

Incorporação de Chamote na Massa de Cerâmica Vermelha como Valorização do Resíduo

**Alexandre Zaccaron^{a*}, Sergio Luciano Galatto^{ab},
Vitor de Souza Nandi^{ac}, Paulo Fernandes^c**

^aUniversidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, Criciúma, SC, Brasil

^bInstituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas – IPAT, Criciúma, SC, Brasil

^cCentro Universitário Barriga Verde – UNIBAVE, Cocal do Sul, SC, Brasil

*e-mail: alexandre-zaccaron@hotmail.com

Resumo: Analisando as questões ambientais que compreendem o processo de fabricação de cerâmica vermelha, deve-se enfatizar a geração de resíduos destas empresas, que não constam qualquer tipo de gerenciamento. Esse trabalho tem por objetivo analisar a viabilidade técnica de incorporação do resíduo “chamote queimado” na massa cerâmica em escala laboratorial. Foram realizados ensaios de caracterização química, física, mineralógica e de classificação do resíduo. Posteriormente, desenvolveu-se formulações em diferentes percentuais (5, 10, 15 e 20%) incorporando resíduo à massa padrão de uma cerâmica da região. Os corpos-de-prova experimentados foram confeccionados de forma manual e posteriormente submetida a tratamento térmico em estufa e queima em forno a 900 °C. As propriedades tecnológicas avaliadas foram: retração térmica linear de secagem e de queima, perda ao fogo, absorção de água, porosidade aparente, densidade relativa e aparente e tensão de ruptura à flexão. Os resultados de classificação do resíduo indicaram como não perigoso - Classe II A - Não Inerte. Os resultados das diferentes propriedades tecnológicas permitiram verificar a viabilidade técnica da adição de até 20% de chamote queimado no processo cerâmico em escala laboratorial, especificamente com melhoria nos parâmetros de secagem da cerâmica.

Palavras-chave: *chamote queimado, cerâmica vermelha, resíduo.*

1. Introdução

O grande desafio do homem para com seu futuro, não é apenas saber como descartar o que ele próprio gera, e sim saber como reaproveitar de uma forma economicamente viável tudo o que a princípio não tem relevância. O desenvolvimento industrial ao longo das últimas décadas tem gerado grandes quantidades de resíduos¹, e o que por muito tempo era depositado de forma inapropriada gerando alguns tipos de contaminação pôde ser transformado em matérias-primas solucionando muitos problemas de algumas indústrias.

Nos últimos anos houve um aumento demasiado da construção civil devido ao desenvolvimento das cidades e aos fáceis investimentos imobiliários²; com isso, têm-se um crescimento da procura de blocos de vedação (tijolos). Essa ascensão vai refletir nas questões ambientais, onde havendo uma maior produção industrial, terão maiores impactos associados, seja ele com extração de matéria-prima, emissões atmosféricas e por fim geração de resíduos.

Na região sul de Santa Catarina se concentra o maior polo de cerâmica vermelha do estado³, responsável por aproximadamente 2,5 % de produção do país. Dados apontam que as indústrias do setor passam das 270 empresas, o que mostra grande importância do segmento à economia local. O município de Morro da Fumaça, é segundo a lei nº 12.874 de 22 de janeiro de 2004, a capital catarinense da cerâmica vermelha, tal titulação é motivo de orgulho aos ceramistas que compõem as dezenas de indústrias alojadas ali, porém as mais de cem (100) “olarias” que já foram instaladas na cidade fumacense (muitas dessas já encerraram suas atividades) somada as outras centenas em funcionamento (ou não) em municípios vizinhos, agravaram a degradação ambiental, seja ela por poluição do ar ou extração irregular de matéria-prima.

Em meados de 2004, o Ministério Público Estadual através de uma Ação Civil Pública promoveu maior rigidez neste segmento, exigindo readequações nas atividades junto à cerâmica vermelha. Uma das exigências está relacionada à execução de projetos de

recuperação das áreas de passivo ambiental de extração de material argiloso, seguida também da padronização dos blocos estruturais, controle de emissões atmosféricas e utilização de combustível de fontes renováveis. Em paralelo às questões ambientais, o setor de cerâmica vermelha está desenvolvendo estudos que visam à incorporação de diferentes materiais e resíduos na matéria-prima.

O gerenciamento adequado de resíduos provenientes dos processos pós-queima da cerâmica vermelha, é um procedimento totalmente desconhecido pelo ceramista. Atualmente, não existe qualquer preocupação com o que esse rejeito pode acarretar ao meio ambiente, mas alguns estudos mostram a possibilidade de agregar valor a esse material que até então serve para terraplanagem, e na grande maioria é encaminhado a descarte a céu aberto.

Importante ressaltar, que a maior parte dos resíduos gerados após o processo de queima, não são reaproveitados, tornando-se um problema para manuseio, além de custos com sua disposição final em aterro. A Política Nacional dos Resíduos Sólidos é bem clara ao determinar que nenhum tipo de resíduo deve ter destinação final efetuada de forma irregular.

Dentro desta premissa, este trabalho busca avaliar a reutilização do rejeito de cerâmica vermelha gerado no processo de quebra de tijolos pós-queima na massa padrão, de forma a minimizar custos com material argiloso e a diminuição da disposição de forma desordenada no meio ambiente.

