

Reciclagem do Lodo da Estação de Tratamento de Efluentes de uma Indústria de Revestimentos Cerâmicos. Parte 1: Ensaio Laboratoriais

P.F. Fernandes^{1,2}, A.P.N. Oliveira^{2,3} e D. Hotza^{1,2}

¹ Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Departamento de Engenharia Química – EQA, Campus Universitário, 88040-900 Florianópolis - SC, Brasil
e-mail: hotza@enq.ufsc.br

² Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PGMAT

³ Centro de Tecnologia em Materiais - CTCmat, Criciúma - SC

Resumo: O lodo de estação de tratamento de efluentes é um resíduo sólido não inerte de indústrias cerâmicas, que é em geral depositado em aterros. No presente trabalho, desenvolveu-se uma forma de reutilização da torta da estação de tratamento de efluentes de uma indústria de revestimentos cerâmicos, através da adição desta à massa de grés. Este reaproveitamento tem como finalidades a redução dos custos de produção da massa, a diminuição de rejeitos enviados para aterro e por consequência a eliminação de um impacto ambiental significativo. Foram realizados testes preliminares em laboratório para análise da viabilidade de implantação em escala fabril de produção. Em laboratório, foram formuladas misturas de resíduo e massa padrão de grés cerâmico, em percentuais relativos variáveis. Para cada mistura, foram medidas as propriedades absorção d'água, retração linear e resistência mecânica de peças queimadas, no intervalo de temperatura de 1100 a 1200 °C. Os resultados obtidos para incorporações de até 5% de resíduo foram comparáveis aos resultados obtidos com massa padrão.

Palavras-chaves: *resíduo, reciclagem, revestimentos cerâmicos*

1. Introdução e objetivos

Com o crescente aumento da concorrência e das preocupações com a melhoria da qualidade do meio ambiente, as indústrias vêm buscando alternativas de diminuir os custos visando à redução dos impactos ambientais e o aumento da credibilidade perante o mercado consumidor. Esse comportamento se insere no contexto de uma legislação mais exigente, do desenvolvimento de políticas econômicas, de outras medidas destinadas a estimular a proteção ao meio ambiente e de uma crescente preocupação das partes interessadas em relação às questões ambientais e ao desenvolvimento sustentável.

Muitas empresas têm efetuado análises ambientais a fim de avaliar seu desempenho ambiental. Para que estes sejam eficazes, é necessário que esses procedimentos se-

jam conduzidos dentro de um sistema de gestão estruturado e integrado ao conjunto de atividades de gestão. É buscando a realização de todos os requisitos legais e a otimização de seu processo que as indústrias estão buscando a implantação da ISO14001⁷.

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 no Brasil quanto no mundo. As empresas estão se conscientizando de que a geração de resíduos está associada a custos, já que requer seu tratamento e/ou disposição adequados. A tendência é atuar preventivamente, alterando o processo produtivo e usando tecnologias mais limpas.

Para o tratamento dos efluentes gerados no decorrer dos processos industriais, são implantadas as Estações de Tratamento de Efluentes (ETE) que geram como subprodutos lodos; enquadrados como resíduos sólidos perigosos ou não-perigosos. Sua disposição é cara e pode afetar as características ambientais da região caso seja disposto indevidamente.

As indústrias cerâmicas, nos processos de preparação de massas, esmaltes, esmaltação e escolha geram considerável quantidade de emissões, efluentes e resíduos que provocam a necessidade de investimentos em vários equipamentos de tratamento e/ou destinação adequada. Os efluentes são tratados em ETE, de onde resulta o lodo que, após prensado em filtro-prensa, é compactado em blocos chamados comumente de torta de lodo ou apenas torta.

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 e além da geração de impactos ambientais significativos. Essas análises e informações contribuem com o aumento da tendência de buscas de reaproveitamento de resíduos visando a redução de custos industriais e agressões ao meio ambiente.

O presente trabalho propõe uma solução para o problema da produção de cerca de resíduos de lodo de uma empresa fabricante de revestimentos cerâmicos. Os objetivos do trabalho são:

- caracterizar o lodo, visando o seu uso na composição da massa;
- estudar a viabilidade de uso deste resíduo, reduzindo os custos da massa de revestimentos cerâmicos;
- diminuir o envio de rejeitos industriais para aterros e por consequência a geração de impactos ambientais negativos;
- contribuir para a modificação do conceito incorreto de resíduos como sendo materiais descartáveis, indesejáveis e prejudiciais aos produtos.

Nesta primeira parte do trabalho serão analisados os resultados preliminares, obtidos em laboratório.

2. Tratamento de efluentes e resíduos

No decorrer do processo produtivo, diversas atividades geram resíduos, emissões atmosféricas e efluentes que devem receber tratamento adequado antes do descarte para o meio ambiente.

Os efluentes, numa indústria cerâmica, são produzidos basicamente em três setores: preparação de massa, preparação de esmaltes e linhas de esmaltação. A geração desses resíduos deve-se à limpeza de equipamentos, sobras de produção e, no caso de resíduos de massa, de peneiramentos da barbotina antes da atomização da massa.

