

Reciclagem do Lodo da Estação de Tratamento de Efluentes de uma Indústria de Revestimentos Cerâmicos. Parte 2: Ensaio Industriais

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

¹ Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC
Departamento de Engenharia Química, EQA
Campus Universitário, 88040-900 Florianópolis - SC
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: Na primeira parte deste trabalho, desenvolveu-se um estudo em escala laboratorial a respeito da reutilização da torta da estação de tratamento de efluentes (ETE) de uma indústria de revestimentos cerâmicos. Nesta parte do trabalho, foram realizados testes de adição da torta de ETE à massa de grés em escala semi-industrial e piloto, até a implantação em escala fabril de produção. Para cada mistura, foram medidas as propriedades absorção d'água, retração linear e resistência mecânica de peças queimadas, nas faixas de temperatura de queima de grés cerâmico. Nas etapas semi-industrial e piloto, foram incorporados 2% de lodo à massa padrão (100%). Por fim, optou-se, inicialmente, pela adição de 1% de lodo como matéria-prima à massa padrão. Em nenhuma das escalas analisadas foram medidas variações significativas das características observadas.

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

1. Introdução

Os efluentes de indústrias de revestimentos cerâmicos são usualmente processados em estações de tratamento (ETE). Deste processo resulta o lodo que, após desumidificado por filtro-prensa, forma a torta de lodo. Tal resíduo é constituído de sobras de matérias-primas ao longo da seqüência de etapas de preparação de massas e esmaltes.

Os lodos de ETE de indústrias cerâmicas são muitas vezes depositados em aterros, correspondendo a um aumento de perdas e por consequência dos custos de produção, além da geração de impactos ambientais negativos.

Em um trabalho anterior¹, 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.

O presente trabalho apresenta os testes de adição da torta de ETE à massa de grés em escala semi-industrial e piloto, que levou à implantação do processo de reciclagem em escala fabril de produção.

2. Procedimento experimental

2.1. Materiais

2.1.1. Massa padrão

A massa padrão foi caracterizada quanto à sua composição química por fluorescência de raios-X, no CTCmat, Criciúma, SC. Outras características da massa padrão, como distribuição granulométrica e comportamento térmico, foram relatadas anteriormente¹.

Tabela 1. 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

Tabela 2. 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		

2.1.2. Torta de lodo de ETE

Na Tabela 2, apresenta-se a composição química da torta, realizada por fluorescência de raios-x. Os óxidos BaO, Cr₂O₃, PbO, SrO, ZnO encontrados são procedentes do processo de fabricação de grés porcelânico, cujos resíduos são tratados na mesma ETE.

No teste de lixiviação realizado¹, foram analisados três elementos (cádmio, chumbo, cromo), além de íons fluoreto. O resíduo foi classificado como não perigoso, conforme NBR ISO 10005:1997². No teste de solubilização, por sua vez, o resíduo foi classificado como classe II (não-inerte), conforme NBR ISO 10006:1997³. Neste teste foram analisados os mesmos três elementos, além de íons sulfato, e dureza.

2.2. Métodos

Após a análise dos resultados e definição do percentual final a ser introduzido na massa (100 + 2% de lodo), foram feitos testes em linhas de produção, para verificação do comportamento de alguns produtos após tal incorporação.

Do mesmo modo que no laboratório, foram realizados na indústria os ensaios característicos de uma curva de gresificação^{4,5}: retração linear, absorção d'água, e resistência mecânica (módulo de ruptura por flexão). Os procedimentos experimentais seguiram as recomendações da norma NBR ISO 13818:1997⁶. Além disso, avaliaram-se

qualitativamente os aspectos estéticos, como cor, textura e brilho da superfície e o aspecto da massa em superfícies de fratura de peças amostradas.

As etapas industriais foram subdivididas em 3 categorias, de acordo com a quantidade de revestimentos cerâmicos produzida:

- testes semi-industriais
- testes piloto
- implantação

Neste trabalho, entende-se fase “semi-industrial” como sendo a fase posterior a do desenvolvimento em laboratório, realizada numa linha de produção normal, com uma produção de 40 até 200 m² de revestimentos.

Em seguida, foi feito o desenvolvimento de testes piloto, em linhas de produção, para avaliação final. Analogamente, define-se “piloto” como sendo a fase posterior à semi-industrial, realizada numa linha de produção normal, com uma produção de até 500 m² de revestimentos. Um dos produtos testados em escala semi-industrial foi analisado novamente em escala piloto.