2. Materiais e Métodos

Foram utilizados dois tipos de argilas no experimento laboratorial, Argila A (Vargia, maior plasticidade) e Argila B (Morro, menor plasticidade). As mesmas foram cedidas por uma indústria de cerâmica vermelha localizada em Morro da Fumaça, SC. A coleta foi realizada diretamente do estoque da cerâmica, onde a princípio foram retirados em torno de 100 kg de cada argila, de cinco pontos diferentes. Essas

amostras passaram pelo processo de quartejamento, homogeneizadas e reduzidas para um volume de aproximadamente 90 kg da Argila A, e 60 kg da Argila B, para ensaios laboratoriais. A “Argila A” constituiu um número maior de blocos (torrões), o que necessitou de desintegração mecânica, que foi realizada com auxílio do laminador modelo 500 da marca Natreb, da própria cerâmica, antes de ser encaminhada ao laboratório. O resíduo foi obtido na mesma cerâmica cujas argilas foram cedidas. É importante ressaltar que o produto passou por uma condição de queima entre 800 a 900 °C. A coleta das peças danificadas ocorreu após a descarga de um dos fornos industriais e para atender à NBR 10007:2004⁴ item “3.1.3.4 - Ponto de Amostragem”, após a limpeza desse forno, todas as peças descartadas foram encaminhadas a um local livre de contaminação externa e obedeceram aos pontos de amostragem como determinado na tabela “A.4.” da norma em questão. Após coletadas e acondicionadas em sacas de rafia, as amostras do resíduo foram desagregadas com auxílio de um desintegrador manual (com aproximadamente 1 metro de altura). Para fragmentar as amostras, foi utilizado um laminador modelo 500 da marca Natreb, antes de serem enviadas ao laboratório. No laboratório, o material foi peneirado com auxílio de uma peneira aro Ø 55 cm, e abertura da malha de 1,45 mm. Foram feitas análises químicas por Espectrometria de Fluorescência de Raios X e Espectrometria de Absorção Atômica das argilas (A e B) e do rejeito (chamote), ensaios realizados segundo os procedimentos: PR-CRI-097, PR-CRI-098 e PR-CRI-103, no Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCM), do SENAIsc em Criciúma, através do Espectrômetro de Raios X marca Philips modelo PW 2400 por dispersão de comprimento de onda (WDXRF). A classificação do resíduo (chamote) foi realizada no Laboratório de Análises de Solo e Fertilizantes Químicos do Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas (IPAT), no Parque Científico e Tecnológico (IPARQUE), pertencente à UNESC baseada na metodologia de através de procedimento interno de trabalho e as referências: NBR 10004:04⁵ - Classificação de Resíduos Sólidos; NBR 10005:04⁶ - Ensaio de Lixiviação; NBR 10006:04⁷ - Ensaio de Solubilização; e NBR 10007:04⁴ - Amostragem de Resíduos.

Para a preparação das amostras, as matérias-primas (argilas e resíduo), foram secas em estufa (com resistência elétrica, marca DeLeo n° 2211, tipo: 8) a 100 ± 10 °C e laminadas (laminador de escala laboratorial da marca Bertan) a fim de homogeneizar e destorroar partículas mais grosseiras. Em seguida foi realizada a pesagem auxiliado por uma balança com 0,1 g de precisão (Modelo AC 10K, Marca Marte) e em seguida forma dosadas com posterior umidificação para conformação manual das peças. A umidificação teórica das amostras para encontrar a plasticidade ideal da formulação, foi realizada pela média ponderada. As massas formuladas sofreram um descanso de 24 h para homogeneização da umidade.

Juntamente com a amostra Padrão (STD), foram efetuadas quatro outras formulações utilizando massa de cerâmica vermelha (Argilas A e B) em diferentes percentuais associados ao resíduo “chamote”. A formulação da massa cerâmica (Argilas A e B) foi desenvolvida baseada no percentual utilizado na Indústria que forneceu as argilas, sendo que os teores de resíduo “chamote” foram incorporados na massa cerâmica em percentuais de 5, 10, 15 e 20%. Todas as amostras foram caracterizadas quanto à retração de secagem, retração

de queima, perda ao fogo, densidade aparente, densidade relativa, porosidade, absorção de água e resistência mecânica à compressão diametral pós queima. O resíduo bruto foi realizado apenas nas argilas. As formulações foram feitas em base seca e encontram-se na Tabela 1.

Após o período de homogeneização das massas formuladas, deu-se início ao processo de confecção dos corpos-de-prova, que foram preparados manualmente em formato cilíndrico com auxílio de um molde de PVC com diâmetro aproximado de 35 mm e 16 mm de altura.

Após a conformação dos corpos-de-prova, as peças ficaram em repouso em secagem natural por 24 h. Em seguida foram levadas em estufa (com resistência elétrica, marca DeLeo n° 2211, tipo: 8) a uma temperatura de 100 ± 10 °C por mais 24 h. Após a etapa de secagem, as amostras foram levadas para serem queimadas em forno laboratorial tipo mufla (Jung, Modelo J200), com taxa de aquecimento de 2 °C/min, temperatura de queima de 900 °C e tempo de patamar de 2 horas. Essas condições foram adotadas como padrão laboratorial, já que a empresa não contém base de temperatura.