Existem várias formas de tratamento de efluentes, po-

rém em indústrias cerâmicas, comumente utilizam-se duas formas:

- instalação de duas Estações de Tratamento de Efluentes (ETE) independentes; uma destinada ao tratamento dos efluentes gerados no setor de preparação de massa e outra destinada ao tratamento dos efluentes de esmaltes, provenientes das linhas de esmaltação e do setor de preparação de esmaltes;
- instalação de uma única ETE que tratará simultaneamente resíduos de esmaltes e massa.

O desenvolvimento deste trabalho será feito em uma indústria que utiliza a segunda opção de tratamento. Assim, os efluentes de massa e esmaltes são coletados em canais setoriais ligados a um canal central que tem a finalidade de transportar a mistura de efluentes para o devido tratamento, antes do descarte da água industrial no meio ambiente.

Um equipamento utilizado para a filtração em estações de tratamento de efluentes é o filtro-prensa que consta de uma série de pratos paralelos, cobertos em ambos os lados por um meio filtrante. As câmaras, onde fica depositada a torta, são formadas entre placas sucessivas de forma que as espessuras das tortas de lodo podem ser variáveis.

A filtração pode ser definida como a separação de partículas de um fluido mediante a passagem do mesmo através de um leito poroso e permeável que as retém. Através do efeito de obstrução, as partículas ficam retidas unicamente pelo seu tamanho e forma geométrica. Independente da dimensão efetiva dos poros, se as suas partículas movem-se a uma distância da parede dos poros igual ou inferior ao seu raio, serão separadas e interceptadas⁵.

O fluxograma da Fig. 1 descreve as etapas envolvidas no tratamento de efluentes.

As etapas do tratamento de efluentes estão descritas em detalhe a seguir.

- 1) **Tanque de pré-decantação:** tanque onde o efluente vindo do processo é recebido. É onde ocorre a primeira decantação sem a adição de nenhum tipo de produto químico. O lodo decantado é retirado por raspadores no fundo do tanque. Esse lodo é arrastado para o tanque de lodo.
- 2) **Tanque de pré-armazenamento:** tanque onde escoo o efluente que pré-decantou. Armazena e bombeia o efluente para as chicanas.
- 3) **Chicanas de mistura:** corredores por onde passa o efluente, com a finalidade de promover um maior contato entre o efluente e os produtos químicos que são dosados.
- 4) **Dosagem de coagulante e floculante:** produtos químicos utilizados para a decantação dos sólidos que não decantaram no tanque de pré-decantação.
- 5) **Decantador:** tanque utilizado para a decantação dos sólidos. Depois da adição dos produtos químicos o efluente escoo para este tanque para que ocorra a

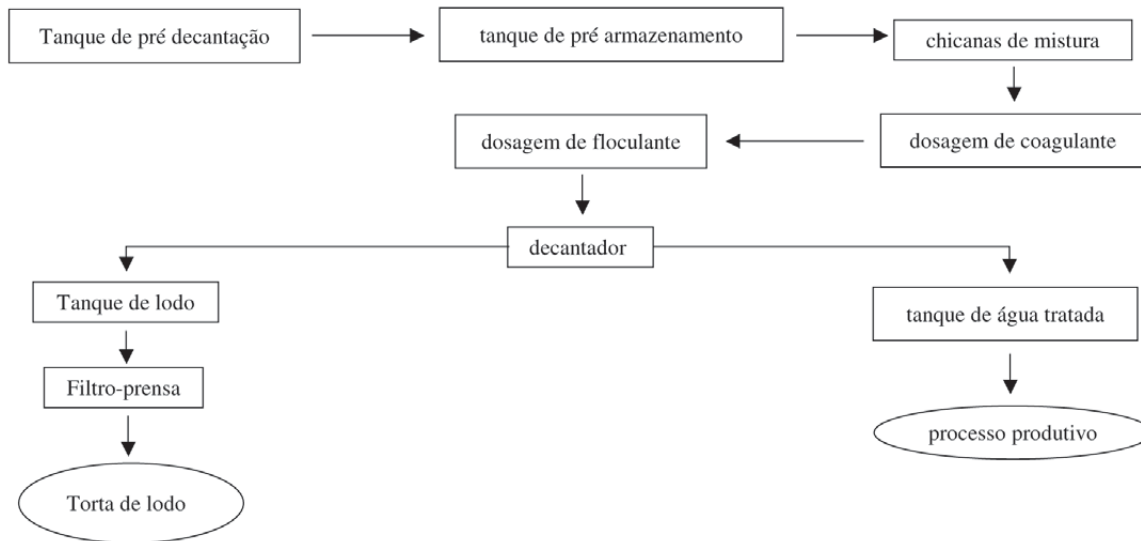


Figura 1. Fluxograma da estação de tratamento de efluentes de uma indústria cerâmica.

decantação. A água tratada é bombeada para o tanque de água tratada. Os sólidos que decantaram (lodo) vão para o tanque de lodo.

6) Tanque de água tratada: tanque para onde a água tratada na estação de tratamento é bombeada. Este tanque armazena esta água até ser utilizada no processo produtivo.