Após a análise dos resultados de todas as etapas preliminares ocorreu a última etapa, chamada de etapa de implantação. Definiu-se inicialmente o percentual de 1% de incorporação de lodo na formulação da massa cerâmica, que está sendo utilizada em escala normal de produção.

Algumas peças, dos vários formatos testados, foram separadas antes da nova formulação para que fossem realizados testes comparativos, caso fossem encontrados problemas na produção (como coração negro, por exemplo). Alguns casos foram mencionados, porém após a comparação dos produtos com incorporação e sem incorporação, constatou-se que os defeitos eram provenientes de outras circunstâncias que não a adição de resíduo. Diversos produtos foram analisados desta maneira no decorrer do mês de implantação.

3. Resultados e discussão

3.1. Ensaios semi-industriais

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, a relação percentual entre o desvio padrão e a média calculada.

Dos produtos disponíveis para estudo em escala semi-industrial, foram escolhidos três representativos para os ensaios de curva de gresificação.

O produto AN 10 × 10 cm² é um revestimento de parede para fachada externo de aparência branca. Este produto foi escolhido, pois, ocorrendo alguma alteração significativa na cor da massa, esta pode influenciar marcadamente a tonalidade final deste produto.

O produto MB 10 × 10 cm² é também um revestimento de parede para fachada externa. Neste caso, havia sido observada na produção deste produto a existência frequente

do defeito denominado “coração negro”, cuja ocorrência pode então ser comparada antes e depois da incorporação de lodo à massa.

As argilas utilizadas nas formulações das massas para revestimentos cerâmicos podem conter matéria orgânica como impureza. Durante a queima de peças cerâmicas, que contenham matéria orgânica, pode surgir um núcleo escuro interno, conhecido como “coração negro”. Nos produtos cerâmicos produzidos por monoqueima, é habitual encontrar o defeito quando se utilizam ciclos de queima reduzidos, ou quando a necessidade de aumentar a resistência mecânica obriga a conformar a peça com pressão mais elevada⁷.

O produto FB, 40 × 40 cm², é um pavimento cerâmico de aparência rústica. Este produto foi escolhido por se tratar de um revestimento de geometria e aparência diferente dos anteriores.

A Fig. 1 apresenta os dados de retração linear de revestimentos cerâmicos com massa padrão comparado a da mesma massa acrescida de 2% de lodo. Observando-se os resultados, nota-se que não houve alteração significativa

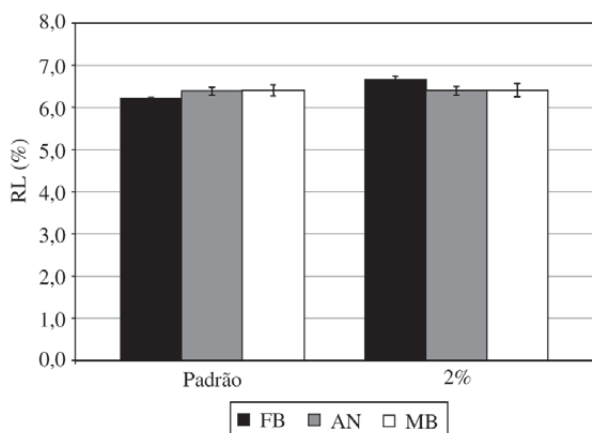


Figura 1. Retração linear para o teste semi-industrial de 40 m².

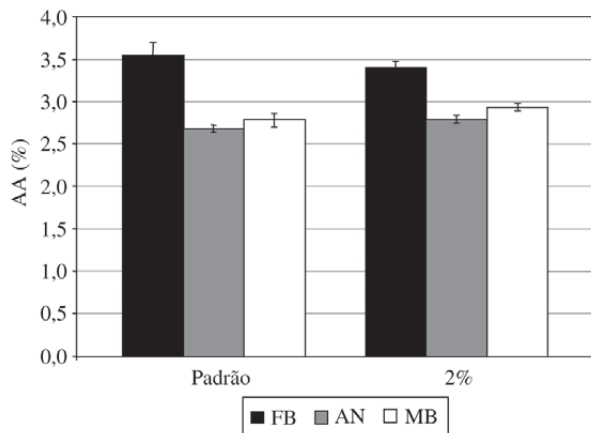


Figura 2. Absorção d’água para o teste semi-industrial de 40 m².

da propriedade retração linear, para a produção de 40 m², com a adição de lodo em todos os produtos testados. Ainda, a variação dos resultados medidos para os produtos com lodo, indicada no gráfico por uma barra de erros, foi da ordem de 1,6%. Tal variação está dentro da ordem de grandeza observada para os produtos padrão.

