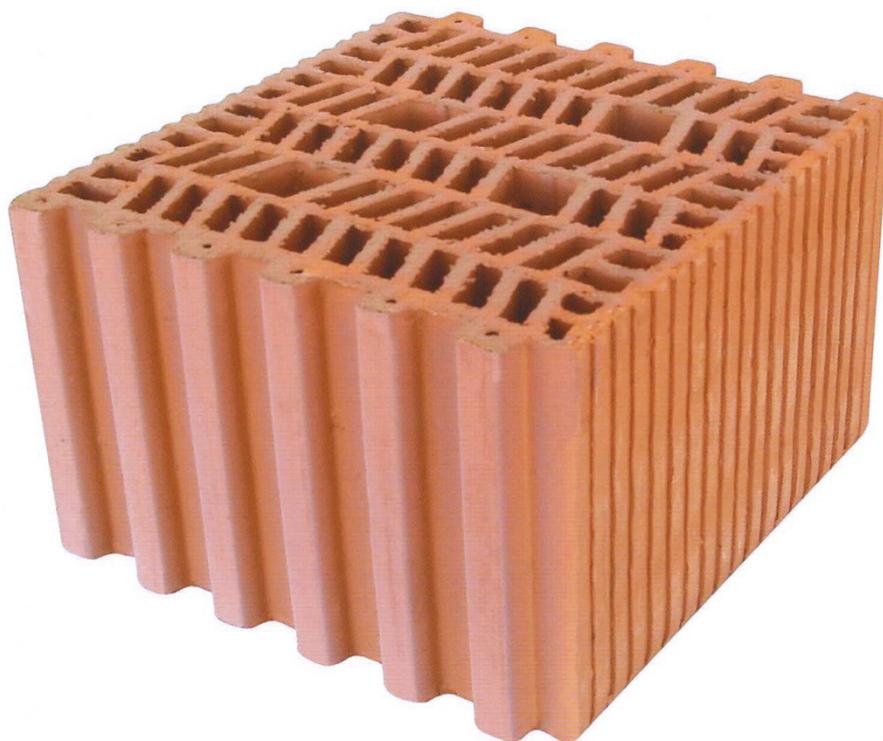


52
cm

CONSTRUÇÃO MAGAZINE

REVISTA TÉCNICO-CIENTÍFICA ENGENHARIA CIVIL

Nº 52 . NOVEMBRO/DEZEMBRO 2012 . 6.50€



DOSSIER
Resíduos e Materiais de Construção

CONVERSAS
Victor Ferreira

FLB



divulgue a sua empresa ao Mundo em Português
em www.construcaomagazine.pt
e na e-Newsletter da Construção Magazine

*41% DOS NOSSOS VISITANTES E LEITORES ESTÃO EM PAÍSES LUSÓFONOS FORA DE PORTUGAL.
[BRASIL, ANGOLA E MOÇAMBIQUE SÃO OS MAIS SIGNIFICATIVOS].

ISSN 1645-1767
9 771645 176009

29_33

RESÍDUOS E MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO RECICLAGEM DE LAMA RESIDUAL DE ANODIZAÇÃO E LACAGEM EM TIJOLO — CASO DE ESTUDO EM INDÚSTRIAS PORTUGUESAS

As lamas de anodização e lacagem são o principal resíduo produzido na indústria de tratamento da superfície do alumínio. Após uma detalhada caracterização, que envolveu a composição química, o tamanho de partícula, a distribuição do tamanho de partícula, o fator de forma e a estrutura e superfície, a lama foi adicionada (5% m/m) à argila convencional utilizada para produzir tijolos na indústria cerâmica Preceram (Pombal).

A fiabilidade do processo de reciclagem foi avaliada sob o ponto de vista tecnológico e ambiental. O *scale up* foi realizado na fábrica de tijolo, após uma simulação do processo em laboratório. As características das cerâmicas avaliadas incidiram sobre o teor de água

total necessário para a extrudir, a retração após secagem e total, a absorção de água, a densidade aparente e real e o desempenho mecânico e térmico. As propriedades do tijolo final foram avaliadas de acordo com as normas técnicas e requisitos de mercado. Após extrusão da mistura argila/lama e cozedura, o novo tijolo apresentava uma melhoria do isolamento térmico de cerca de 30%.