Após o processo de queima, as peças passaram por testes de qualidade (já citados anteriormente) a fim de se obter os resultados que comprovem ou não a eficiência dos materiais que tiveram a adição do chamote.

O teor de umidade é considerado a quantidade de água higroscópica, ou adsorvida, presente na massa, que confere sua plasticidade. A saída dessa água ocorre por intermédio da ação do calor em temperaturas acima de 100 °C. A umidade se calcula em percentuais através de medidas de massa seca e massa úmida por meio da Equação 1.

$$U(\%) = \frac{(m_u - m_s)}{m_u} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

U = umidade (%)

m_u = massa úmida (g)

m_s = massa seca (g)

A plasticidade descreve uma particularidade das argilas, que são as matérias-primas principais da cerâmica vermelha. Para compreender melhor, coloca-se que as argilas são materiais compostos de caulinita e outros argilominerais com percentuais variados de illita e esmectita, possuindo também um conteúdo sem percentual definido de quartzo, feldspato e matéria orgânica. Na massa cerâmica a composição desses é responsável por fornecer plasticidade, trabalhabilidade, resistência mecânica e refratariedade. A plasticidade desses materiais é também o que proporciona a conformação dos corpos cerâmicos⁸. Quando se trata de avaliar a adaptação de uma massa plástica a determinado processo de conformação, o termo *trabalhabilidade* é usado frequentemente como sinônimo de *plasticidade*⁹. Em outros termos, vale mencionar que a plasticidade é o que deixa a argila fisicamente apta para dar forma às peças quando moldadas.

O teste foi realizado no Laboratório Técnico do IMG em Cocal do Sul-SC e o método escolhido para avaliar o teor de plasticidade da massa foi o de *Pfefferkorn*, que consiste em obter uma deformação de 30% dos corpos-de-prova com auxílio de um plasticímetro, que define

Tabela 1. Composições da massa cerâmica com o resíduo incorporado.

Matéria-Prima	Formulações (%massa)				
	STD	F1	F2	F3	F4
Argila A	60	57,5	55	52,5	50
Argila B	40	37,5	35	32,5	30
Chamote	-	5	10	15	20
Total	100	100	100	100	100

o percentual de água ideal da matéria-prima. Este método consistiu em preparar 300 g de massa seca das argilas A e B com diferentes teores de umidade, sendo para a argila A os percentuais de 24, 26, 28 e 30%, e na argila B os percentuais 26, 28, 30 e 32%. A deformação plástica foi obtida através da Equação 2. Este procedimento foi realizado apenas com as Argilas A e B.

$$\varepsilon(\%) = \frac{(h_0 - h_f)}{h_0} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

ε = deformação plástica;

h_0 = altura inicial;

h_f = altura final.

Resíduo bruto é a porção de material que não pode ser desagregado sem o auxílio de alguma ferramenta ou método de cominuição. Para realização deste ensaio as amostras foram secas em estufa a 110 ± 10 °C por 24 horas. Depois da secagem foram pesadas 100 g de cada argila e diluídas em água até formar uma solução aquosa, seguido de repouso por 24 horas para desagregação dos grãos. Em seguida estes materiais foram passados por uma peneira de 200 mesh (75 μ m). A quantidade de amostra retida na peneira foi passada para bandejas metálicas utilizando água em retro lavagem e secada em estufa por 24 horas. O cálculo de resíduo bruto foi realizado através da Equação 3. Este procedimento foi realizado apenas com as Argilas A e B.

$$Rb(\%) = \frac{m_r}{m_{am}} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

Rb = percentual de resíduo bruto (%)

m_r = massa retida na peneira (g)

m_{am} = massa da amostra inicial (g)

A retração linear de secagem é a variação dimensional que o corpo-de-prova sofre devido à saída de água durante o processo de secagem. O ensaio consiste em medir as unidades de comprimento com a peça crua e depois com ela seca, com auxílio de um paquímetro (com 0,02mm de resolução, modelo 125 MEA, Marca Starret) com resolução adequada. As unidades de comprimento foram padronizadas em 30 mm (com auxílio do paquímetro) após a conformação das peças e após secagem mediu-se a retração ocorrida nos pontos marcados. Os valores de retração de secagem foram obtidos através da Equação 4.

$$RLS = \frac{L_i - L_f}{L_i} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

RLS = retração linear de secagem (%)

L_i = comprimento inicial das peças cruas (mm)

L_f = comprimento final pós-secagem (mm)

A retração linear de queima é a variação dimensional que o corpo-de-prova sofre devido à saída de gases de decomposição e densificação do material. O ensaio consiste em medir as unidades de comprimento da peça seca e depois com ela queimada, com auxílio de um paquímetro com resolução adequada. Nesse ensaio, as unidades de comprimento finais foram obtidas nos pontos que foram marcados com paquímetro, na etapa de conformação como descrito na seção anterior. Os valores de retração de queima foram obtidos através da Equação 5.

$$RLQ = \frac{L_s - L_Q}{L_s} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

RLQ = retração linear de queima (%)

L_s = comprimento inicial da peça seca (mm)

L_Q = comprimento final pós queima (mm)