As análises dos valores obtidos nos ensaios de absorção d’água para a produção de 40 m², para cada produto, demonstram que as variações existentes, quando comparadas com os padrões de cada produto, não são significativas, Fig. 2. Considerando que os produtos AN e MB são classificados como grés (absorção abaixo de 3%) e que o produto FB possui classificação de semi-grés (absorção d’água entre 3% e 6%), estes permaneceram dentro de suas características, sem grandes variações. Assim, pode-se constatar que a incorporação do lodo não proporcionou modificações nas características dos produtos analisados.

Analisando-se os resultados obtidos quanto à resistência mecânica para a produção de 40 m², Fig. 3, conclui-se que não ocorreram variações importantes na propriedade medida em nenhum dos formatos ou produtos analisados. De fato, no caso da incorporação de 2% de resíduo, o valor médio permaneceu em torno de 380 kgf/cm², enquanto que, nos produtos padrão, este valor oscilou entre 340 e 400 kgf/cm². A NBR ISO 13818:1997⁶ determina que o valor de resistência mecânica, para produtos semi-grés seja no mínimo 220 kgf/cm², valor superado em todos os produtos testados.

Dos produtos disponíveis para estudo em escala semi-industrial, 200 m², foram escolhidos três representativos para os ensaios de curva de gresificação. Os produtos AN e AR, 10 × 10 cm², são revestimentos de parede para fachada externa de aparência branca. Estes produtos foram testados, pois ocorrendo alguma alteração significativa na cor da massa, esta pode influenciar na tonalidade final do produto. O produto TG, 30 × 30 cm², é um pavimento

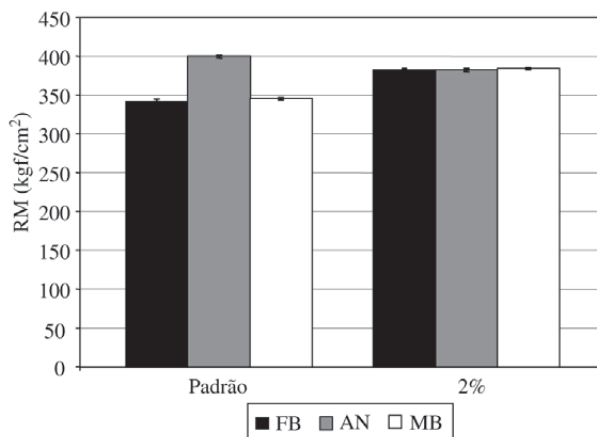


Figura 3. Resistência mecânica para o teste semi-industrial de 40 m².

cerâmico de aparência rústica; escolhido por possuir características estéticas e dimensionais diferentes dos produtos citados anteriormente. Assim, é possível a comparação entre o comportamento de um formato não analisado e que representa a maior produção, em m², da empresa em questão.

A Fig. 4 confirma que, analogamente aos resultados descritos na etapa de 40 m², nesta etapa de 200 m² não ocorreram diferenças marcantes quanto à retração linear, quando se comparam os valores dos produtos com massa de teste e os mesmos produtos com massa padrão.

Analisando os resultados dos testes, quanto à absorção d'água na etapa de 200 m², Fig. 5, observa-se uma leve tendência ao aumento desta propriedade com a adição de 2% de lodo. No entanto, os produtos testados, classificados como grés, mantiveram esta característica após a incorporação de resíduo.

Na seqüência, fizeram-se as mesmas considerações, descritas na etapa de 40 m², em relação aos grupos de absorção d'água segundo a NBR ISO 13818:1997⁶.

