após secagem e queima (1050 °C/ 40 min)

Formulação	r_{secagem}	r_{queima}	r_{total}	AA
A	0,45±0,20	1,36±0,13	1,81±0,27	13,33±0,76
B	0,60±0,06	1,96±0,34	2,56±0,33	8,82±1,22
C	0,70±0,10	1,51±0,25	2,21±0,29	11,88±1,14
D	0,60±0,10	1,65±0,24	2,25±0,24	15,00±0,82
E	0,30±0,04	1,70±0,13	2,00±0,12	13,08±0,91
F	0,25±0,06	1,65±0,20	1,90±0,20	13,33±1,04
G	0,20±0,08	1,85±0,26	2,05±0,24	13,21±0,63
H	0,40±0,09	1,50±0,17	1,90±0,16	12,26±0,93
I	0,30±0,08	1,25±0,17	1,55±0,12	12,26±0,66
J	0,30±0,06	1,20±0,09	1,50±0,10	11,21±1,00

Fonte: do autor, 2013.

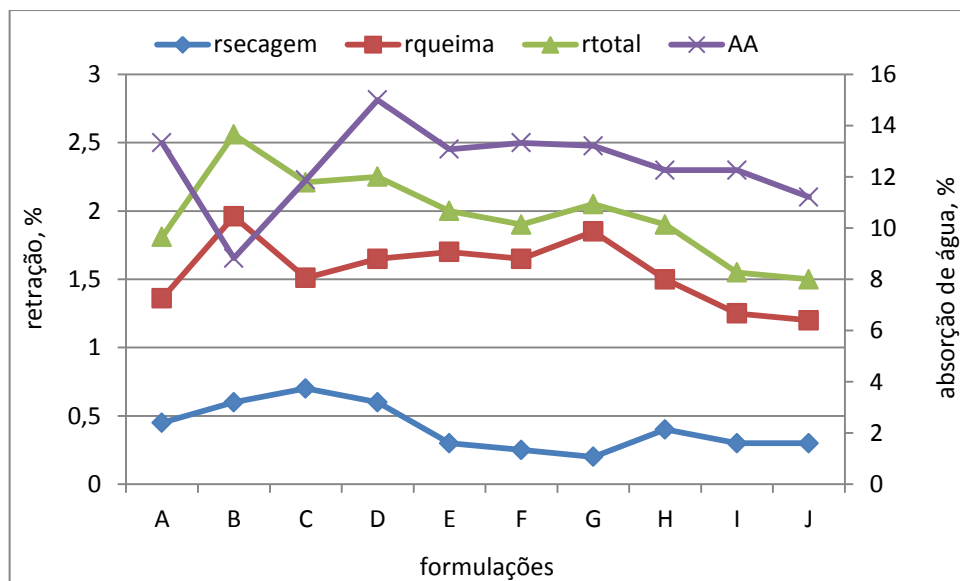


Figura 4: Representa a retração (%) e absorção de água (%) das amostras após secagem e queima (1050 °C/ 40 min) (Fonte: do autor, 2013).

Finalmente, com relação ao comportamento mecânico das amostras estudadas, a adição de 5% de lodo de ETE (B) aumentou ligeiramente a resistência mecânica das amostras em relação à massa padrão (A), Figura 5. A adição de 10% de lodo de ETE (C) resultou em mesma resistência mecânica que a massa padrão e a adição de 15% de lodo de ETE reduziu drasticamente a resistência mecânica da massa

padrão. A maior resistência mecânica média, combinada com menor absorção de água e maior retração total, Tabela 4, da adição de até 5% de lodo de ETE parece estar associada a um efeito mineralizante deste resíduo, pois contém óxidos fundentes, principalmente CaO, na forma de feldspato cálcico que agem como um mineralizante na formulação. Interessante notar que uma adição crescente (15%) deste resíduo resulta em uma maior absorção de água e menor resistência mecânica.

Com relação ao lodo de valo (E, F e G) e óxido de alumínio (H, I e J), a adição crescente destes resíduos reduziu a resistência mecânica das amostras em relação à massa padrão (A). A redução mais acentuada ocorre para a adição de lodo de valo à massa padrão, Figura 5.

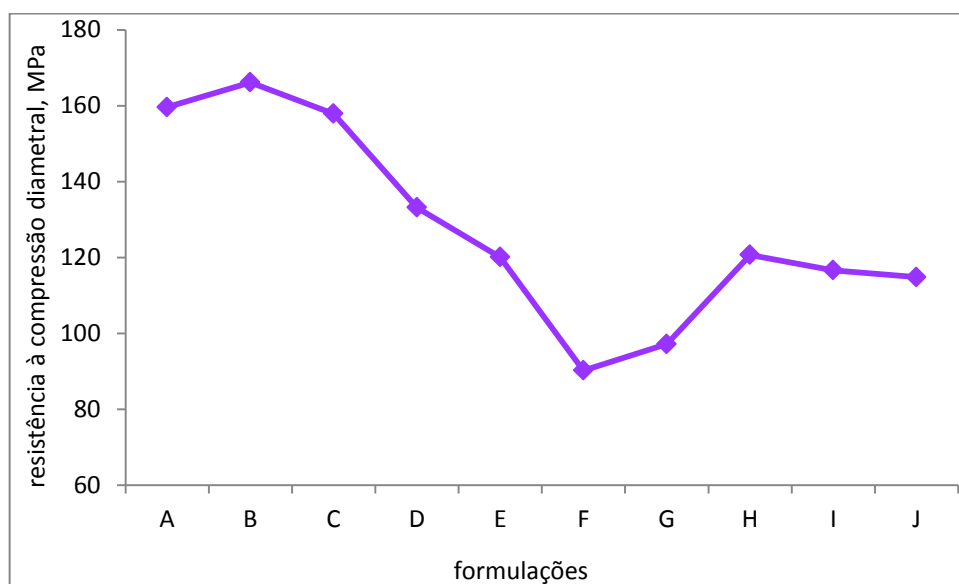


Figura 5: Resistência à compressão diametral média das amostras após queima (1050°C/40min)
(Fonte: do autor, 2013)