O ensaio de densidade aparente foi baseado no princípio de Arquimedes, podendo ser descrito basicamente como sendo o volume de um líquido (em estado de equilíbrio) deslocado em virtude da imersão, total ou parcial, de um corpo, que corresponde ao próprio volume do corpo. As forças atuantes sobre os corpos foram chamadas de empuxo. Através da imersão de corpos-de-prova (saturados com água devido aos poros presente na amostra, pois, de outra forma os resultados não seriam representativos) em água obteve-se o valor correspondente ao volume do corpo. A Equação 6 foi usada para determinação da densidade aparente das formulações.

$$\rho_{ap} = \frac{m}{(m_s - m_i)} \quad (6)$$

Onde:

ρ_{ap} = densidade aparente (g/cm³)

m = massa inicial do corpo-de-prova (g)

$m_s - m_i = V$ = corresponde à diferença entre a massa saturada e a massa imersa no líquido, compatível com o volume do corpo em imersão (cm³).

Para determinar o valor da densidade relativa do material foi necessário utilizar os resultados da densidade aparente e densidade teórica, porém estes dados não foram apresentados nesse trabalho, pois o interesse maior está relacionado na porosidade. A Equação 7 foi usada para determinação da densidade relativa a partir do resultado da densidade aparente.

$$\rho_{rel} = \frac{\rho_{ap}}{\rho_t} \quad (7)$$

Onde:

ρ_{rel} = densidade relativa

ρ_{ap} = densidade aparente (g/cm³)

ρ_t = densidade teórica (g/cm³)

A perda ao fogo corresponde à quantidade de material que volatilizou em virtude das decomposições que ocorreram durante as etapas de aquecimento e queima no forno. Consisti em pesar os corpos-de-prova secos e depois de queimados, sendo que após a queima, são resfriados em temperatura ambiente. Para definição dos resultados de perda ao fogo foi utilizada a Equação 8.

$$PF(\%) = \frac{(P_i - P_f)}{P_i} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

PF = perda ao fogo

P_i = peso inicial (g)

P_f = peso final (g)

A absorção de água ocorre devido a forças de capilaridade quando a amostra é imersa em água. A água penetra na peça ocupando os espaços abertos, os poros, gerando um ganho de massa, definido em percentual. A absorção de água é determinada através da diferença entre a massa seca e a massa úmida do corpo-de-prova. O ensaio consiste em pesar a amostra seca, e depois submetê-la em banho de imersão, podendo ser realizada de duas maneiras: banho em água fria por 24 horas ou banho com água em ebulição por 2 horas. Após o banho retira-se o excesso de umidade com o auxílio de um pano umedecido. Os valores de absorção de água foram obtidos utilizando a Equação 9.

$$AA(\%) = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100 \quad (9)$$

Onde:

AA = absorção de água (%)

m_u = massa úmida (g)

m_s = massa seca (g)

A porosidade aparente dos corpos-de-prova é definida como o percentual volumétrico de porosidade aberta existente na amostra. O cálculo para determinar a porosidade aparente foi realizado com o auxílio da Equação 10.

$$Pa(\%) = \frac{m_u - m_i}{m_u - m_i} \times 100 \quad (10)$$

Onde:

Pa = porosidade aparente (%)

m_u = massa úmida (g)

m_s = massa seca (g)

m_i = massa imersa (g)

O ensaio de compressão diametral também é conhecido como ensaio de resistência à tração indireta¹⁰ e foi utilizado somente na caracterização das amostras para efeito comparativo. O ensaio consiste no carregamento de amostras cilíndricas em uma máquina universal de ensaios modelo DL-20000, marca EMIC, apoiada em duas placas rígidas paralelas entre si, marcando dois pontos extremos. A carga de ruptura acontece de forma contínua e gradativa ao longo do plano vertical diametral até o rompimento do corpo-de-prova, conectando os dois pontos de contato. A obtenção dos valores de resistência à compressão diametral é calculada através da Equação 11.

$$\sigma_T = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times e} \quad (11)$$

Onde:

σ_T = resistência à tração indireta via compressão diametral (MPa)

F = carga de ruptura (N)

D = diâmetro (mm)

e = espessura do corpo de prova (mm)

O ensaio de resistência mecânica à compressão foi realizado com base na NBR 15270-03¹¹:2005. Consiste em proceder a preparação prévia dos corpos-de-prova com capeamento (ato de preparação dos corpos-de-prova cilíndricos de argamassa e/ou concreto de cimento) e ensaiados em máquina universal de ensaios modelo DL-20000, marca EMIC para avaliar a carga de ruptura. A máquina universal de ensaios possui um sistema computacional acoplado ao êmbolo, onde é possível verificar a força submetida no corpo-de-prova até seu rompimento. O software calcula a resistência mecânica através da Equação 12.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (12)$$

Onde:

σ = Resistência mecânica à compressão (MPa)

F = Carga de ruptura

A = Área de contato (mm²)

3. Resultados e Discussões

A Tabela 2 mostra os valores de Fluorescência de Raios X das argilas A e B e do resíduo “chamote”. As três amostras analisadas apresentam sílica (SiO₂) com maior percentual. Posteriormente, verifica-se ocorrência de alumina (Al₂O₃) e a hematita (Fe₂O₃) com percentuais aproximados entre as amostras. Observou-se ainda baixa concentração de óxidos alcalinos (K₂O e Na₂O) e alcalinos terrosos (MgO e CaO). Com relação à perda ao fogo, o baixo percentual encontrado na amostra de chamote em relação às argilas, se justifica em função do processo de queima. De modo geral, constata-se similaridade das três amostras quanto aos resultados das análises químicas, uma vez que o chamote, não deixa de ser argila.