O uso de lama é tecnologicamente fiável, resultando em melhorias no desempenho térmico do tijolo sem afetar significativamente os parâmetros do processo de produção e as restantes propriedades do novo tijolo. Este trabalho tem o objetivo de implementar uma cooperação sustentável entre empresas e

desenvolver um melhor produto a partir de resíduos, conseguindo-se assim atingir soluções ambientalmente corretas. Teve-se uma atenção especial ao impacto ambiental que pudesse ser causado durante a manipulação das lamas e durante a produção do novo tijolo, levando-se para isso a cabo uma avaliação da emissão de SO₂. A quantidade total de lama produzida pode ser inteiramente reciclada como aditivo no tijolo.

Ivânia Marques*, Maria Teresa Vieira
Centro de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra
(CEMUC)
*imarques@ipn.pt

INTRODUÇÃO

A anodização e a lacagem de ligas de alumínio são técnicas geralmente utilizadas para proteger estes materiais metálicos da corrosão e que proporcionam alguns efeitos estéticos. Estes processos consomem grandes quantidades de água, não só em cada banho químico consecutivo, mas também na descontaminação das peças após cada banho. Como consequência direta, uma enorme quantidade de água residual é gerada, que após tratamento adequado, em água limpa, resulta numa enorme quantidade de um resíduo sólido, denominado lama de alumínio [1]. Atualmente, esta lama é classificada como não tóxica e inerte [2], no entanto, a sua elevada produção torna a sua deposição em aterro dispendiosa, especialmente devido ao elevado custo de transporte (40E para deposição e 15E para transporte).

Assim, o setor de tratamentos de superfícies por via eletrolítica é reconhecido como muito poluente [1], onde uma fábrica de média produção gera 1000 ton/ano de lamas, normalmente depositadas em aterro.

Ao longo dos últimos anos, e no âmbito da estratégia europeia para redução da poluição industrial, o conceito de ambiente alterou-se drasticamente passando de custo para oportunidade. Os resíduos são vistos como perda de matérias-primas e, como tal, devem ser recuperados [3,4]. A indústria de tijolo pode constituir uma alternativa interessante aos aterros. De facto, os níveis atuais de produção, que envolvem o consumo de elevadas quantidades de recursos (uma fábrica média produz cerca de 200 ton/dia de tijolo), associado ao carácter heterogéneo das matérias-primas e uso de diferentes formulações asseguram as condições desejadas para uma indústria recetora de

resíduos. As lamas, se analisadas em detalhe, contêm características que podem ir para além de se comportarem no tijolo recetor como mero aditivo e contribuirão também para alterações significativas de comportamento em serviço.

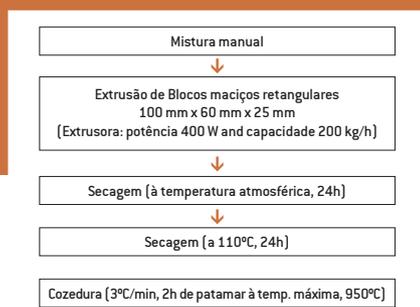
Após análise detalhada das características específicas das lamas, o presente estudo visa clarificar o efeito da adição de lama de alumínio na resistência térmica do tijolo. Para a sua implementação servível a nível industrial, foram utilizados os mesmos parâmetros de produção da fábrica de tijolo e especial atenção foi dada aos custos da reciclagem, particularmente aos relacionados com os pré-tratamentos requeridos e transporte da lama. Assim, foi utilizado o ciclo de produção da empresa de tijolo (Preceram) e a matéria-prima foi resultante da mistura dos constituintes convencionais do tijolo com adição de lamas. Assim, foram produzidas 10 toneladas de tijolo aditivado,



> 1



> 2



> 3



> 4



> 5

testado o seu comportamento térmico e avaliadas as suas propriedades. O transporte das lamas, que poderia representar o principal custo desta reciclagem, não contribui para o aumento de preço do produto, pois é garantido através de linhas transportadoras de tijolo.

MATERIAIS E MÉTODOS

A lama residual proveniente da empresa Laco-viana (Figura 1), de estrutura nanocristalina (<100 nm) e com um teor de água de cerca de 77%, foi adicionada à argila proveniente da linha de produção da empresa Preceram previamente misturada e homogeneizada na fábrica (Figura 2). Estes materiais foram caracterizados recorrendo à sua composição química (FRX), composição mineralógica (DRX), distribuição do tamanho de partículas (DLS) e comportamento térmico (DTA/TG e dilatometria).