4. Conclusão

A partir da caracterização dos resíduos e da massa cerâmica as principais conclusões são:

A massa cerâmica apresenta composição química, mineralogia e distribuição de tamanhos de partículas típica de uma mistura de argilas caulínicas com presença de quartzo e ilita. O resíduo de valo tem composição química e mineralógica típica

de pedra-pomes (ou púmice), uma rocha vulcânica com características vítreas e alta porosidade (90%); sua finura deriva do uso ao qual é destinada, o tratamento dos jeans. O resíduo de ETE tem características da parte sólida de toda água de processamento da empresa e da adição de cal durante o tratamento desta água. Finalmente, o óxido de alumínio, usado para desgaste dos jeans, é quase inalterado.

Com relação às formulações, a adição de lodo de ETE diminui a densidade aparente da massa cerâmica, aumenta sua retração de queima, diminui sua absorção de água até 5% de adição e aumenta a resistência mecânica com esta adição. Adições maiores aumentam a absorção de água e diminuem a resistência mecânica. Desta forma, o uso de 5% de lodo de ETE como adição à massa cerâmica da empresa estudada melhoram as propriedades do produto final, podendo ser uma solução para minimizar o problema do acúmulo deste resíduo e aterros sanitários.

A adição dos outros resíduos – lodo de valo e óxido de alumínio – não alteram significativamente a densidade aparente, retração total e absorção de água da massa cerâmica, porém diminuem sua resistência mecânica. O uso do lodo de valo resultou em baixa retração linear na secagem e na queima, mostrando ser um material que pode reduzir as trincas de secagem e de queima em peças de cerâmica vermelha, aumentando assim a qualidade do produto final.

Considerando que a Cerâmica Forgiarini consome 6.000 toneladas de massa cerâmica e que 150 toneladas/ano de lodo de ETE são enviadas a aterro sanitário a um custo de R\$ 20.800,00 anualmente, a adição de 2,5% em massa de lodo de ETE à massa cerâmica consumiria todo o lodo de ETE e eliminaria os custos de destinação adequada deste resíduo, com o benefício de incrementar as propriedades do produto final.

Porém, deve-se levar em consideração o grande teor de umidade (~73%) e de matéria orgânica (~60%) contidas neste resíduo, o que demandaria uma preparação prévia do mesmo para uso em cerâmica vermelha. Normalmente estes parâmetros não são levados em consideração quando da incorporação de resíduos em produtos cerâmicos, mas podem inviabilizar sua utilização.

Referências

ANDREOLI, V. C. Resíduos sólidos do saneamento: Processamento, reciclagem e disposição final. PROSAB, 2001.

CASAGRANDE, M. C. *et al.* Reaproveitamento de resíduos sólidos industriais: Processamento e aplicações no setor cerâmico. *Cerâmica Industrial*, v. 13, n. 1/2, p. 34-37, 2008.

Código Estadual do Meio Ambiente de Santa Catarina, Lei nº 14.675. Padrões ambientais de recursos hídricos. Código Estadual do Meio Ambiente de Santa Catarina, 2009.

CONAMA nº 430, Art. 16º. Condições e padrões de lançamentos de efluentes. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2011.

CONAMA nº 357, Art. 15º. Classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2005.

COSTA, M. G. *et al.* Reutilização in situ das lamas residuais de uma indústria cerâmica. *Cerâmica Industrial*, v. 7, n. 5, p. 44-50, 2002.

DUARTE, A. C. L. Incorporação do lodo de esgoto na massa cerâmica para a fabricação de tijolos maciços: Uma alternativa para a disposição final do resíduo. Dissertação. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008. 111 p

DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. Reciclagem de resíduos agroindustriais: Cinza de casca de arroz como fonte alternativa de sílica. *Cerâmica Industrial*, v. 10, n. 2, p. 22-25, 2005.

FERNANDES, P. F.; OLIVEIRA, A. P. N.; HOTZA, D. Reciclagem do lodo da estação de tratamento de efluentes de uma indústria de revestimentos cerâmicos. Parte 1: Ensaios laboratoriais. *Cerâmica Industrial*, v. 8, n. 2, p. 26-27, 2003.

FERRARI, K. R.; FERRI, C. F.; SILVA, L. L.; BATISTA, L. C. Z.; FIGUEIREDO FILHO, P. M. Ações para a diminuição da geração de resíduos na indústria de revestimentos cerâmicos e a reciclagem das “raspas”. Parte 1: Resultados preliminares. *Cerâmica Industrial*, v. 7, n. 2, p. 38-41, 2002.

MARTINS, C. A.; SORDI, V. L.; BRUNO, R. S. S.; ZAUBERAS, R. T.; BOSCHI, A. O. Metodologia para avaliação da possibilidade de incorporação de resíduos industriais em massas cerâmicas conformadas por extrusão. *Cerâmica Industrial*, v. 10, n. 4, p. 32-34, 2005.

PALMONARI, C.; TIMELLINI, G. A indústria de revestimentos italiana e o meio ambiente. *Cerâmica Industrial*, v. 7, n. 1, p. 7-11, 2002.

SOUZA SANTOS, P. *Ciência e tecnologia de argilas*. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1992.