7) Tanque de lodo: tanque que armazena o lodo gerado no tanque de pré-decantação e no decantador, de onde o lodo é enviado para o filtro-prensa.

8) Filtro-prensa: filtra e prensa o lodo, retirando aproximadamente 75% da água. Após esse processo o que foi prensado chama-se torta de lodo.

9) Reaproveitamento no processo: carregamento da torta de lodo para adição na moagem junto a outras matérias-primas.

3. Reciclagem de resíduos na indústria cerâmica

Os aterros industriais, criados e projetados especialmente para disposição de resíduos sólidos industriais, são as alternativas mais procuradas pelas empresas para livrarem-se dos resíduos e multas. Porém, alguns métodos vêm sendo aplicados, alcançando resultados interessantes do ponto de vista econômico e de preservação do meio ambiente. Assim a reciclagem, palavra de ordem dentro dos sistemas modernos de gerenciamento, surge como importante opção, em face de sua grande flexibilidade operacional e da possibilidade de sua aplicação em sistemas de baixo custo¹⁰. Dentre as inúmeras vantagens do reaproveitamento dos resíduos, pode-se citar:

- diminuição da quantidade de resíduos enviados para aterros industriais, diminuindo assim, os custos com destinação e transporte;
- economia de energia e recursos naturais;
- melhoria de imagem da empresa frente ao mercado consumidor;
- redução dos custos industriais mediante a incorporação de resíduos em seus processos produtivos.

Vários estudos já foram realizados visando a utilização de resíduos industriais oriundos de diversos processos de fabricação em massas cerâmicas, entre eles podem-se citar:

- Mendes¹¹ desenvolveu, em escala laboratorial, agregados leves a partir de lodo da indústria têxtil. Avaliou a influência de várias formulações na morfologia e concluiu que é uma alternativa viável para a utilização e disposição de lodos industriais.
- Oliveira¹⁵ *et al.* avaliaram a viabilidade de utilização do resíduo proveniente do processo de fabricação de papel, em massa de revestimentos tipo semi-grês. Foram feitos corpos de prova com incorporações de 2 a 7,5%, na temperatura de 1180 °C. Os resultados mostraram que o resíduo pode ser utilizado, em uma proporção de até 4%, para melhorar a resistência mecânica e a absorção de água do produto final.
- Vicenzi¹⁹ *et al.* analisaram, em escala laboratorial, a utilização de escória de aciaria em uma massa de piso cerâmico, nas temperaturas de queima de 850 °C, 950 °C e 1050 °C, com percentuais de 2%, 5% e 10% e concluíram que tal resíduo diminui a temperatura de sinterização, porosidade aparente e absor-

ção de água e aumenta a resistência mecânica dos pisos, sendo os melhores resultados obtidos nos corpos de prova contendo 2% de resíduo.

- Neves¹⁴ *et al.* estudaram sobre o aproveitamento dos resíduos oriundos do beneficiamento de granitos na fabricação de tijolos cerâmicos. Os resultados obtidos em laboratório, após diversos ensaios de caracterização das propriedades químicas e físicas, com 31% de lodo e temperaturas na faixa de 1000 °C a 1200 °C, indicaram a possibilidade de utilização destes resíduos na fabricação de tijolos maciços.
- Silva¹⁷ *et al.* verificaram a viabilidade de utilização de cinzas volantes, oriundas da queima de carvão em usinas termelétricas, em massas cerâmicas. Os testes realizados comprovaram que as formulações definidas são adequadas para confecção de pequenas peças e ladrilhos cerâmicos.
- Xavier²⁰ *et al.* estudaram a possibilidade de utilização de rejeitos oriundos do corte dos blocos de mármore, de indústrias de beneficiamento de mármore e granitos, em massas cerâmicas. Realizaram diversos ensaios de caracterização e seus resultados indicaram a possibilidade do uso deste resíduo na confecção de artefatos cerâmicos para uso na construção civil.
- Morais¹³ *et al.* avaliaram as propriedades mecânicas de revestimentos cerâmicos contendo adições de resíduos queimados de indústrias cerâmicas e concluíram que com o aumento nas propriedades do produto acabado torna-se viável a utilização desse resíduo no processo de fabricação.
- Soares¹⁸ *et al.* estudaram sobre a adição de serragem de couro curtido como matéria-prima para a produção de cerâmica vermelha. Foram realizadas diversas incorporações do resíduo à mistura de argilas e os resultados demonstraram um crescimento da resistência mecânica.
- Romano *et al.* [2001] verificaram, em escala laboratorial, a tolerância da utilização de sobras de esmaltes cerâmicos em massas cerâmicas, através de caracterização química e mineralógica que é possível adicionar até 8% de tal rejeito à massa, sem alterar significativamente as propriedades do produto.
- Menezes¹² *et al.* estudaram o uso de um rejeito de granito, oriundo da decantação de efluente industrial no processo de obtenção de agregados graúdos para concretos (britas), em composições de cerâmica vermelha para produção de tijolos e telhas. Através de ensaios de caracterizações físico-químicas, concluíram que as propriedades permaneceram dentro das especificações exigidas para os produtos.
- Folgueras⁹ obteve-se vidros e vitrocerâmicos sinterizados a partir da combinação de escórias de alto forno e cinzas volantes, provenientes da com-

bustão do carvão em termoeletricas. Os vidros foram fundidos em temperaturas entre 1200 e 1400 °C e os tratamentos térmicos para cristalização utilizaram ciclos de 60 min. O comportamento mecânico do vitrocerâmico desenvolvido foi compatível com o de vitrocerâmicos comerciais e grês porcelanato.