Na etapa do estudo em laboratório, a lama foi seca a 110°C, durante 24h, e desaglomerada num almofariz automático (o mais próximo do moinho de galgas utilizado na fábrica). A distribuição do tamanho de partículas está apresentada na Tabela 1. As amostras foram preparadas de acordo com o esquema apresentado na Figura 3, aproximado, o melhor

possível, com o processamento convencional dos tijolos. Os estágios verde, seco e cozido dos tijolos laboratoriais podem ser visualizados na Figura 4. Foram extrudidas amostras de argila simples (AS) e argila com uma adição de 5% de lama (m/m) (A+L).

O teste em escala real consistiu na produção de 10 toneladas de tijolo nas instalações da empresa Preceram (geometria designada por térmica, Figura 5). A lama tal qual (5% (m/m)) foi previamente desaglomerada num agitador, e adicionada 40% (m/m) de água. De seguida, a lama foi acrescentada à argila, misturada e homogeneizada no moinho galgas e a mistura percorreu todas as restantes etapas do ciclo produtivo. Como referido, todos os parâmetros da produção foram mantidos inalterados. Os testes de caracterização do produto foram realizados no tijolo térmico convencional, produzido pela Preceram (Tijolo Real) e ao tijolo com

%<		d ₁₀	d ₅₀	d ₉₀
Argila	μm	2,33	15,56	124,70
Lama	μm	0,93	4,87	25,99

Tabela 1 Distribuição do tamanho de partículas.

incorporação de lama de alumínio (Novo Tijolo). Ao longo da fase em laboratório e do scale up em fábrica, as propriedades tecnológicas, físicas, mecânicas e térmicas foram determinadas de acordo com as normas aplicáveis:

- Retração durante a secagem e durante a cozedura;
- Absorção de água (PT EN 772-7) [5], porosidade aberta e densidade aberta (ASTM C373) [6];
- Porosimetria (Porosimetria de Intrusão de Mercúrio);
- Densidade Real (Picnometria de Hélio);
- Resistência à Compressão (PT EN 772-1) [7];
- Condutividade Térmica, k (Isomet 2104);
- Coeficiente de transmissão térmica, U (ISO 8990) [8].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Propriedades físicas e químicas das matérias-primas (tijolo e lama)

A lama era maioritariamente constituída por compostos de alumínio (sob a forma de hidróxidos e um menor teor em sulfatos) onde é visível a presença de alguns metais alcalinos

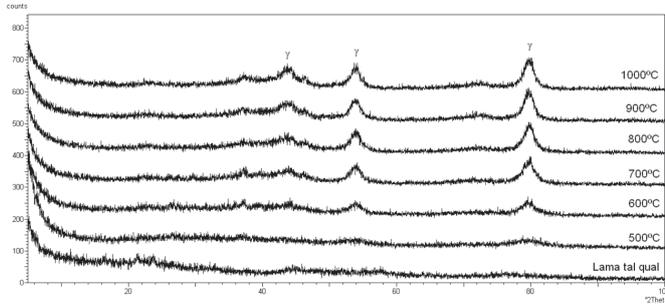
> Figura 1: Lama de alumínio tal qual é produzida.

> Figura 2: Argila misturada e homogeneizada.

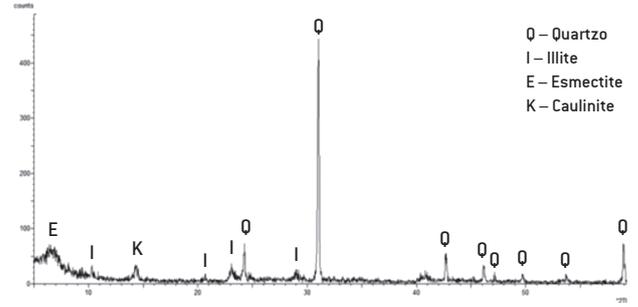
> Figura 3: Etapas do processo produtivo do tijolo.

> Figura 4: Estágios verde, seco e cozido (da esquerda para a direita) das amostras de tijolo laboratoriais.