A análise de caracterização e classificação do resíduo foi efetuada segundo a NBR 10004:2004⁵. Primeiramente realizou-se ensaio na massa bruta, para observar a corrosividade e reatividade. Com pH de 5,09 o resíduo é caracterizado como não corrosivo, pois não ultrapassa o limite estabelecido pela referida norma técnica, especificamente na letra “a” do item “4.2.1.2 Corrosividade - que recomenda estar entre 2 a 12,4”. Portanto, o resíduo é classificado como não perigoso neste primeiro ensaio. Posteriormente, no teste de reatividade, apresentou-se valores aceitáveis (<0,1 mg/kg) de ácido sulfídrico (H₂S), não se aproximando do limite liberável por kg de resíduo, que é de 500 mg de H₂S. Óleos e Graxas também estão ausentes no resíduo, o que se enquadra nos limites estabelecidos pela norma técnica. Conclui-se então, que o resíduo ensaiado é caracterizado como não reativo, pois não apresenta em sua constituição ion sulfeto acima do limite estabelecido pela NBR 10004:2004⁵, letra “e” do item “4.2.1.3 Reatividade”. Portanto, o resíduo é classificado como não perigoso neste ensaio. Em um segundo momento foi realizado teste de toxicidade, com ensaios de lixiviação e solubilização, cujos resultados podem ser observados nas Tabelas 3 e 4.

No ensaio de lixiviação (Tabela 3), os parâmetros analisados no extrato obtido segundo a NBR 10005:2004⁶, não apresentaram concentrações acima dos limites máximos permitidos conforme item “4.2.1.4 toxicidade”, letra “a”, “anexo F” da NBR 10004:2004⁵, caracterizando o resíduo como não tóxico, sendo classificado como não perigoso neste ensaio. No ensaio de solubilização (Tabela 4), dos parâmetros analisados no extrato obtido segundo a NBR 10006:2004⁷, apenas o manganês apresentou concentração superior ao padrão para este ensaio, anexo “G” da NBR 10004:2004⁵, caracterizando como não inerte neste ensaio e classificando como resíduo não perigoso, ou seja, **Classe II A - Não Inerte**.

Na Figura 1 é possível observar que a retração linear de secagem diminui conforme há um aumento no percentual do resíduo nas formulações. A retração de secagem é importante para controlar a dimensão final da peça cerâmica. Esse fenômeno ocorre pelo fato do resíduo “chamote” reagir como material inerte, minimizando a redução do tamanho inicial de conformação da peça. A minimização da retração influenciada pelo resíduo incorporado ocorre devido à mínima reação de água entre estes materiais e as partículas de argilominerais. À medida que a água é retirada pela secagem, os percentuais de resíduo praticamente se mantêm em seu tamanho original, mantendo consigo a estrutura da peça, e diminuindo assim, a deformação com a retirada da água.

Tabela 2. Análise química das argilas e do chamote, em %.

Material/Óxidos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	BaO	TiO ₂	*PF
Argila A	70,66	15,60	0,15	3,92	1,24	0,43	<0,05	0,20	<0,05	-	1,02	6,70
Argila B	69,29	18,52	0,08	8,87	2,48	0,67	<0,05	0,09	0,09	-	0,96	5,88
Chamote	72,92	16,82	0,17	5,02	1,58	0,49	<0,05	0,28	0,06	0,17	1,00	1,45

*PF=Perda ao fogo.

Tabela 3. Resultados do ensaio de lixiviação - Inorgânicos.

Parâmetros	Resultados (mg/L)	Limites máximos no lixiviado (MG/L)	L.Q.
Arsênio	0,374	1,0	0,001*
Bário	0,5	70,0	0,1
Cádmio	<0,01	0,5	0,01
Chumbo	<0,05	1,0	0,05
Cromo total	<0,02	5,0	0,02
Fluoreto	<0,1	150,0	0,1
Mercúrio	<0,001	0,1	0,001**
Prata	<0,01	5,0	0,01
Selênio	<0,001	1,0	0,001**

L.Q.: Limites de Quantificação. Os metais foram analisados por Espectrofotometria de Absorção Atômica – Chama: * Forno de Grafite; ** Vapor a Frio.

Tabela 4. Resultados do ensaio de solubilização.

Parâmetros	Resultados (mg/L)	Limites Máximos no Lixiviado (MG/L)	L.Q.
Alumínio	<0,1	0,2	0,1
Arsênio	<0,001	0,01	0,001*
Ferro	0,04	0,3	0,02
Manganês	0,21	0,1	0,01
Sódio	10,17	200,0	0,01
Sulfato (expresso em SO ₄)	58,0	250,0	10,0

L.Q.: Limites de Quantificação. Os metais foram analisados por Espectrofotometria de Absorção Atômica - Chama: * Forno de Grafite.