- Casagrande⁶ analisou o efeito da adição de chamote semi-gresificado (caco) na massa cerâmica. Foram comparados os resultados de 5 formulações (entre 1 e 30% de caco) em 5 temperaturas de queima, na faixa de 1000 a 1200 °C. Descreveu as principais características físico-químicas e concluiu que a adição de até 10% de caco à massa cerâmica não influencia nas características físico-químicas do material.
- Rosa¹⁶ estudou a viabilidade de obtenção de placas cerâmicas para revestimentos, a partir de resíduos de diversos setores industriais. Nas formulações foram acrescentados percentuais variáveis, até 10%, de resíduos gerados em indústrias de revestimentos cerâmicos, metalúrgicas e mineradoras. Os corpos de prova foram sinterizados entre 900 e 1120 °C. Concluiu que é possível utilizar matérias-primas não convencionais e obter um comportamento semelhante aos produtos fabricados com matérias-primas tradicionais.
- Ferrari⁸ *et al.* avaliaram o efeito da adição de 3 a 9% de resíduo sólido (“raspas”) a uma massa padrão de revestimentos cerâmicos fabricados por via seca, e verificaram que ocorre a melhoria no teor de absorção de água da peça cerâmica sem alterar, significativamente, a retração linear de queima, além de aumentar a resistência mecânica das peças após a queima.

4. Procedimento experimental

Os ensaios e análises laboratoriais foram realizados no Centro de Tecnologia em Cerâmica (CTC), e no Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas (IPAT) / Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), ambos em Criciúma, SC.

4.1 Matérias-primas, resíduos e produtos

4.1.1 Massa padrão

A caracterização da distribuição de tamanho de partículas foi realizada no CTC com granulômetro por difração a laser Cilas 1064L. A massa padrão foi caracterizada quanto à sua composição química por fluorescência de raios-x (FRX) no CTC. A análise térmica simultânea foi feita em um instrumento Netzsch STA 409EP, em cadinho de Al₂O₃ ao ar, com a taxa de 10 °C /min até 1110 °C.

4.1.2 Torta de lodo de ETE

Amostras do lodo foram coletadas na saída do filtro-prensa, durante uma semana, para cada etapa de análise

Tabela 1. Formulações de massa utilizada em laboratório.

Teste laboratorial	Componente	Percentual mássico de componentes em base seca								
Fase 1 (TL1)	Massa padrão	100	99	97	95	50	0			
	Torta de lodo de ETE	0	1	3	5	50	100			
Fase 2 (TL2)	Massa padrão	100	99,5	99	98,5	98	97,5	97	96,5	96
	Torta de lodo de ETE	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4

laboratorial. Obteve-se, assim, uma amostra mais homogênea, com umidade de aproximadamente 25%.

A caracterização da distribuição de tamanho de partículas foi realizada no CTC com granulômetro por difração a laser Cilas 1064L. A análise química do lodo foi feita por FRX no CTC, além de ter sido classificado segundo NBR ISO 10004², pelo IPAT/UNESC, através de ensaio de lixiviação, conforme NBR ISO 10005³ e ensaio de solubilização conforme NBR ISO 10006⁴. A análise térmica simultânea foi feita em um instrumento Netsch STA 409EP, em condições análogas à análise da massa padrão.

4.2 Métodos de ensaio

Foram observados, nos testes preliminares em laboratório, os efeitos da adição de diversos percentuais do resíduo de lodo de ETE em peças queimadas em algumas temperaturas sobre as propriedades absorção d'água, retração linear e resistência mecânica, para definição de um percentual viável para a realização dos testes industriais iniciais.

Para estes ensaios foram usadas as seguintes proporções de massa padrão e torta de lodo, Tabela 1.

Foram realizados 2 testes laboratoriais denominados TL. No TL1 foram incorporados 1; 3; 5; 50; 100% de lodo à massa padrão. No TL2 foram incorporados 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5 e 4% de lodo à massa padrão.

Os corpos de prova, nas dimensões de 10,0 × 5,0 × 0,5 cm³, compactados a uma pressão de 300 kgf/cm² com umidade de 7%. Foram queimados nas temperaturas de 1100 °C, 1150 °C e 1200 °C no TL1 e 1100 °C, 1150 °C, 1180 °C e 1200 °C no TL2, durante 4 min, no laboratório de processamento do CTC.

5. Resultados e discussão

5.1 Caracterização dos materiais

5.1.1 Massa cerâmica

A partir da distribuição granulométrica da massa atomizada em uma suspensão aquosa, realizada por difração a laser, verificou-se que 100% das partículas estão abaixo de 70 mm e cerca de 10% estão abaixo de 1 mm. O tamanho médio de partícula, calculado como 50% da curva cumulativa foi de aproximadamente 6 mm para a amostra analisada.