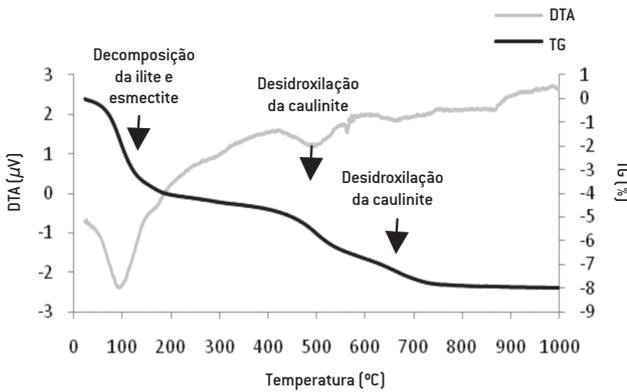
> Figura 5: Geometria do tijolo térmico produzido pela Preceram.



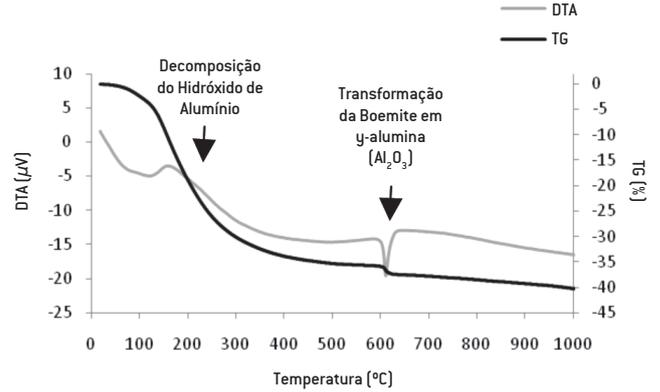
> 6



> 7



> 8



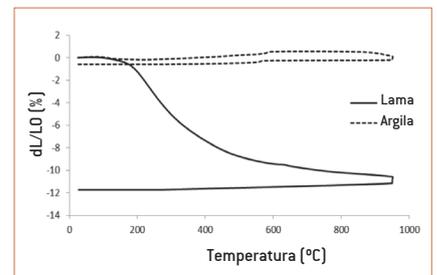
> 9

(sódio, cálcio, magnésio). A sua densidade é de 2,17 g/cm³. No entanto, a lama calcinada (1000°C) tinha uma densidade de 2,80 g/cm³. A presença de sulfatos e de metais alcalinos representam os aspetos sensíveis da incorporação da lama em produtos de base argilosa. Isto quer dizer que a argila selecionada tinha um baixo teor em metais alcalinos para assegurar a inexistência de eflorescências no tijolo depois de cozido e que as emissões de sulfatos durante a cozedura devem ser avaliadas. A análise química (Tabela 2) evidencia que o alumínio é o composto maioritário nas lamas (cerca de 92% se não for considerada a perda ao rubro). De acordo com a análise de difração de Raios X, a lama revela a presença de boemite amorfa. Esta evolui para alumina γ durante o ciclo de cozedura dos tijolos, como se pode observar pelo aumento de intensidade dos picos correspondentes (> 600°C) (Figura 6). Assim, a alumina γ é a principal fase cristalina presente na lama após a cozedura. No caso da argila, os picos identificados no difractograma (Figura 7) indicam que os minerais cristalinos presentes na argila são:

quartzo, illite, esmectite e caulinite. A sua densidade é 2.6 g/cm³ (argila seca). A análise química mostra o baixo teor em metais alcalinos, tal como foi requerido. A análise do comportamento térmico das matérias-primas permitiu identificar e estabelecer as reações que ocorrem durante o ciclo de cozedura do tijolo. As curvas DTA/TG da argila, até 1000°C (Figura 8), mostram uma perda de massa (cerca de 8%) que ocorre principalmente em 3 estágios diferentes, correspondendo a diferentes cinéticas de formação de novas fase. Relativamente à lama (lama seca), observando as curvas DTA/TG (Figura 9), é visível uma elevada perda de massa (cerca de 42%) ao longo de todo o ciclo térmico. A decomposição do hidróxido de alumínio (o principal constituinte da lama), que ocorre no início do ciclo de cozedura, e a transformação da boemite em alumina γ (como foi visto no DRX), que representa o real interesse deste resíduo, são os pontos principais desta análise. A dilatometria da lama e da argila (secas a 110°C, 24h)