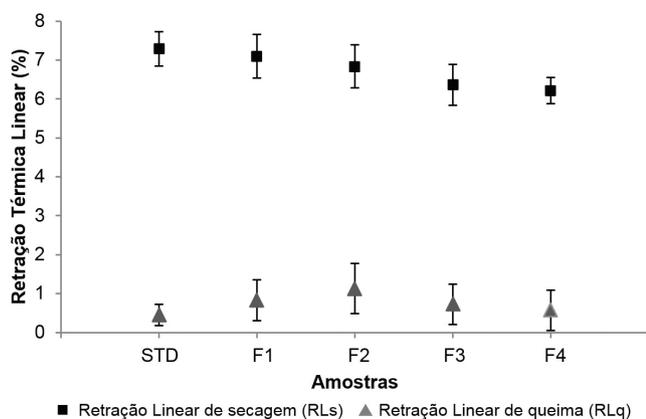


Figura 1. Gráfico com a Retração Térmica Linear de Secagem e de Queima.

A cerâmica vermelha para tijolos e telhas possui um valor de variação “ótima” tanto para retração linear de secagem quanto para queima. No processamento industrial a retração linear de secagem considera-se ótima de 5% a 8%, sendo a situação mais aceitável entre 3 a 10%, para a retração linear de queima, a ótima é menor que 1,5% com a situação aceitável entre 1,5 a 3%¹².

A variação de 1,07% mostra que apesar de baixa, existe uma alteração na retração da peça com a adição do resíduo, essa diferença mostra que quanto maior o percentual de chamote incorporado na massa, menor será a retração, e quanto menor a retração, menor a possibilidade de trincas na peça.

O comportamento dos corpos-de-prova quanto à retração de queima (Figura 1), indicam uma leve variação entre as formulações, apresentando maior retração que a amostra padrão. Todavia, a amostra da formulação (F4) aproximou-se da amostra padrão (STD), e também ficou dentro dos limites citados anteriormente. O motivo dessa pequena variação (0,12%) pode ser explicado pela alteração na temperatura de queima, o que deve ter reagido com as partículas

do resíduo tornando a retração maior. Esse fenômeno acontece uma vez que o aumento de temperatura de queima aumenta a retração linear de queima, ocasionando tendência à diminuição da expansão térmica total¹³. A determinação da variação resulta do chamote usado nos testes ser oriundo de rejeito (quebra de tijolos) de uma queima inferior a 900 °C. A tendência do chamote, por ser material inerte, é não retrair até chegar à temperatura na qual foi obtida. Com relação à variação na queima, se deve ao fato dos fornos utilizados nas cerâmicas da região não possuírem tecnologia para controle de temperatura, podendo acarretar leves mudanças, implicando em alterações nos resultados de qualidade, como porosidade aparente.

O ensaio de perda ao fogo fornece informações relativas à presença de matéria orgânica e substâncias voláteis no material amostrado¹⁴. Os resultados obtidos de perda ao fogo das amostras ensaiadas (argilas, formulação padrão e com incorporação de resíduo) estão apresentados na Tabela 5. Observa-se que o aumento de percentual de resíduo incorporado na massa cerâmica favorece a diminuição de perda de materiais. Esse fato está relacionado ao resíduo já ter liberado matéria orgânica durante o primeiro processo de queima, ou seja, antes de ser moído para ser incorporado à massa cerâmica. Pode-se constatar também que maiores percentuais de resíduo incorporado na massa cerâmica favorecerão menores perdas ao fogo. A massa padrão (STD) se manteve num percentual de 6,38% de perda ao fogo, enquanto a F4 com 5,94%; essa leve mudança é explicada pela variação relacionada às variáveis do processo, tais como perda de água associada a hidróxidos, água de constituição de argilominerais e matéria orgânica eliminada durante o processo de queima; o que comprova que a 900 °C o uso de resíduo (chamote) não acarreta danos ao produto¹⁵. Vale ressaltar, que durante a queima, algumas transformações acontecem na estrutura da argila, o que explica a perda ao fogo. Os argilominerais quando aquecidos até 150 °C, perdem água dos poros e a água adsorvida, e entre 400 °C e 900 °C ocorre a expulsão da água ligada estruturalmente sob forma de grupos OH⁻. O mesmo autor, ainda coloca uma série de mudanças físicas e químicas, que acontecem no decorrer do aumento de temperatura, tais fenômenos podem implicar na perda ao fogo⁸.

Tabela 5. Valores obtidos de Perda ao Fogo da Etapa 1.

Amostras	STD	F1	F2	F3	F4
*P.F. (%)	6,38	6,49	6,18	6,07	5,94
**D.P.	0,342206	1,20104	0,387587	0,387258	0,438703

*P.F. = Perda ao Fogo; **D.P. = Desvio Padrão.

A Figura 2 mostra os valores obtidos para densidade aparente e relativa, onde ambas tiveram uma regularidade em seus resultados, ou seja, a adição de resíduo na massa, não interferiu nessa etapa. Para densidade aparente, tem-se variação de 0,05% entre a amostra padrão (STD) em relação F4. Na densidade relativa, a variação entre STD e F4 se manteve na mesma ordem, próximas de 0,03%; o que comprova que o chamote não alterou de forma significativa a densidade do produto, tornando viável nessa etapa o uso do resíduo. O desvio padrão teve valores inferiores à <0,02 e foram desconsideradas.