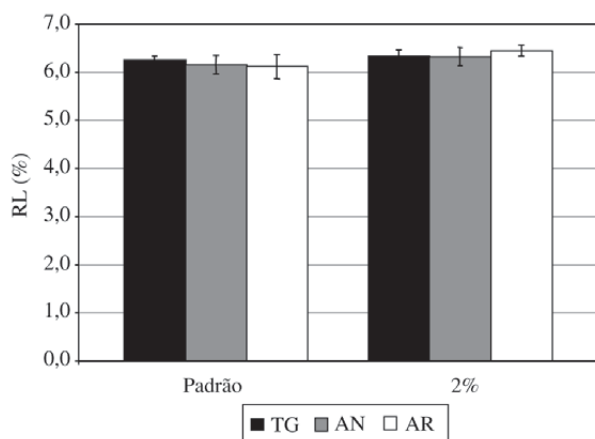


Figura 4. Retração linear para o teste semi-industrial de 200 m².

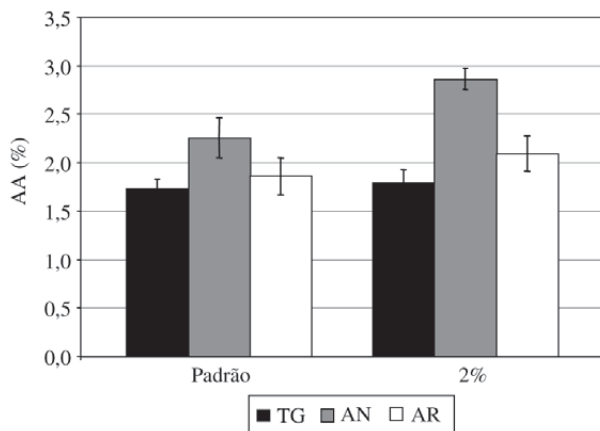


Figura 5. Absorção d'água para o teste semi-industrial de 200 m².

Os resultados de resistência mecânica, obtidos na etapa de testes semi-industriais de 200 m², Fig. 6, apresentaram valores médios e variações comparáveis em relação ao padrão de cada produto e permaneceram na faixa de aceitação dos produtos, de acordo com seus grupos de classificação.

Reforçando as observações anteriores em relação à mudança de escala de produção, na Fig. 7 são comparados os resultados obtidos do produto AN, produzido em escala normal de produção (STD), com o mesmo produto obtido com incorporação de 2% de lodo nas etapas de 40 m² e 200 m². Demonstra-se, novamente, a inexistência de variações importantes quanto à retração linear.

As análises dos valores obtidos nos ensaios de absorção d'água do produto AN, comparando-se as duas etapas semi-industriais, conforme observado na Fig. 8, demonstram que as variações existentes, quando comparadas com o padrão do produto, não são significativas. Considerando que o produto analisado é classificado como grés (absorção abaixo de 3%) e permaneceu dentro de suas características, sem grandes variações, pode-se constatar que a incorporação do lodo não proporcionou modificações expressivas na característica do produto, nas etapas analisadas.

Apesar da variação observada na Fig. 9, no comparativo entre as duas séries de testes semi-industriais realizadas, o produto AN manteve os valores de resistência mecânica acima das exigências mínimas da norma NBR ISO 13818:1997⁶.

3.2 Ensaios em escala piloto

A Fig. 10 ilustra a comparação quanto à retração linear do produto TG, 30 × 30 cm², considerando a massa padrão e as massas com resíduo do teste semi-industrial 200 m² e do teste piloto 500 m². Também aqui, os resultados obtidos nas três etapas comparadas são da mesma ordem em termos de valores médios e desvios padrão. A análise dos

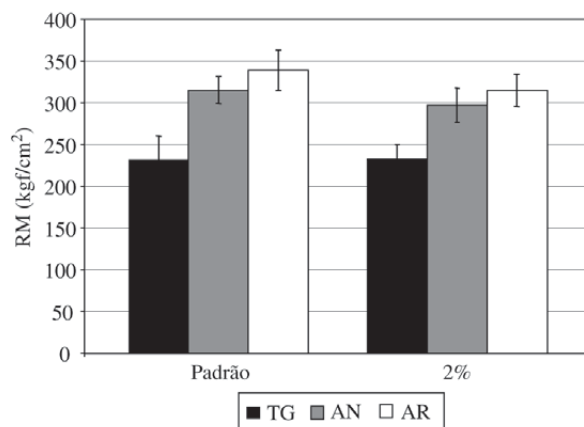


Figura 6. Resistência mecânica para o teste semi-industrial de 200 m².