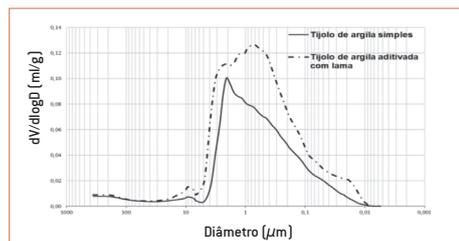
	Argila	Lama
SiO ₂	71,39	0,95
Al ₂ O ₃	12,12	51,88
Fe ₂ O ₃	3,59	0,12
CaO	1,04	0,34
MgO	1,19	0,3
K ₂ O	2,09	<0,03
Na ₂ O	<0,20	0,91
MnO	0,05	—
PR	7,49	45,92
S	—	1,9

Tabela 2 Composição química das matérias-primas (%).



> 10

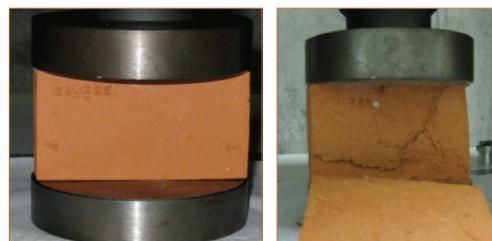
- > Figura 6: Difractograma da lama tal qual e após calcinação.
- > Figura 7: Difractograma da argila.
- > Figura 8: Curvas DTA/TG da argila.
- > Figura 9: Curvas DTA/TG da lama.
- > Figura 10: Curvas dilatómicas da argila e da lama, secas a 110°C, 24h.



> 11



> 12



> 13

versível retração é visível na curva relativa à lama, que ocorre ao longo do ciclo de temperatura e até à temperatura máxima. Em contraste, a argila tem um baixo valor de retração. Este resultado põe em evidência a impossibilidade de adicionar uma elevada quantidade de lama à argila [no presente estudo foi limitada a 5%, depois de um estudo preliminar [12]].

Propriedades físicas e técnicas do material cerâmico

A introdução de lama na argila não induziu efeitos significativos nas propriedades físicas e tecnológicas do material cerâmico “compósito”, durante a simulação do processo de produção do tijolo em laboratório. Uma vez a lama adicionada, o teor de água necessário para extrudir aumentou devido ao aumento da porosidade total (6,4%), essencialmente porosidade aberta (6,2%). A adição de lama

reduz a densidade do compósito cerâmico mas aumenta a sua absorção de água. No entanto, o valor continua de acordo com o máximo permitido para o tijolo [max ± 20 wt.%].

A análise da porosidade (Figura 11) mostra um aumento no volume de poros, quando a lama é adicionada na argila. É de destacar que a presença de lama na matriz de argila promove principalmente a formação de poros submicrométricos, provavelmente devido à natureza nanocristalina das lamas.

+A influência da adição de lama na argila é bem evidenciada pelos valores de condutividade térmica (Tabela 4), que sofrem uma redução de 26% no caso das amostras produzidas em laboratório e de 36% no caso do tijolo produzido em fábrica. De facto, é previsível que o aumento da porosidade submicrométrica influencie o desempenho térmico do compósito cerâmico. Os valores de condutividade térmica do tijolo foram utilizados para a modelação numérica do Coeficiente de Transmissão Térmica do pro-

duto final. Neste caso, os valores encontrados apontam para uma melhoria de 21%.

No que concerne a resistência mecânica, a adição de lama reduz a resistência à compressão do material cerâmico.

Apesar do pior desempenho mecânico, o valor de resistência à compressão continua a ser similar ao registado para para o tijolo convencional [furação horizontal]. As propriedades estruturais do tijolo produzido em fábrica integram um outro trabalho que complementa este [9].

Avaliação da emissão de SO₂

A emissão de SO₂ foi avaliada recorrendo aos registos que a fábrica dispõe. Como se pode observar (Figura 14) não é visível qualquer alteração nos valores da concentração de SO₂, emitidos pela fábrica, no período de cozedura dos tijolos aditivados com lamas (zona demarcada a vermelho).