A porosidade pode ser observada na Figura 3, seguindo certa similaridade com as características apresentadas no ensaio de absorção de água. No estado seco a porosidade depende somente das frações granulométricas dos componentes e do modo com o qual estão misturados¹⁶. Portanto, melhor compactação e um número reduzido de poros são obtidos através de uma distribuição perfeita de granulometria com grânulos pequenos que preenchem os espaços deixados pelos maiores. Após o processo de queima, a porosidade tende a aumentar devido à eliminação de matéria orgânica e água¹⁷. Existe pequena variação entre a amostra padrão (STD) com as formulações, chegando a menos de 0,2%, o que leva a crer que apesar do rejeito aumentar a porosidade da peça, não sofre uma mudança que venha a ocasionar interferência negativa na absorção de água.

A absorção de água está diretamente associada à quantidade de poros da peça¹⁶. Os valores do ensaio são observados na Figura 3, podendo ser interpretada em relação à porosidade aparente dos corpos-de-prova; ou seja, quanto mais porosa é a peça, maior a absorção de água. Os resultados estão entre o esperado, onde há a elevação de AA, com o aumento de chamote incorporado à STD. Existe uma leve variação entre F2 e F3, mas através dos seus desvios-padrão, constata-se uma normalidade. Uma pequena diferença de 2,18% separa a amostra padrão (STD) da F4, o que não é encarado como exorbitante, e mesmo assim, essa última ainda atende à NBR15270-02:2005¹⁸, ficando com 19,47% de AA. Apesar da norma não ter um regimento específico para esses tipos de corpos-de-prova que foram estudados (corpos-de-prova manuais), eles podem servir de referência para a realização de uma escala industrial.

Analisando os dados obtidos através do ensaio de compressão na máquina universal de ensaios, apontados na Figura 4, pode-se observar instabilidade nas amostras STD, F1 e F4, ficando entre 3,90 e 3,99 (MPa); existe uma leve variação nas amostras F2 e F3, mas através de seus desvios padrão seguem uma normalidade. A variação nas amostras (F1 a F4), pode ser explicada em função de a confecção ter sido realizada de forma manual, e nem sempre há uma padronização na força exercida no momento da produção dos corpos-de-prova, todavia, as 20 amostras analisadas para cada formulação, mostraram uma média, que de certa forma são aceitáveis para o procedimento. Tal variação fica mais evidenciada na formulação (F2).

4. Conclusão

Em âmbito regional, depara-se com o descaso com o meio ambiente, uma vez que o resíduo gerado no processo industrial da cerâmica vermelha é disposto em locais inadequados, o que mostra a importância desse estudo. A utilização do chamote vem contribuir no gerenciamento de resíduos sólidos na cerâmica vermelha, reduzindo

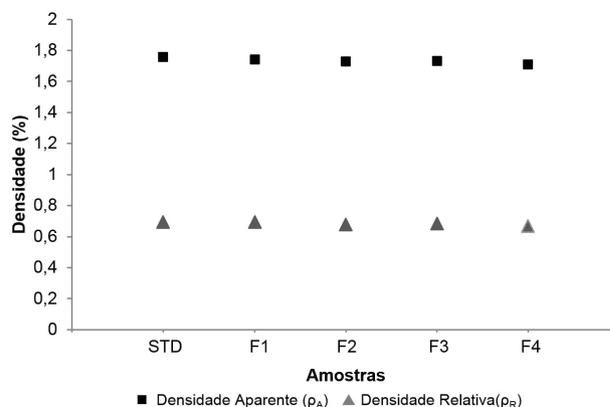


Figura 2. Gráfico com as Densidades Aparente e Relativa.

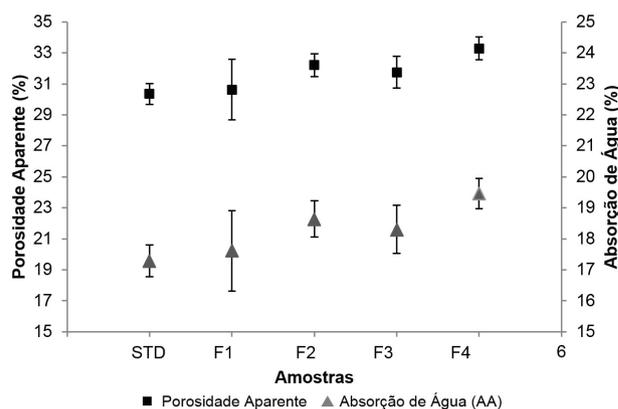


Figura 3. Gráfico da Porosidade Aparente × Absorção de Água.

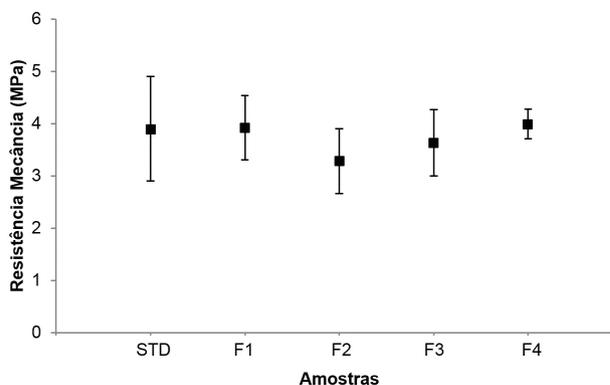


Figura 4. Gráfico da Resistência Mecânica à Compressão Diametral.

custos com extração de matéria-prima, aumentando inclusive a vida útil das jazidas e agregando valor econômico ao resíduo.