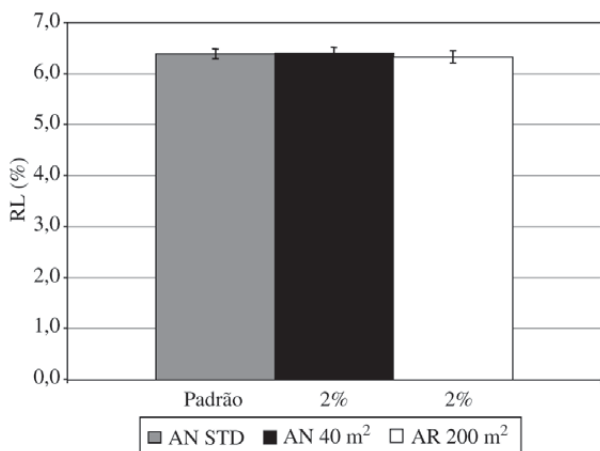


Figura 7. Retração linear para o teste semi-industrial comparativo de 40 m² com 200 m².

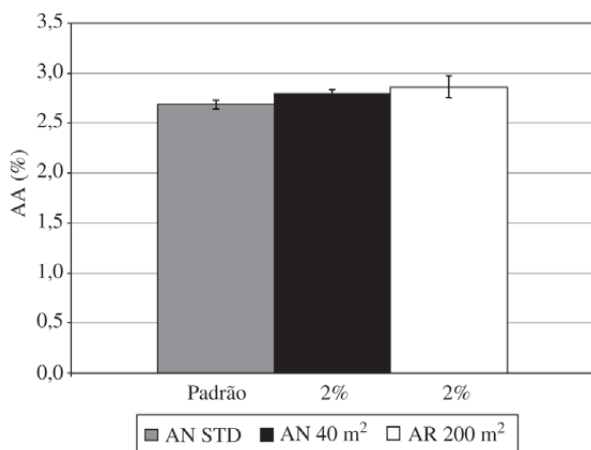


Figura 8. Absorção d'água para o teste semi-industrial comparativo de 40 m² com 200 m².

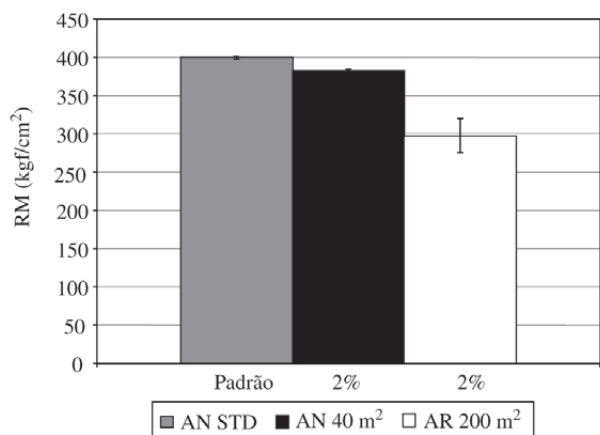


Figura 9. Resistência mecânica para o teste semi-industrial comparativo de 40 m² com 200 m².

resultados demonstra uma variação máxima de 1,9% entre as amostras analisadas.

As análises dos valores obtidos nos ensaios de absorção d'água do produto TG, Fig. 11, comparando-se o teste semi-industrial 200 m² com o piloto 500 m², demonstra que as variações existentes, quando comparadas com o padrão do produto, não são importantes. Em relação à dispersão de resultados, expressa como desvio padrão em relação à média, nota-se uma variação da ordem de 8% no caso da adição de 2% de lodo comparada com 5,4% do padrão. Considerando que o produto analisado é classificado como semi-grés e permaneceu dentro das características de produtos grés, pode-se constatar que a incorporação do lodo não proporcionou alterações desta característica do produto, nas etapas analisadas.

Comparando o teste semi-industrial 200 m² com o piloto 500 m², para o produto TG, no caso da resistência mecânica, Fig. 12, nota-se que os valores médios e as variações permanecem quase que constantes. Em todos os casos, os resultados obtidos de resistência mecânica estão acima dos valores mínimos da norma NBR ISO 13818:1997⁶, para produtos semi-grés (220 kgf/cm²).

3.3 Implantação

Desde o início da etapa de implantação, como foi detalhado anteriormente, diversos produtos foram escolhidos para as análises das características intrínsecas dos produtos acabados, para verificação final das possíveis variações provocadas pela utilização do lodo como matéria-prima.