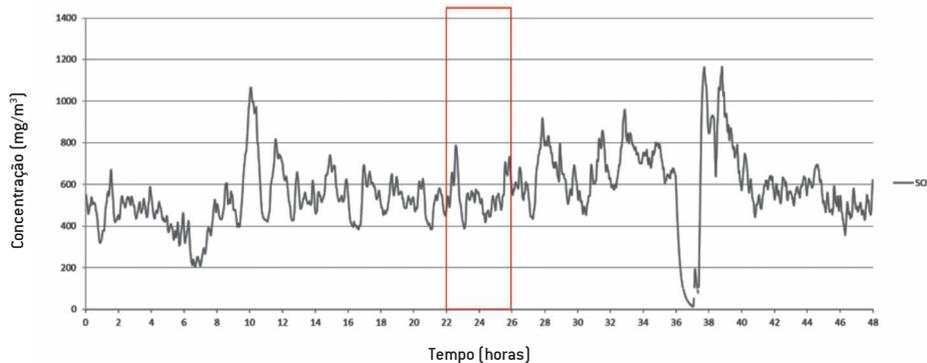
Teor em lama (% m/m)	AS	A+L
	0	5
Teor de água total (%)	18,4	24,8
Retração na secagem (%)	5,2	5,6
Retração total (%)	5,0	5,8
Perda de massa (%)	3,1	5,3
Densidade aparente (g/cm ³)	2,0	1,7
Densidade real (g/cm ³)	2,5	2,6
Porosidade total (%)	28,0	35,9
Porosidade aberta (%)	26,8	33,0
Porosidade Fechada (%)	1,2	3,0
Absorção de água (%)	13,7	18,9

Tabela 3 Propriedades dos materiais.

Teor de lama (m/m.%)	AS	A+L	Tijolo real	Novo tijolo
	0	5		
k (W/m°C)	0,70	0,52	0,53	0,34
U _{numerical method} (W/m ² °C)	—	—	0,82	0,65
Resistência à Compressão (MPa)	22	13	—	—

Tabela 4 Propriedades Térmicas e Mecânicas do tijolo.

- > Figura 11: Distribuição do tamanho de poros.
- > Figura 12: Ensaio de medição da Condutividade Térmica (k)
- > Figura 13: Ensaio de determinação da Resistência à Compressão



> Figura 14: Medição da concentração de SO_2 nas emissões gasosas da fábrica de tijolo

CONCLUSÕES

Alama de alumínio pode ser usada como aditivo para melhorar o isolamento térmico do tijolo, como ficou comprovado pelos testes em escala real. De facto, a adição de lama nanométrica de Al_2O_3 reduz a condutividade térmica do material cerâmico e a transmissão térmica do tijolo (20 a 30%), sem aumentar o custo de produção, levando a uma clara melhoria do conforto térmico dos edifícios. Este é um excelente resultado, principalmente se se tiver em conta que as restantes propriedades físicas e tecnológicas não são significativamente alteradas e se mantêm de acordo com os valores permitidos pelas normas aplicáveis. ■

REFERÊNCIAS

- [1] BREF - Reference Document on Best Available Techniques for the Surface Treatment of Metals and Plastics (2006).
- [2] J. M. MAGALHÃES, J. E. SILVA, F. P. CASTRO, J. A. LABRINCHA, "Physical and chemical characterization of metal finishing industrial wastes", *Journal Environmental Management*, 75, 157-166, (2005).
- [3] Guia Técnico Sectorial. Setor dos Tratamentos de Superfície, Elaborado no Âmbito do Plano Nacional de Prevenção dos Resíduos Industriais (PNAPRI), INETI, Lisboa, Novembro, 2000.
- [4] Toward an Improved Policy on Industrial Emissions, Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, Brussels, 21/12/2007.
- [5] Norma PT EN 772-7. Methods of test for masonry units. Part 7: Determination of water absorption of clay masonry damp proof course units by boiling in water; (2000).
- [6] American society for testing and materials: ASTM C. C373 – 88. Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products (2006);
- [7] Norma PTEN 772-1. Methods of test for masonry units. Part 1: Determination of compressive strength (2002);
- [8] International Organization for Standardization [EN ISO 8990]. Thermal insulation. Determination of steady-state thermal transmission properties. Calibrated and guarded hot box; (1996).
- [9] GRILLO, I., SANTOS, P., GOUVEIA, J., JÚLIO, E., Melhoria do Comportamento Mecânico e Térmico de Tijolos de Alvenaria Cerâmica Aditivada com Resíduos da Indústria do Alumínio, *Construção Magazine* N.º 52, Novembro - Dezembro 2012.