Tabela 2. Composição química da massa cerâmica.

Óxidos	% em massa	Óxidos	% em massa
SiO ₂	66,57	K ₂ O	3,81
Al ₂ O ₃	18,73	MnO	0,05
Fe ₂ O ₃	2,30	TiO ₂	0,80
CaO	0,25	MgO	0,77
Na ₂ O	2,00	P ₂ O ₅	0,04
		Perda ao Fogo	4,68

Na Tabela 2, apresenta-se a composição química da massa, realizada por FRX. Nota-se a presença de elementos característicos das fases majoritárias comumente presentes em uma massa cerâmica tradicional.

A partir da análise térmica diferencial (ATD) e termogravimetria (TG) foram observadas as seguintes características. A 80,4 °C ocorreu um pico endotérmico relativo à saída de água adsorvida, com uma perda de massa de 0,64%. Entre 150 °C e 400 °C, aproximadamente, houve uma perda de massa de 0,69%, devido a desidroxilação de algum hidróxido e/ou decomposição de matéria orgânica. A 496,8 °C ocorreu um pico endotérmico relativo a desidroxilação da caulinita, com uma perda de massa de 2,12%. A 564,2 °C ocorreu um leve pico endotérmico, indicando a presença de quartzo. Entre 620 °C e 820 °C, aproximadamente, houve uma perda de massa de 1,05%, possivelmente devido à decomposição de carbonatos.

5.1.2 Torta de lodo de ETE

A curva de distribuição granulométrica de uma amostra de lodo, realizada por difração a laser permitiu identificar que 100% das partículas estão abaixo de 60 mm. O tamanho médio de partícula calculado para a amostra analisada foi em torno de 6 mm. A forma da curva e os valores característicos de tamanho de partícula são comparáveis aos da curva da massa padrão.

Na Tabela 3, apresenta-se a composição química da torta, realizada por fluorescência de raios-x. Comparando as análises da massa e do lodo, observa-se que os óxidos BaO, Cr₂O₃, PbO, SrO, ZnO são encontrados apenas na composição de lodo. Estes elementos são oriundos de outros processos de fabricação (p. ex. porcelanato), que tra-

tam seus efluentes na mesma estação de tratamento.

No teste de lixiviação realizado, Tabela 4, o resíduo foi classificado como não perigoso, conforme NBR ISO 10004². Neste teste foram analisados três elementos (cádmio, chumbo, cromo), além de íons fluoreto. No teste de solubilização, por sua vez, o resíduo foi classificado como classe II (não-inerte), conforme NBR ISO 10004². Neste teste foram analisados os mesmos três elementos, além de íons sulfato, e dureza.

A partir da análise térmica diferencial (ATD) e termogravimetria (TG) foram observados basicamente os mesmos picos característicos anteriores. A 67,5 °C ocorreu um pico endotérmico relativo à saída de água adsorvida, com uma perda de massa de 0,67%. Entre 120 °C e 420 °C, aproximadamente, houve uma perda de massa de 1,02%, devido a desidroxilação de algum hidróxido e/ou decomposição de matéria orgânica. A 506,7 °C ocorreu um pico endotérmico relativo a desidroxilação da caulinita, com uma perda de massa de 2,33%. A 564,6 °C ocorreu um leve pico endotérmico, indicando a presença de quartzo. A 702,0 °C ocorreu um pico endotérmico relativo, possivelmente, à decomposição de carbonatos, com uma perda de massa de 0,70%.

Tabela 3. Composição química da torta.

Óxidos	% em massa	Óxidos	% em massa
SiO ₂	57,13	ZrO ₂	4,30
Al ₂ O ₃	16,61	BaO	1,18
Fe ₂ O ₃	1,31	Cr ₂ O ₃	0,17
CaO	4,34	PbO	0,70
Na ₂ O	1,13	SrO	0,04
K ₂ O	2,87	ZnO	3,96
MnO	0,09	Perda ao Fogo	4,57
TiO ₂	0,46		
MgO	1,05		
P ₂ O ₅	0,10		

Tabela 4. Classificação da torta de lodo, segundo NBR ISO 10004².

Parâmetros	Lixiviação		Solubilização	
	Resultado Obtido (mg/l)	Limite Máximo Permitido (mg/l)	Resultado Obtido (mg/l)	Limite Máximo Permitido (mg/l)
Alumínio (mg/l)	—	—	0,9	0,2
Cádmio (mg/l)	<0,01	0,5	—	—
Chumbo (mg/l)	1,22	5,0	<0,05	0,05
Cromo (mg/l)	<0,02	5,0	<0,02	0,05
Dureza Total (mg/l)	—	—	34	500
Fluoretos (mg/l)	0,2	150	—	—
Sulfato (mg/l)	—	—	<1	400

5.2 Formulações

Nos gráficos de variação de propriedades a serem apresentados a seguir, são expressos os valores médios das propriedades medidas e, na forma de uma barra de erros, o desvio padrão dos valores medidos.