Os testes realizados nessa etapa serviram de confirmação para os resultados obtidos em todas as etapas semi-industriais, visto que um processo contínuo de produção é fundamental para a análise real de possíveis variações das características esperadas dos produtos.

Os resultados obtidos nos testes em laboratório demonstraram que a introdução de 5% de lodo na massa não afetaria as propriedades dos produtos acabados. As etapas semi-industriais apresentaram resultados com pequenas variações nas propriedades analisadas após a incorporação de 2%. A etapa de implantação, da qual os resultados estão descritos a seguir, vem apresentar os resultados correntes das propriedades dos produtos acabados sendo produzidos em escala normal de produção.

Na seqüência, para fins de comparação apresenta-se apenas um formato, 30 × 30 cm², por este representar o formato de maior produção em m², da empresa em questão.

A Fig. 13 ilustra a comparação em relação à massa padrão (STD 30 × 30 cm²), da propriedade retração linear, de alguns produtos produzidos na etapa de implantação. Os resultados encontrados confirmam as observações anteriores, pois não ocorreram diferenças significativas em todos os produtos analisados. O maior desvio padrão encontrado, entre as peças do mesmo produto, foi no AB 20 × 20 cm², com o valor de 0,24.

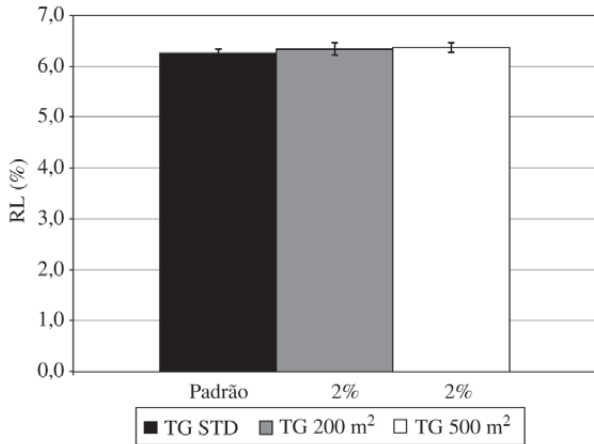


Figura 10. Retração linear para o comparativo do teste semi-industrial 200 m² com o piloto 500 m².

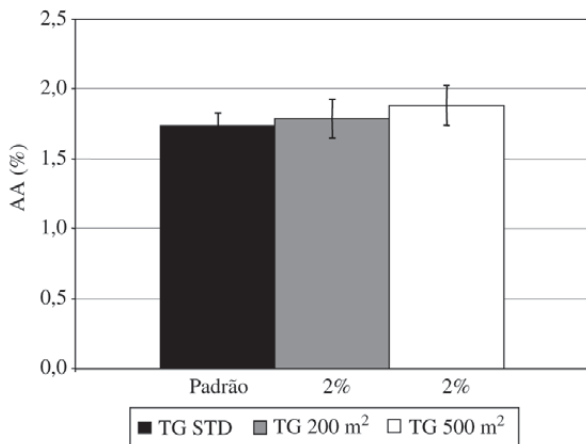


Figura 11. Absorção d'água para o comparativo do teste semi-industrial 200 m² com o piloto 500 m².

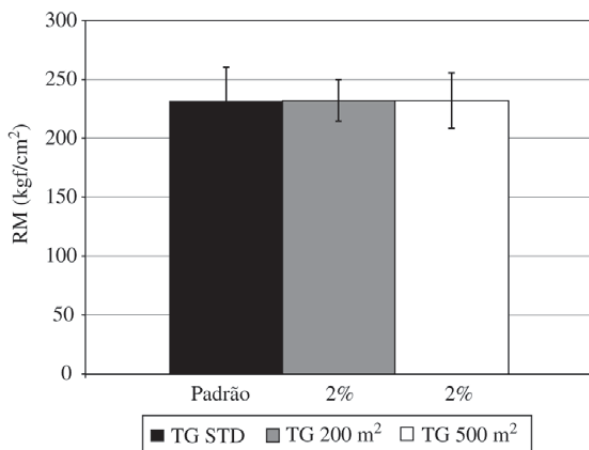


Figura 12. Resistência mecânica para o comparativo do teste semi-industrial 200 m² com o piloto 500 m².