Os resultados de Classificação do resíduo segundo a NBR 10004:2004⁵, permitiu identificar a presença de manganês em concentração superior ao padrão estabelecido, classificando o

resíduo como não perigoso - Classe II A - Não Inerte, apontando a obrigatoriedade de uma deposição adequada.

De acordo com os resultados obtidos nos experimentos, verifica-se a viabilidade da utilização do resíduo no processo cerâmico em até 20% de material incorporado à massa cerâmica. Apesar das pequenas variações encontradas diante das diferentes formulações realizadas, todas se comportaram dentro das especificações da norma técnica, o que é de grande importância.

Importante destacar que os resultados obtidos nas diferentes formulações ensaiadas, especialmente de Retração Térmica Linear de Secagem, permitiram a diminuição da retração do produto durante a secagem, o que possibilitou menos perda de peças cerâmicas em relação à dimensão pré-estabelecida pela NBR15270-02:2005¹⁸ especificado no item “4.5.2 Dimensões de Fabricação”, sendo o valor permitido para tolerância especificada no item “5.1 Tolerância Dimensional”, correspondente a ± 3 mm. Considerando uma menor retração da peça crua, possibilita menor chance de trinca no produto final.

No caso da Absorção de água, o desempenho do produto com resíduo acabou sendo inferior a STD (Padrão), devendo ser analisado com atenção, uma vez que a peça cerâmica tem pior desempenho em contato com a água, porém os dados obtidos atendem à norma técnica. Com relação ao ensaio de compressão mecânica, verificou-se que a peça manteve um padrão de qualidade com emprego do chamote, comprovando a viabilidade do estudo em escala laboratorial.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e a CAPES e a todas as empresas que colaboraram direta ou indiretamente para o desenvolvimento deste trabalho.

Referências

1. TELOEKEN, A. C. et al. Utilização de lodo galvânico como matéria-prima em cerâmica vermelha e caracterização dos corpos cerâmicos obtidos quanto a propriedades tecnológicas e a imobilização de metais. *Cerâmica Industrial*, v. 16, n. 2, p. 14-19, 2011.
2. CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CONSTRUÇÃO – CBIC. *Construção civil*: análises e perspectivas. Brasília, 2010.
3. ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE SANTA CATARINA – ALESC. Documentário Contará a História da Cerâmica Vermelha. *Diário Catarinense*, Florianópolis, 18 dez. 2012. p. 42-43.
4. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007/2004. Amostragem de Resíduos Sólidos**: Rio de Janeiro: ABNT, 2004, 21p.
5. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004/2004. Resíduos Sólidos - Classificação**: Rio de Janeiro: ABNT, 2004, 71p.
6. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005/2004. Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**: Rio de Janeiro: ABNT, 2004, 16p.
7. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006/2004. Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**: Rio de Janeiro: ABNT, 2004, 3p.
8. RIELLA, H. G. *Cerâmica: dos minerais à porcelana*. São Paulo: TecArt, 2010. 157 p.
9. RIBEIRO, M. J.; FERREIRA, A. A. L.; LABRINCHA, J. A. Aspectos fundamentais sobre a extrusão de massas de cerâmicas vermelhas. *Cerâmica Industrial*, v. 8, n. 1, p. 37-42, 2003.
10. CARMONA, S. et al. Use of the splitting-tension test to characterize the toughness of fiber-reinforced concrete. *Anales de Mecánica de la Fractura*, v. 12, n. 1, p. 233-238, 2005.
11. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-03/2005. Componentes Cerâmicos Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de ensaio**: Rio de Janeiro: ABNT, 2005, 27p.
12. DONDI, M. Caracterização tecnológica dos materiais argilosos: métodos experimentais e interpretação dos dados. *Cerâmica Industrial*, v. 11, n. 3, p. 36-40, 2006.
13. MARINO, L. F. B.; BOSCHI, A. O. A expansão térmica de materiais cerâmicos. Parte I: introdução, aplicações e composição da massa. *Cerâmica Industrial*, v. 3, n. 1-2, p. 17-21, 1998.
14. DIAS, L. M. et al. Alternativa de destinação final do lodo de estação de tratamento de água: fabricação de blocos cerâmicos. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA, 29., 2004, San Juan. *Anais...* San Juan: AIDIS, 2004. p. 1.
15. FERNANDES, P. et al. O estudo da diminuição da rugosidade da superfície de telhas cerâmicas. *Cerâmica Industrial*, v. 17, n. 5-6, p. 42-46, 2012. <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2014.029>
16. FACINCANI, E. *Tecnologia cerâmica: cerâmica estrutural*. Tradução de Géol Jaime Pedrassani. São Paulo: Faenza Editrice do Brasil, 2002. 276 p.
17. GOUVEIA, F. P.; SPOSTO, R. M. Incorporação de chamote em massa cerâmica para a produção de blocos. Um estudo das propriedades físico-mecânicas. *Cerâmica*, v. 55, n. 336, p. 415-419, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132009000400012>
18. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-02/2005. Componentes cerâmicos Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos**: Rio de Janeiro: ABNT, 2005, 11p.