5.2.1.1 Teste laboratorial 1

Foram feitos testes de retração linear, absorção d'água e resistência mecânica com vários percentuais de incorporação de lodo, na faixa de temperatura de 1100 a 1200 °C, para analisar o comportamento das amostras e a viabilidade da utilização do lodo na massa cerâmica.

A Fig. 2 apresenta os resultados do teste laboratorial 1 de retração linear em função da temperatura de queima, para as formulações estudadas. Observa-se que a retração linear aumenta com o aumento da temperatura, como resultado do aumento do grau de densificação da massa, até 1150 °C. Já na temperatura de 1200 °C começa a ocorrer um escoamento da massa vítrea presente no lodo incorporado, causando na prática uma tendência contrária à retração do corpo na direção medida neste ensaio.

Além disso, para as temperaturas de queima de 1100 e 1150 °C, não houve variação significativa na RL da massa com incorporação de até 5%. Nestas temperaturas, a amostra com 100% de lodo apresenta os maiores valores de retração linear. Tal fato se deve à presença de elementos fundentes no lodo, p. ex. Na, Pb, K, conforme análise química anterior. Como consequência, forma-se possivelmente fase líquida, que aumenta o grau de densificação do material.

Para a temperatura de 1200 °C, temperatura próxima à utilizada para queima de produtos grés e semi-grés (1180 °C, usualmente), não ocorreram variações significativas na variável analisada, na faixa de adição de lodo de até 50%.

A Fig. 3 apresenta o efeito da absorção d'água em função da temperatura para as formulações estudadas no teste laboratorial 1. Esta propriedade está associada ao tipo de microestrutura formada no material sinterizado e seu con-

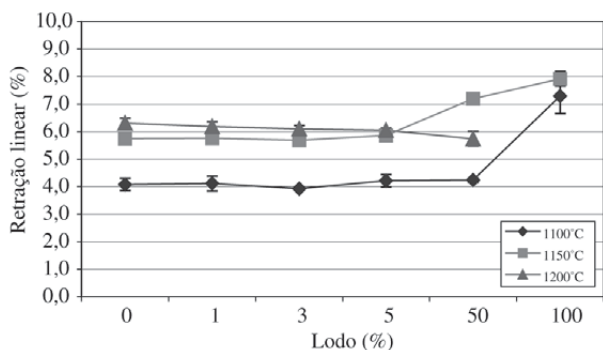


Figura 2. Retração linear em função da temperatura para as formulações estudadas no teste laboratorial 1.

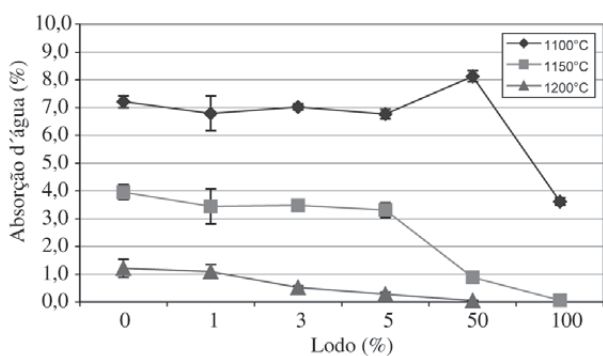


Figura 3. Absorção d'água em função da temperatura para as formulações analisadas no teste laboratorial 1.

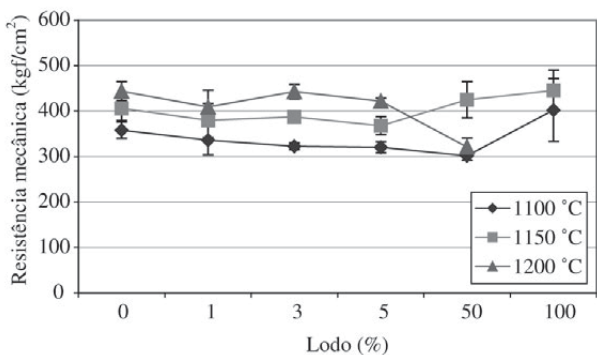


Figura 4. Resistência mecânica em função da temperatura para as formulações analisadas no teste laboratorial 1.

trole significa uma forma simplificada de controle da porosidade, podendo interferir em outras propriedades do produto acabado.

De acordo com o esperado, os resultados de absorção d'água de todas as formulações estudadas diminuí com o aumento da temperatura e do percentual de incorporação de lodo. Nas temperaturas de 1150, 1180 e 1200 °C, ob-

serva-se uma grande diminuição do índice de absorção d'água para todas as formulações estudadas em função do aumento da densificação da massa.

A Fig. 4 apresenta os resultados obtidos quanto à resistência mecânica das formulações analisadas em relação às temperaturas impostas no teste laboratorial 1. Conforme NBR ISO 13817¹, considerando o índice de absorção d'água do produto final, são aceitáveis os valores de resistência mecânica entre 300 e 450 kgf/cm².

A análise dos resultados apresentados na Fig. 4, para as formulações de 0, 1, 3 e 5%, mostra que a resistência mecânica apresenta a mesma tendência dos resultados anteriores. Assim, corpos de prova com maior grau de densificação (sinterizados a maiores temperaturas) apresentam uma maior resistência mecânica. Os resultados para a temperatura de queima de 1200 °C, para 50% de lodo incorporado são tendencialmente menores, devido à formação de fase vítrea que torna mais frágil o material.