A Fig. 14 ilustra o comparativo, quanto à absorção d'água, dos mesmos produtos analisados quanto à retração linear na etapa de implantação. Estes resultados vêm a confirmar a ausência de alterações importantes nos produtos analisados. Há uma diminuição no percentual de absorção d'água, porém tal variação não afeta as características desejadas para os produtos, visto que estes estão classificados como semi-grés ($3\% \leq AA \leq 6\%$).

A Fig. 15 apresenta os valores médios e desvios de resistência mecânica para os mesmos produtos analisados anteriormente na etapa de implantação. Os resultados indicam variações no percentual de resistência mecânica para

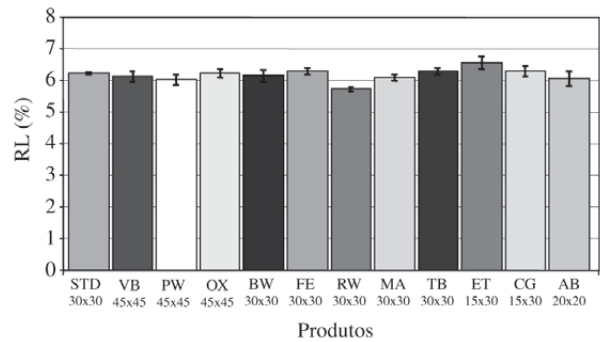


Figura 13. Retração linear para a etapa de implantação.

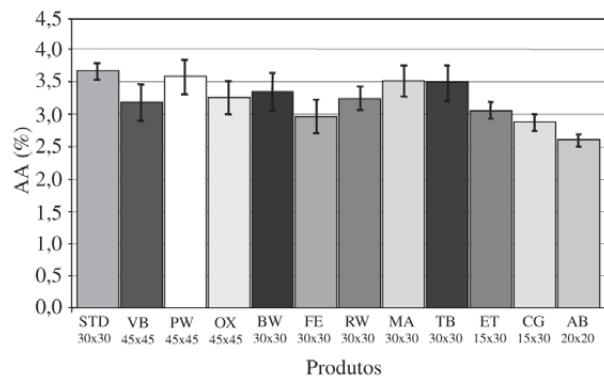


Figura 14. Absorção d'água para a etapa de implantação.

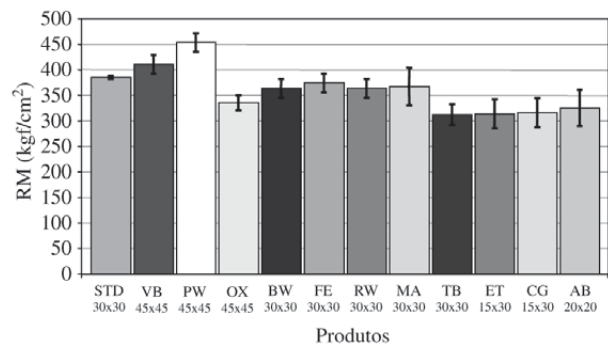


Figura 15. Resistência mecânica para a etapa de implantação.

todos os formatos, porém tal variação não afeta as características exigidas, pela NBR ISO 13818:1997⁶, para os produtos semi-grés.

A Fig. 16 apresenta os valores médios e variações de retração linear dos formatos analisados na etapa de implantação. Ocorreram pequenas oscilações em torno de cerca de 6% de retração linear, com desvio máximo de 0,3%.

A Fig. 17 apresenta os valores médios dos formatos analisados na etapa de implantação, quanto à absorção d'água. Os resultados indicam uma diminuição no percentual de absorção d'água, de acordo com a diminuição da área de cada formato, devido à menor área de con-

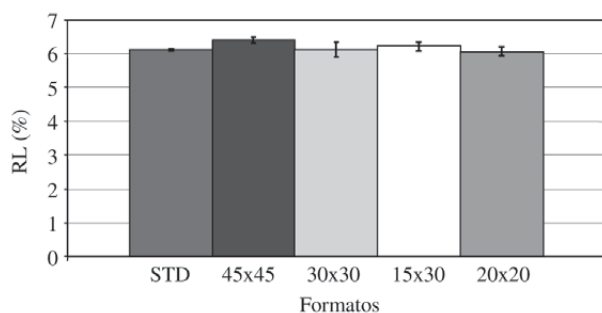


Figura 16. Comparativo da retração linear para os formatos analisados na etapa de implantação.