5.2.1.2 Teste laboratorial 2

Foram feitos testes de retração linear, absorção d'água e resistência mecânica com percentuais menores de incorporação de lodo, quando comparado com o teste laboratorial 1, e com temperaturas mais próximas das utilizadas em indústrias cerâmicas. Essa escolha deveu-se ao fato de que, nesta pesquisa, optou-se por adicionar quantidades que pudessem corresponder ao aproveitamento total da quantidade produzidas de lodo, considerando os parâmetros usuais de processo de monoqueima nas unidades industriais pesquisadas.

A Fig. 5 apresenta os resultados do teste laboratorial 2 de retração linear em função da temperatura de queima, para as formulações estudadas. Observa-se que a retração linear aumenta com o aumento da temperatura, analogamente à Fig. 2 do teste laboratorial 1.

Na Fig. 5 observa-se que, para a faixa de temperatura e de incorporação analisadas, não ocorreram variações significativas na retração linear. Da mesma forma, quanto maior a temperatura de queima maior o grau de densificação e maior, portanto, a retração linear.

A Fig. 6 apresenta o efeito da absorção d'água em função da temperatura para as formulações estudadas no teste laboratorial 2.

De acordo com o esperado, a absorção d'água de todas as formulações estudadas diminuí com o aumento da temperatura, da mesma forma que anteriormente. Observa-se que os valores máximos de absorção correspondem, em cada temperatura analisada, a um teor adicionado de lodo de 2,5%. Para teores maiores, de até 4%, a absorção tende a diminuir. Os valores de dispersão de resultados são, no entanto, relativamente altos, mesmo para a mistura padrão (0% lodo), o que dificulta uma análise mais conclusiva.

A Fig. 7 apresenta os resultados de resistência mecânica das formulações analisadas em relação à temperatura

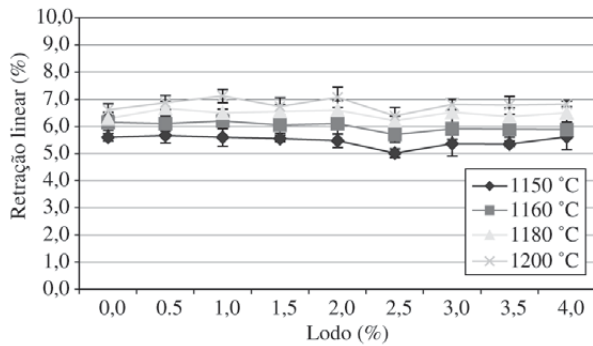


Figura 5. Retração linear em função da temperatura para as formulações estudadas no teste laboratorial 2.

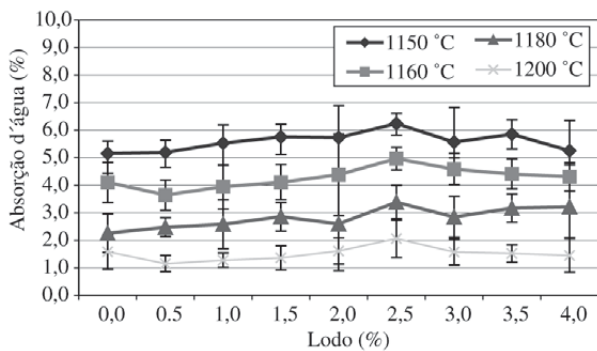


Figura 6. Asorção d'água em função da temperatura para as formulações analisadas no teste laboratorial 2.

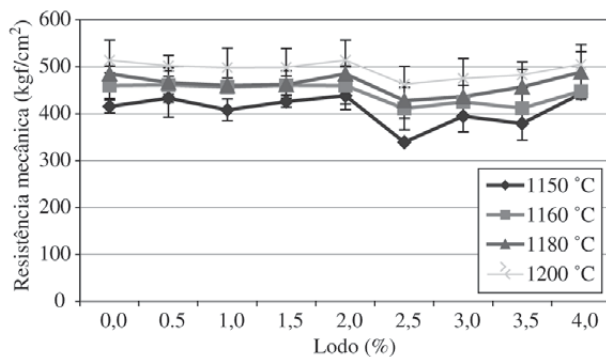


Figura 7. Resistência mecânica em função da temperatura para as formulações analisadas no teste laboratorial 2.

no teste laboratorial 2. A resistência mecânica aumenta com o aumento da temperatura, em função da redução da porosidade, como no teste laboratorial 1, para o mesmo parâmetro.

A incorporação de até 4% lodo não afeta significativamente a resistência mecânica em cada temperatura analisada, considerando a dispersão dos resultados.

6. Conclusões

Neste trabalho, foi analisado o efeito da incorporação do lodo da estação de tratamento de efluentes de uma indústria cerâmica em etapas laboratoriais visando uma futura implantação em regime normal de produção.

Foram feitas curvas de gresificação das propriedades de retração linear, absorção d'água e resistência mecânica em função de temperatura de queima, em todas as etapas.

Com relação aos resultados encontrados, pode-se ressaltar:

- Os ensaios de caracterização do lodo classificam este resíduo como não-inerte. O lodo age, quando introduzido à massa, como matéria-prima fundente, devido à presença de elementos que formam fase vítrea, provenientes das composições de esmalte.
- Os resultados dos ensaios laboratoriais demonstraram que a incorporação de até 5% de lodo na massa padrão não afetou as características de absorção d'água, retração linear, e resistência mecânica. Os produtos não apresentaram mudança na tonalidade, nem defeito de coração negro, com a introdução do lodo.

Este trabalho serviu como incentivo para outros que estão sendo desenvolvidos na empresa, para redução da geração e reaproveitamento de resíduos em diversos processos, contribuindo assim, para a diminuição dos impactos ambientais negativos que tanto prejudicam a implantação da ISO 14001. Assim, contribuiu-se ainda para o aumento da conscientização ambiental dos funcionários e por consequência, da mudança de cultura da empresa, deixando de considerar os resíduos como problema e sim como oportunidade de ganho.

7. Referências bibliográficas

1. ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. Placas cerâmicas para revestimento, critérios de classificação: NBR ISO 13817. Rio de Janeiro, 1997.
2. ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. Resíduos Sólidos, classificação: NBR ISO 10004. Rio de Janeiro, 1997.
3. ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. Lixiviação de Resíduos, procedimento: NBR ISO 10005. Rio de Janeiro, 1997.
4. ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. Solubilização de Resíduos: NBR ISO 10006. Rio de Janeiro, 1997.
5. Blasco, A. *et al.* Tratamiento de emisiones gaseosas, efluentes líquidos e residuos sólidos de la industria cerámica. Castellón: Instituto de Tecnología Cerámica/Universitat Jaume, 1987.
6. Casagrande, M.C. Efeito da adição de chamote semi-gresificado no comportamento físico e químico da massa cerâmica para pavimento, p. 66, Dissertação de

- Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
7. Costa, M. Resíduos sólidos; os caminhos para resolver o problema, *Revista Banas Ambiental*, São Paulo, n. 06, p. 14-18, abr. 2000.
 8. 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 I: Resultados Preliminares, *Cerâmica Industrial*, v. 7, n. 2, 2002.
 9. Folgueiras, M.V. Obtenção de vitrocerâmicos sinterizados a partir da combinação de escórias siderúrgicas e cinzas volantes. p. 144, Tese de Doutorado - Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
 10. Furtado, M. Destino limpo para o lixo industrial. Química e Derivados, São Paulo, n. 387, p. 10-31, out. 2000.
 11. Mendes, M.R. Desenvolvimento de agregados leves a partir de subproduto da mineração de carvão e de lodo de estação de tratamento de efluentes de indústria têxtil, p. 99, dissertação de Mestrado - Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.
 12. Menezes, R.R. *et al.* Utilização de resíduos industriais da produção de agregados na produção de tijolos e telhas. In: *Congresso Brasileiro de Cerâmica*, 45°, revestimentos cerâmicos, 020. Santa Catarina, 2001. CD-ROM.
 13. Morais, R.M. *et al.* Propriedades mecânicas de revestimentos cerâmicos contendo adições de resíduos sólidos queimados. In: *Congresso Brasileiro de Cerâmica*, 45°, revestimentos cerâmicos, 008. Santa Catarina, 2001. CD-ROM.
 14. Neves, G.A. *et al.* Utilização de Resíduos da Serragem de Granitos para Confeção de Tijolos Cerâmicos. In: *Congresso Brasileiro de Cerâmica*, 44°, matérias primas, 006. São Paulo, 2000. CD-ROM.
 15. Oliveira, H.A. Estudo para reaproveitamento do resíduo lama de cal do processo KRAFT de fabricação de celulose e papel em cerâmicas de revestimento. São Paulo: 2000. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.
 16. Rosa, F. G. Estudo da viabilidade de obtenção de placas cerâmicas para revestimentos a partir de resíduos sólidos industriais e minerais. 2002. 71 p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
 17. Silva, N.I.W. *et al.* Estudo da Aplicação da Argila e Cinzas de Carvão como Matérias-Primas Cerâmicas. In: *Congresso Brasileiro de Cerâmica*, 43°, revestimentos cerâmicos, 128. Santa Catarina, 1999. CD-ROM.
 18. Soares, J.M.D. *et al.* Adição de resíduo de couro na massa para produção de cerâmica vermelha. In: *Congresso Brasileiro de Cerâmica*, 45°, revestimentos cerâmicos, 26. Santa Catarina, 2001. CD-ROM.
 19. Vicenzi, J. *et al.* Aproveitamento de um resíduo industrial em uma massa cerâmica para pisos. In: *Congresso Brasileiro de Cerâmica*, 43°, revestimentos cerâmicos, 290. Santa Catarina, 1999. CD-ROM.
 20. Xavier, G.C. *et al.* Estudo da adição de resíduos da serragem do mármore à massa de conformação de cerâmica vermelha. In: *Congresso Brasileiro de Cerâmica*, 45°, revestimentos cerâmicos, 004. Santa Catarina, 2001. CD-ROM.