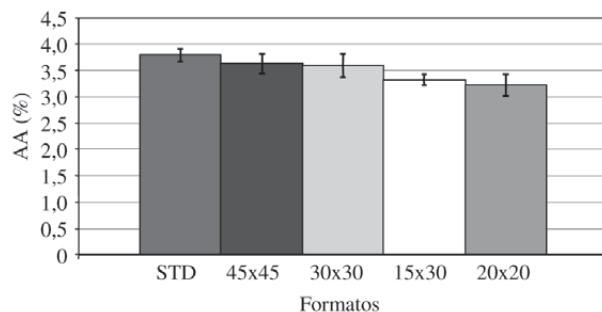


Figura 17. Comparativo da absorção d'água para os formatos analisados na etapa de implantação.

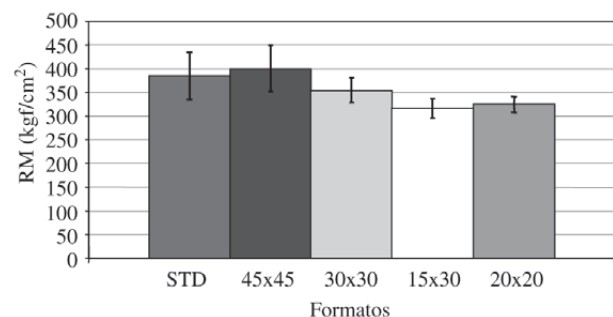


Figura 18. Comparativo da resistência mecânica para os formatos analisados na etapa de implantação.

tato existente para que ocorra a absorção d'água na peça.

A Fig. 18, por fim, apresenta os valores médios e as respectivas variações de valores medidos de resistência mecânica. Os resultados indicam variações de resistência mecânica na faixa de 300 a 400 kgf/cm² para todos os formatos. Comparando-se o mesmo formato (30 × 30 cm²) antes e depois da incorporação de resíduo, nota-se, neste caso, que o desvio padrão destas medidas foi em geral menor para o produto com 2% de lodo. Em todos os casos, os valores estão dentro dos limites definidos pela NBR ISO 13818:1997⁶, para os produtos semi-grés.

4. Conclusões

Nas etapas semi-industrial e piloto, foram analisadas as mesmas características das etapas laboratoriais com a adição de 2% de lodo à massa padrão (100%). Por fim, optou-se, inicialmente, por incorporar 1% de lodo como matéria-prima à massa padrão. Em nenhuma das escalas analisadas foram medidas variações significativas das características observadas.

A introdução do lodo como matéria prima na massa de semi-grés, proporciona uma economia significativa no custo de matéria-prima e permite a utilização de 2360 ton/ano de um resíduo antes não aproveitado. Considerando, ainda, a exigência dos órgãos ambientais por uma correta destinação destes resíduos em aterros controlados, para emissões das licenças ambientais e implantação da ISO 14001, estima-se uma economia ainda maior, devido às despesas associadas à correta destinação deste resíduo.

Referências Bibliográficas

1. 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 I: Ensaios Laboratoriais, *Cerâmica Industrial*, v. 8, n. 2, p. 26-34, 2003.
2. ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Lixiviação de Resíduos, procedimento: NBR ISO 10005*. Rio de Janeiro, 1997.
3. ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Solubilização de Resíduos: NBR ISO 10006*. Rio de Janeiro, 1997.
4. Melchiades, F.G.; Quinteiro, E.; Boschi, A.O. A Curva de Gresificação: Parte I: Ensaios Laboratoriais, *Cerâmica Industrial*, v. 1, n. 4-5, p. 30-31, 1996.
5. Melchiades, F.G.; Quinteiro, E.; Boschi, A.O. A Curva de Gresificação: Parte II: Ensaios Laboratoriais, *Cerâmica Industrial*, v. 2, n. 1-2, p. 23-26, 1997.
6. ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Placas Cerâmicas para Revestimento, Especificações e Métodos de Ensaios: NBR ISO 13818*. Rio de Janeiro, 1997.
7. Amorós, J.L. et al. *Defectos de Fabricación de Pavimentos y Revestimientos Cerámicos*. Castellón: Instituto de Tecnología Cerámica/Universitat Jaume I, 1991.